

Modélisation hydrologique du bassin versant de la Vesdre

Convention MODREC-Vesdre

Noémie BONAVENTURE

Aurore DEGRE

Lisa DI MAGGIO

Benjamin GUILLAUME

Emmanuelle LEYH

Adrien MICHEZ

Sara RABOULI

Décembre 2023

Table des matières

1 Introduction	5
2 Modélisation hydrologique à base physique	5
2.1 Sites d'étude	5
2.1.1 Le bassin versant forestier : la Hoëgne.....	6
2.1.2 Le bassin versant tourbeux : la Helle.....	9
2.1.3 Le bassin versant agricole : la Magne.....	12
2.2 Stratégie de construction des modèles.....	15
2.2.1 Topographie	15
2.2.2 Données climatiques.....	16
2.2.3 Végétation.....	17
2.2.4 Rugosité de surface.....	19
2.2.5 Rétention superficielle	19
2.2.6 Propriétés hydrodynamiques des sols.....	20
2.2.7 Propriétés du socle hydrogéologique.....	21
2.2.8 Données limnimétriques.....	21
2.3 Modélisation des scénarios identifiés par le schéma Vesdre	22
2.3.1 Hoëgne.....	23
2.3.2 Helle.....	26
2.3.3 Magne.....	26
2.3.4 Aménagement de keylines en contexte agricole et forestier	28
2.4 Chaîne de traitement des résultats	33
2.4.1 Calibration et validation des modèles	33
2.4.2 Effet des aménagements sur les inondations : débits à l'exutoire	34
2.4.4 Effet des aménagements sur les sècheresses	37
2.5 Résultats de modélisation : bassin versant de la Hoëgne.....	38
2.5.1 Calibration et validation	38
2.5.2 Effet des aménagements sur les inondations : débit à l'exutoire.....	41
2.5.3 Effet des aménagements sur les inondations : fonctionnement hydrologique du bassin versant	45
2.5.4 Effet des aménagements sur les sècheresses	51
2.6 Résultats de modélisation : bassin versant de la Helle.....	55
2.6.1 Calibration et validation	55
2.6.2 Effet sur les inondations : A l'exutoire.....	58

2.6.3	Effet des aménagements sur les inondations : fonctionnement hydrologique du bassin versant	62
2.6.4	Effet des aménagements sur les sécheresses	67
2.7	Résultats de modélisation : bassin versant de la Magne	69
2.7.1	Calibration et validation	69
2.7.2	Effet des aménagements sur les inondations : Débits à l'exutoire	73
2.7.3	Effet des aménagements sur les inondations : fonctionnement hydrologique du bassin versant	75
2.7.4	Effet des aménagements sur les sècheresses	80
2.8	Résultats de modélisation : Keylines sur un bassin versant agricole pilote	84
2.8.1	Effet des keylines sur les inondations : débit à l'exutoire	84
2.8.2	Effet des keylines sur les inondations : fonctionnement hydrologique du bassin versant.....	86
2.8.3	Effet des keylines sur les sècheresses.....	87
2.9	Résultats de modélisation : Keylines en contexte forestier	90
2.9.1	Effet des keylines sur les inondations : débit à l'exutoire	90
2.9.2	Effet des keylines sur les inondations : fonctionnement hydrologique du bassin versant.....	93
2.9.3	Effet sur les sècheresses.....	94
2.10	Synthèse et recommandations	96
2.10.1	Précaution vis à vis de la modélisation physiquement basée	96
2.10.2	Restauration des sols tourbeux et paratourbeux (A1)	97
2.10.3	Diversification des milieux sur sols hydromorphes (A2).....	97
2.10.4	Pratiques limitant la compaction des sols (A5)	98
2.10.5	Redents et bouchage du réseau de drainage forestier (B2 + B3)	98
2.10.6	Pratiques agricoles de conservation des eaux et des sols (A4)	99
2.10.7	Trame bocagère en milieux agricoles et production inter-parcellaire de fourrage (B1 et B4)	100
2.10.8	Keylines (B5)	100
3	Modélisation conceptuelle	102
3.1	Principes de modélisation conceptuelle.....	102
3.1.1	Généralités.....	102
3.1.2	Fonction objectif.....	103
3.1.3	Indicateurs de qualité	103
3.1.4	Algorithme de calibration	104
3.1.5	Type de modélisation	104

3.1.6	Intérêt et limite de la modélisation	104
3.1.7	WOLFHidro.....	104
3.1.8	GR4H.....	106
3.2	Données d'entrée	106
3.2.1	Précipitations.....	106
3.2.2	Traitement de spatialisation	107
3.2.3	Débits.....	107
3.2.4	Occupation du sol.....	108
3.2.5	Topographie.....	108
3.2.6	Evapotranspiration	108
3.3	Description du bassin de la Vesdre.....	110
3.3.1	Particularités du bassin versant.....	110
3.3.2	Bilan des données disponibles	113
3.4	Stratégie de modélisation conceptuelle.....	113
3.4.1	Conceptualisation des barrages	115
3.4.2	Prise en compte du canal de la Vesdre.....	116
3.4.3	Calibration	117
3.4.4	Interactions hydrologie-hydraulique	117
3.4.5	Constitution des séries de débit.....	118
3.4.6	Calibration des sous-bassins.....	125
3.4.7	Validation des calibrations.....	126
3.5	Modélisation du fonctionnement du bassin versant GR4H.....	126
3.5.1	Scénarios courbes enveloppes	126
3.5.2	Calibration sur base des modèles physiquement basés.....	127
3.6	MAR.....	129
3.6.1.	Comparaison IRM-MAR et évolutions selon MAR MIROC6 ssp3-7.0	129
3.6.3.	Simulations MAR	130
3.7	Résultats	131
3.7.1	Paramètres optimaux	131
3.7.2	Evaluation quantitative des calibrations et validations	132
3.7.3	Validation sur base des débits observés amonts.....	133
3.7.4	Validation sur base des simulations	133
3.7.5	Simulations	133

3.7.6	Redistribution des débits.....	138
3.7.7	Calibrations issues de MIKE.....	139
3.7.8.	MAR.....	141
3.7	Conclusion	157
4	Références	158
5	Annexes	159

1 Introduction

À la suite des inondations de juillet 2021, la convention MODREC-Vesdre a été établie entre l'ULiège (HECE et Gembloux Agro-Bio Tech) et le SPW. L'objectif de la convention est de fournir un modèle hydrologique et hydraulique du bassin versant de la Vesdre. Le présent rapport fait l'état des travaux de la modélisation hydrologique. Celle-ci est abordée selon deux axes : une modélisation conceptuelle sur l'ensemble du bassin versant de la Vesdre et une modélisation physiquement basée sur trois sous-bassins types. La modélisation conceptuelle a pour objectif d'alimenter le modèle hydraulique aux points d'entrées du réseau de 1^{ère} catégorie. La modélisation physiquement basée a pour objectif de représenter la réponse hydrologique de trois sous-bassins versants contrastés en matière d'occupation des sols aux scénarios de gestion proposés de la cadre du Schéma Stratégique Vesdre (SSV).

2 Modélisation hydrologique à base physique

2.1 Sites d'étude

Le projet de modélisation hydrologique physiquement basée a été élaboré avec pour objectif une application au sein de trois sous-bassins versants contrastés en matière d'occupation des sols tout en étant représentatifs du bassin versant de la Vesdre : un bassin « forestier », un bassin « tourbeux » et un bassin « agricole ». Afin de limiter les temps de calcul mais également pour garantir une certaine homogénéité en termes d'occupation de sol, la superficie maximale des bassins pilotes a été fixée à 50 km². Les bassins versants ont été sélectionnés et leur choix avalisé par le comité d'accompagnement lors des réunions du 29 juin et 21 décembre 2022 (Figure 1). Cette sélection a été réalisée sur base de croisements de différentes bases de données spatiales relatives au type de sol (CNSW), l'occupation du sol (WALOUS 2018), la topographie (MNT LiDAR 2013-2014), le réseau hydrographique wallon ainsi que le réseau de stations de mesures de débits et de hauteur d'eau du SPW.

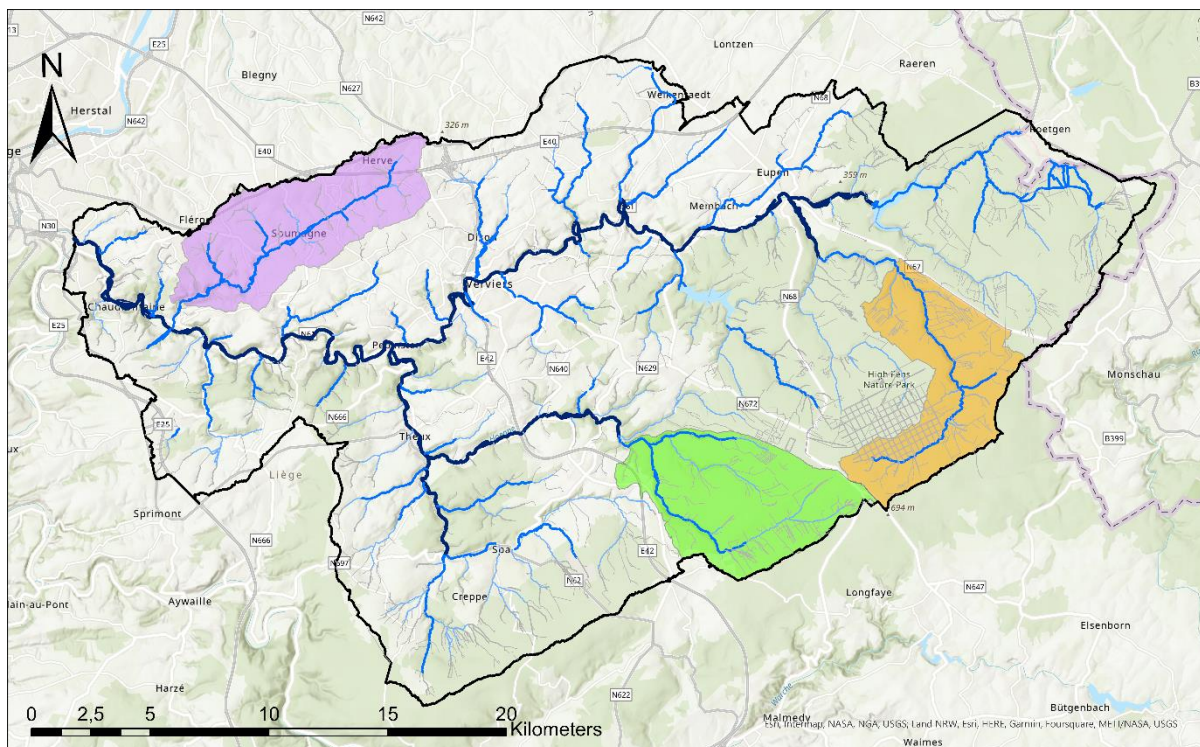


Figure 1 : bassin versant forestier (Hoëgne, en vert), bassin versant agricole (Magne, en violet) et bassin versant tourbeux (la Helle, en orange).

2.1.1 Le bassin versant forestier : la Hoëgne

Le **bassin versant forestier** correspond au bassin versant de la Hoëgne à la confluence avec la Statte et s'étend sur une superficie de 38 km² (Figure 2). Ce sous-bassin est situé dans une zone amont du bassin versant de la Vesdre et n'est impacté par aucun ouvrage anthropique majeur en aval. En aval de l'exutoire du bassin versant forestier (à Polleur) se situe une station limnimétrique du SPW-MI. La zone d'étude a donc été étendue jusqu'à celle-ci afin de pouvoir utiliser cette série de données supplémentaire (Figure 2). Cette extension a pour conséquence d'étendre la superficie du BV étudié à 71 km². Toutefois, la plupart des aménagements proposés par le schéma Vesdre et testés au sein du modèle à base physique sont localisés dans le bassin de la Hoëgne jusqu'à sa confluence avec la Statte. Une forme de « dilution » de l'impact des ouvrages localisé plus en amont est donc probable pour les débits associés à l'exutoire de Polleur.

L'occupation du sol majoritaire dans le bassin versant est forestière (39 % résineuse et de 12 % feuillue). On note également la présence de tourbières en amont du bassin (20%). Quelques prairies sont également localisées en aval.

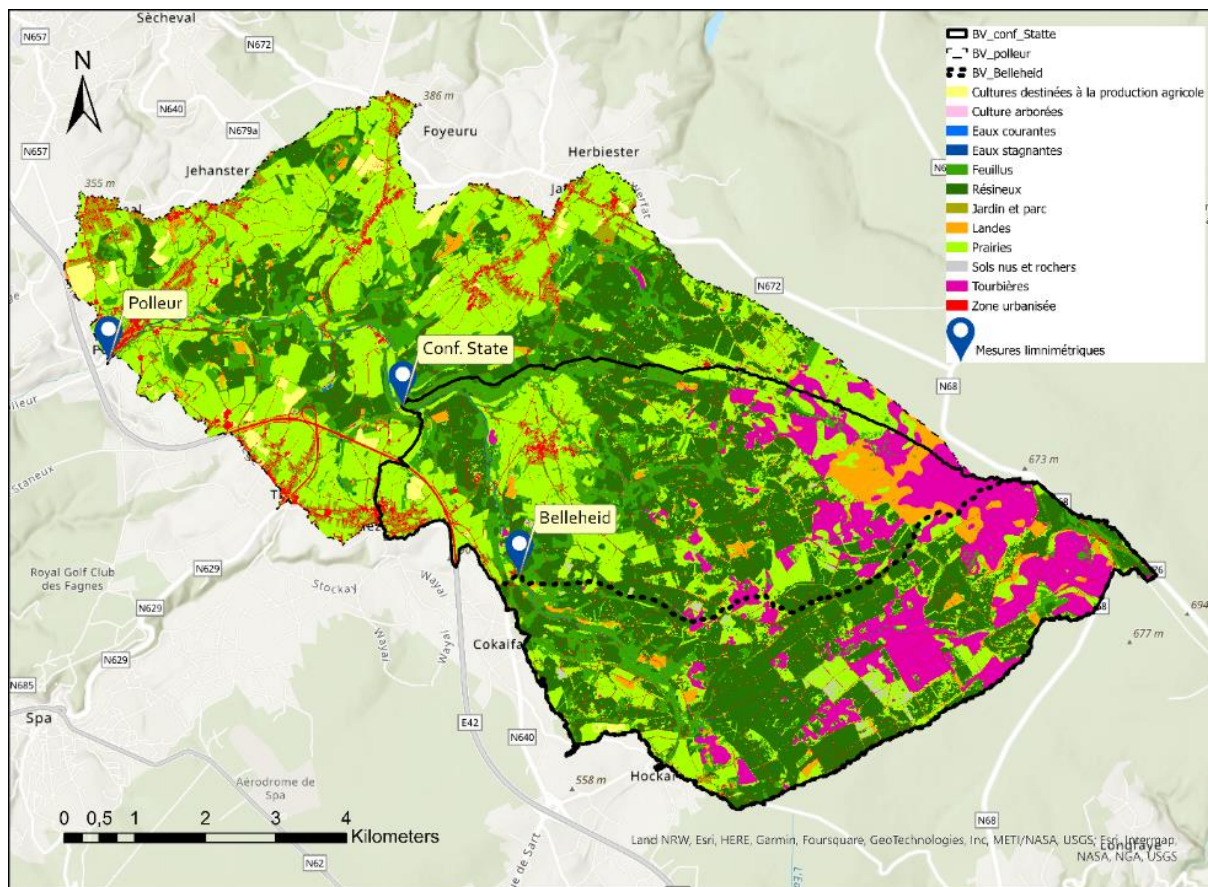


Figure 2 : Occupation du sol du bassin versant forestier et ses exutoires équipés d'un limnimètre

Le bassin versant de la Hoëgne possède un relief contrasté entre l'amont situé sur le Haut plateau des Fagnes, relativement plat, et l'aval connu comme étant la Dépression de la Hoëgne, caractérisée par des vallées profondes et évasées (Figure 3). Ce relief plat, situé sur le Haut plateau des Fagnes, limite le drainage latéral de l'eau des sols, favorisant ainsi l'apparition de tourbières ou de sols hydromorphes (Figure 4). Ces sols sont relativement profonds (de l'ordre du mètre), car de-facto peu érodés. Les fortes pentes situées à l'aval limitent l'infiltration de l'eau dans les sols, produisant ainsi du ruissellement. Les sols sont alors érodés, peu profonds (de l'ordre de quelques dizaines de centimètres) et relativement secs. De plus, le différentiel d'altitude entre l'exutoire à Polleur et l'amont, sur le Haut plateau des Fagnes, est de l'ordre de 400 mètres, entraînant un gradient de pluviométrie et de température entre l'amont et l'aval. Cela contribue à créer un paysage où la moitié amont est relativement humide comparée à la moitié aval, relativement sèche.

Il est important de noter que les sols sont majoritairement composés de limons avec une charge caillouteuse dont le diamètre excède 2 mm, représentant entre 15 et 50 % du volume total du sol. Cette charge caillouteuse, réduit la capacité de rétention en eau des sols limoneux sur l'ensemble du bassin versant. Cette charge caillouteuse provient du socle géologique, principalement schisteux et/ou gréseux.

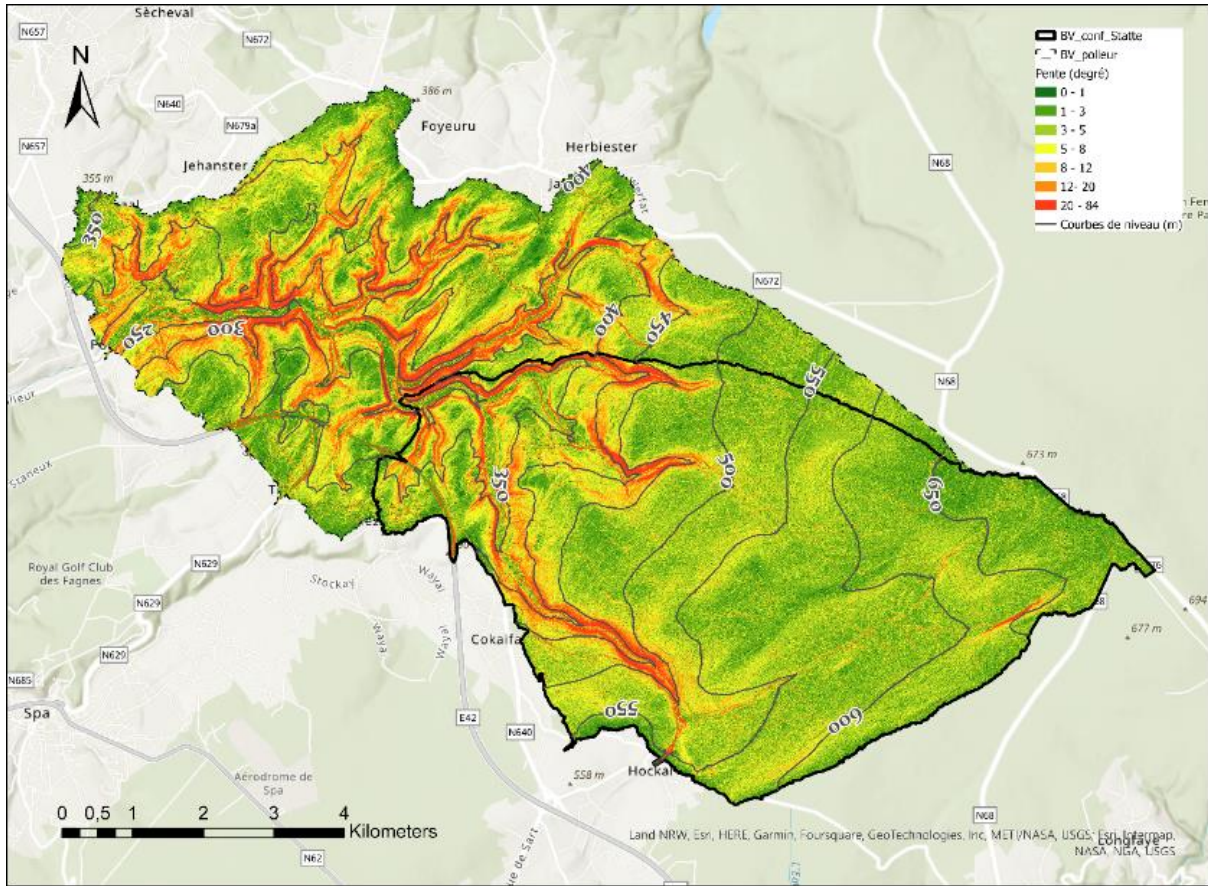


Figure 3 : Pentes du bassin versant forestier.

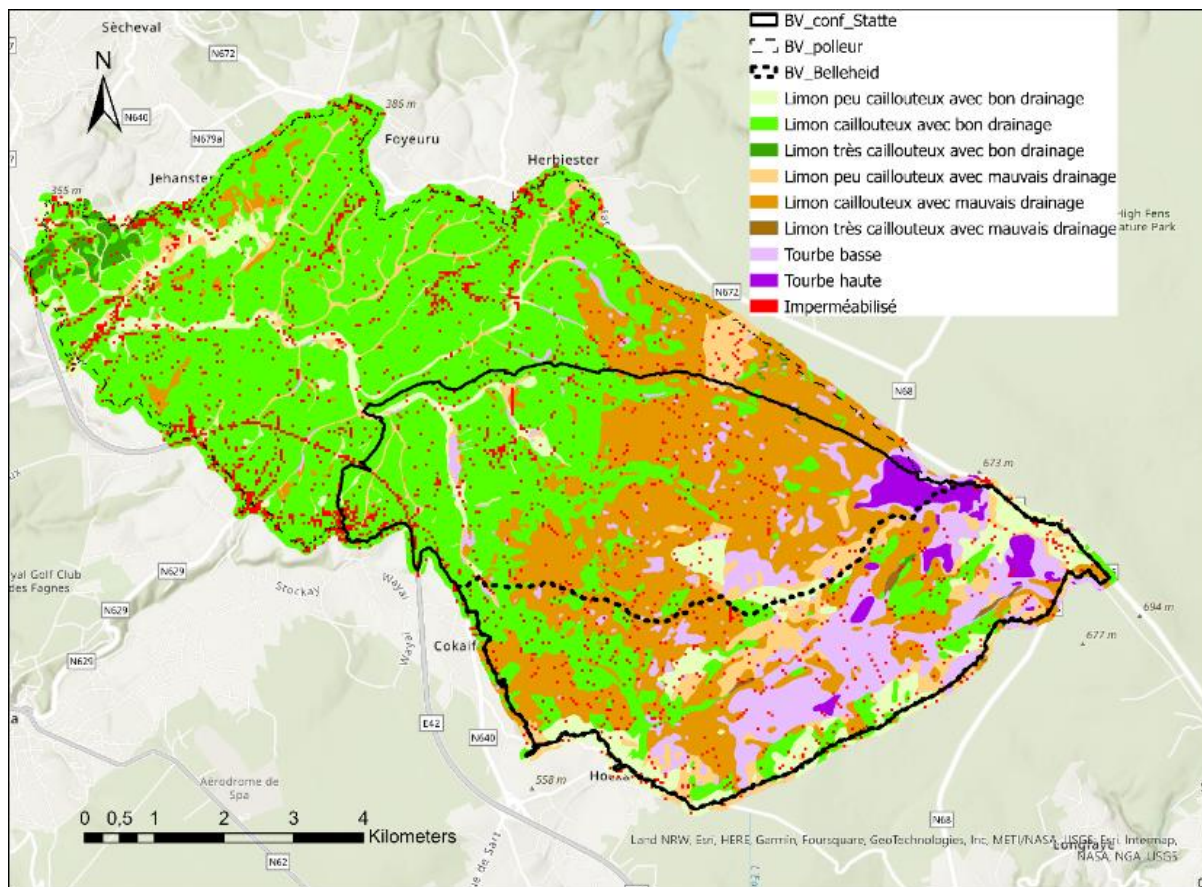


Figure 4 : Sols du bassin versant forestier.

2.1.2 Le bassin versant tourbeux : la Helle

Le **bassin versant tourbeux** correspond au bassin versant de la Helle à l'amont du tunnel d'alimentation du barrage d'Eupen et s'étend sur une superficie de 36 km² (Figure 5). Le débit orienté vers le tunnel ainsi que le débit en aval de ce prélèvement sont suivis grâce à deux limnimètres du SPW-MI (direction des barrages) dont les données ne sont pas publiées sur le portail « Hydrométrie » du SPW. Le débit à l'exutoire du bassin versant peut donc être reconstitué sur base des informations fournies par ces stations de mesure. Ce sous-bassin est situé dans une zone amont du bassin versant de la Vesdre et n'est impacté par aucun ouvrage majeur. Le bassin versant de la Helle se trouve majoritairement sur le Haut plateau des Fagnes, relativement plat. La rivière de la Helle prend sa source sur les dessus de ce même plateau et sillonne ensuite dans une vallée étroite et fortement encaissée.

Les tourbières occupent près de 37% de la superficie du bassin versant de la Helle, avec toutefois une composante forestière importante (28% résineuse, 14% feuillue). Les tourbières sont regroupées à l'amont alors que les forêts se situent plutôt à l'aval du bassin versant. L'urbanisation y est quasi nulle.

Les sols en dehors des tourbières sont limoneux avec une charge caillouteuse (schisto-gréseuse), très souvent relativement importante (15 à 50% du volume total du sol). Ces sols sont relativement peu profonds ; souvent inférieurs au mètre. Les sols situés sur les plateaux autour de la vallée ont majoritairement un mauvais drainage naturel et sont humides. Les sols des versants sont quant à eux plus secs, avec un meilleur drainage naturel.

Au sein du bassin versant de la Helle, un micro-bassin de 14 ha couvrant la tourbière intacte de Cléfaye a été monitoré de 2013 à 2015 (projet « P.L.U.I.E.S »). Les données sont utilisées pour vérifier la modélisation d'un milieu tourbeux.

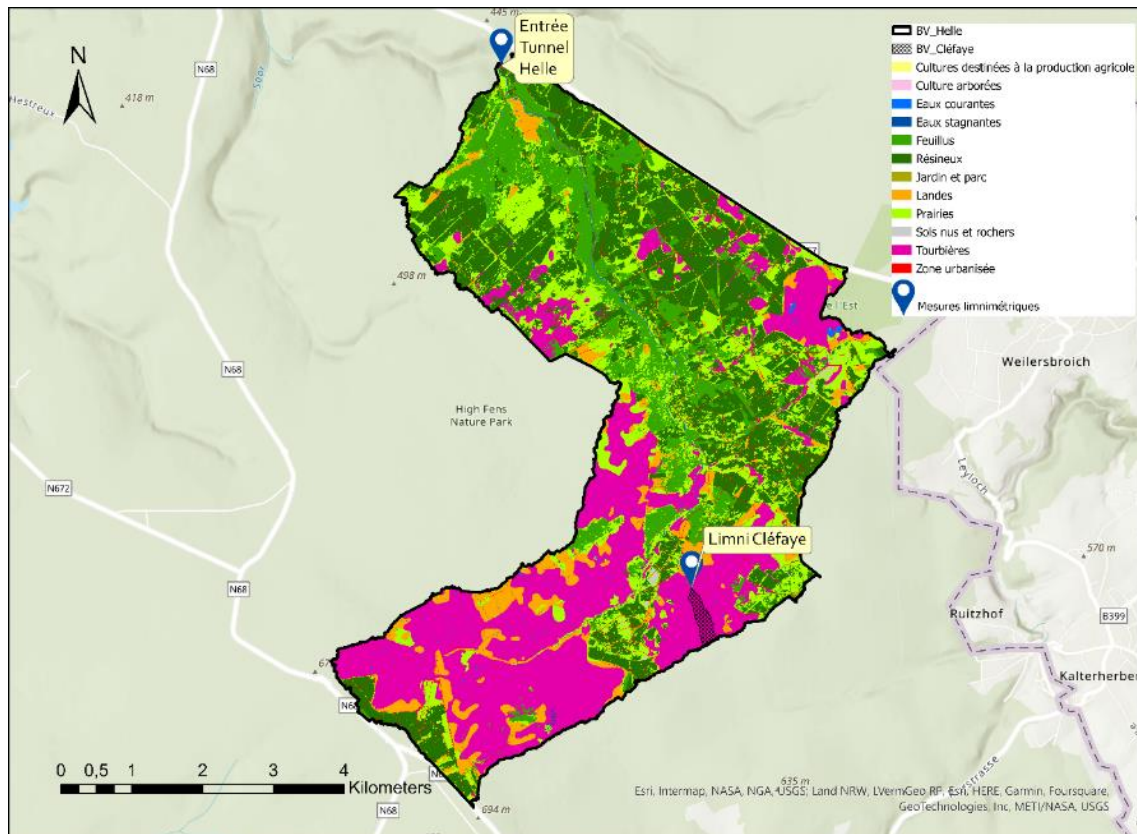


Figure 5 : Occupation du bassin versant tourbeux et ses exutoires équipés d'un limnimètre

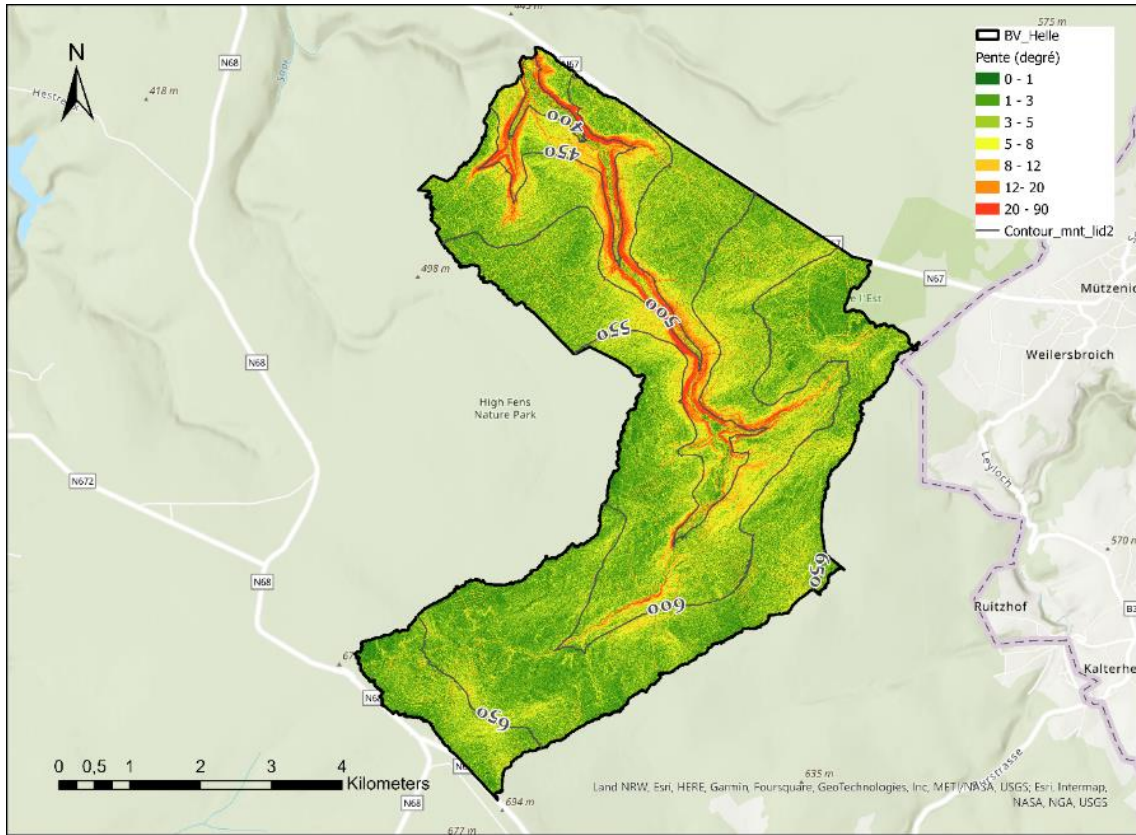


Figure 6 : Pentes du bassin versant tourbeux.

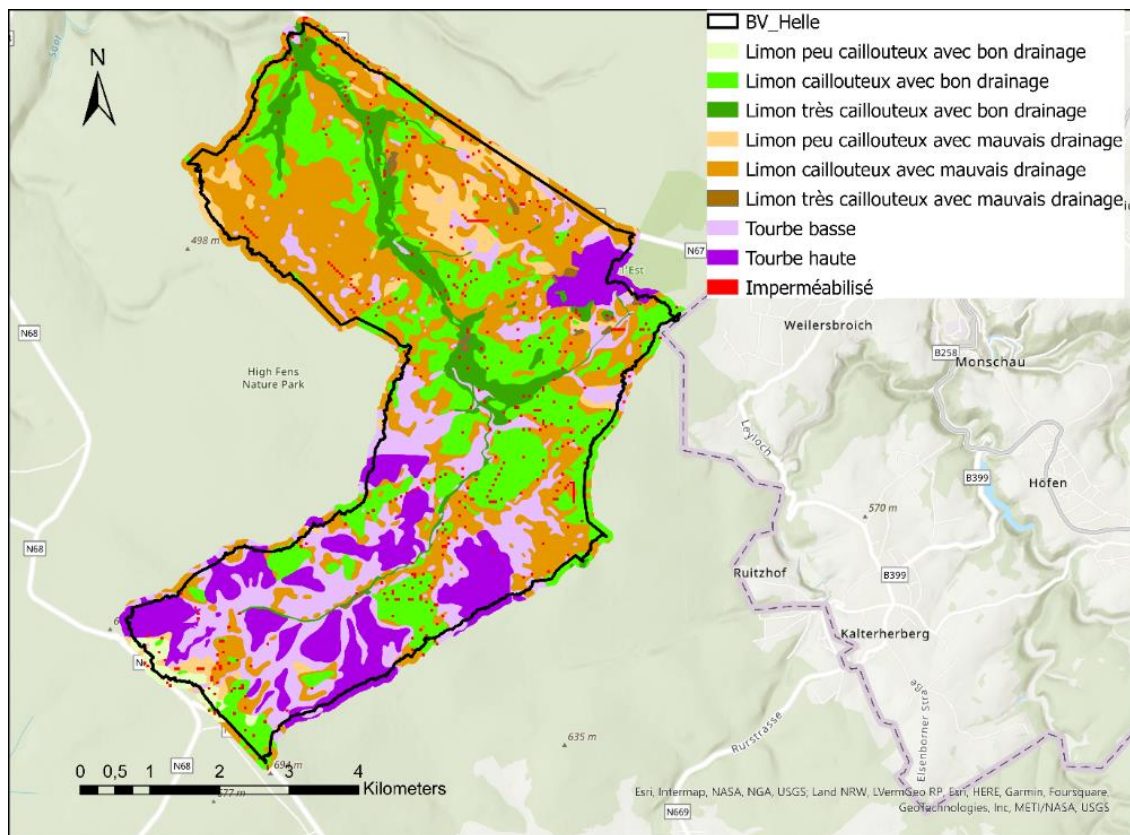


Figure 7: Sols du bassin versant tourbeux.

2.1.3 Le bassin versant agricole : la Magne

Le **bassin versant agricole** est le sous-bassin de la Magne, également appelée « Ruisseaux des fonds de forêts », jusqu'à un exutoire situé au niveau de la station L7600 (Forêt) du SPW-DCENN (Figure 8). La superficie du bassin est de 39,9 km² et est situé au Nord-Ouest du bassin versant de la Vedre.

Le paysage y est fortement vallonné, avec néanmoins quelques plateaux majoritairement situés au nord et en amont du bassin versant. Sur ces plateaux, des infrastructures routières et autoroutières se sont développées, entraînant une vague d'urbanisation entre les années 1960 et 2000 (cf. schéma stratégique Vedre). Cette urbanisation a provoqué une imperméabilisation des sols dont le drainage initial était naturellement bon. Les surfaces considérées comme urbanisées représentent 17 % (6,7 km²) du bassin versant.

Néanmoins, ce bassin versant est composé à 65 % (25,9 km²) de « couvert herbacé toute l'année », assimilé à des prairies productives. Les forêts et les cultures représentent respectivement 14 % (5,5 km²) et 4 % (1,6 km²) du territoire.

La majorité du bassin versant est couverte par des limons d'une épaisseur variable (de 0 à 6 m). On note néanmoins en amont quelques poches d'argiles connues comme étant la « Smectite de Herve ». En comparaison des deux autres bassins versants, les sols y sont majoritairement profonds (> 1,25 m) comprenant une charge caillouteuse moins importante. Les sols caillouteux se limitent aux versants. Le drainage est mauvais dans les fonds de vallées, bon sur les versants et modéré sur les plateaux. On note la présence de formations calcaires très perméables en aval du bassin versant (aval de la carrière du Bay Bonnet) rendant les sols très drainants à ces endroits. Le sous-sol du reste du bassin versant

est principalement composé de formations du Jurassique et du Crétacé. Les premières consistent en des alternances de couches, plus ou moins épaisses, de grès et de schistes. Les secondes sont composées de craies, surmontées de conglomérats de silex. Ces dernières formations sont considérées comme plus perméables que les premières.

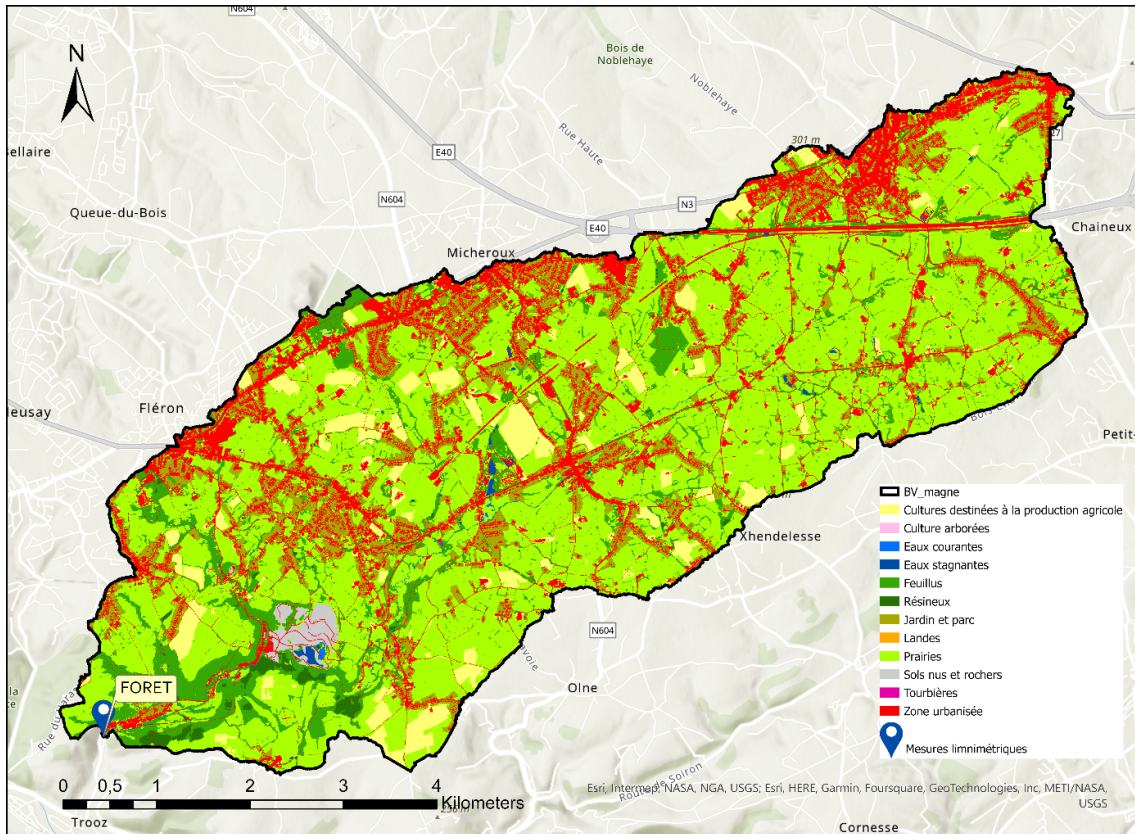


Figure 8 : Occupation du bassin versant agricole et son exutoire équipé d'un limnimètre.

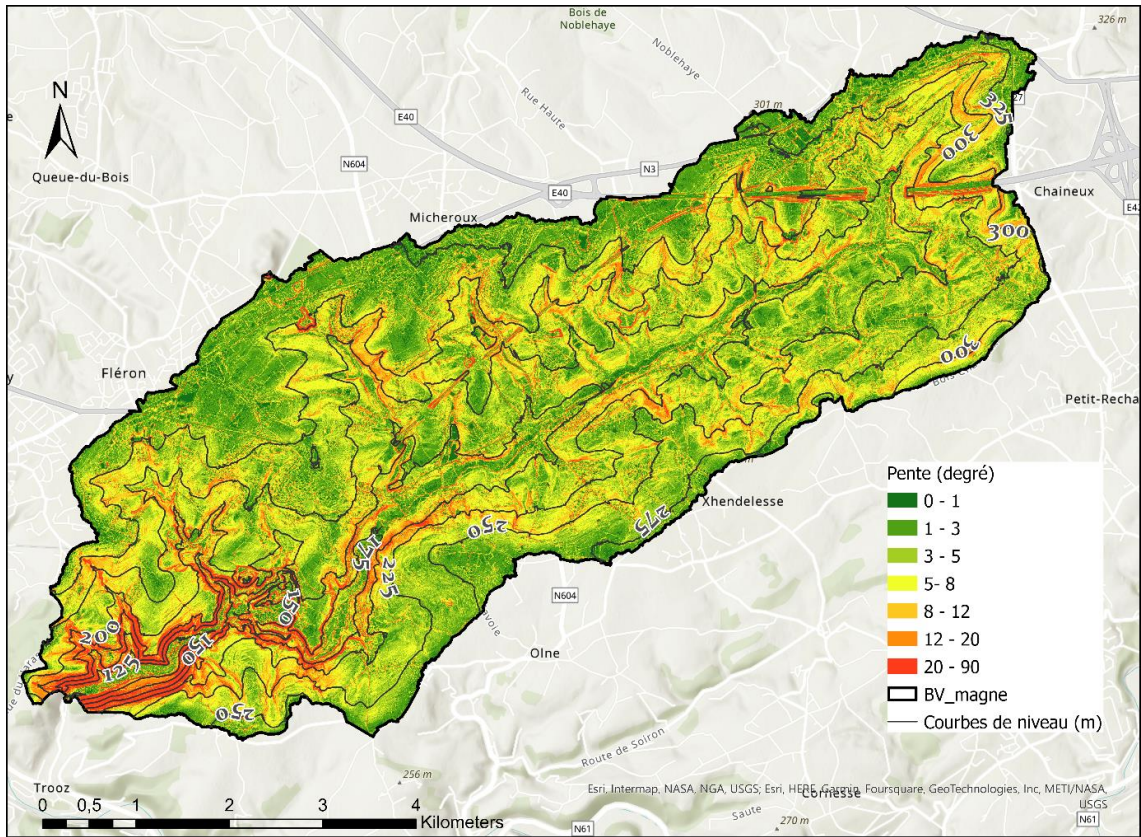


Figure 9 : Pentes du bassin versant agricole.

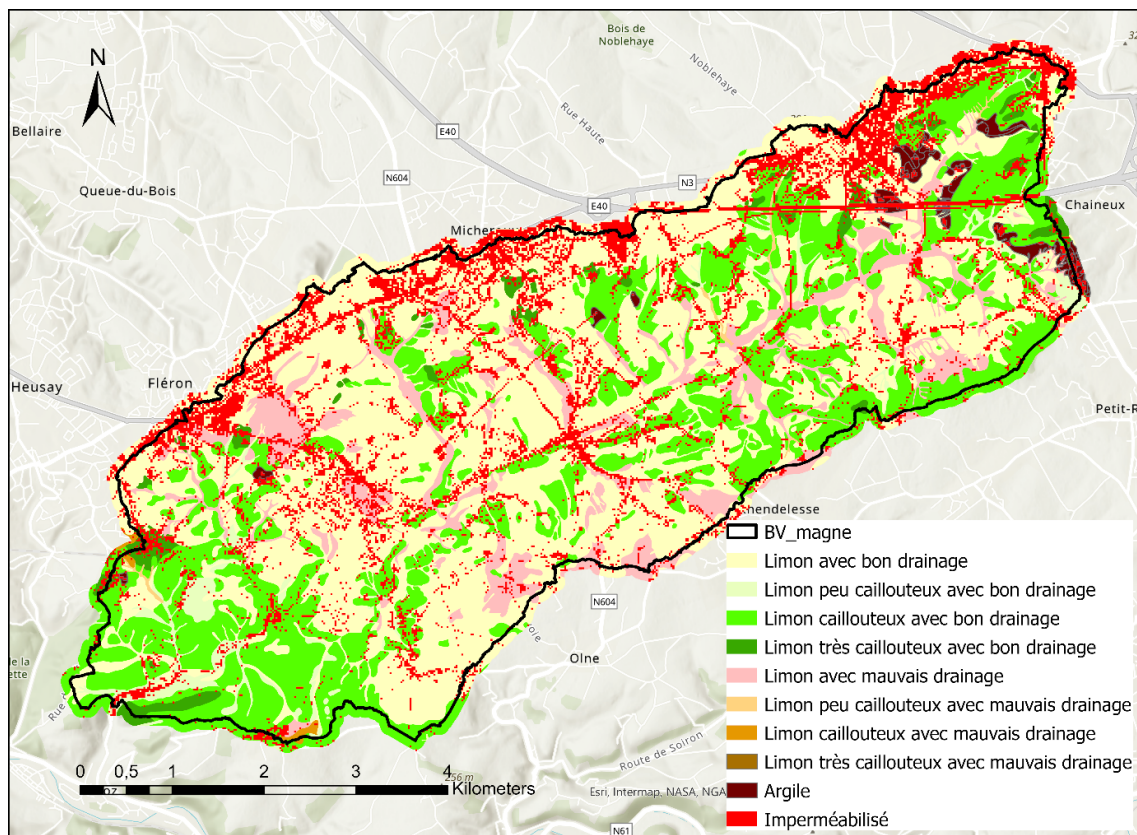


Figure 10 : Sols du bassin versant agricole.

2.2 Stratégie de construction des modèles

Les modélisations des 3 sous-bassins versants sont réalisées selon une stratégie commune, tant pour leur construction que pour leur validation. Dans cette partie, nous aborderons la manière dont sont construites les données d'entrées des modèles.

2.2.1 Topographie

Les données topographiques utilisées dans le cadre de ce projet proviennent de deux sources. La première correspond au Modèle Numérique de Terrain (MNT) hydrologiquement corrigé d'une résolution de 2m (LIDAXES (version 2) – MNT). La seconde donnée est le MNT « LiDAR 2013-2014 » d'une résolution de 1m (« Relief de la Wallonie - Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2013-2014 »). Ces deux données sont combinées pour que les discontinuités dans la donnée LiDAXES associées à des zones d'interception du ruissellement (p. exemple phénomènes kartistques, carrières, ...) soient comblées par les données du MNT « LiDAR 2013-2014 ». Les données topographiques sont rééchantillonnées à la résolution des différents modèles (40m, 20m et 10m) en utilisant une fonction d'agrégation sélectionnant la valeur d'altitude minimale au sein de la fenêtre d'analyse. Cette procédure permet de conserver la correction hydrologique réalisée sur le MNT « LIDAXES » et donc d'obtenir des MNT hydrologiquement corrects aux différentes résolutions analysées. Ces données topographiques servent à la fois à générer les branches représentant le réseau hydrographique modélisé dans le module « MIKE HYDRO » et comme données d'entrées dans MIKE SHE, permettant de représenter les écoulements de surface sur les versants.

2.2.2 Données climatiques

Les données climatiques d'entrée des modèles sont les précipitations au pas de temps horaire et l'évapotranspiration potentielle au pas de temps journalier.

L'évapotranspiration potentielle est directement fournie par l'Institut Royal Météorologique (IRM). Celle-ci est estimée par l'équation de Penman–Monteith appliquée aux données récoltées par leur réseau d'observations (température, humidité, vitesse du vent et radiation), au pas de temps journalier et à une résolution de 5*5 km.

Concernant les précipitations, deux sources de données ont été combinées. La première correspond aux données fournies par l'IRM, au pas de temps journalier et à une résolution de 5*5 km. La seconde correspond aux données provenant d'un réseau de pluviographes du Service Public de Wallonie (SPW) fonctionnant sur base horaire. Ces deux données ont été combinées afin de distribuer au pas de temps horaire l'information pluviométrique journalière de référence fournie par l'IRM. Les données de précipitation s'étendent du 1^{er} janvier 2002 (le démarrage d'acquisition de données de ce type par le SPW de manière contrôlée) au 31 décembre 2021.

Pour chaque maille IRM de 5*5 km, un ou plusieurs pluviographes SPW sont attribués sur base d'une grille de répartition du territoire réalisée à l'aide de polygones de Thiessen générés à partir des coordonnées des pluviographes du SPW. Sur l'ensemble de la période analysée, différentes polygonisations de Thiessen ont été réalisées pour refléter les changements dans le réseau de pluviographes (Figure 11).

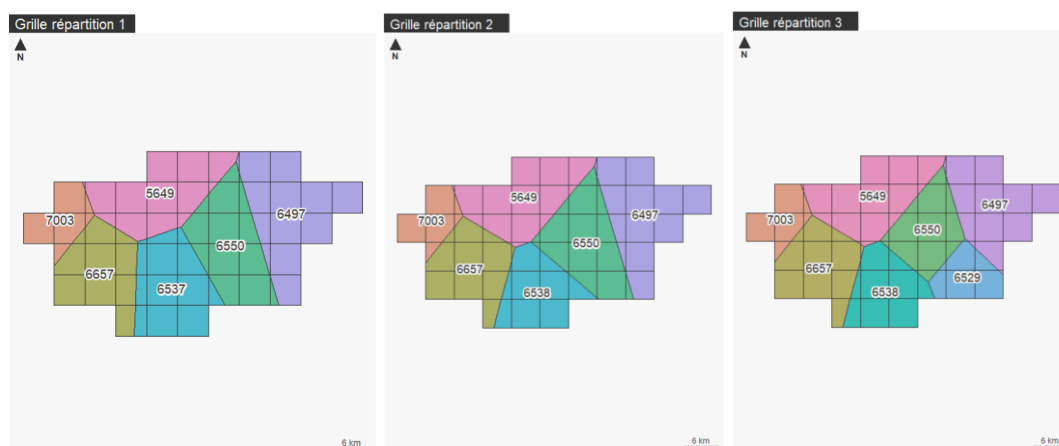


Figure 11 : Polygonisation de Thiessen réalisée pour les périodes 1 (6 pluviographes, 01/01/2002 - 05/10/2016), 2 (7 pluviographes, 05/10/2016 – 21/11/2018) et 3 (7 pluviographes, 21/11/2018 – 31/12/2021).

La formule ci-dessous synthétise le principe de calcul de la précipitation horaire au sein d'une maille i de la grille IRM, sur base d'un pluviographe j du réseau du SPW.

La précipitation à l'heure H ($P_{IRM\ i, d, h}$) est donc la précipitation journalière (jour d) telle que fournie par l'IRM ($P_{IRM\ i, d}$) multipliée par la précipitation observée à l'heure h par le pluviomètre j du SPW (P_{j_h}) divisée par la somme de précipitation journalière observée ce même jour par le pluviographe du SPW. Lorsque la maille est couverte par plusieurs polygones, une pondération par la proportion au sein de la maille IRM considérée est réalisée.

$$P_{IRM\ i, d, h} = \frac{P_{j_h}}{\sum_{h=0}^{h=24} P_{j_h}} * P_{IRM\ i, d}$$

Le cas particulier de précipitations enregistrées uniquement au sein des données IRM a été géré par une répartition de la quantité précipitée de manière homogène sur les 24 heures. Il est important de noter que ce genre de cas de figure n'a eu lieu que pour des événements très peu intenses et ayant peu d'impact sur les modèles hydrologiques pour lesquels ce travail a été réalisé.

2.2.3 Végétation

Les données d'entrées liées à la description de la végétation sont l'indice de surface foliaire (LAI), la profondeur racinaire et le coefficient de culture (Kc). Une stratégie de configuration par unité de végétation a été choisie. Ainsi, l'ensemble des territoires modélisés ont été répartis en 7 classes de végétation (pas de végétation, zone humide, milieu ouvert de production, conifère, feuillu, milieu ouvert de conservation, cultures). A chacune de ces classes est associée une dynamique d'évolution annuelle du LAI, de la profondeur racinaire et du Kc. Il faut noter que la profondeur racinaire ne tient pas compte de la profondeur des sols. Ainsi, il est possible que la profondeur racinaire soit plus importante que la profondeur du sol. Cela est surtout le cas en forêt feuillue et au niveau des bassins de la Hoëgne et la Helle dont certains sols sont peu profonds. La profondeur explorée à la tarière est connue pour être plus faible que la profondeur explorée par les racines, cette limite est considérée acceptable.

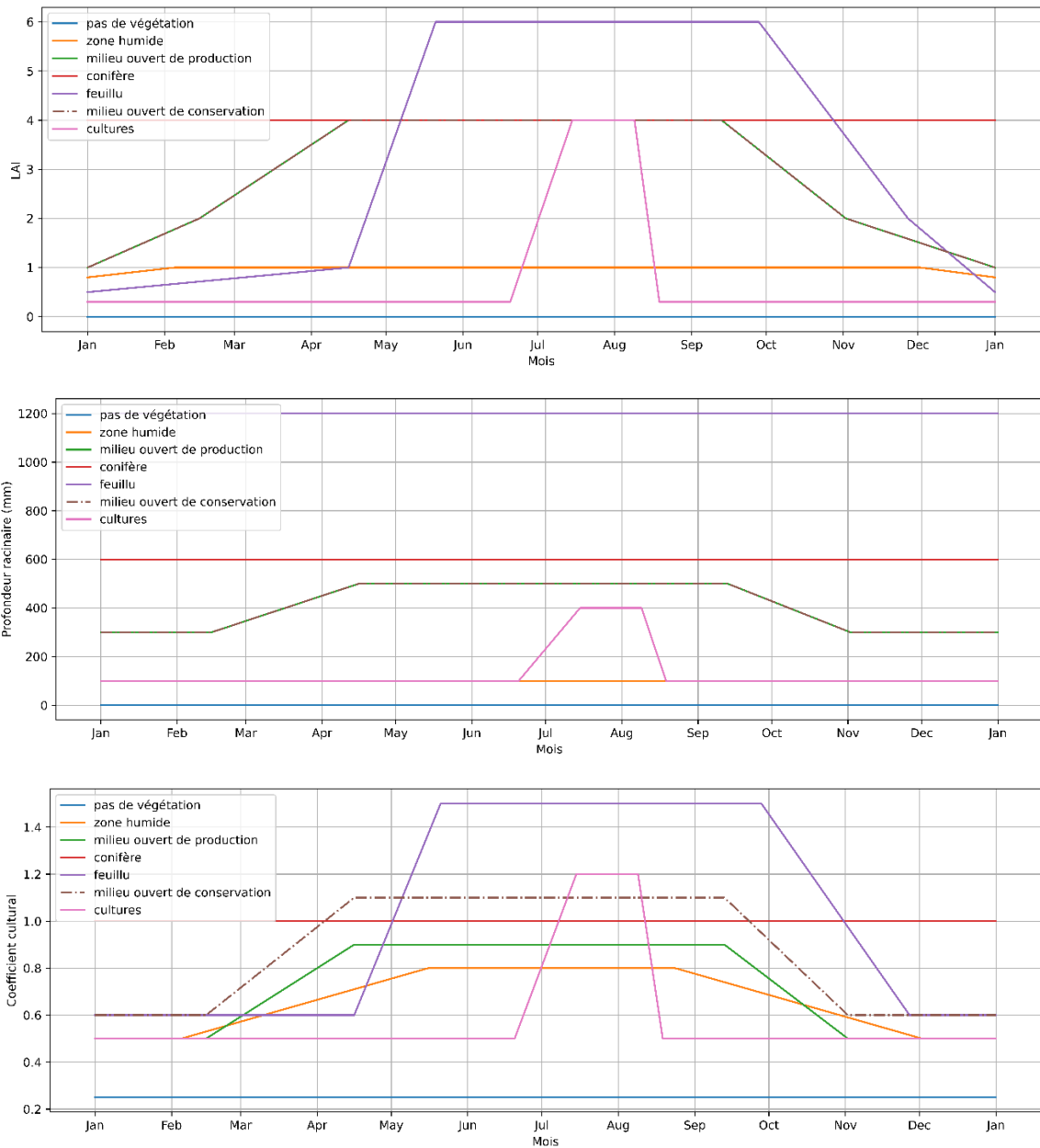


Figure 12 : Représentation de la dynamique temporelle annuelle du LAI, de la profondeur racinaire et du coefficient cultural par classe de végétation.

La cartographie de ces unités est obtenue à partir de regroupements réalisés au sein d'une cartographie d'occupation et d'utilisation des sols (LU/LC). Dans notre cas, c'est la cartographie LU/LC réalisée par l'équipe du Pr. Dufrêne à Gembloux Agro-Bio Tech dans le cadre du projet de cartographie du réseau écologique wallon qui a été utilisée.

Tableau 1 : Typologie du regroupement des classes d'occupation et d'utilisation des sols (Réseau écologique wallon : Niveau 4) en classes de végétations (Classe MODREC).

Classe MODREC	Réseau écologique wallon : Niveau 4
Pas de végétation	Réseau ferroviaire, réseau viaire, construction artificielle hors sol, revêtement artificiel au sol et sol nu
Zone humide	Tourbière, lac, étang, mare, bassin, lande humide, surface de rivière et autre surface en eau non classée
Milieu ouvert de production	Couvert herbacé en rotation dans l'année, couvert herbacé toute l'année, culture fourragère, prairie de fauche, prairie humide, prairie permanente, prairie permanente intensive, verger et fruits à coque et autre couvert herbacé toute l'année
Conifère	Pessière, douglaiaie, pineraie, résineux, résineux < 3m, résineux > 3 m, sapin de Noël et autre peuplement résineux ou essence résineuse inconnue >3m
Feuillu	Feuillus, feuillus < 3 m, feuillus > 3 m, boulaie, chênaie, hêtraie, mélèzière, peupleraie, autre peuplement feuillu ou essence feuillue inconnue >3m
Milieu ouvert de conservation	Lande sèche et pelouse sèche
Cultures	Maïs, céréale et assimilée, culture sarclée (betterave, chicorée, pomme de terre, légume), oléagineux et autre culture ou autre usage agricole

2.2.4 Rugosité de surface

A chacune des classes d'occupation et d'utilisation des sols (Tableau 1 : Réseau écologique wallon : Niveau 4) est associée une rugosité de surface (Manning M) extraite de la littérature. La cartographie des classes d'occupation du sol utilisée est également celle réalisée par l'équipe du Pr. Dufrêne à Gembloux Agro-Bio Tech dans le cadre du projet de cartographie du réseau écologique wallon. Cette valeur n'évolue pas avec le temps.

La rugosité du réseau hydrographique modélisé dans le module « MIKE HYDRO » est constante pour un même sous-bassin versant et est adaptée par une approche « essai erreur », tout en restant dans une gamme de valeur raisonnable.

2.2.5 Rétention superficielle

La rétention superficielle est un paramètre représentant le stockage de l'eau de surface au niveau des dépressions à l'intérieur d'une maille du modèle. Ce paramètre est fixé à 4 mm sur l'ensemble des trois sous-bassins. Une accumulation d'eau en surface inférieure à cette valeur ne génère pas de ruissellement. Ce paramètre est utile pour représenter l'effet d'aménagements visant à stocker l'eau dans la rugosité de surface (ex : rouleau antiérosif en maïs).

2.2.6 Propriétés hydrodynamiques des sols

L'équation de Richards est utilisée pour décrire les flux verticaux d'eau dans la zone non saturée. Pour résoudre cette équation, les propriétés de rétention en eau et de conductivité hydraulique de la zone non saturée doivent être décrites en tous points. Ces propriétés sont représentées par des courbes de rétention et de conductivité hydraulique décrites par des fonctions mathématiques continues. Les fonctions de Van Genuchten et de Mualem sont les plus couramment utilisées et ont été sélectionnées.

Afin de pouvoir établir ces deux courbes en tous points de la zone non saturée, des zones homogènes de sols ont été définies sur base de la Carte Numérique des Sols de Wallonie (« Carte Numérique des Sols de Wallonie »). Ces unités homogènes de sols ont été définies en fonction de la classe texturale (Argile, Limon, Limono-sableux, Tourbe dégradée, Tourbière haute, zones imperméables). Pour les Limons, une distinction a été réalisée sur base de la charge caillouteuse (limon non caillouteux, limon peu caillouteux, limon caillouteux et limon très caillouteux) et de la classe de drainage naturel (sans engorgement d'eau, avec engorgement d'eau). La description des sols tient également compte de leur profondeur, décrite par Xavier Legrain (source interne). Ainsi, les sols sont répartis selon 4 classes de profondeur (≥ 20 , ≥ 30 , ≥ 60 ou ≥ 200 cm).

Les sols argileux, limoneux et limono-sableux sont décrits verticalement par un horizon de « surface » allant de 0 à 40 cm de profondeur suivi d'un horizon « sous-sol » allant de 40 à 200 cm. Pour les tourbes dégradées et les tourbières hautes, l'acrotème représente la couche supérieure formée de la végétation vivante et de sphagnes mortes. Celui-ci a une épaisseur de 20 cm pour les tourbes dégradées et de 40 cm pour les tourbières hautes. Le catotème, représente la strate inférieure. Celui-ci a une épaisseur de 60 cm pour les tourbes dégradées et 160 cm pour les tourbières hautes. Une couche imperméable riche en argile de 60 cm d'épaisseur est également définie sous le catotème. Les sols sont tronqués par le bas à la profondeur correspondante (≥ 20 , ≥ 30 , ≥ 60 ou ≥ 200 cm).

Pour les unités homogènes de sols argileux, limoneux et limono-sableux, des pourcentages moyens en argile, limon et sables ont été calculés sur base de la carte reprenant les « Textures et fractions granulométriques de référence des sols de Wallonie » sur le bassin versant de la Vesdre et disponible sur le géoportail wallon. Ces moyennes ont été utilisées en tant que variables d'entrées dans des fonctions de pédotransfert calibrées à l'échelle européenne par Szabó et al. (2021) afin de déterminer les paramètres des fonctions de Van Genuchten (courbe de rétention) et de Mualem (courbe de conductivité), pour chacune de ces unités homogènes de sols. Concernant les sols limoneux, le paramètre de teneur en eau à la saturation, θ_{sat} , a été ajusté en fonction de la proportion de volume occupé par la charge caillouteuse, déduite de l'information de « charge en éléments grossiers » de la carte numérique des sols de Wallonie (Tableau 2).

Tableau 2 : Proportion de volume occupé par la charge caillouteuse en fonction du type de sol et de la profondeur.

CHARGE	PEU CAILLOUTEUX	CAILLOUTEUX	TRÈS CAILLOUTEUX
SURFACE	0.05	0.25	0.5
SOUS-SOL	0.15	0.35	0.7

Concernant les tourbes dégradées et les tourbières hautes, des fonctions de Van Genuchten ont été ajustées à des mesures réalisées sur les tourbes du bassin versant de Deux-Séries et de Cléfaye, respectivement. Ces mesures ont été réalisées au sein de la période 2012-2014 dans le cadre du projet « Recherche d'intérêt général portant sur la mise en place d'un système d'évaluation des mesures de

restauration hydrique dans les tourbières hautes de haute Ardenne et de leurs impacts sur la prévention des inondations (plan P.L.U.I.E.S.) ».

2.2.7 Propriétés du socle hydrogéologique

Sous cette couche de sol d'épaisseur variable est ensuite décrit le socle hydrogéologique. Des données cartographiques du socle rocheux ont été établies lors du projet de cartographie hydro-géologique de Wallonie (épaisseur et conductivité K_{sat} verticale) dans le cadre du développement du modèle EPICgrid (GxABT-SPW). Cette donnée possède une résolution de 5*5km. Cette information a été utilisée comme valeur initiale pour la description du socle hydrogéologique des modèles. Elle a été localement adaptée par une approche « essai erreur » pour une meilleure représentation du fonctionnement hydrodynamique des sols dans les zones étudiées. Ainsi, pour un même type de sous-sol, la conductivité hydraulique horizontale est fixée à 10x la conductivité hydraulique verticale. Il est à noter qu'une même couche géologique subit toujours les mêmes ajustements dans les trois sous-bassins versants.

2.2.8 Données limnimétriques

Hoëgne

La mise en place par le SPW DCENN, en été 2022, d'une station limnimétrique à l'exutoire du bassin versant de la Hoëgne, en aval de la confluence avec la Statte, permettrait à terme de fournir des données de validation (Figure 2). Néanmoins, à ce stade, ces données n'ont pas encore été utilisés dans le cadre de cette modélisation car les données météorologiques fournies par L'IRM s'arrêtent le 31 décembre 2021.

En revanche, deux stations limnimétriques supplémentaires sont prises en compte pour la validation du modèle de la Hoëgne. La première est située en amont de ce sous bassin, à Belleheid (BV de 19.6 km²). Elle est en service depuis juin 1993 et est gérée par le SPW-MI. Le maximum jaugé est de 11.76 m³/s (le 20-02-1999). Une seconde station limnimétrique du SPW-MI en service depuis mars 2004 est également disponible en aval du bassin versant (à Polleur). Le maximum jaugé est de 12.75 m³/s (le 30-01-2021). La zone d'étude a donc été étendue jusqu'à celle-ci afin de pouvoir utiliser cette série de données supplémentaire (Figure 2). Cette extension a pour conséquence d'étendre la superficie du BV étudié à 71 km².

Helle

Dans le cadre de la modélisation de la Helle, l'exutoire a été placé juste en amont du tunnel de dérivation des eaux de la Helle vers le barrage d'Eupen. L'exutoire du bassin versant n'est pas équipé d'une station limnimétrique mais une chronique de débit a tout de même pu être reconstituée en sommant les débits mesurés par une station située sur la Helle juste en aval de la dérivation (débit restitué à la rivière) et ceux mesurés par une seconde station située à la sortie du tunnel d'une longueur approximative de 1 km. Cette procédure repose sur l'hypothèse d'un temps de parcours du tunnel et de perte en eau lors de la traversée du tunnel tous deux considérés négligeables. Cette série de mesures s'étend de janvier 1993 à juin 2022. Le maximum jaugé est de 2.19 m³/s à la sortie du tunnel et de 1.54 m³/s (réalisé le 14/11/2017) pour la station située sur la Helle juste en aval de la dérivation.

Par ailleurs, une station limnimétrique mise en place à l'exutoire du bassin versant de Cléfaye a été en service de 2013 à 2015, dans le cadre du projet « P.L.U.I.E.S ». Ce bassin versant de Cléfaye a une

superficie de 14 ha et est entièrement tourbeux (tourbe haute intacte) (Figure 5). Le maximum jaugé de cette station est de 0.019 m³/s.

Magne

Une station (L7600) de mesure de hauteurs d'eau et de débits est située au niveau de la localité de Fond de Forêt. L'exutoire de la zone d'étude est fixé au niveau de cette station. Celle-ci est en place depuis mai 2011 et fournit des mesures de hauteurs d'eau et de débit depuis cette date. Le maximum jaugé de cette station est de 4.94 m³/s.

2.3 Modélisation des scénarios identifiés par le schéma Vesdre

Les modèles tels qu'ils ont été construits permettent de tester l'impact des scénarios d'aménagements en éditant les paramètres qui sont modifiés par les aménagement proposés par le schéma stratégique Vesdre (SSV). En modélisant les mêmes périodes avec un climat restant inchangé, on peut donc comparer les sorties du modèle pour une configuration d'un bassin versant original (VO) à celle dite "aménagée" (POST) dans le but d'évaluer les impacts des interventions.

Les propositions faites dans le cadre du SSV reposent sur un réseau d'éléments d'atténuation du ruissellement (« Runoff Attenuation Feature » ou RAF en anglais) qui : i) s'insère dans le paysage ; ii) respecte la continuité du réseau hydrologique existant (par exemple, il n'est pas proposé de réservoir inactif écologiquement, ou de barrage stoppant net les écoulements) ; et iii) favorise le développement des écosystèmes par la mise en place d'alternance de régimes d'écoulement variés.

Les propositions du SSV distinguent trois niveaux d'action :

- Niveau A : actions sur les versants, sur l'utilisation et la couverture du sol ;
- Niveau B : actions sur les linéaires directeurs avant d'atteindre le réseau hydrographique naturel (aire drainée < 2 km²), il s'agit des chemins, haies, talus, ravines qui structurent les premiers axes de ruissellement sur le territoire ;
- Niveau C : actions sur le réseau hydrographique.

Ces trois échelles d'interventions sont la cible d'actions dont les objectifs peuvent être regroupés en trois catégories, selon leurs impacts plus ou moins directs sur la régulation hydrologique :

- Catégorie I : les actions ont pour objectif premier la restauration écologique du milieu, qui en contrepartie augmente les services régulateurs fournis par la nature ;
- Catégorie II : les actions cherchent à minimiser ou tirer profit des constructions anthropiques déjà mises en place sur le territoire pour réguler le cycle hydrologique ;
- Catégorie III : les actions visent directement la régulation de la réponse hydrologique du bassin versant tout en étant peu intrusives vis-à-vis de l'utilisation du territoire actuel et de son bon état écologique.

Le Tableau 3 reprend une synthèse des actions proposées par le SSV ainsi qu'une distinction des actions qui ont pu être testées. Les actions reprises en noir au sein du Tableau 3 n'ont pu être testées au sein de l'interface de modélisation soit car elles relevaient plutôt d'une modélisation de type hydraulique instationnaire (C2, C3, C4, partim B5), soit car elles étaient incompatibles avec la résolution spatiale du modèle (B6).

Tableau 3 : Synthèse des actions proposées par le SSV appliquées à la modélisation. Les actions en vert sont appliquées aux bassins versants de la Hoëgne et de la Helle. Celles en bleu sont appliquées au bassin versant de la Magne. L'action en rouge est testée sur deux zones pilotes de $\pm 1\text{km}^2$ situées dans le bassin versant de la Magne et de la Helle. Les actions en noir n'ont pas été implémentées au sein des BV pilotes modélisés.

	CATEGORIE I	CATEGORIE II	CATEGORIE III
NIVEAU A	<p>A1 : Restauration des sols tourbeux et paratourbeux</p> <p>A2 : Diversification des milieux sur sols hydromorphes</p>	<p>A3 : Conservation de prairie en milieux agricoles</p> <p>A4 : Pratiques agricoles de conservation des eaux et des sols en maïs</p> <p>A5 : Pratique forestière limitant la compaction des sols</p>	
NIVEAU B	<p>B1 : Trame bocagère en milieux agricoles</p>	<p>B2 : Une autre gestion du drainage des chemins forestiers et bandes coupe-feu</p> <p>B3 : Pose de redents sur le réseau routier de forte pente</p> <p>B4 : Production inter-parcellaire de fourrage</p>	<p>B5 : Aménagement de canaux, biefs de dérivation, keyline</p> <p>B6 : Correction torrentielle des axes de ruissellement incisés</p>
NIVEAU C	<p>C1 : Restauration des zones ripariennes</p> <p>C2 : Restauration hydromorphologique (reméandration)</p>	<p>C3 : Utilisation des carrières comme zone de stockage pour les crues importantes</p>	<p>C4 : Création de retenues (avec digues et pertuis) le long des affluents de la Vesdre</p>

L'implémentation des scénarios de gestion au sein des modèles hydrologiques a été réalisée à travers l'adaptation de paramètres d'entrées spatialement et/ou temporellement distribués :

- la rugosité,
- la topographie (qui sont utilisées pour la modélisation des écoulements de surface),
- le type de végétation (qui est utilisé pour le calcul de l'évapotranspiration réelle),
- la rétention en eau et conductivité des sols,
- la rétention superficielle (correspondant à la hauteur de la lame d'eau à atteindre en surface avant l'activation du ruissellement).

2.3.1 Hoëgne

En ce qui concerne le **bassin versant forestier**, les actions se sont concentrées sur le bassin de la Hoëgne dont l'exutoire est la confluence avec la Statte (41 km²). L'hypothèse de travail posée s'est

focalisée sur une enveloppe de travail associée aux activités A1 en lien avec la restauration de milieux humides (tourbières), les activités A2 associées à la diversification des forêts sur les sols peu productifs à faible drainage et les activités A5 liées à des pratiques forestières limitant la compaction des sols (Figure 13). Le Tableau 4 reprend plus en détail l'implémentation des actions au sein de l'interface de modélisation.

Ainsi, environ 0,85 km² de landes humides sont converties en futures tourbières. 3,75 km² de forêts sur sols hydromorphes sont converties en futures tourbières. 5,38 km² de forêts de résineux sont converties en forêts de feuillus mixtes. Celles-ci représentent finalement un total de 16,83 km² de forêts qui sont gérées de manière à limiter la compaction des sols. Cette dernière action est également appliquée à la partie en aval de la confluence avec la Statte. Au total, c'est à peu près la moitié du bassin versant de la Hoëgne à la confluence avec la Statte qui est concernée par des aménagements.

Dans une logique de cohérence des interventions potentielles sur le terrain, il a été décidé de tester au sein de ces enveloppes d'autres actions suggérées en lien plus direct avec le réseau hydrographique, à savoir la création de 275 redents et le creusage de 34 mares de 40 x 40 x 0,45 m (actions B2 et B3) au sein des zones aménagées. Les actions C1 associées à la restauration des forêts ripariennes sont de facto également testées car elles correspondent à des conversions des mêmes plantations d'épicéa converties en forêts feuillues visées par les actions A2.

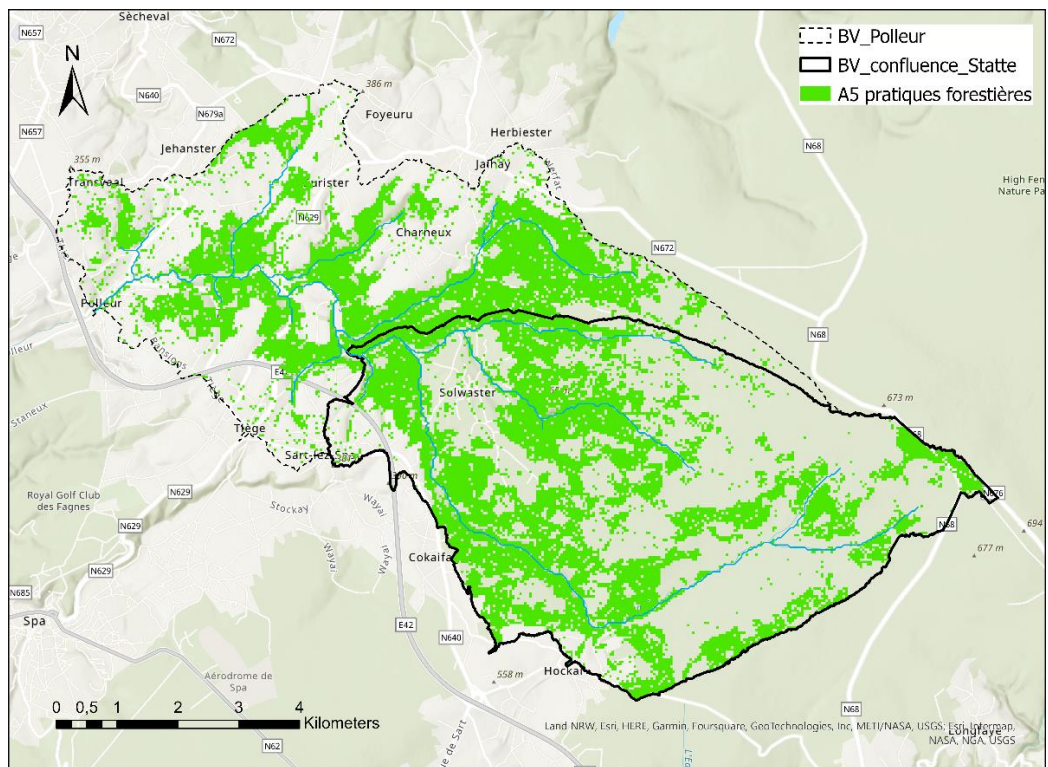
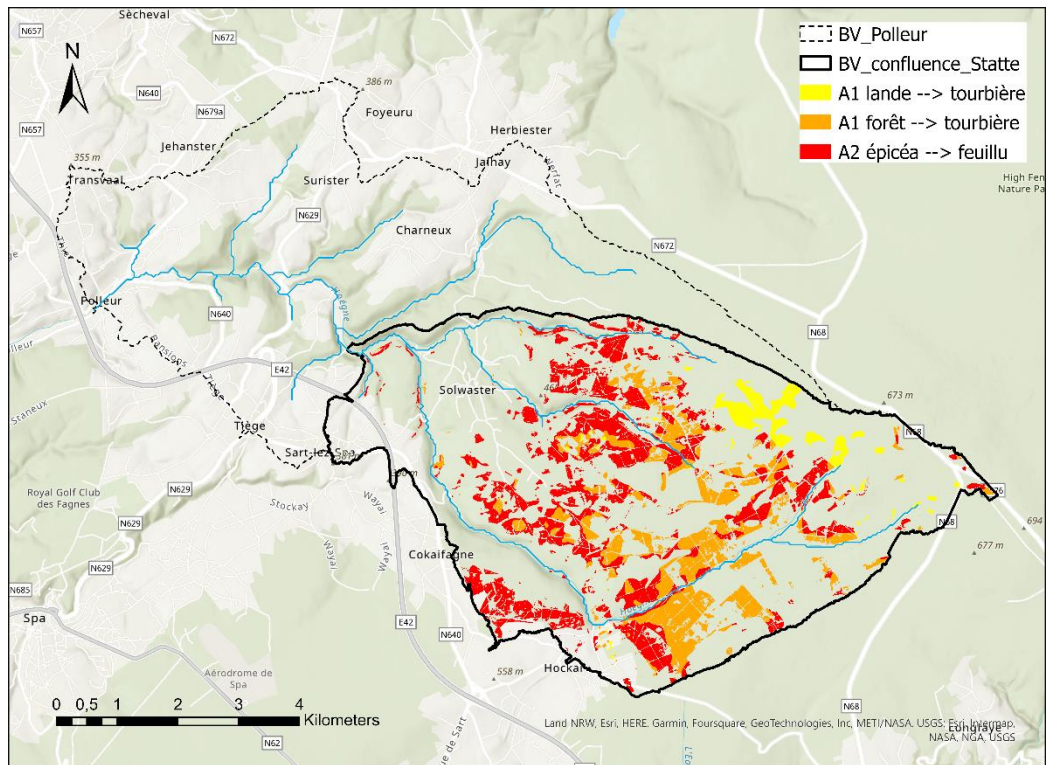


Figure 13 : Répartition des aménagements de restauration des tourbières et de forêts feuillues (haut) et des pratiques forestières limitant la compaction des sols (bas) au sein du bassin forestier (Hoëgne).

2.3.2 Helle

En ce qui concerne le **bassin versant tourbeux**, les actions sont identiques à celles mises en place sur le bassin versant forestier (Figure 14). Ainsi, environ 0,83 km² de landes humides sont converties en futures tourbières. 3,19 km² de forêts sur sols hydromorphes sont converties en futures tourbières. 3,49 km² de forêts de résineux sont converties en forêts de feuillus mixtes. Ces dernières représentent finalement un total de 12,34 km² sur l'ensemble du bassin et sont gérées de manière à limiter la compaction des sols. Pour rappel, le bassin versant tourbeux (la Helle) s'étend sur 36 km². C'est donc à peu près 45% de la superficie de ce bassin qui est concernée par des aménagements.

De façon similaires au bassin versant forestier, 197 redents et 26 mares (40 m x 40 m x 0.45 m) ont été installées dans les zones aménagées.

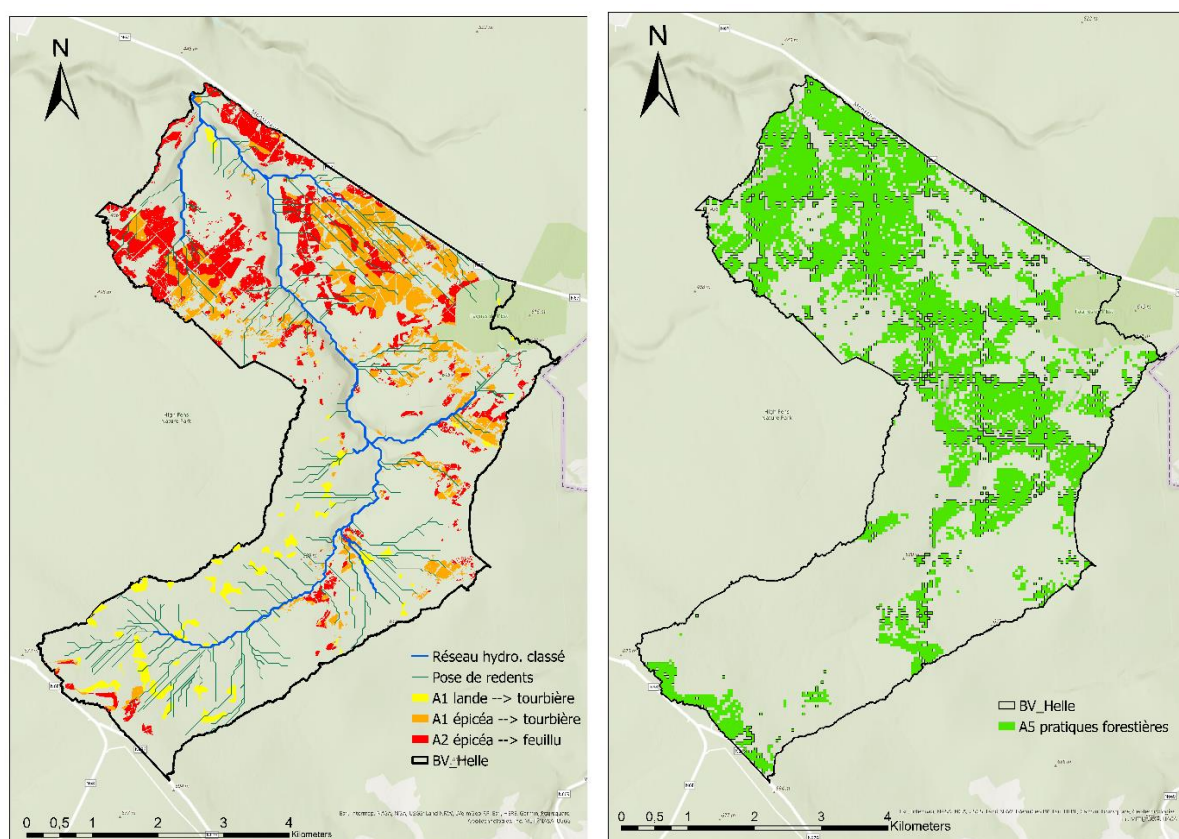


Figure 14 : Répartition des aménagements de restauration des tourbières et de forêts feuillues (gauche) et des pratiques forestières limitant la compaction des sols (droite) au sein du bassin tourbeux (Helle).

2.3.3 Magne

En ce qui concerne le **bassin versant agricole**, les actions se sont focalisées principalement sur le réaménagement d'une trame bocagère en marge des parcelles agricoles (B1) à travers la mise en place de barrières interparcelles productrices de biomasse ou de fourrage (B4) comme proposé par le SSV (Figure 15). Le Tableau 4 reprend plus en détail l'implémentation de ces actions au sein de l'interface de modélisation. Les barrières interparcelles sont matérialisées par des haies de 15m de large en bordure de toutes les parcelles du parcellaire agricole anonyme (situation 2020). Au niveau de ces

bandes, les propriétés du sol et la rugosité ont été modifiés dans le modèle sur base de mesures réalisées sur des bandes de miscanthus/haies de saules prises dans le cadre du projet « INTELL'EAU ». L'aménagement de barrière interparcelles représente environ 700 km linéaires d'aménagements pour une surface de 8.87 km² sur le bassin versant de la Magne. Ce chiffre peut paraître important mais ne représente pourtant qu'une fraction du linéaire associé au paysage bocager historique présent au sein de cette région (cf. Figure 16). La logique d'implantation est ici directement issue du découpage des parcelles actuelles, sans réflexion sur l'importance éventuelle de ladite implantation en matière de fonctionnement hydrologique du bassin versant. Ces aspects seront abordés localement pour le test des *keylines* (voir paragraphe suivant). La trame bocagère encore existante est globalement incluse au sein de ces 700 km d'aménagement linéaires. L'adoption de pratiques agricoles de conservation des eaux et des sols (activités A4) a également été modélisée à travers l'implémentation du rouleau anti-érosif en maïs (0,73 km² aménagés) et l'adoption de techniques culturales simplifiées (TCS) pour les autres cultures (0,30 km² aménagés). Au total, 25% de la surface du bassin est concernée par ces aménagements.

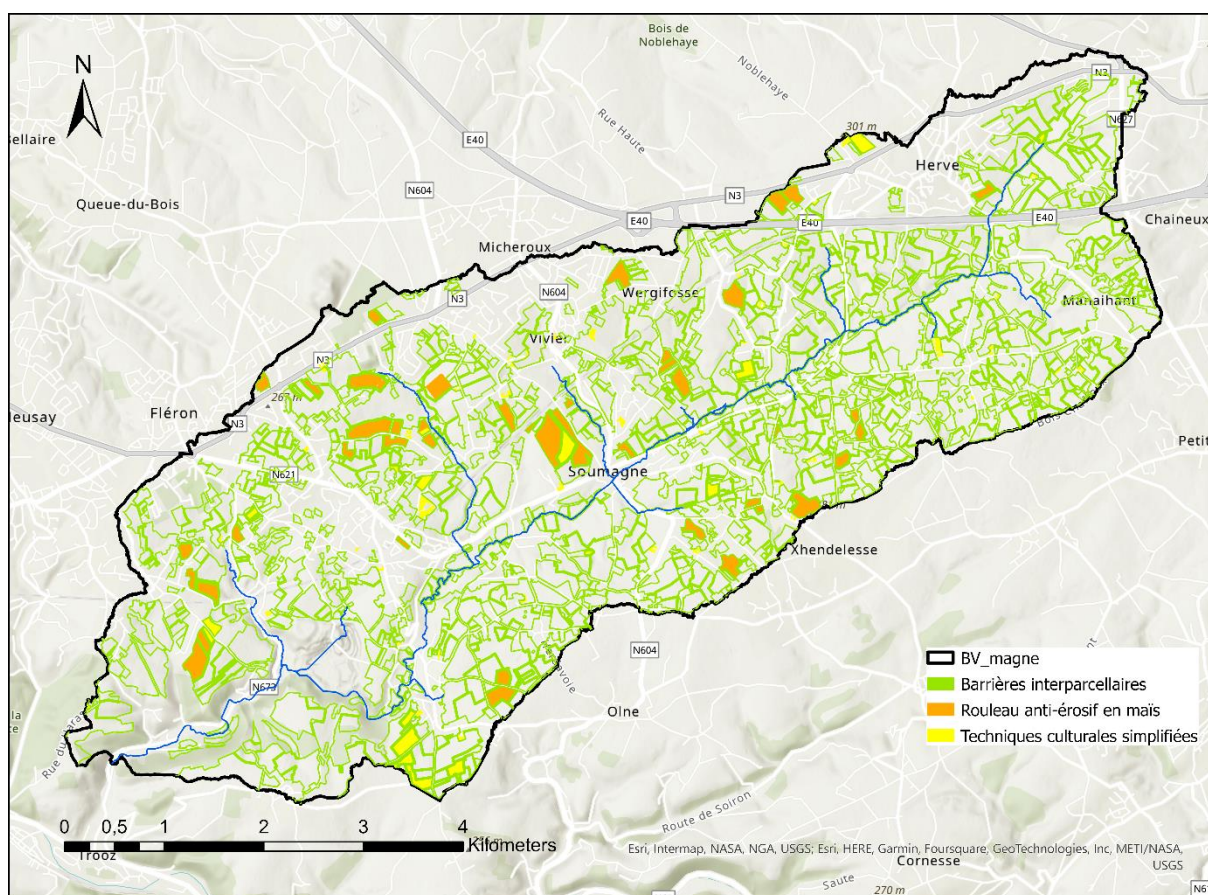


Figure 15 : Répartition des aménagements au sein du bassin versant de la Magne.

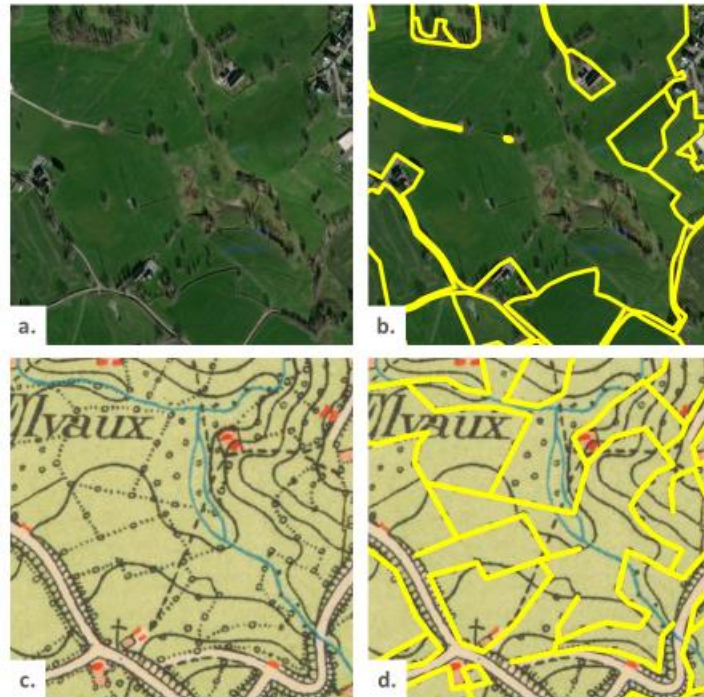


Figure 16 : trame bocagère dans la zone amont du bassin de la Magne (Trou du chat à Herve). a. b. vue aérienne et barrière interparcellaire simulée correspondant aux limites SIGEC 2020 ; c. d. carte topographique historique (< 1873) et linéaire de haies cartographié. Le linéaire de haies recréé dans le cadre du projet correspond pour la zone visualisée approximativement à la moitié du linéaire présent à la fin du 19^{ème} siècle.

2.3.4 Aménagement de keylines en contexte agricole et forestier

Parallèlement, deux scénarios impliquant l'installation de « keylines » ont été implémentés sur deux zones pilotes. Cet aménagement a pour but redistribuer et réinfiltrer l'eau de ruissellement en la détournant des fonds de vallées (naturellement humides) vers les crêtes (naturellement plus sèches). Dans la pratique, on profite de replats au niveau d'un axe concentré de ruissellement (talwegs) pour capter l'eau de ruissellement, cette eau peut ensuite être dirigée vers un fossé, généralement creusé à l'aide d'une excavatrice. Ce fossé suit une courbe de niveau mais présente une légère inclinaison pour permettre l'écoulement de l'eau jusqu'à la ligne de crête. Les terres excavées servent à construire une butte sur la parallèle aval du fossé. Cela permet notamment d'augmenter la capacité rétention du fossé. Une haie est généralement plantée sur cette même butée afin d'assurer sa stabilité. Ce type d'aménagement est couramment appelé « baissière » en permaculture. Ces aménagements peuvent être répétés en aval de la première keyline. En contexte agricole, il est également possible d'effectuer une opération de sous-solage parallèlement aux keylines afin de briser une éventuelle couche de sol imperméable, favorisant ainsi une meilleure infiltration de l'eau et un meilleur enracinement.

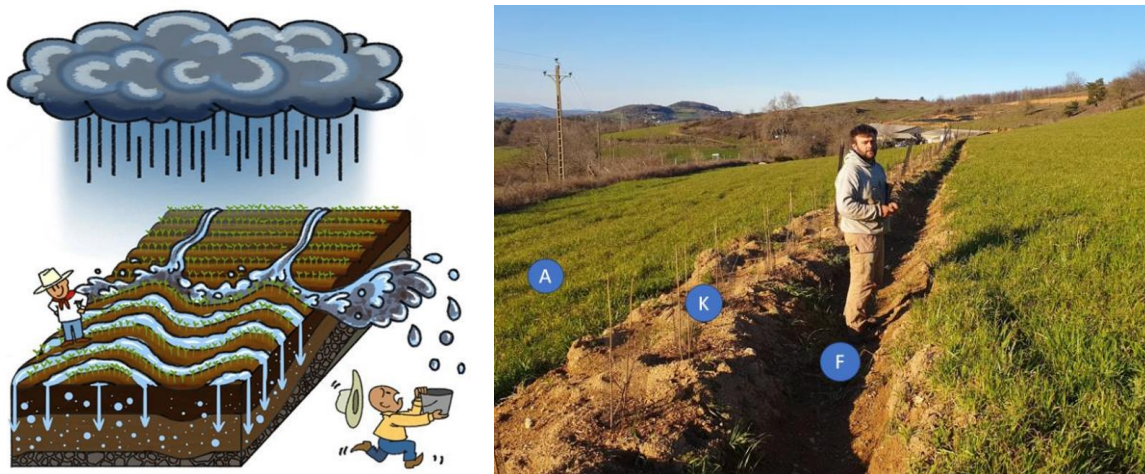


Figure 17 : Illustration de l'aménagement de keylines selon Ponce-Rodríguez et al., 2021 (à gauche) et une keyline en fossé-butée, ou baissière (à droite) (F = zone de fossé, K = zone sur la keyline avec la plantation d'arbres et A = zone en aval de la keyline).

Dans la pratique, ces aménagements ont été testés (via la modélisation physiquement basée) sur deux bassins versants pilotes d'une superficie de l'ordre de 1 km² chacun. Ceux-ci sont compris dans le bassin de la Magne (contexte agricole) et de la Helle (en zone de contexte forestier, aval du bassin versant tourbeux). Nous avons opté pour des zones d'études de plus petites tailles afin de pouvoir effectuer des modélisations plus précises, à une résolution de 10*10 mètres, permettant ainsi une représentation plus réaliste de ces aménagements. Le tracé des keylines modélisées n'est pas contraint par le parcellaire agricole et forestier, suggérant ainsi la possibilité d'envisager un remembrement (aménagement foncier rural) à des fins d'optimisation. En revanche, le tracé des keylines tient compte du réseau viaire. Deux stratégies de traçage des keylines ont été testées ; un traçage manuel (appliqué en contexte agricole) et un traçage automatisé (appliqué en contexte forestier). Le Tableau 4 reprend plus en détail l'implémentation de ces actions au sein de l'interface de modélisation.

Contexte agricole

Dans le contexte agricole, les keylines sont tracées manuellement par un opérateur expérimenté. L'avantage avec cette manière d'opérer est que le traçage des keylines est plus contrôlé. En revanche, il est difficile de tracer de nombreuses keylines. Ainsi, les keylines situées en aval de la première keyline ne sont pas explicitement représentées au sein du modèle, mais sont plutôt intégrées à travers la modulation d'un paramètre destiné à rendre compte des accumulations d'eau dues à la microtopographie (rétention superficielle). Ce paramètre est ajusté de manière à correspondre au volume d'eau retenu par des keylines de 1 mètre de large et de 1m de profondeur située à 100 mètres d'intervalles.

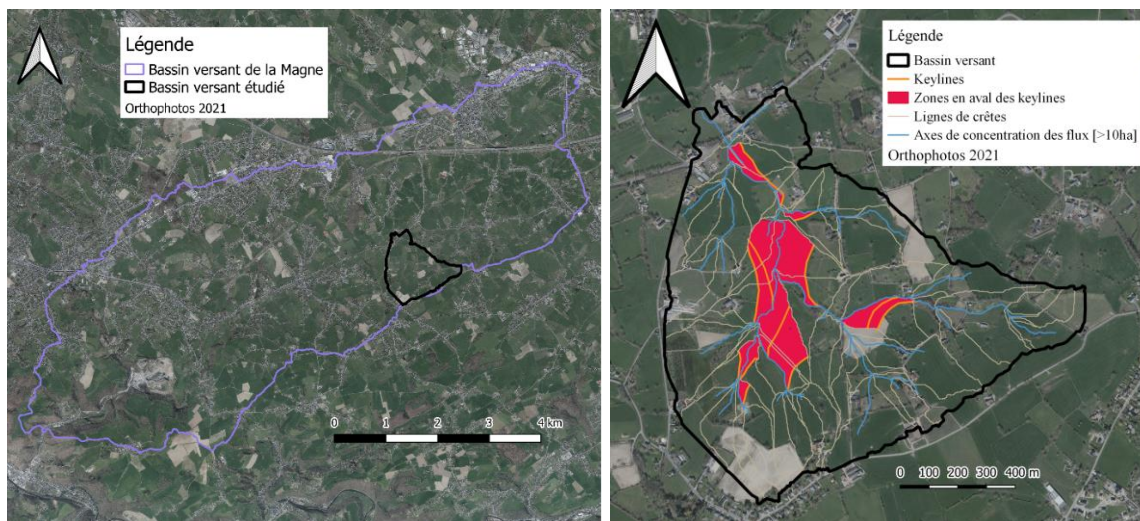


Figure 18: Bassin versant agricole pilote pour l'installation de keylines (à gauche) et représentation des aménagements sur ce bassin versant pilote (à droite).

Ainsi, on peut estimer que les zones concernées par ces aménagements de keylines représentent 2% de la surface du bassin versant pilote. Les keylines sont matérialisées par un fossé de 1m de profondeur (et 10m de largeur) et une butée parallèle de 1m de hauteur (et 10 m de largeur). Des alignements de feuillus sont modélisés sur les butées. Ce scénario est modélisé selon trois variantes : une variante avec un sous-solage dans la zone aval à la première keyline (KEYLINE sous solage), une variante sans sous-solage (KEYLINE) et une variante correspondant aux aménagements faits sur l'ensemble du bassin versant agricole (POST). Une fois la zone aval est aménagée, la surface des aménagements Keyline et sous solage passe à 9,5% du bassin versant pilote. Par comparaison, 39% de la surface du bassin versant pilote est aménagée dans le scénario POST.

Contexte forestier

Dans le contexte forestier, une procédure automatisée de traçage des keylines, se basant sur la topographie et l'occupation du sol est réalisée. En bref, cette procédure reprend les étapes suivantes :

1. Délimitation des axes de concentrations et des lignes de crêtes sur base d'un modèle numérique de terrain et de seuils d'accumulation. Pour les axes de concentrations, un seuil minimal de 2ha et maximal de 15ha est appliqué afin de sélectionner les parties du réseau où des keylines peuvent être tracées (pas trop en amont, ni trop en aval). Le seuil appliqué pour tracer les lignes de crêtes est de 2ha. Ces seuils peuvent être ajustés en fonction du contexte géomorphologique.
2. Traçage de keypoints (point de démarrage des keylines) sur base d'une intersection entre le réseau hydrographique et les lignes des courbes de niveaux. La différence de hauteur entre les courbes de niveaux peut être ajustée. Les keypoints trop proches les uns des autres peuvent être supprimés sur base d'un seuil d'éloignement minimal. Les keypoints se trouvant dans les zones d'occupation du sol « pas de végétation, zone humide et culture » (Tableau 1) sont volontairement retirés.

3. Création d'un masque pour le traçage des fossés des keylines partant de part et d'autre de chaque keypoint et perpendiculairement aux axes de concentrations. En partant d'un des deux points perpendiculaires au keypoint, un algorithme permet de tracer un masquage d'un fossé. Cet algorithme choisi itérativement, parmi les 3 mailles adjacentes dans la direction prise précédemment, la maille générant la pente la plus proche d'un de pente seuil fixé (ici -1%). L'algorithme s'arrête lorsqu'une maille choisie atteint la ligne de crête ou une zone d'occupation de sol « pas de végétation, zone humide et culture ».
4. Traçage d'une butée parallèle en aval du fossé créé.

Avec cette approche, toutes les keylines sont explicitement représentées dans le modèle. Néanmoins, il reste une marge de progression dans la mise en œuvre de ce procédé.

Dans le contexte forestier (Figure 19), les keylines sont matérialisées par un fossé de 0,5m de profondeur (et 10m de largeur) et une butée parallèle de 0,5m de hauteur (et 10 m de largeur). La profondeur des fossés est plus faible qu'en contexte agricole vu que les profondeurs de sols sont généralement plus faibles. Des alignements de feuillus sont modélisés sur les butées. Ce scénario correspond au scénario « KEYLINES ». Celui-ci est comparé au scénario correspondant aux aménagements faits sur l'ensemble du bassin versant tourbeux (POST). Une troisième variante de scénario est testée en additionnant les aménagements des deux scénarios précédents (POST + KEYLINE).

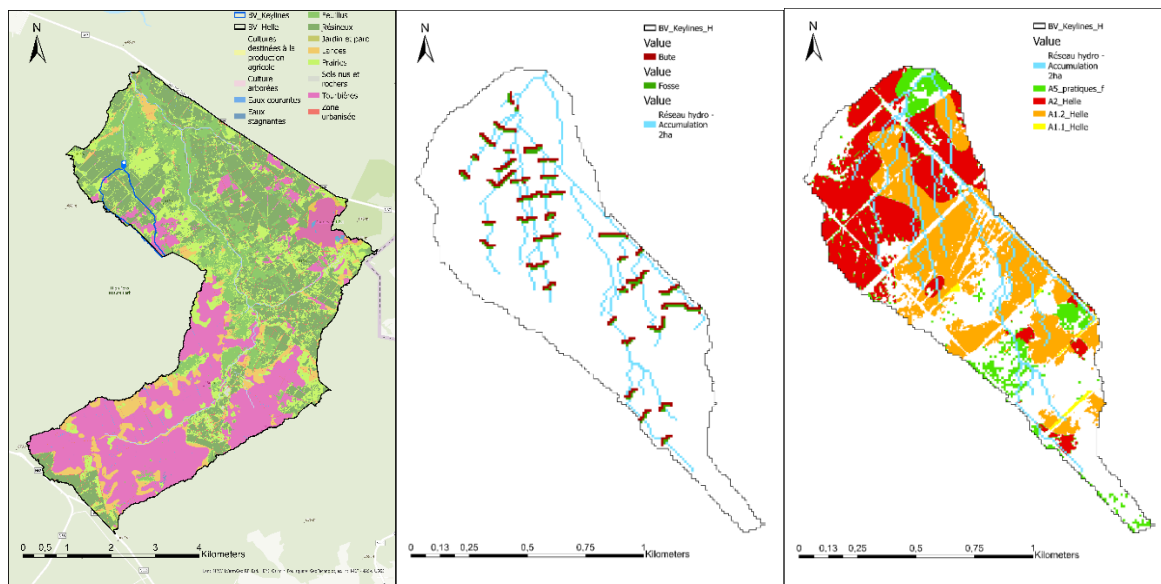


Figure 19 : Représentation du bassin versant pilote tourbeux ($\pm 1\text{km}^2$) (à gauche) et des scénarios d'aménagements faits : KEYLINE (au centre) et POST (à droite). Le scénario POST + KEYLINE correspond à une addition des scénarios POST et KEYLINES. Dans le scénario KEYLINE, 6% de la surface du bassin est aménagée, contre 60% dans le scénario POST.

Tableau 4 : Synthèse des modifications réalisées dans Mike She pour chaque type d'aménagement.

Aménagement	Surface concernée Hoëgne	Surface concernée Helle	Surface concernée Magne	Topographie	Végétation	Rugosité (M)	Conductivité hydraulique du sol (40 premiers cm)	Porosité du sol (40 premiers cm)	Alpha van-genuchten (40 premiers cm)	Rétention superficielle
Restauration des sols tourbeux et paratourbeux sur landes (A1.1)	1%	2%	/	/	/	5	/	/	/	/
Restauration des sols tourbeux et paratourbeux sur résineux (A1.2)	5%	9%	/	/	Résineux vers milieu ouvert de conservation	5	/	/	/	/
Diversification des milieux sur sols hydromorphes et pratiques forestière limitant la compaction des sols (A2+A5)	7%	9%	/	/	Résineux vers feuillus	5	plus 50% de la valeur VO	plus 10% de la valeur VO	/	/
pratiques forestière limitant la compaction des sols (A5)	32%	24%	/	/	/	/	plus 50% de la valeur VO	plus 10% de la VO	/	plus 2 mm
Redents (B2 + B3)	0,7%	1%	/	plus 45 cm sur axes concentrés entre 100 et 5 Ha	/	/	/	/	/	/
Mares (B2 + B3)	0,08%	0,1%	/	moins 45 cm en zones plates	/	/	/	/	/	/
Barrières interparcellaires (B1)	/	/	22%	/	Milieux ouverts de production ou cultures vers feuillus	2	plus 100% de la valeur VO	plus 20% de la VO	/	/
Rouleau anti-érosif en maïs (A4)	/	/	2%	/	/	/	/	/	/	plus 21 mm
Techniques Culturelles Simplifiées - TCS (A4)	/	/	1%	/	/	/	/	/	moins 20 % de la VO	/
Keylines en contexte forestier (B5)	/	6% (du bv pilote)	/	plus 50 cm (butée) et moins 50 cm (fossé)	Vers feuillus (butée)	/	/	/	/	/
Keylines en contexte agricole (B5)	/	/	10% (du bv pilote)	plus 100 cm (butée) et moins 100 cm (fossé)	Vers feuillus (butée)	/	/	/	/	plus 10 mm (zone aval)
Keylines + sous solage en contexte agricole (B5)	/	/	10% (du bv pilote)	plus 100 cm (butée) et moins 100 cm (fossé)	Vers feuillus (butée)	/	plus 100% de la valeur VO (zone aval)	plus 10% de la valeur VO (zone aval)	/	plus 10 mm (zone aval)

2.4 Chaîne de traitement des résultats

La modélisation hydrologique réalisée dans le cadre de ce projet est une modélisation continue dans le temps (de 2002 à 2022), entièrement distribuée spatialement et physiquement basée. Cette modélisation offre donc une large gamme de résultats (dans le temps et l'espace) qu'il convient de synthétiser. Une chaîne complète de traitement des résultats est développée afin de valider les modèles et de déduire les effets des différents aménagements modélisés tant sur les aspects inondations que sur les aspects sécheresses. Les résultats proposés se distinguent par l'endroit où ils sont observés (à l'exutoire ou dans le bassin) et par la période temporelle considérée (approche par événements individualisés ou continue).

2.4.1 Calibration et validation des modèles

Aucune approche de calibration « automatisée » n'est intégrée au modèle MIKE SHE. La calibration se fait en ajustant manuellement certains paramètres du modèle. Dans le cadre de ce projet, la calibration s'est limitée à la modulation par essai-erreur des valeurs associées à la rugosité dans le chenal, la rugosité de surface et les propriétés du socle hydrogéologique.

Par ailleurs, trois approches de validation (complémentaires entre elles) sont proposées afin de s'assurer du bon fonctionnement hydrodynamique des bassins modélisés, tant en termes de dynamique des flux qu'en termes de distribution spatiale.

Validation des débits

Une analyse des hydrogrammes modélisés a été réalisée par comparaison avec les hydrogrammes obtenus grâce aux différentes stations de suivi situées aux exutoires et dans les bassins. Les périodes de validation dépendent des données disponibles. Les différents indicateurs sont calculés sur base annuelle, comme :

L'Erreur Moyenne (ME) :

$$ME = \frac{\sum_t QObs_t - QMod_t}{n}$$

Où $QObs_t$ est le débit mesuré au temps t et $QMod_t$ est le débit modélisé au temps t . la variable n correspond au nombre d'observations. L'optimum visé vaut 0.

L'Erreur Moyenne Absolue (MAE) :

$$MAE = \frac{\sum_t |QObs_t - QMod_t|}{n}$$

L'optimum visé vaut 0.

La racine de l'erreur quadratique moyenne ou Root Mean Square Error (RMSE) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_t (QObs_t - QMod_t)^2}{n}}$$

L'optimum visé vaut 0.

L'écart type des résidus (STDres) :

$$STDres = \sqrt{\frac{\sum_t \left[(QObs_t - QMod_t) - \left(\frac{\sum_t QObs_t - QMod_t}{n} \right) \right]^2}{n}}$$

L'optimum visé vaut 0.

Le coefficient de corrélation (R) :

$$R = \frac{\sum_t(QObs_t - \frac{\sum_t QObs_t}{n}) * (QMod_t - \frac{\sum_t QMod_t}{n})}{\sqrt{\sum_t(QObs_t - \frac{\sum_t QObs_t}{n})^2 * \sum_t(QMod_t - \frac{\sum_t QMod_t}{n})^2}}$$

L'optimum visé vaut 1.

Le coefficient de Nash-Sutcliffe (R²-Nash) :

$$R^2 - Nash = 1 - \frac{\sum_t(QObs_t - QMod_t)^2}{\sum_t(QObs_t - \frac{\sum_t QObs_t}{n})^2}$$

L'optimum visé vaut 1.

Par ailleurs, une analyse des nuages de points (diagrammes de dispersion) avec en abscisse les débits observés et en ordonnée les débits modélisés est réalisée.

Validation de la dynamique temporelle et spatiale de la zone saturée

Au sein de la modélisation, un suivi de la dynamique temporelle de la hauteur de la zone saturée est réalisé ponctuellement au niveau de différents types de sols. Faute de données de référence *sensus stricto*, cette validation se fait de manière visuelle, en comparant la dynamique observée au sein de la vadose en quelques points clefs du territoire à celle attendue, en conformité avec l'information de drainage naturel présente au sein de la CNSW.

La profondeur moyenne de la zone saturée est extraite sur une période de plusieurs années (les mêmes périodes utilisées pour la validation aux exutoires) en tous points des bassins modélisés. Ces moyennes temporelles et spatialisées sont comparées aux informations de drainage naturel contenues dans la Carte Numérique des Sols de Wallonie afin de valider la bonne spatialisation de la dynamique de l'eau dans la vadose.

En effet, l'information de drainage naturel contenue dans la Carte Numérique des Sols de Wallonie est le reflet de la profondeur à laquelle le sol est temporairement saturé. La cartographie des classes de drainage se base principalement sur la profondeur à laquelle sont retrouvées des tâches d'oxydoréduction (principalement du fer). Ces tâches apparaissent dans le sol lors des alternances de conditions réductrices (en absence d'oxygène lorsque le sol est saturé d'eau) et de conditions oxydatives (en présence d'oxygène lorsque le sol n'est pas saturé d'eau). La profondeur et l'abondance des tâches a été utilisée par les cartographes du sol pour coder le drainage naturel de chaque observation pédologique (une description de sondage à la tarière tous les 75 m).

2.4.2 Effet des aménagements sur les inondations : débits à l'exutoire

Se positionner à l'exutoire permet de quantifier directement les potentiels bénéfiques en termes d'inondations en aval de l'ensemble des aménagements mis en place dans un scénario donné. Trois types de résultats à l'exutoire sont proposés :

Hydrogrammes d'évènements

L'approche proposée pour la comparaison du comportement hydrologique du bassin avant et après aménagement porte sur la comparaison d'hydrogrammes à l'exutoire pour des événements

spécifiques. Généralement, l'évènement de la crue de juillet 2021 est présenté. D'autres événements peuvent être interprétés.

De cette manière, les indicateurs développés portent sur :

- Le décalage dans le temps du débit maximum observé entre les sorties des modèles avant et après travaux (exprimé en minutes) ;

$$\text{Delta time } Q_{max} = \text{Time}Q_{max_POST} - \text{Time}Q_{max_VO}$$

- Le décalage en termes de débit maximum observé avant / après travaux (exprimé en pourcents) ;

$$\text{Delta } Q_{max} = 100 * \frac{Q_{max_POST} - Q_{max_VO}}{Q_{max_VO}} ;$$

- Le décalage en termes de volumes écoulés lors de l'évènement ayant lieu entre les jours i et j, observé avant / après travaux (exprimé en pourcents) :

$$\text{Delta Volume} = 100 * \frac{\sum_{x=i}^{x=j} Vol_post_x - \sum_{x=i}^{x=j} Vol_VO_x}{\sum_{x=i}^{x=j} Vol_VO_x} ;$$

Débits maximums

Contrairement à l'approche centrée sur un événement, ce résultat s'intéresse à un ensemble d'évènements météorologiques susceptibles de générer une réponse à l'exutoire (approche continue). Cela permet d'évaluer l'impact des aménagements sur un large spectre d'évènements pluvieux isolés les uns des autres par au moins 6 heures sans pluies. Au sein de chaque événement, le débit maximum à l'exutoire est retenu. Cet indicateur est analysé sous la forme d'un nuage de point permettant d'observer les couples de débits maximums modélisés avant et après aménagement. L'interprétation de la structure de ce nuage de point permet alors de poser des hypothèses en matière d'impact des aménagements sur la réponse à l'exutoire.

QDF et hydrogrammes monofréquence

Des relations débit-durée-fréquence (QDF) et hydrogrammes monofréquences sont générés à partir des chroniques de débits modélisés aux exutoires des trois sous-bassins grâce à la librairie python « Wolf Eva » développée dans le cadre du Groupe de travail Statistiques, du Groupe Transversal Inondations.

Les chroniques de débits utilisées pour générer ces résultats démarrent le 01 janvier 2003 et s'arrêtent le 31 décembre 2021. Les QDF sont générés à partir des débits maximums annuels dépassés pendant 1, 2, 12, 24 et 48h. Pour chaque durée considérée, une fonction de « Gumbel » est ajustée aux débits maximums annuels afin d'associer le débit à la période retour. La période de retour maximale considérée est de 100 ans.

A partir des relations QDF pour une durée de dépassement de 1h, des hydrogrammes monofréquences (à une résolution horaire) sont générés. Ceux-ci sont générés pour des périodes de retour de 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans. La montée en débit de l'hydrogramme évolue linéairement avec le temps. Le temps de montée de l'hydrogramme est manuellement ajusté en fonction de l'hydrogramme médian des hydrogrammes où le débit maximal annuel est dépassé pendant une heure. Ensuite les débits lors de la décrue sont trouvés par « résolution d'un problème de minimisation de l'écart de volume vis-à-vis du volume théorique ».

Il est important de noter que les QDF et hydrogrammes monofréquence générés dans le cadre de la modélisation physiquement basée servent uniquement à l'interprétation des effets éventuels des aménagements modélisés. Ceux-ci ne sont pas utilisés tels quels comme débits d'entrées dans le cadre de la modélisation hydraulique. Les QDF et hydrogrammes générés pour la modélisation hydraulique doivent faire l'objet d'une analyse plus poussée, notamment sur le choix de la manière d'échantillonner les débits maximums et le choix de loi GEV qui s'ajuste le mieux aux données. Ainsi la loi de Gumbel sélectionnée dans le cadre de cette comparaison n'est certainement pas une loi qui s'ajuste toujours le mieux aux données modélisées. Néanmoins, pour comparer les courbes QDF avant et après aménagement, il est nécessaire qu'elles soient élaborées à partir d'une même loi GEV, en l'occurrence la loi de Gumbel qui a un paramètre de forme fixé à 0.

2.4.3 Effet des aménagements sur les inondations : fonctionnement hydrologique du bassin versant

Se positionner dans le versant permet de mieux comprendre les effets des aménagements mis en place, en identifiant les zones de diminution de production de ruissellement par exemple.

Coefficient d'écoulement

Cet indicateur correspond au rapport entre le ruissellement et la précipitation. Nous proposons d'évaluer le coefficient d'écoulement sur un événement donné (généralement juillet 2021) ayant eu lieu entre les jours i et j , et ce pour chaque maille du modèle, tel que défini ci-après :

$$CE = \frac{\sum_{x=i}^{x=j} P_x - Inf_x}{\sum_{x=i}^{x=j} P_x}$$

La variable P correspond aux précipitations et Inf correspond à l'infiltration.

Dynamique des écoulements de surface

Des cartographies des vitesses d'écoulements sont réalisées. Ces cartographies reprennent la médiane des vitesses instantanées des écoulements lors des événements de précipitations de plus 30 mm. Une médiane des vitesses entre événements est ensuite réalisée. Une comparaison est réalisée en déterminant le pourcentage de réduction de vitesse après aménagement.

Efficacité des aménagements en termes de réduction du ruissellement

Cet indicateur a pour but de différencier les effets des aménagements surfaciques et linéaires mis en place dans un même bassin versant.

D'abord, les événements pluvieux sont isolés les uns des autres par au moins 6 heures sans pluie. Ensuite, les zones concernées par un seul type d'aménagement sont générées pour qu'elles se trouvent à au moins 40m d'un axe concentré (pour éviter une influence de l'amont) et que la surface soit supérieure à 2.5 ha. Cette analyse n'est pas applicable pour des zones aménagées de niveau B ou C, comme la plantation de haies par exemple. Cette analyse se concentre donc sur les aménagements mis en place dans le bassin versant forestier et tourbeux.

Pour chaque zone et pour chaque événement pluvieux, le ruissellement moyen est calculé et est conservé s'il est >5mm (situation avant aménagement). Pour chaque zone et pour chaque événement pluvieux, une valeur d'efficacité des travaux effectués en termes de réduction du ruissellement est calculée selon la formule suivante :

$$Efficacité (\%) = 100 * \frac{(ruissellement_{non-aménagé} - ruissellement_{aménagé})}{ruissellement_{non-aménagé}}$$

Ces valeurs d'efficacité sont visualisées sous formes de boîtes à moustaches par aménagement. Une analyse *a posteriori* est réalisée afin d'évaluer le lien entre cette efficacité et la sollicitation : volume précipité et intensité moyenne des précipitations.

2.4.4 Effet des aménagements sur les sècheresses

Bilans simplifiés

Des bilans de stock et flux verticaux d'eau dans les premiers 120 cm du sol sont réalisés (Figure 20). Les flux verticaux concernées sont l'interception, l'infiltration, la résurgence, l'évapotranspiration, la recharge et la remontée capillaire. Ces bilans peuvent être réalisés en une maille donnée ou moyennés sur l'ensemble d'une zone.

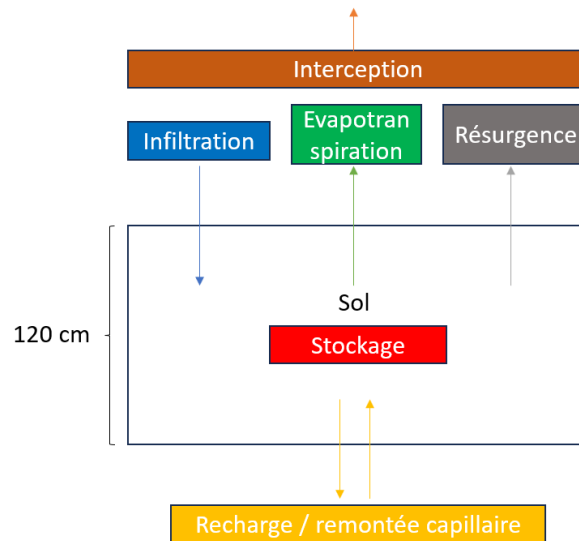


Figure 20 : Schéma du bilan vertical simplifié.

Indicateur de stress hydrique pour les plantes (DDF)

L'objectif de cet indicateur est de réaliser une cartographie du nombre consécutif de jours où les plantes à un endroit donné se retrouvent au-delà d'un seuil de stress hydrique, en fonction d'une période de retour. Le nom donné à cet indicateur est « DDF » pour « Drought-Duration-Frequency ». Il est important de noter que cet indicateur tient compte de la profondeur à laquelle les plantes peuvent prélever de l'eau (profondeur racinaire).

Pour chaque cellule du modèle et chaque année (2003-2021), la durée maximum consécutive où la pression de l'eau dans le profil de sol exploré par les racines (rhizosphère) est sous le seuil de stress est extraite. Ensuite pour chaque cellule, une loi de Gumbel permettant de faire le lien entre la durée (y) et la probabilité d'occurrence (période de retour : TM) du stress est ajustée.

$$y = -c \left(\ln \ln \frac{TM}{TM - 1} \right) - a$$

c et a sont des paramètres d'ajustement. La variable TM correspond à la période de retour et est calculée selon la formule suivante.

$$TM = \frac{n + 1}{m}$$

La variable n correspond au rang dans le classement décroissant. La variable m correspond au nombre total d'années d'observations.

Cette opération est répétée pour deux seuils de stress ou intensité du stress (stress modéré : -30 m de potentiel matriciel¹, stress sévère : -150 m de potentiel matriciel).

2.5 Résultats de modélisation : bassin versant de la Hoëgne

2.5.1 Calibration et validation

Validation des débits

Dans le cadre de la modélisation physiquement basée du bassin versant de la Hoëgne, la validation se réalise sur base de deux stations. Une première station se trouve en amont du bassin versant, à Belleheid (BV de 19.6 km²). La seconde station se trouve en aval dans le village de Polleur (BV de 71 km²).

Sur l'ensemble de la période de validation, on observe une bonne concordance entre les débits modélisés et les débits mesurés aux deux stations (Tableau 5). Il existe néanmoins un léger biais, où les volumes d'eau mesurés sont en moyenne supérieurs à ceux modélisés (Tableau 5 et Figure 21). La qualité de la modélisation semble homogène entre l'amont (à Belleheid) et l'aval (à Polleur).

Tableau 5 : analyse des débits simulés et observés sur la Hoëgne à Polleur et à Belleheid. ME : erreur moyenne (m³/s) ; MAE : erreur moyenne absolue (m³/s) ; RMSE : racine de l'erreur quadratique moyenne (m³/s) ; STDres : écart-type des résidus (m³/s) ; R et R²-Nash

Année	ME	MAE	RMSE	STDres	R	R ² -Nash
Polleur						
2017	-0,314	0,525	0,868	0,809	0,859	0,623
2018	0,088	0,629	1,405	1,402	0,824	0,676
2019	0,187	0,596	1,425	1,412	0,888	0,722
2020	0,056	0,638	1,237	1,235	0,810	0,644
2021	0,296	0,878	2,674	2,657	0,817	0,626
2017-2021	0,062	0,653	1,638	1,637	0,816	0,658
Belleheid						
2017	0,012	0,179	0,397	0,397	0,830	0,548
2018	0,039	0,226	0,533	0,532	0,822	0,626
2019	0,107	0,201	0,418	0,404	0,882	0,762
2020	0,064	0,226	0,447	0,443	0,857	0,653
2021	0,127	0,326	0,901	0,891	0,831	0,660
2017-2021	0,070	0,232	0,570	0,566	0,838	0,665

¹ Le potentiel matriciel correspond au niveau énergétique des forces de rétention appliquées sur l'eau par la matrice solide du sol. Il s'exprime en unité de pression (ici en mètres de colonne d'eau). Il existe un lien étroit entre le potentiel matriciel et la teneur en eau du sol. L'eau se déplace naturellement des hauts vers les bas potentiels. Plus le potentiel de l'eau du sol est faible plus l'énergie nécessaire pour extraire cette eau est importante.

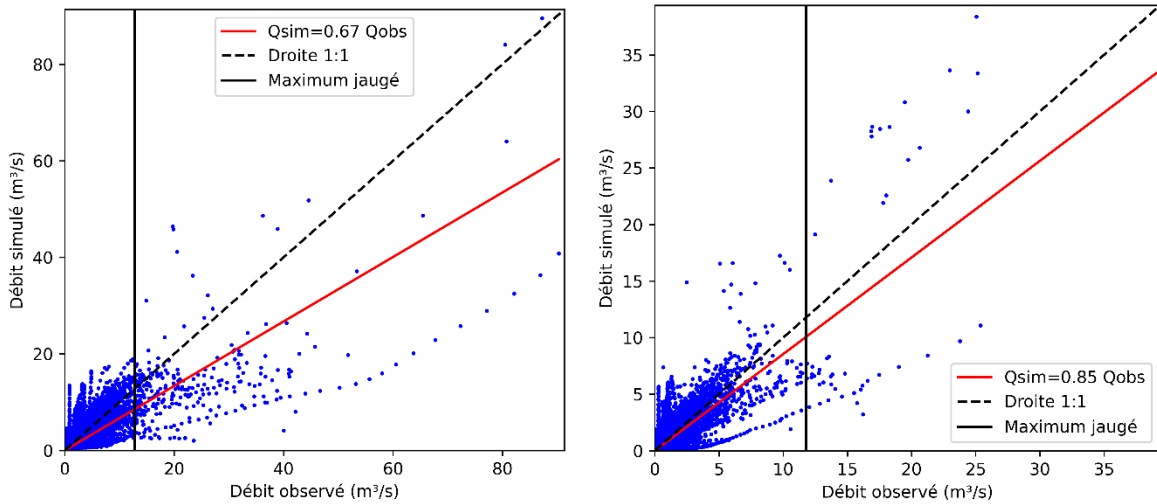


Figure 21 : Diagrammes de dispersion à l'exutoire du bassin versant de la Hoegne à Polleur (à gauche) et à Belleheid (à droite) réalisés de 2017 à 2021.

Validation de la dynamique verticale de la zone saturée

L'examen de la dynamique verticale de la zone saturée à différents points de contrôle semble être en adéquation avec la dynamique attendue (Figure 22). Dans le sol à drainage favorable, la zone saturée reste en permanence largement sous la surface. Pour le sol à drainage modéré à imparfait, la zone saturée reste sous la surface avec des épisodes ponctuels d'engorgement. Pour le sol à engorgement temporaire, la zone saturée affleure en période hivernale tandis qu'elle descend de quelques mètres en périodes sèches. Pour le sol à engorgement temporaire, on observe déjà un contraste important de la profondeur de la zone saturée entre l'été 2018 (très sec) et l'été 2021 (très humide). Concernant la tourbière haute, la zone saturée affleure en période hivernale tandis qu'elle ne redescend que de quelques centimètres en période estivale.

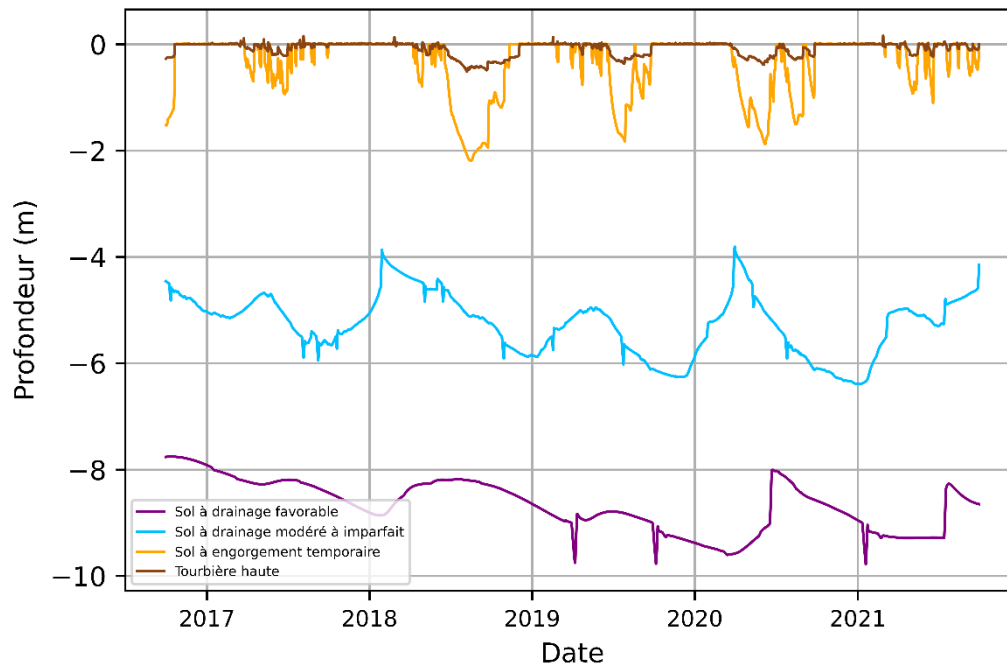


Figure 22 : Dynamique verticale de la zone saturée de 2017 à 2021 pour différents points de contrôles dans différents types de sols du bassin versant forestier (Hoëgne).

Validation spatiale de la profondeur de la zone saturée

Les moyennes temporelles et spatialisées de la profondeur de la zone saturée semblent valider la bonne spatialisée de la dynamique de l'eau dans la vadose (Figure 23). Ces moyennes temporelles de la profondeur de la zone saturée modélisée révèlent le patron spatial des classes de drainage naturel de la CNSW. On observe néanmoins une pixélisation de la profondeur moyenne de la zone saturée. Ceci est dû à la définition dans le modèle du socle géologique dont la résolution est de 5 km.

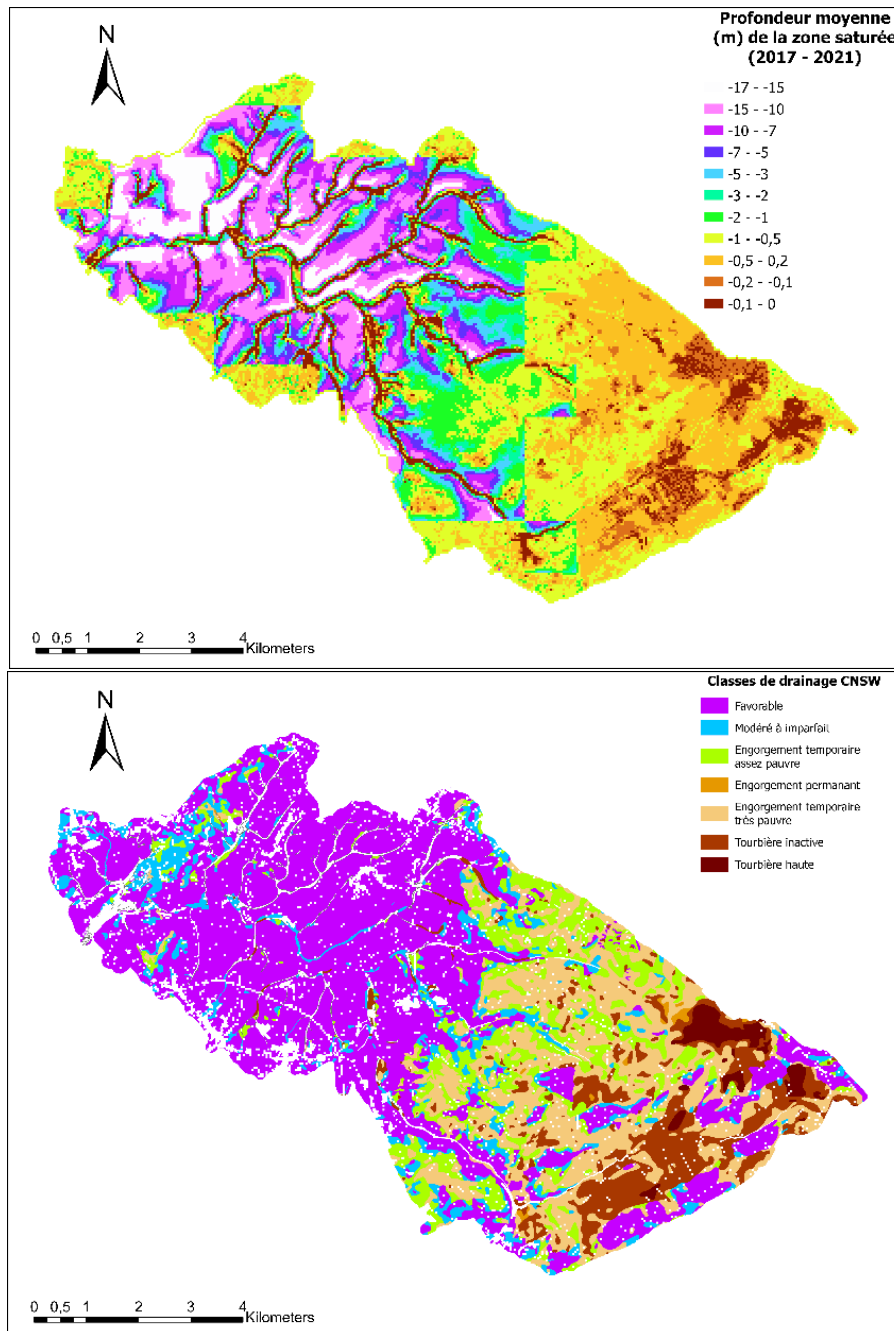
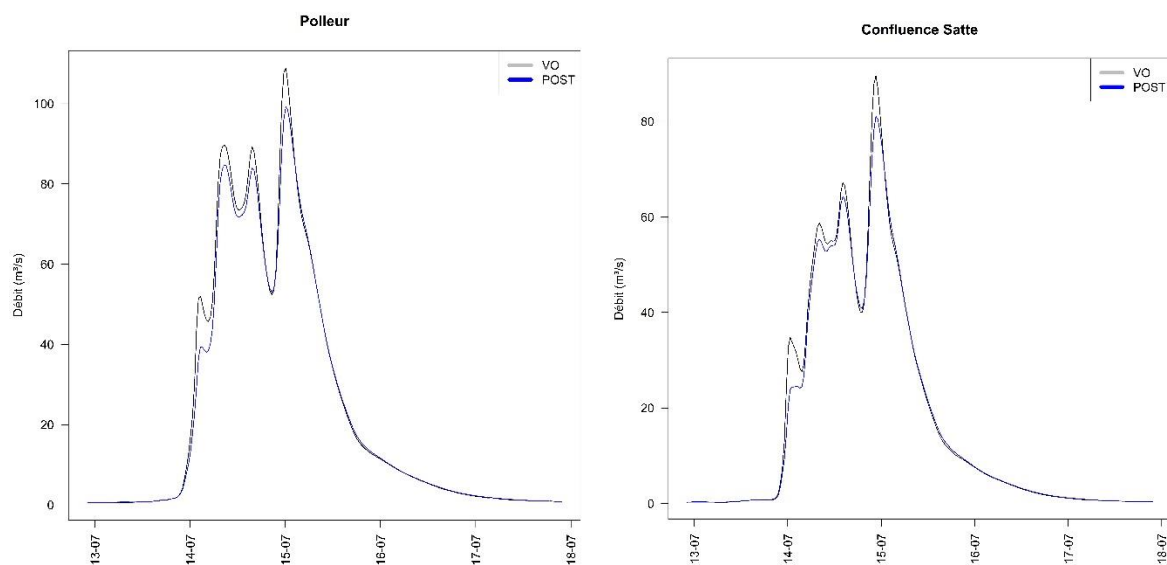


Figure 23 : Comparaison entre la modélisation de la profondeur (m) moyenne de la zone saturée (calculée de 2017 à 2021) et la carte des classes de drainage issue de CNSW sur le bassin versant forestier (Hoëgne).

2.5.2 Effet des aménagements sur les inondations : débit à l'exutoire

Hydrogrammes

L'analyse des hydrogrammes de l'évènement de juillet 2021 (Figure 24) permet d'identifier une diminution tangible du pic de crue ainsi que du volume écoulé durant les épisodes considérés. La diminution du pic de crue (débit maximum simulé) approche les 10% pour une diminution du volume de l'ordre de 7%. Pour cet évènement, le décalage temporel du pic de crue est négligeable.



	site_ref	QMax delta (%)	Qmax Time delta (min)	Vol. tot. delta (%)
1	Polleur	-9	< 15 min	-7
2	Confluence Satte	-10	< 15 min	-7

Figure 24: Hydrogrammes, décalage temporel du pic de crue, différence relative en termes de débit maximal et de volume total modélisés à l'exutoire du bassin versant forestiers (à Polleur) et à la confluence avec la Statte pour les périodes du 13 au 18 juillet 2021.

Débits maximums

L'analyse des débits maximums modélisés à Polleur et à la confluence avec la Statte montre une réduction des débits de pointe, engendrée par les aménagements, de l'ordre de 9% et 11%, respectivement (Figure 25). On observe une atténuation (de 2% des débits de pointe) des effets des aménagements entre le bassin dont l'exutoire est la confluence avec la Statte (plus en amont) et le bassin dont l'exutoire est à Polleur. Cela est, notamment, causé par le fait que la partie amont est plus aménagée, proportionnellement en termes de surfaces, que la partie aval du bassin versant.

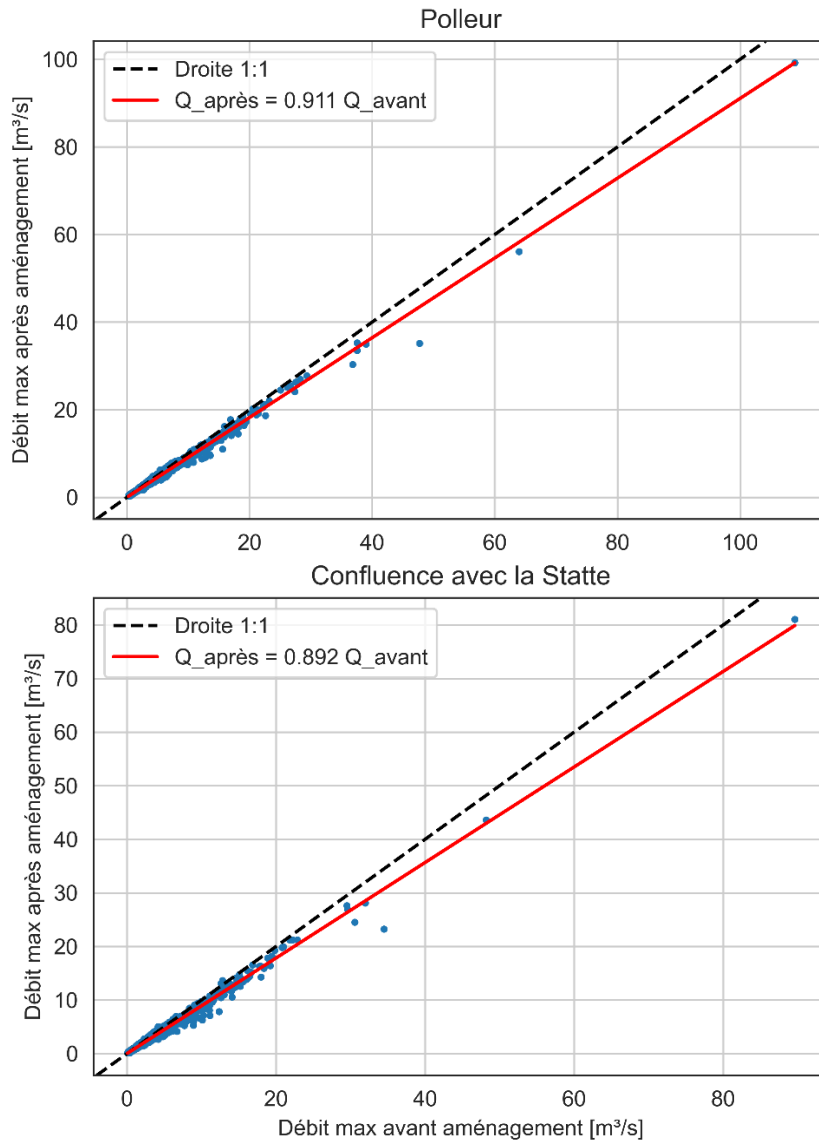


Figure 25 : Nuages de points représentant des couples de débits maximums modélisés avant et après aménagement par évènement à Polleur et à la confluence avec la Statte (Hoëgne).

QDF et hydrogrammes monofréquences

L'analyse des courbes QDF semble être en accord avec les observations faites précédemment. On observe que les aménagements provoquent globalement une diminution des débits. Néanmoins, cette diminution semble être plus importante plus la durée des débits maximums considérée est faible. Ainsi, pour une période de retour de 100 ans, le débit maximum à Polleur passe de environs $70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à environs $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ après aménagement, si la durée considérée est de 1h. En revanche, si la durée considérée est de 48h, on n'observe quasiment pas de diminution du débit maximum après aménagement.

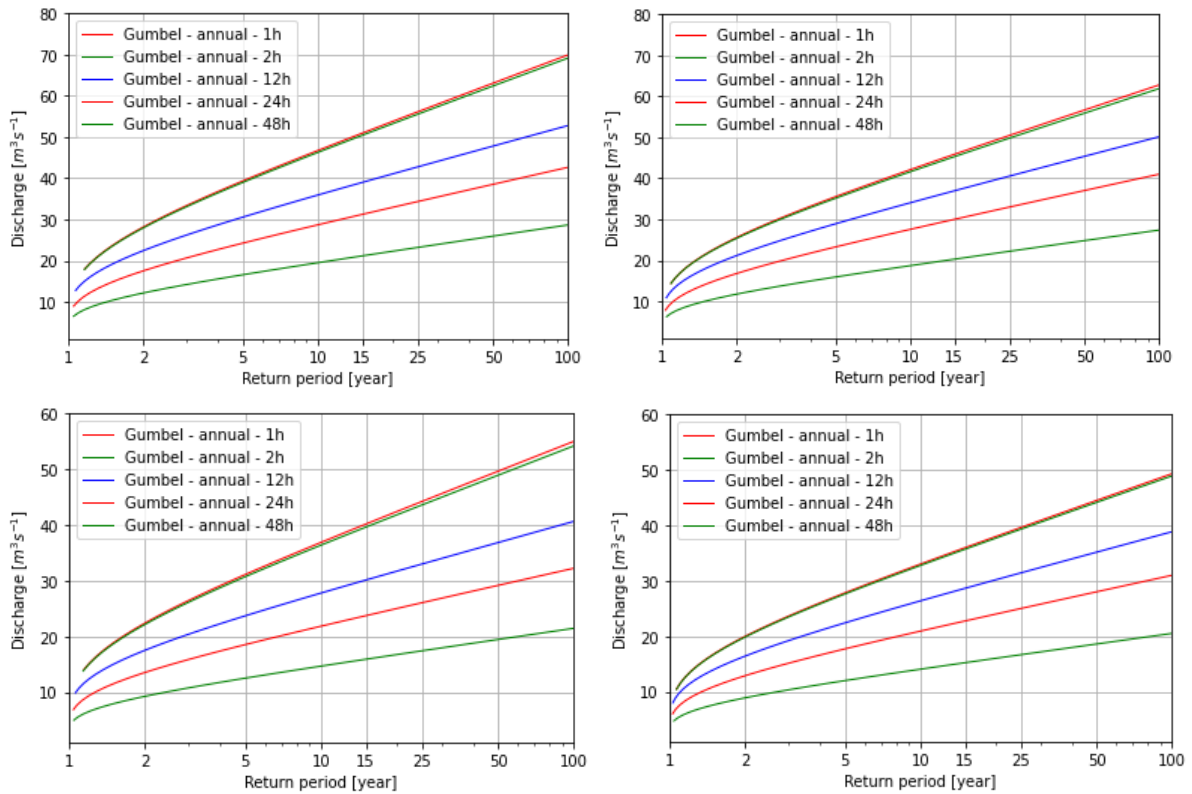


Figure 26 : courbes QDF générées à partir des chroniques de débits modélisés à Polleur (en haut) et à la confluence avec les Statte (en bas) de 2003 à 2021, avant (à gauche) et après (à droite) aménagement.

Les hydrogrammes médians (provenant des hydrogrammes où le débit maximal annuel est dépassé pendant une heure) semblent montrer que le temps de montée est augmenté de l'ordre de 2 heures après aménagements. Ce décalage temporel de l'arrivée du pic de crue n'est pas visible pour l'événement de juillet 2021. Néanmoins, il est fort probable qu'un décalage temporel soit plus marqué pour des événements de plus faibles ampleur (qui sont pris en compte dans la génération des hydrogrammes médians).

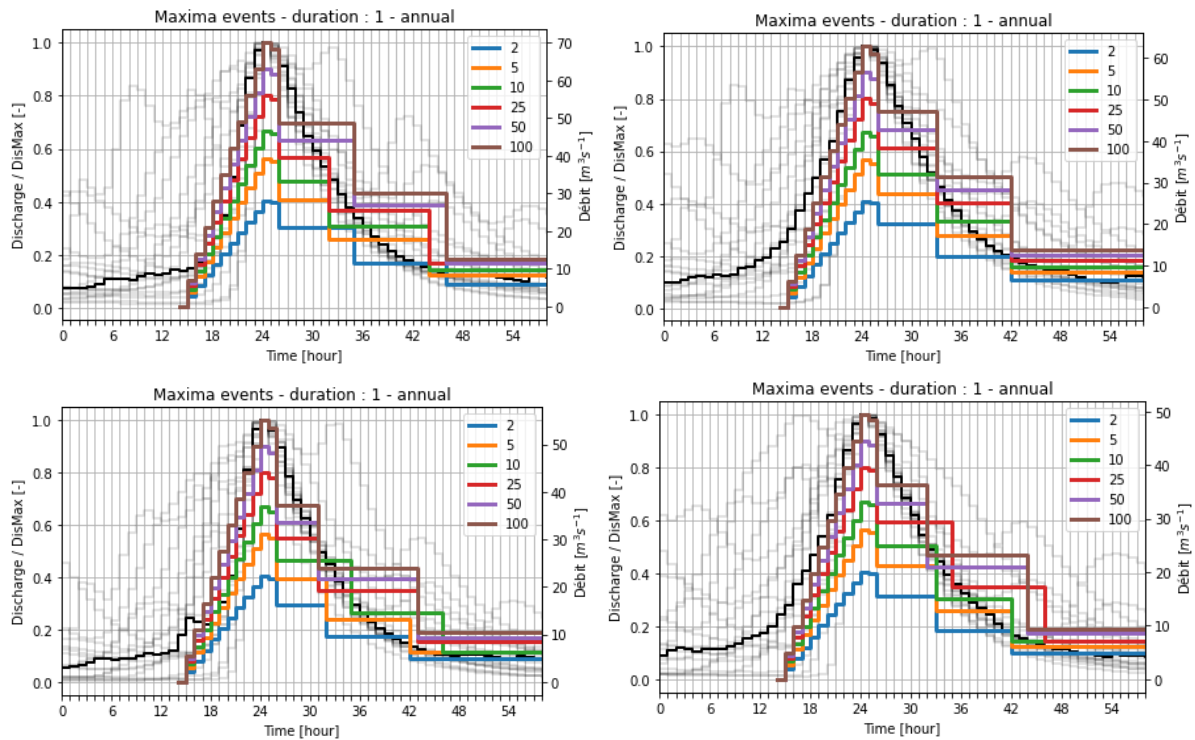


Figure 27: Hydrogrammes synthétiques (temps de montée = 10h) générés à partir des chroniques de débits modélisés à Polluer (en haut) et à la confluence avec la Statte (en bas) de 2003 à 2021, avant (à gauche) et après (à droite) aménagement.

2.5.3 Effet des aménagements sur les inondations : fonctionnement hydrologique du bassin versant

Coefficient d'écoulement

Les coefficients d'écoulement de l'évènement de juillet 2021 montrent que la majorité du ruissellement provient de l'amont du bassin versant (Figure 28). Cela est en accord avec la carte des classes de drainage naturel issue de la CNSW qui montre que les sols en amont ont une capacité d'infiltration moindre qu'en aval (Figure 23). De plus, pour l'évènement de juillet 2021, les aménagements réalisés en amont (principalement A1), semblent être assez peu efficaces comparés aux aménagements faits plus en aval (principalement A2 et A5) (Figure 13).

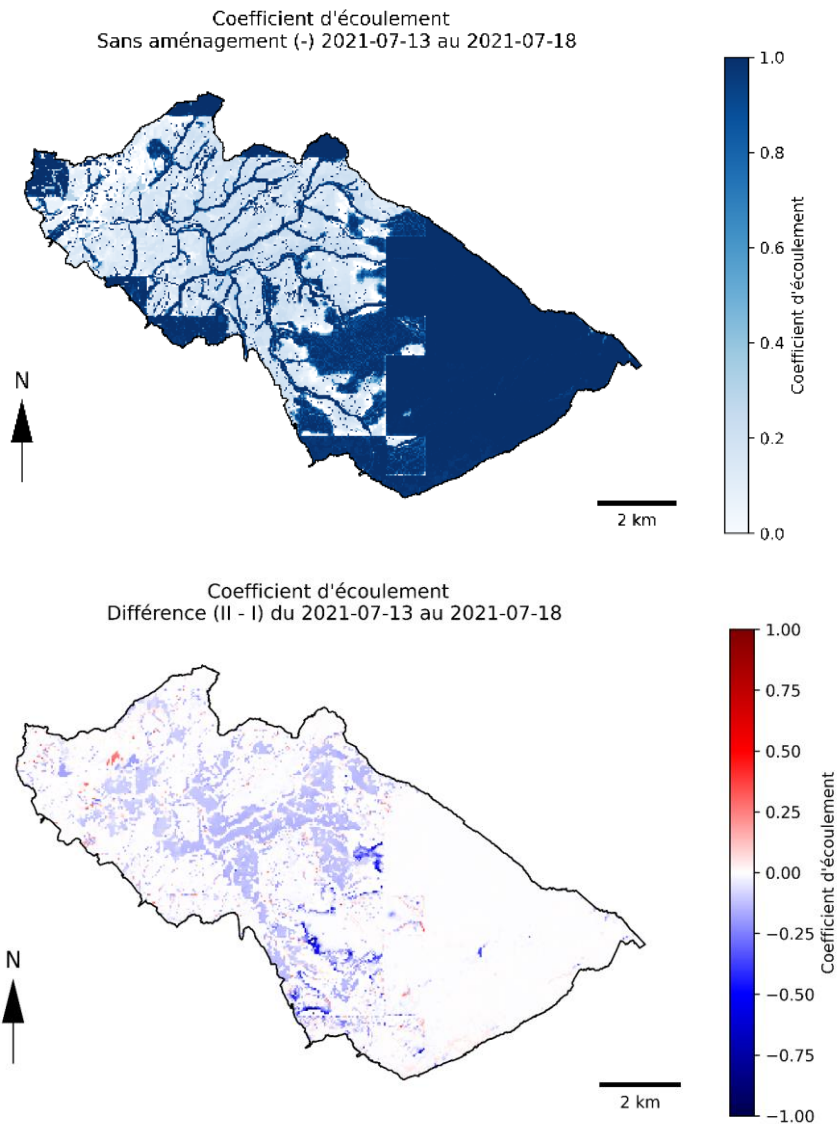


Figure 28 : Coefficients d'écoulement du 13 juillet au 18 juillet 2021 avant aménagement (en haut), et différence après – avant aménagement (en bas). Les quantités ruisselées diminuent dans les zones en bleu.

Dynamique des écoulements de surface

Concernant la dynamique des écoulements, il semblerait que les vitesses d'écoulement en surface à l'amont du bassin versant soient plus importantes qu'à l'aval (Figure 29). Cela peut sembler contre-intuitif car les pentes à l'aval du bassin sont plus importantes qu'à l'amont (Figure 3). Néanmoins, les faibles quantités de ruissèlement produites à l'aval génèrent un écoulement intermittent et peuvent ainsi expliquer une diminution de la vitesse médiane durant les événements sélectionnés (Figure 28). Les pixels d'écoulements rapides visibles en aval correspondent à des zones imperméabilisées.

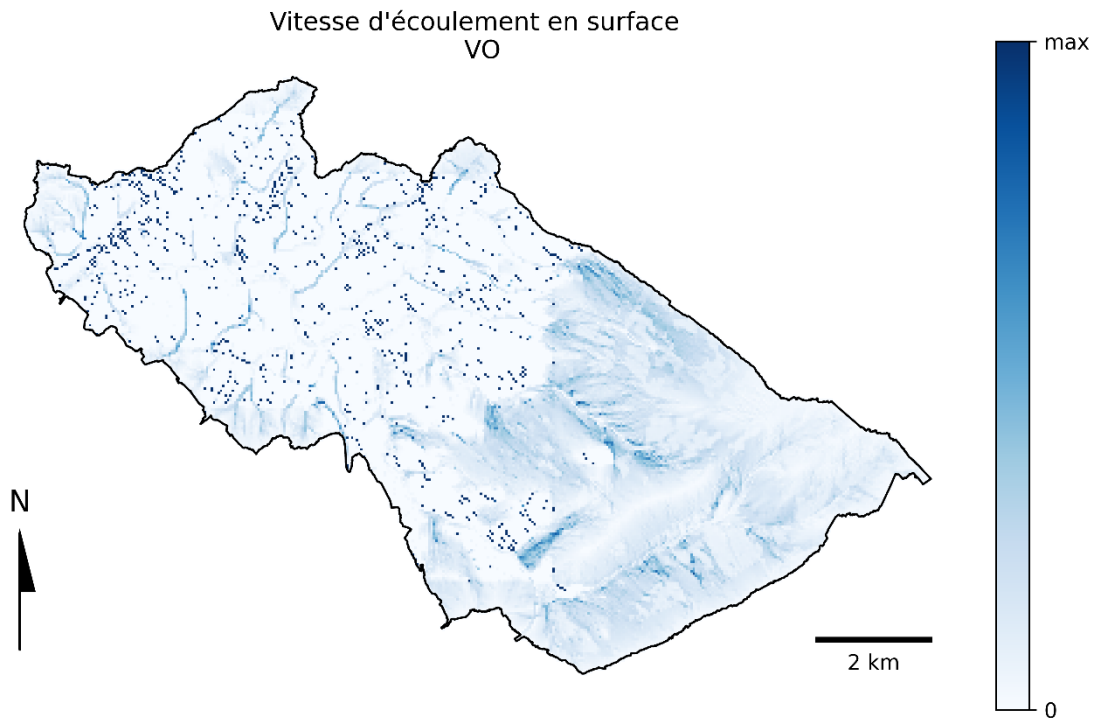


Figure 29 : Vitesse médiane des écoulements de surface pour les évènements pluvieux de plus de 30 mm : situation avant aménagement.

Les vitesses d'écoulement en surface après aménagement semblent principalement diminuer en amont du bassin versant et proche du réseau hydrographique. Néanmoins, ces différences ne sont pas visibles au niveau des zones d'action de restauration des tourbières à partir de landes humides (Figure 13, A1). On observe quasiment aucun effet sur les vitesses dans les zones en aval du bassin concernées par des pratiques forestières limitant la compaction des sols (Figure 13, A5). Cela semble montrer que l'amélioration des propriétés d'infiltration d'un sol déjà infiltrant n'a un impact que si l'intensité de la précipitation dépasse la capacité d'infiltration du sol. Dans le cas de l'évènement de juillet 21, la précipitation a dépassé la capacité d'infiltration des sols en aval du bassin versant. Les actions de pratiques forestières limitant la compaction des sols ont eu un effet dans ce cas-là (Figure

28).

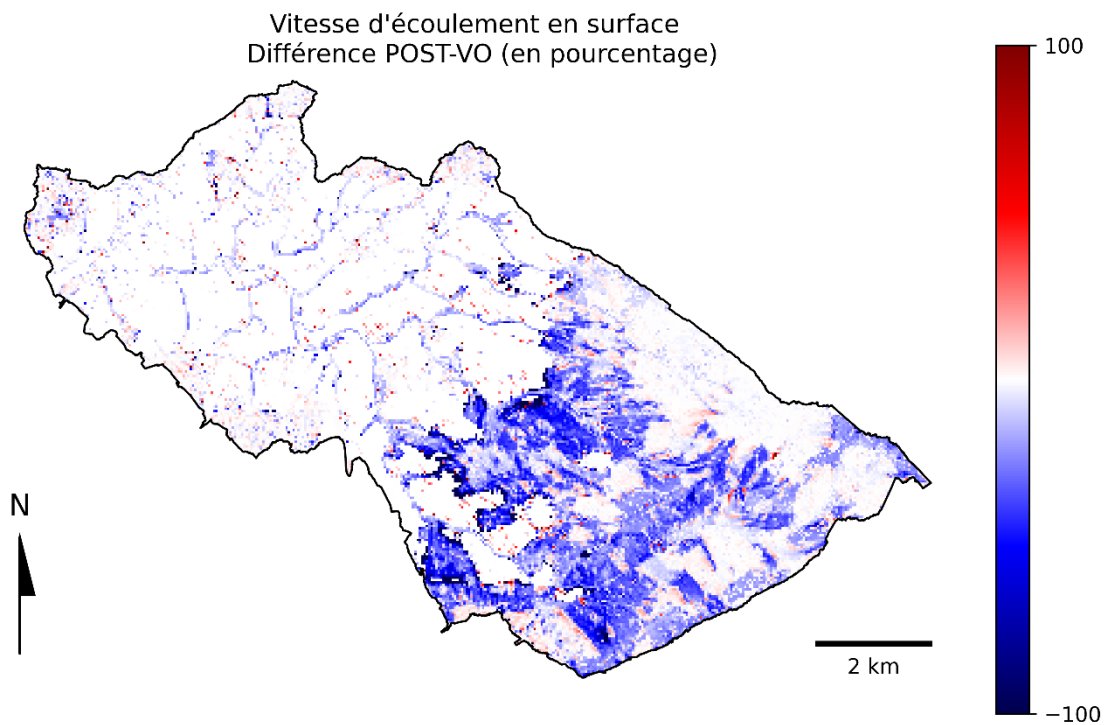


Figure 30 : Vitesse médiane des écoulements de surface pour les événements pluvieux de plus de 30 mm : différence en pourcentages entre la situation après (POST) et avant (VO) aménagement.

Efficacité des aménagements en termes de réduction du ruissellement

La Figure 31 représente l'efficacité moyenne (en termes de réduction du ruissellement) par type d'aménagement pour les événements ayant généré plus de 5 mm de ruissellement dans les zones concernées. Cette visualisation permet de mettre en évidence une efficacité moyenne plus importante des conversions de résineux en forêts feuillues mixtes. La conversion de landes en futures tourbières ne semble pas avoir d'effet sur en termes de réduction de ruissellement.

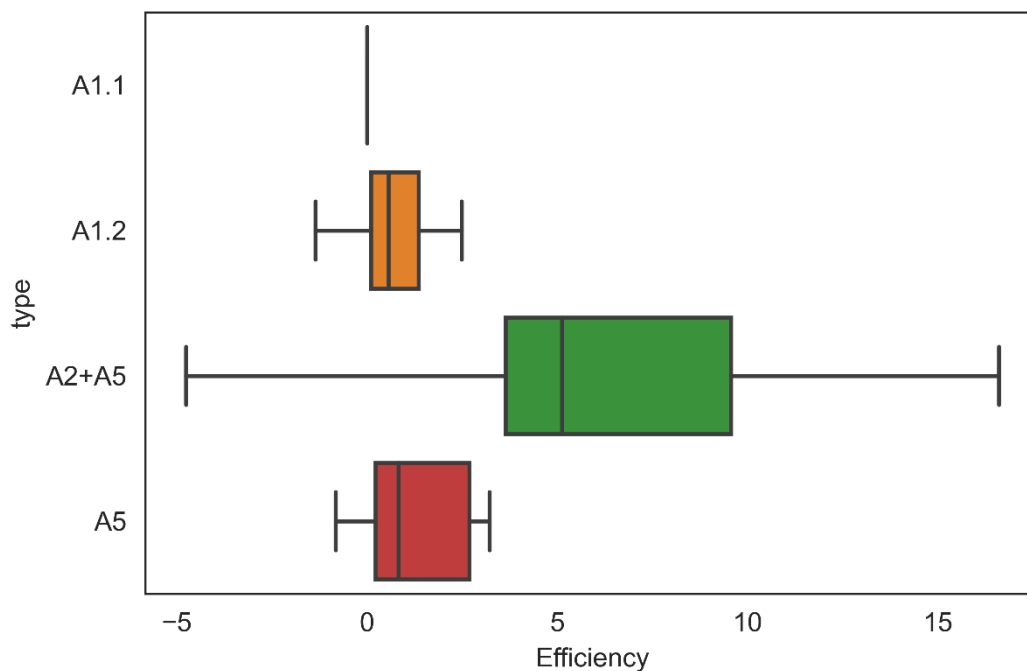


Figure 31 : Réduction du ruissellement (en %) selon la stratégie d'aménagement utilisée : restauration de landes tourbeuses (A1.1), conversion de forêt de résineux en lande tourbeuse (A1.2) ou en forêt feuillue (A2) et de pratiques forestières limitant la compaction des sols (A5).

Dans la synthèse de la Figure 31, les pratiques forestières limitant la compaction des sols (A5) ont une efficacité variable mais limitée en termes de réduction du ruissellement. Pourtant, la carte des coefficients d'écoulements pour l'événement de juillet 2021 semble montrer une diminution du ruissellement dans ces zones. D'ailleurs, la valeur d'efficacité pour cet événement est bien de 9 %, ce qui est assez élevé par rapport à la médiane. Cela peut être expliqué par le fait que ces aménagements (de types A5) sont principalement mis en place sur des sols à drainage favorables, dont la capacité d'infiltration n'est dépassée que lors d'événements de grande ampleur, impliquant de grands volumes (ex : juillet 2021). Si la capacité d'infiltration du sol n'est pas dépassée dans la situation initiale, il ne peut pas y avoir d'effet des aménagements. Il semblerait d'ailleurs que l'efficacité des aménagements A5 soit corrélée avec le volume précipité ($R = 0,45$ et $p\text{-valeur} = 0,09$). La $p\text{-valeur}$ indique la probabilité de conclure à tort qu'une corrélation existe. En termes simples, il y a 91% de chances que l'efficacité des aménagements A5 soit corrélée au volume précipité.

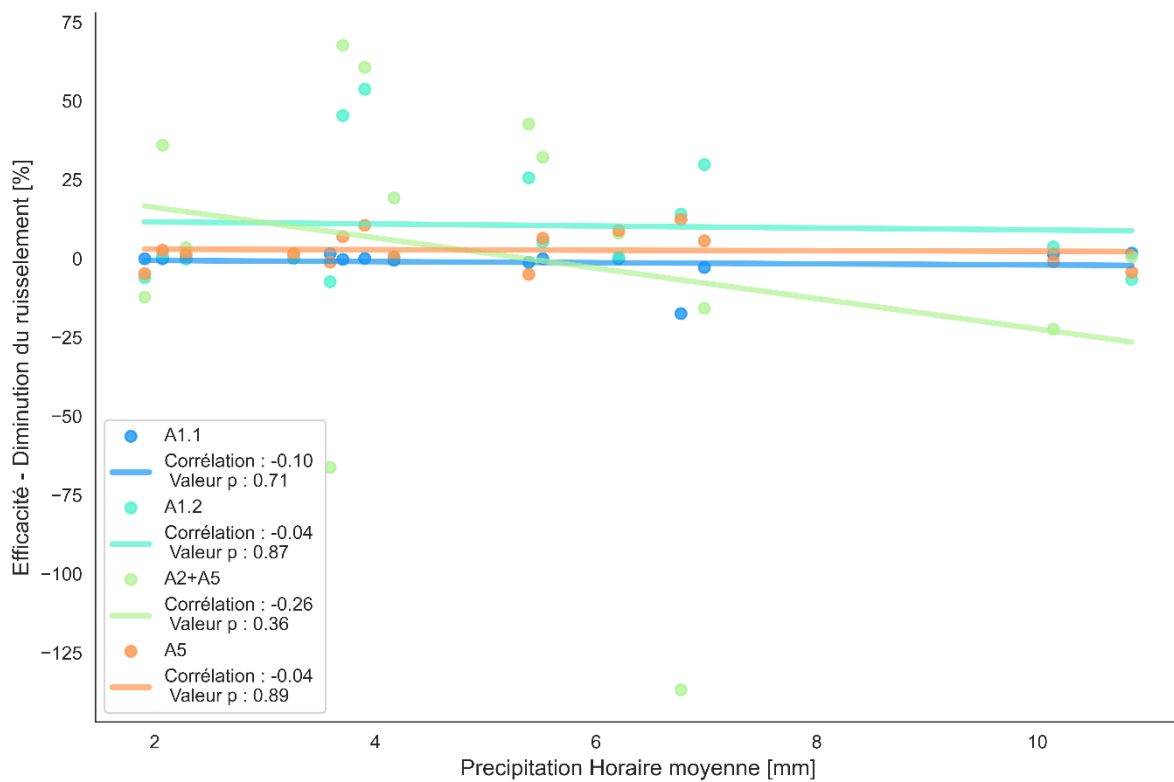
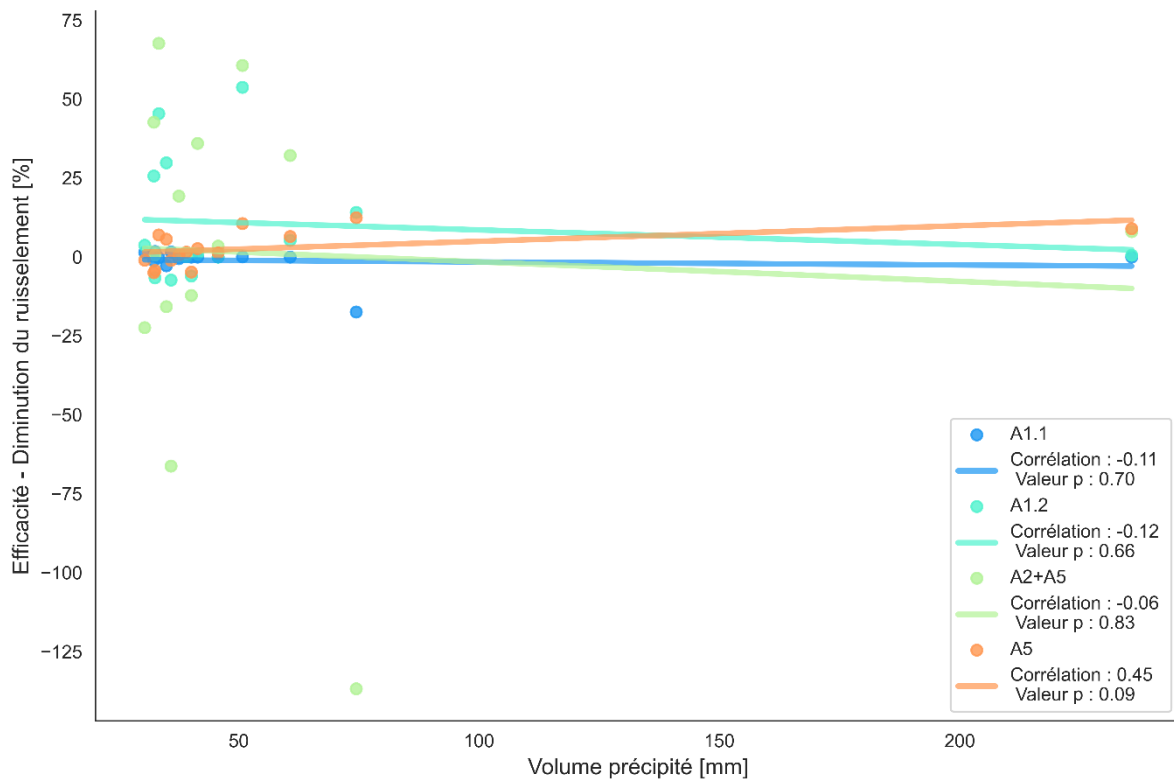


Figure 32 : Analyse de l'efficacité moyenne de la réduction du ruissellement par type d'aménagement au regard du volume et de l'intensité moyenne de précipitations durant l'évènement.

2.5.4 Effet des aménagements sur les sécheresses

Bilan simplifié

Hoëgne	A1.1	51	25	173	19	3	3	267	39	-1	0	359	368
	A1.2	91	72	325	128	5	18	372	59	7	31	506	540
	A2+A5	90	71	399	348	19	63	374	61	49	136	339	372
	A5	95	60	425	453	15	24	420	61	78	281	302	360
	Hoëgne	77	43	345	322	153	185	359	50	59	176	380	416
Hoëgne	A1.1	-0	0	0	-0	-0	-0	0	0	-0	-0	0	0
	A1.2	-7	-36	29	8	-1	-0	44	-10	-2	7	-7	-1
	A2+A5	11	-35	15	58	-2	-4	135	-6	-44	22	-11	-1
	A5	-0	0	-1	-0	0	-1	2	0	1	-1	9	9
	Hoëgne	0	-4	2	6	-1	-1	13	-1	-2	3	2	3
		Interception - été	Interception - hiver	Infiltration - été	Infiltration - hiver	Résurgence - été	Résurgence - hiver	Evapotranspiration - été	Evapotranspiration - hiver	Recharge - été	Recharge - hiver	Stock sol - été	Stock sol - hiver

Figure 33 : Valeur (VO : en haut) et différence (POST – VO : en bas) absolue moyenne sur 19 ans des flux et stocks d'eau exprimés en mm par semestre hydrologique (été - hiver) en fonction des différents aménagements (A1.1, A1.2, A2+A5, A5) et sur l'ensemble du bassin versant de la Hoëgne.

Une première constatation sur base des bilans réalisés sur les différents types d'aménagements est que les aménagements de type A1.1 n'ont pas d'effets tangibles sur la partition des flux d'eau. En revanche, les effets sont les plus importants au niveau des aménagements de type A2 + A5 (conversion de forêts de résineux en forêts feuillues avec des pratiques forestières limitant la compaction des sols). Dans ces zones, on observe une augmentation de 125 mm de l'évapotranspiration en été et une diminution de 7 mm en hiver. L'infiltration moyenne augmente de 58 mm en hiver et de 15 mm en été. Néanmoins, ce surplus d'infiltration ne compense pas les exports liés l'augmentation de

l'évapotranspiration. Cela a pour conséquence de diminuer les quantités d'eau dans le sol, principalement en été. La recharge annuelle est alors diminuée de 22 mm en moyenne.

Les pratiques forestières limitant la compaction des sols (A5) permettent d'augmenter visiblement le stock d'eau dans les sols. En revanche, l'infiltration, l'évapotranspiration et la recharge moyenne ne semblent pas être affectées.

Les pratiques A1.2 semblent offrir un bon compromis. Elles permettent en moyenne d'augmenter l'infiltration et la recharge, tout en augmentant l'évapotranspiration. La légère diminution de la quantité d'eau dans le sol semble être sans impact pour la végétation (sols tourbeux et para-tourbeux initialement très humides). Il se peut que l'augmentation de l'infiltration (annuelle) soit liée à une diminution de l'interception, entraînant plus d'eau à la surface du sol. Cela est dû au passage d'une végétation de résineux dont le couvert est assez dense vers une végétation plus ouverte. Néanmoins, il n'y a pas d'augmentation flagrante de l'infiltration pour l'événement de juillet 2021, dans ces zones car l'interception est négligeable de ce cas de figure. Il s'agit ici d'un effet visible à plus long terme.

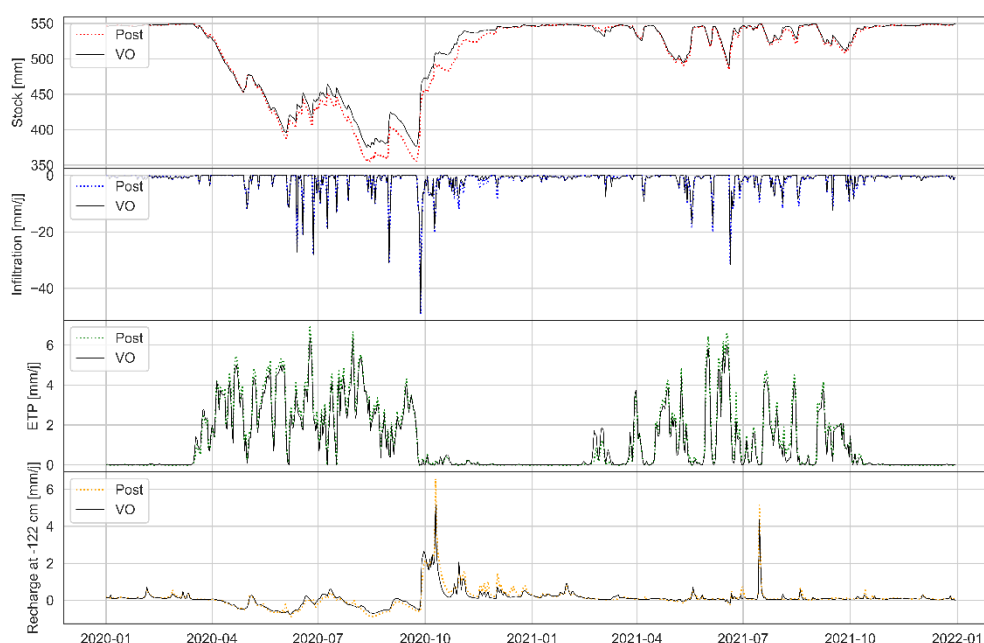


Figure 34 : Bilan moyen des zones concernées par les aménagements A1.2 : moyenne des stocks d'eau dans les 120 premiers centimètres du sol, de l'infiltration, de l'évapotranspiration et de la recharge à 120 centimètres entre 2020 et 2022.

Les aménagements de type A2 + A5 semblent permettre une infiltration plus importante lors de l'événement de juillet 2021 (environ + 20 mm/j) (Figure 35). On observe aussi que le changement de végétation vers des feuillus provoque une augmentation de l'évapotranspiration estivale ainsi qu'un assèchement du sol plus important. Le sol étant plus sec (principalement en fin d'été), cela permet une infiltration plus importante (principalement en automne). Néanmoins, cette situation peut s'inverser en fin d'hiver et au début de printemps étant donné que les résineux conservent leur feuillage et transpirent plus durant ces périodes. Concernant la recharge, on remarque qu'elle augmente ponctuellement, principalement en hiver. Néanmoins, les remontées capillaires estivales compensent largement ce gain de recharge hivernale (Figure 33).

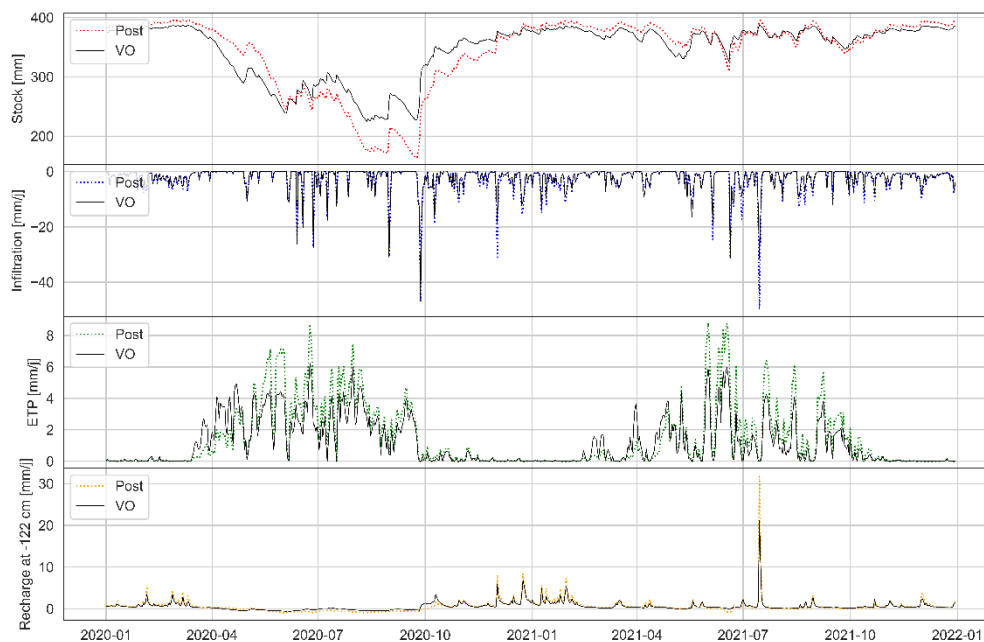


Figure 35 : Bilan moyen des zones concernées par les aménagements A2 + A5 : moyenne des stocks d'eau dans les 120 premiers centimètres du sol, de l'infiltration, de l'évapotranspiration et de la recharge à 120 centimètres entre 2020 et 2022.

Le stock d'eau dans les sols concernés par les aménagements A5 est visiblement augmenté toute l'année. L'infiltration n'augmente visiblement que lors de l'événement de juillet 2021. Cette augmentation d'infiltration est relativement importante (de l'ordre de 15 mm/j).

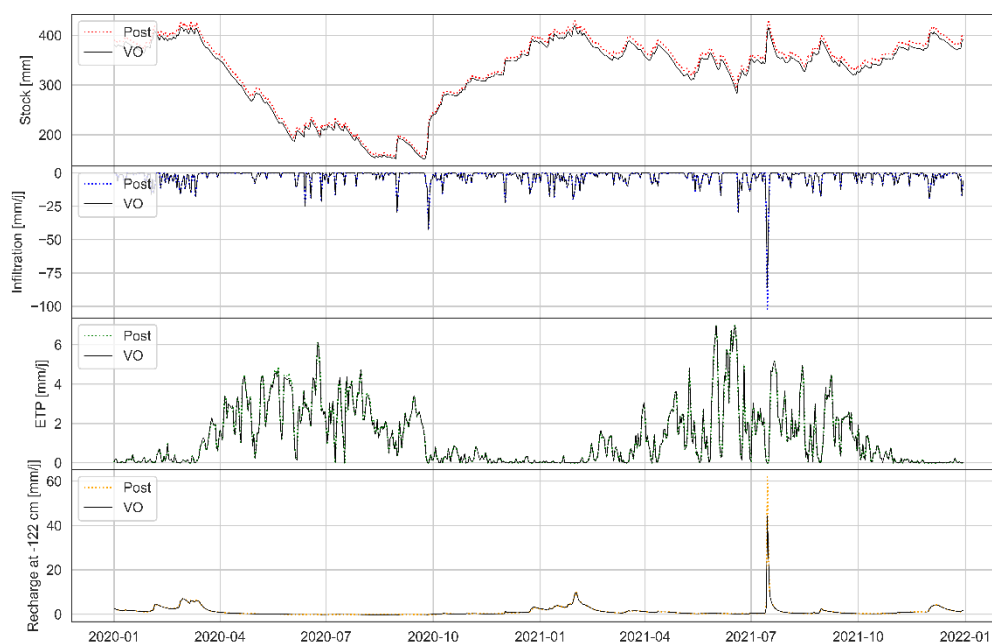


Figure 36 : Bilan moyen des zones concernées par les aménagements A5 : moyenne des stocks d'eau dans les 120 premiers centimètres du sol, de l'infiltration, de l'évapotranspiration et de la recharge à 120 centimètres entre 2020 et 2022.

Indicateur de stress hydrique pour les plantes

Les zones où la végétation est potentiellement susceptible à des stress hydriques sont concentrées à l'aval du bassin versant, là où les sols ont un drainage naturel favorable.

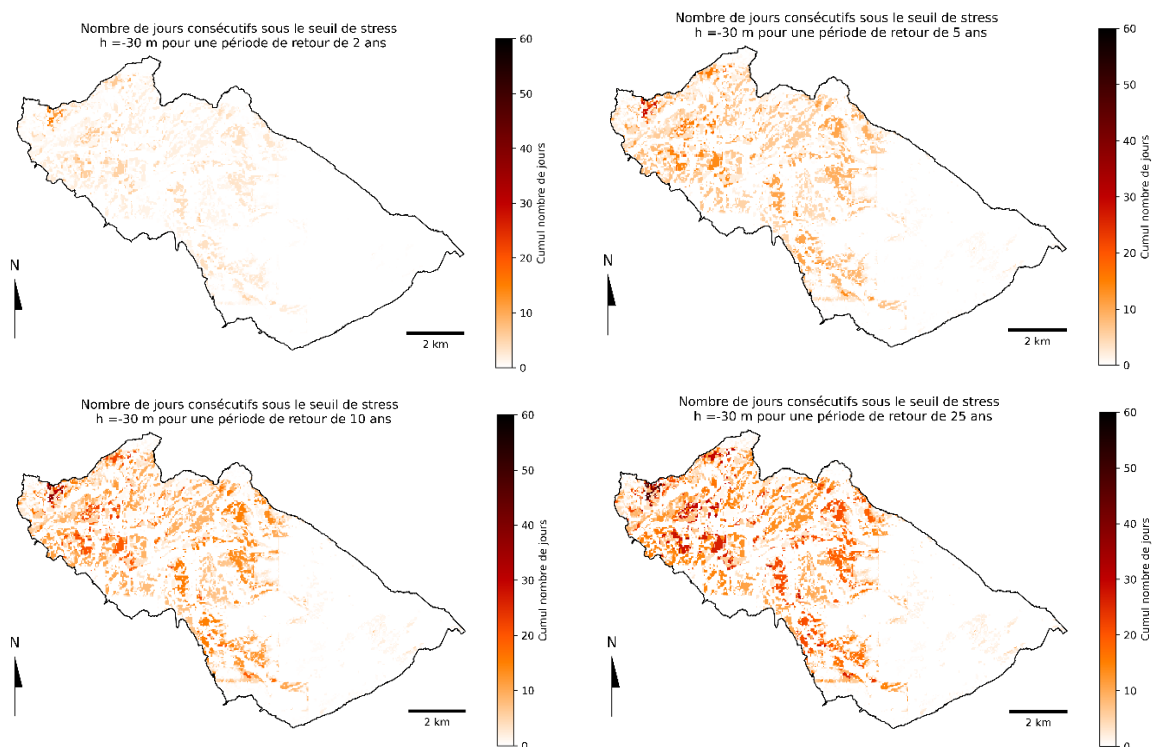


Figure 37 : Nombre de jours consécutifs sous un seuil de stress modéré (-30 m de pression hydrostatique) pour différentes périodes de retour considérées (2, 5, 10 et 25 ans) : bassin versant forestier.

Les aménagements semblent généralement améliorer la situation concernant la susceptibilité de la végétation aux stress hydriques. Les zones où l'on observe cette amélioration coïncident avec les zones concernées par les aménagements de type A2+A5 et A5. Pour les zones A2+A5, il semblerait que cette amélioration soit associée au changement de végétation dont l'augmentation de la profondeur racinaire compense la diminution de quantité d'eau dans le sol. Pour les zones A5, cette amélioration est uniquement due à une augmentation des quantités d'eau dans le sol lié à une amélioration de la porosité. La végétation ne change pas dans ces zones.

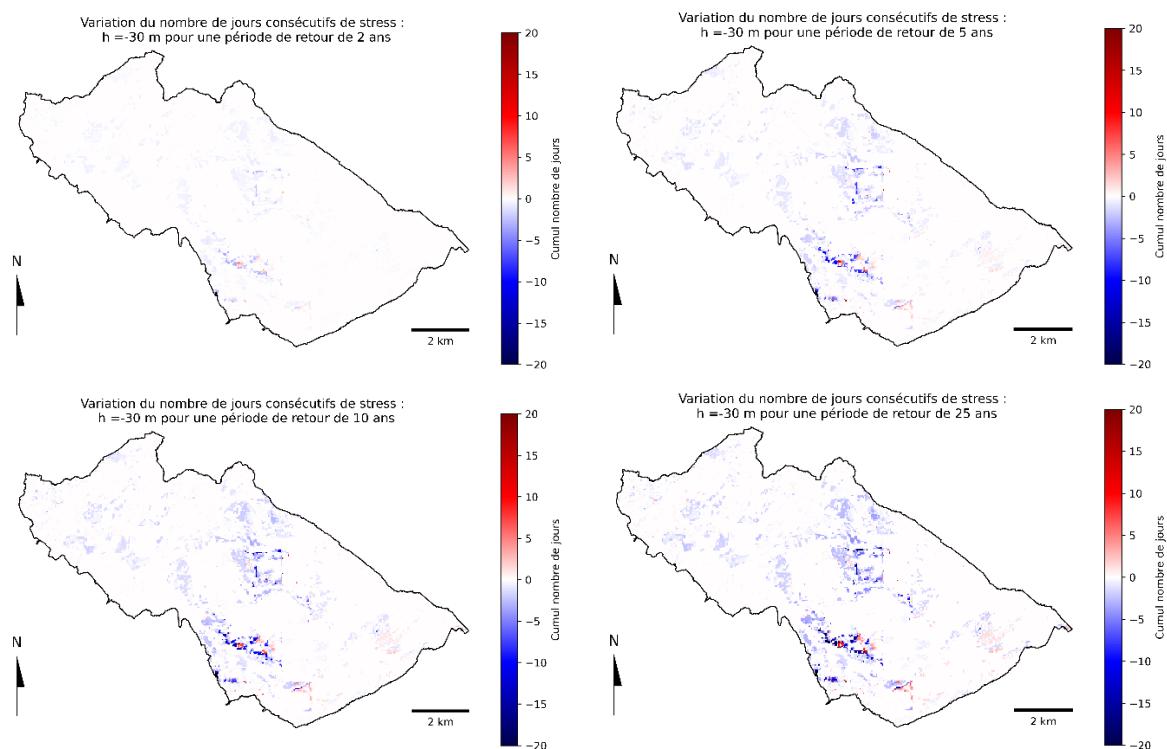


Figure 38 : Différence après – avant aménagement du nombre de jours consécutifs sous un seuil de stress modéré (-30 m de pression hydrostatique) pour différentes périodes de retour considérées (2, 5, 10 et 25 ans) : bassin versant forestier. Dans les zones en bleu, le nombre de jours de stress consécutif diminue.

2.6 Résultats de modélisation : bassin versant de la Helle

2.6.1 Calibration et validation

Validation des débits

Dans le cadre de la modélisation du bassin versant de la Helle, la validation des débits se réalise en deux endroits. Le premier correspond à l'exutoire de la Helle situé en amont du tunnel déviant une partie des eaux de la Helle vers le barrage d'Eupen. Le second correspond à une station située à l'exutoire du bassin de Cléfaye ; un petit bassin de 14 ha entièrement tourbeux (tourbière haute intacte) situé en amont de la Helle. Cette station avait été installée dans le cadre du projet plan « P.L.U.I.E.S » entre 2013 et 2015.

Tableau 6 : analyse des débits simulés et observés à l'exutoire de la Helle et à l'exutoire du bassin de Cléfaye. ME : erreur moyenne (m^3/s) ; MAE : erreur moyenne absolue (m^3/s) ; RMSE : racine de l'erreur quadratique moyenne (m^3/s) ; STDres : écart-type des résidus (m^3/s) ; R : coef. corrélation ; R^2 - Nash : coefficient de Nash-Sutcliffe.

Année	ME	MAE	RMSE	STDres	R	R^2 - Nash
Helle						
2012	0,413	0,510	1,029	0,942	0,894	0,662
2013	0,226	0,438	0,929	0,901	0,811	0,600
2014	0,160	0,318	0,607	0,586	0,918	0,825
2015	0,196	0,369	0,723	0,696	0,890	0,760
2012-2015	0,194	0,375	0,766	0,741	0,863	0,728
Cléfaye						
2013	0,001	0,005	0,011	0,011	0,814	0,634
2014	0,001	0,003	0,007	0,006	0,915	0,833
2015	-0,001	0,002	0,006	0,006	0,914	0,826
2013-2015	0,001	0,004	0,009	0,009	0,866	0,737

Les résultats des différents indicateurs montrent une bonne concordance entre les débits mesurés et modélisés au niveau des deux points de mesure (Tableau 6). On observe néanmoins un léger biais au niveau des volumes atteints à l'exutoire de la Helle. L'erreur moyenne (ME) positive montre que les volumes modélisés sont plus faibles que les volumes observés. Cette observation est également visible au niveau du diagramme de dispersion de la Helle (Figure 39).

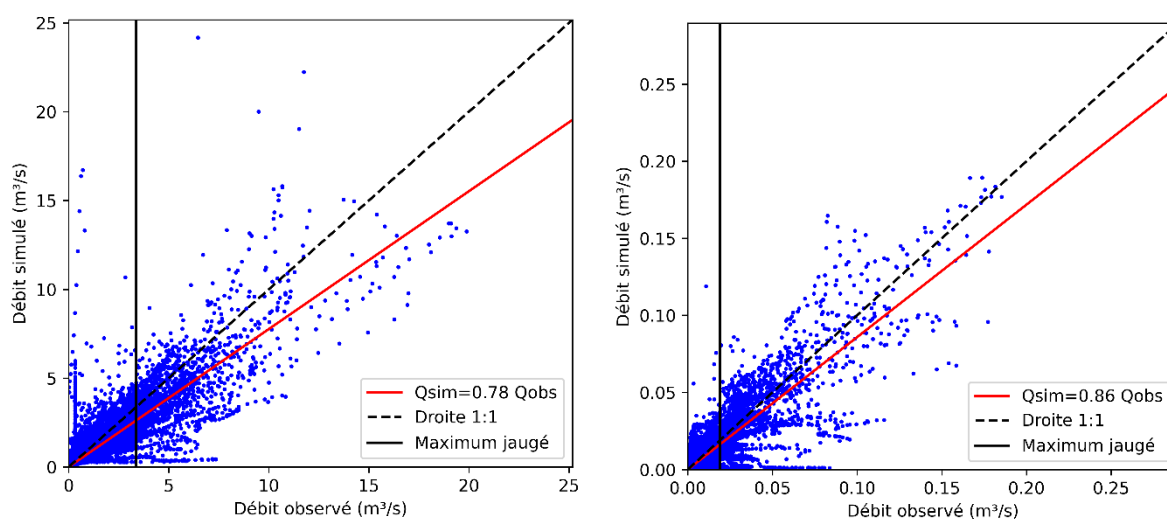


Figure 39 : Diagrammes de dispersion à l'exutoire du bassin versant de la Helle (à gauche) réalisé de 2012 à 2015 et du bassin versant de Cléfaye (à droite) réalisé de 2013 à 2015.

Validation de la dynamique verticale de la zone saturée

Comme pour le bassin versant forestier, la dynamique verticale de la zone saturée à différents points de contrôles est conforme à celle attendue (Figure 40).

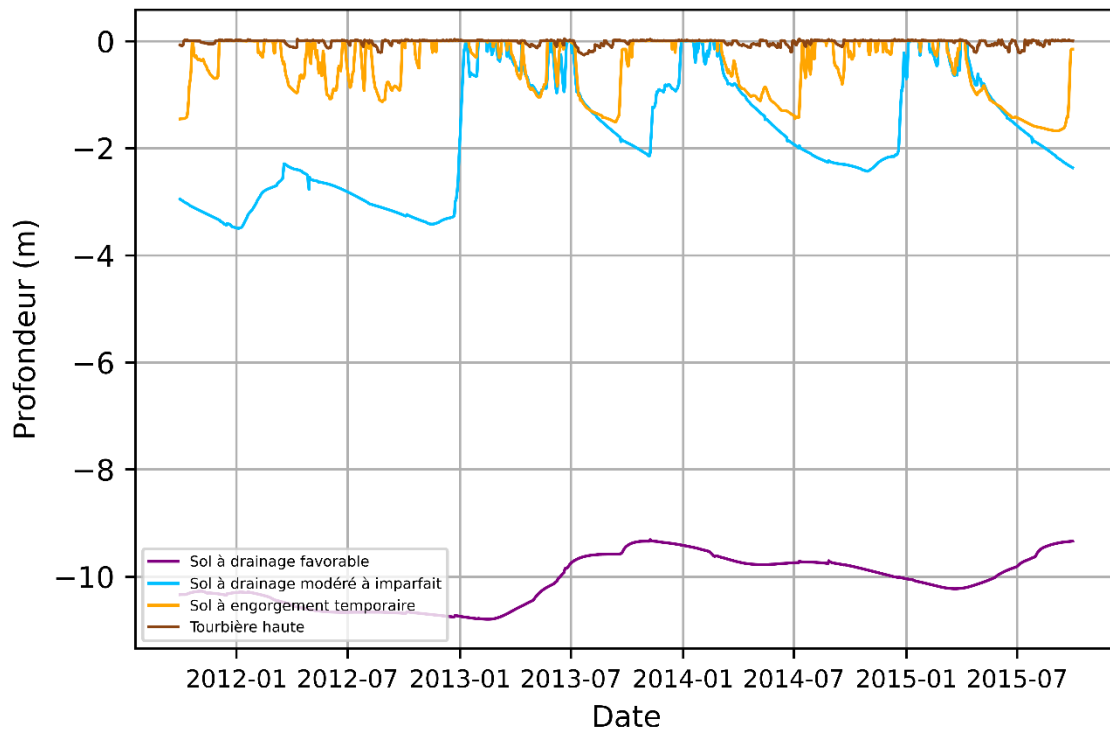


Figure 40 : Dynamique verticale de la zone saturée de 2012 à 2015 pour différents points de contrôles dans différents types de sols du bassin versant tourbeux (Helle).

Validation spatiale de la profondeur de la zone saturée

Les moyennes temporelles et spatialisées de la profondeur de la zone saturée montrent une assez bonne spatialisation de la dynamique de la zone saturée (Figure 41). Néanmoins, on observe toujours cette pixélisation liée à la définition dans le modèle du socle géologique. On observe aussi que

certaines zones de drainages favorables en amont du bassin sont plus humides dans le modèle que ne semble dire la CNSW.

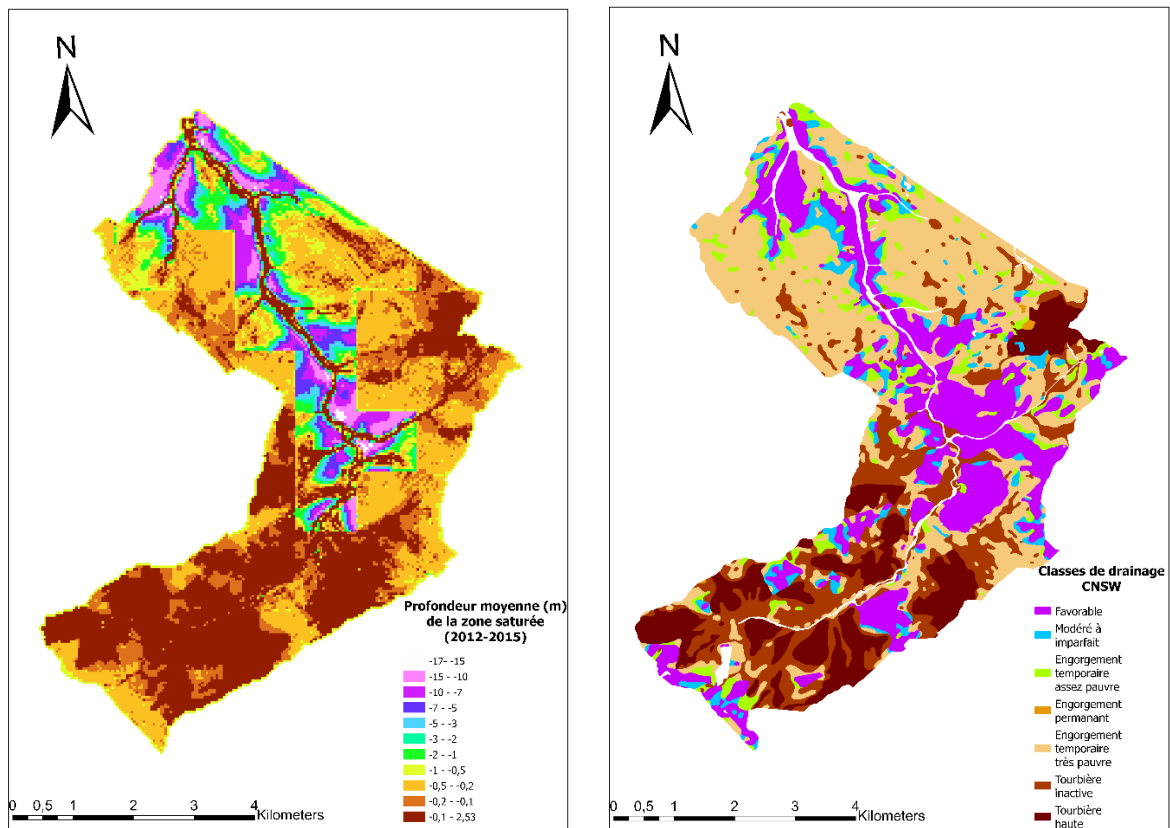
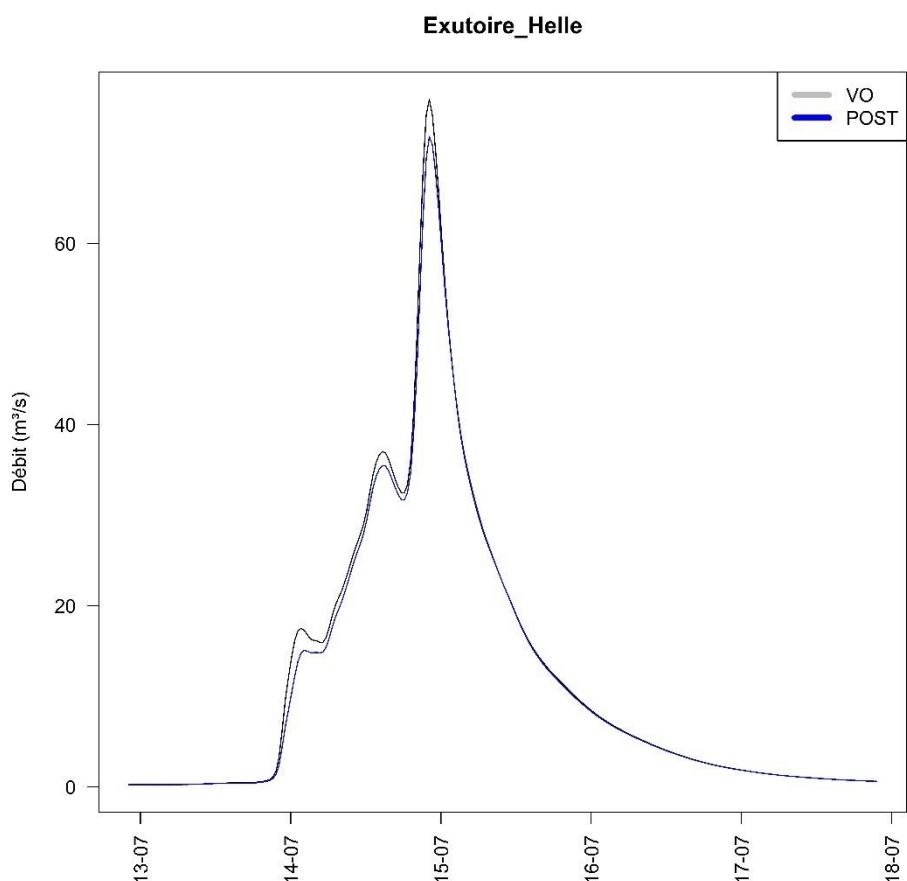


Figure 41 : Comparaison entre la modélisation de la profondeur (m) moyenne de la zone saturée (calculée de 2013 à 2015) et la carte des classes de drainage issue de CNSW sur le bassin versant tourbeux (Helle).

2.6.2 Effet sur les inondations : A l'exutoire

Hydrogrammes

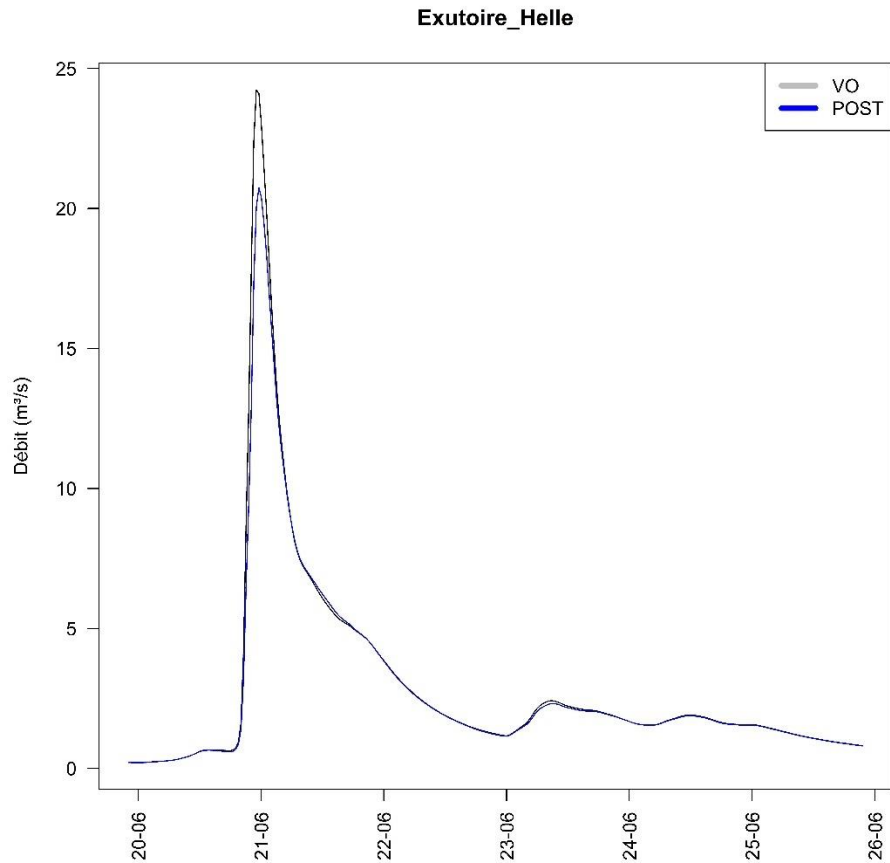
L'analyse des hydrogrammes de juillet 2021 montre une réduction de 5% du débit maximum atteint lors de l'événements à la suite des aménagements (voir 2.3.2 Helle). Le volume total est, quant à lui, réduit de 4%. Aucun effet significatif n'est visible sur la vitesse d'arrivée du débit maximum (Figure 42).



site_ref	QMax delta (%)	Qmax Time delta (min)	Vol. tot. delta (%)
1 Exutoire_Helle	-5	< 15 min	-4

Figure 42 : Hydrogrammes, décalage temporel du pic de crue, différence relative en termes de débit maximal et de volume total modélisés à l'exutoire du bassin versant tourbeux (Helle) pour les périodes du 13 au 18 juillet 2021.

Un second hydrogramme est également comparé à celui de juillet 2021. Il s'agit de l'hydrogramme de l'événement du 20 au 26 juin 2013 (Figure 43). Dans ce cas-ci, l'effet des aménagements est plus prononcé, avec une diminution de 14 % du débit maximum, de 4% du volume total et un décalage du débit maximum atteint de 30 min. Cela s'explique, notamment, par des dynamiques de précipitations différentes entre ces deux évènements. Dans le cas de la précipitation de juin 2013, celle-ci se fait en un seul temps. Les aménagements mis en place peuvent donc jouer pleinement leur rôle et atténuer cette onde unique. Dans le cas de la précipitation de juillet 2021, celle-ci se fait en deux, voire trois, temps. Les aménagements jouent leur rôle lors de la première onde de précipitation, mais ils sont complètement saturés lorsqu'arrive la seconde onde, qui génère la crue.



site_ref	QMax delta (%)	Qmax Time delta (min)	Vol. tot. delta (%)
1 Exutoire_Helle	-14	30	-4

Figure 43 : Hydrogrammes, décalage temporel du pic de crue, différence relative en termes de débit maximal et de volume total modélisés à l'exutoire du bassin versant tourbeux (Helle) pour les périodes du 20 au 26 juin 2013.

Débits maximums

Le nuage de points des débits maximums atteints à l'exutoire montre une réduction des débits de pointe d'environ 5% en moyenne (Figure 44). Cela montre que la réduction des débits maximums de 14% observés lors de l'évènement du 20 au 26 juin 2013 reste assez exceptionnel.

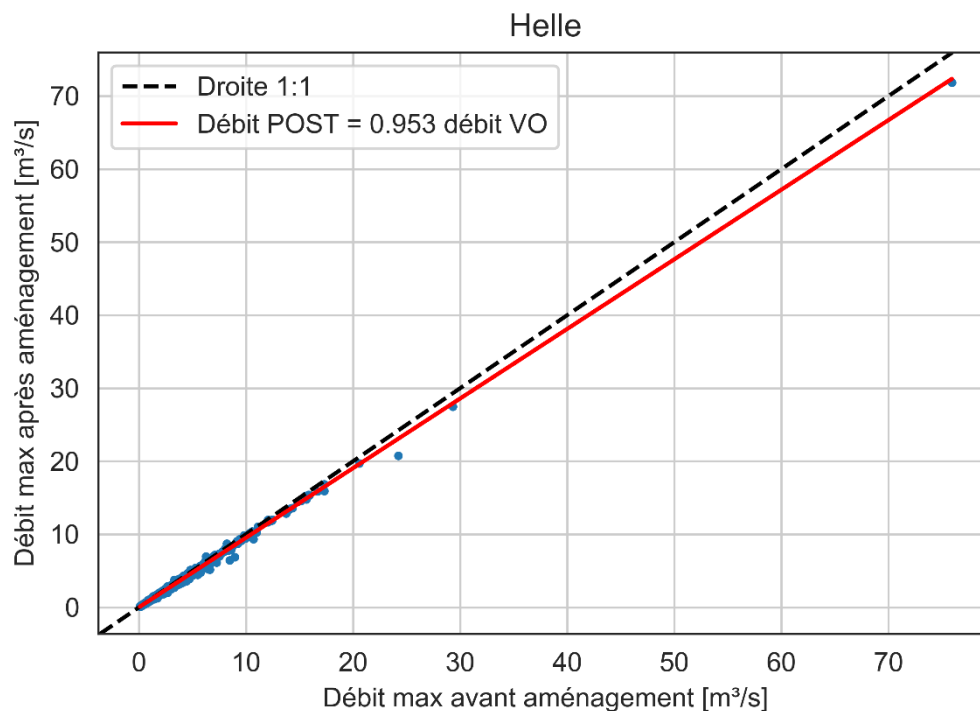


Figure 44 : Nuage de points représentant des couples de débits maximums modélisés avant et après aménagement par évènement à l'exutoire du bassin versant tourbeux (Helle).

QDF et hydrogrammes monofréquences

La comparaison des relations durée-débit-fréquence montre, que pour une même période de retour et une même durée, les aménagements engendrent une faible réduction des débits (Figure 45). Cette réduction des débits semble également être inversement proportionnelle à la durée, avec quasiment aucun effet pour des crues d'une durée 24 à 48h. Le temps de montée ne semble pas être affecté par les aménagements. On observe néanmoins un léger aplatissement de l'hydrogramme médian lors des premières heures de crues, signe que les aménagements mis en place sur le bassin de la Helle sont principalement efficaces sur la « première pluie ».

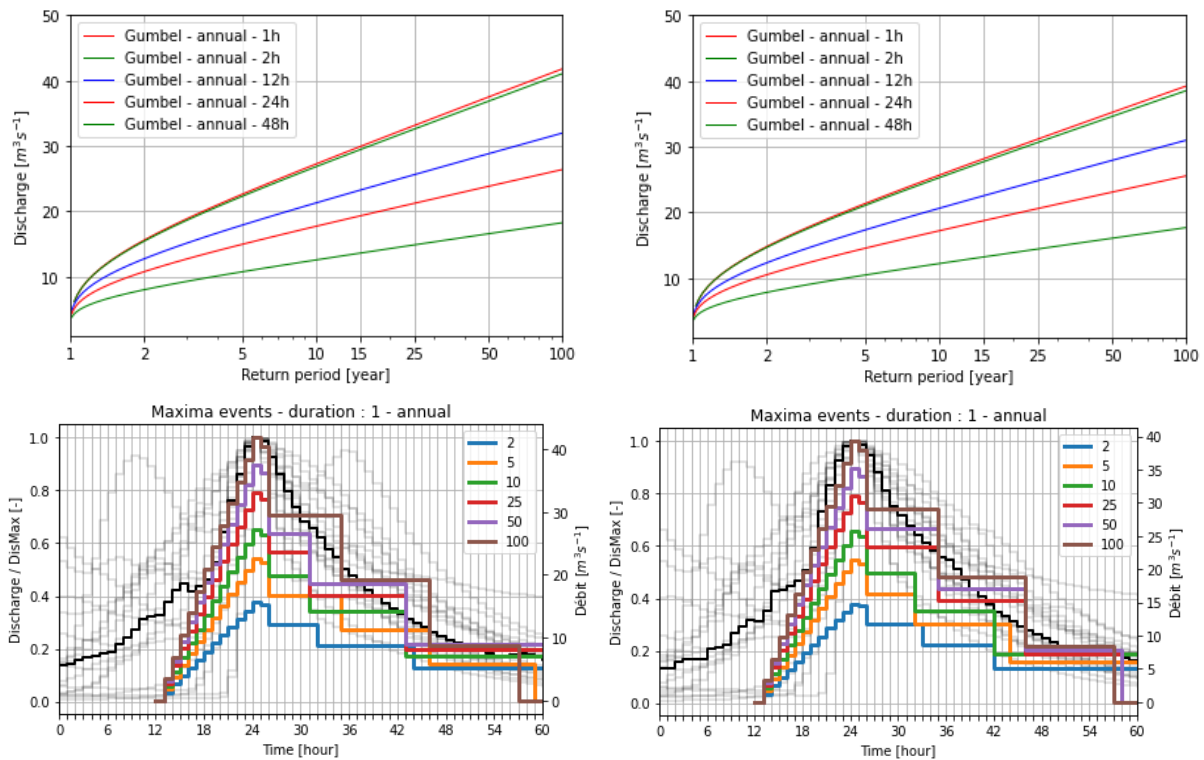


Figure 45 : courbes QDF (en haut) et hydrogrammes synthétiques (en bas ; temps de montée = 12h) générés à partir des chroniques de débits modélisés à l'exutoire du bassin versant tourbeux de 2003 à 2021, avant (à gauche) et après (à droite) aménagement.

2.6.3 Effet des aménagements sur les inondations : fonctionnement hydrologique du bassin versant

Coefficient d'écoulement

Dans le cadre du bassin versant de la Helle lors de l'évènement de juillet 2021, on observe des coefficients d'écoulements contrastés entre l'amont, dominé par les tourbières, et l'aval, dominé par des sols limoneux (Figure 46). Les coefficients d'écoulement unitaires ou presque unitaires en amont du bassin versant montrent que toute l'eau précipitée au niveau des tourbières s'est transformée en ruissellement. Cette situation contraste avec l'imaginaire collectif où les tourbes sont considérées comme « de véritables éponges ». En effet, la tourbe a une porosité très élevée (comparable à celle d'une éponge). Néanmoins, la plupart du temps cette porosité est entièrement remplie d'eau empêchant l'infiltration d'eau supplémentaires, lors d'un évènement orageux.

Pour juillet 2021, les aménagements permettent une diminution du ruissellement en aval, là où l'on retrouve le plus d'aménagements de type forestier (Figure 46). Les quelques aménagements réalisés en amont n'ont pratiquement aucun effet sur la production de ruissellement lors de l'évènement de juillet 2021.

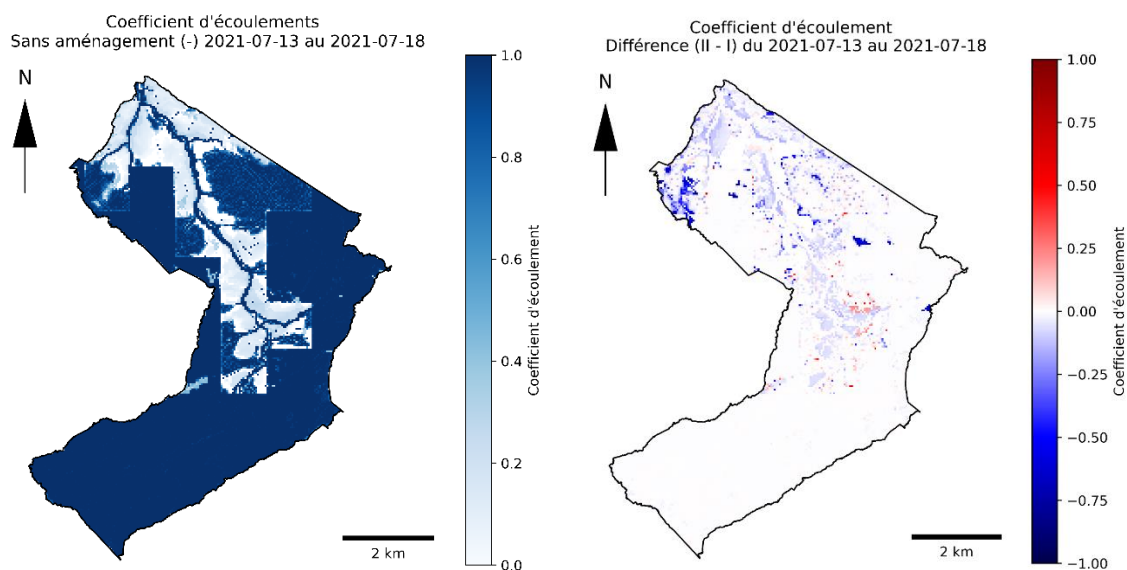


Figure 46 : Coefficients d'écoulement du 13 juillet au 18 juillet 2021 avant aménagement (en haut à gauche), après aménagement (en haut à droite) et différence après – avant aménagement (en bas). Les quantités ruisselées diminuent dans les zones en bleu.

Dynamique des écoulements de surface

L'analyse des vitesses médianes (lors d'événements pluvieux de plus de 30 mm) des écoulements montre une répartition des vitesses inégales sur le bassin versant de la Helle (Figure 47). Les zones d'écoulements rapides correspondent aux versants à fortes pentes et aux zones hydromorphes en aval et au nord du bassin versant. Bien que les quantités ruisselées soient importantes au niveau des tourbières, les écoulements sont relativement lents. Cela s'explique par de faibles pentes et par le fait que les écoulements se font dans une végétation relativement dense, conférant un pouvoir de ralentissement des crues aux tourbières.

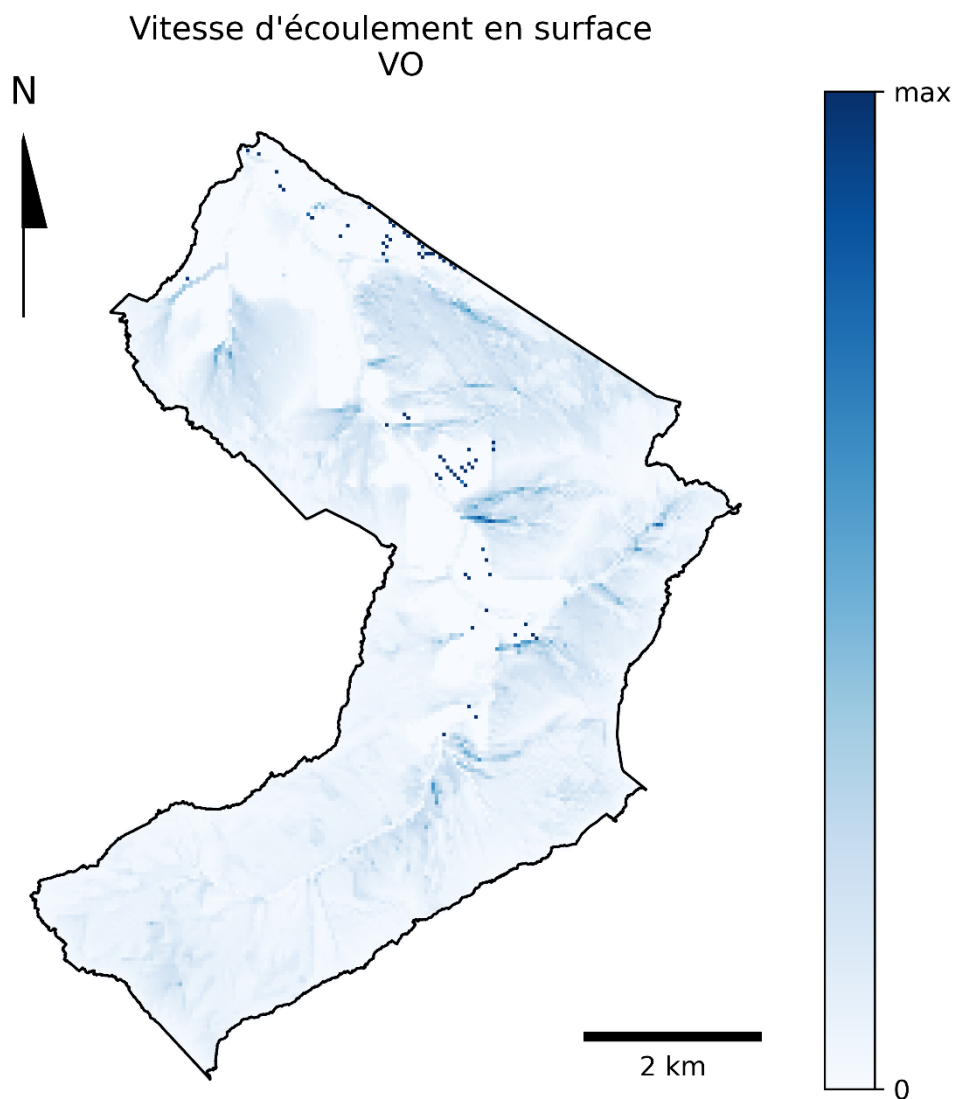


Figure 47 : Vitesse médiane des écoulements de surface pour les évènements pluvieux de plus de 30 mm : situation avant aménagement.

La différence des vitesses des écoulements montre que les aménagements réalisés tendent à diminuer ces vitesses (Figure 48). Comme pour la Hoëgne, on observe quasiment aucun effet sur les vitesses au niveau des sols à drainages favorables en aval du bassin concernées par des pratiques forestières limitant la compaction des sols (A5). Aussi, certains aménagements en amont, notamment la transformation de landes en futures tourbières, tendent à localement augmenter les vitesses d'écoulement. Cela pourrait impliquer un risque de synchronisation des flux, où les eaux de ruissellement provenant de l'amont arriveraient à l'exutoire en même temps que les eaux provenant de l'aval. Ce constat reste néanmoins au stade d'hypothèse, donc incite à la prudence.

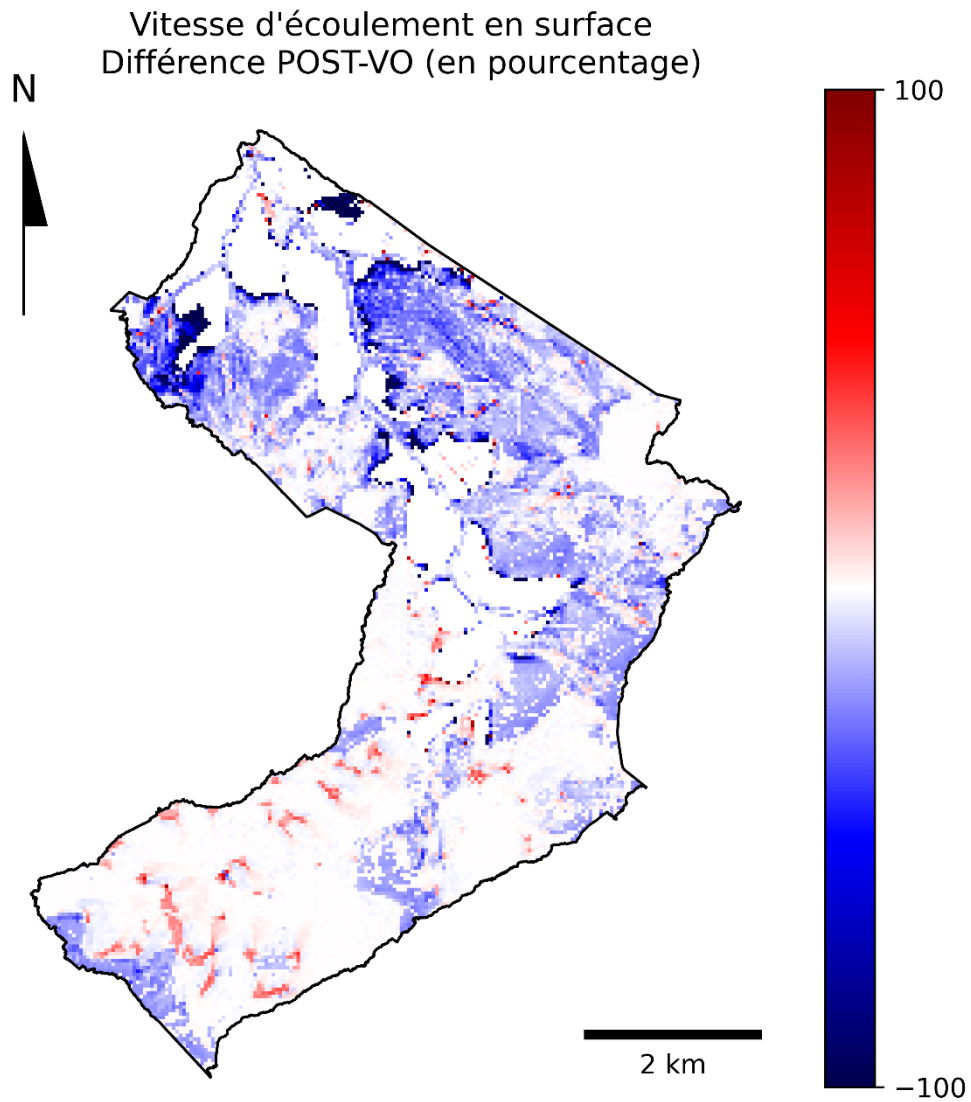


Figure 48 : Vitesses instantanées des écoulements : Différences après – avant aménagements (en pourcentages).

Efficacité des aménagements en termes de réduction du ruissellement

La Figure 49 montre que la transformation de forêts de résineux en forêt de feuillus mixte combiné à des pratiques forestières limitant la compaction des sols (A2+A5) est l'aménagement qui semble permettre de réduire le plus de ruissellement. La conversion de landes en futures tourbières semble apporter peu, voire pas, de bénéfices en termes de réduction du ruissellement.

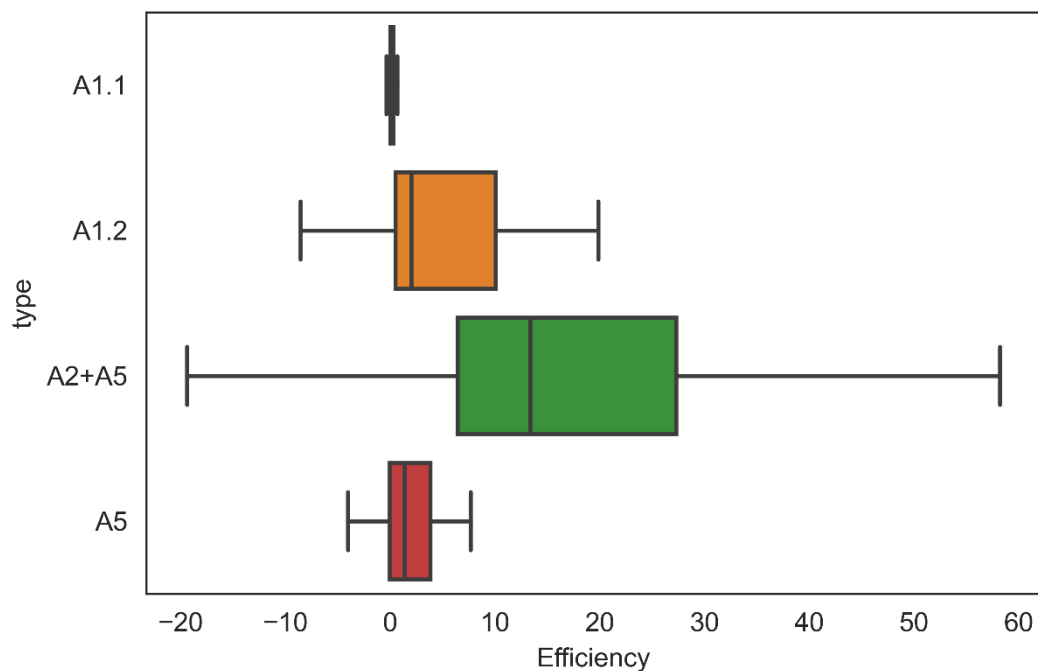


Figure 49 : Réduction du ruissellement (en %) selon la stratégie d'aménagement utilisée : restauration de landes tourbeuses (A1.1), conversion de forêt de résineux en lande tourbeuse (A1.2) ou en forêt feuillue (A2) et de pratiques forestières limitant la compaction des sols (A5).

L'efficacité des aménagements est peu influencée par le volume ou l'intensité moyenne des précipitations (Figure 50). Les corrélations entre l'efficacité et volume ou l'intensité moyenne des précipitations sont non significatives.

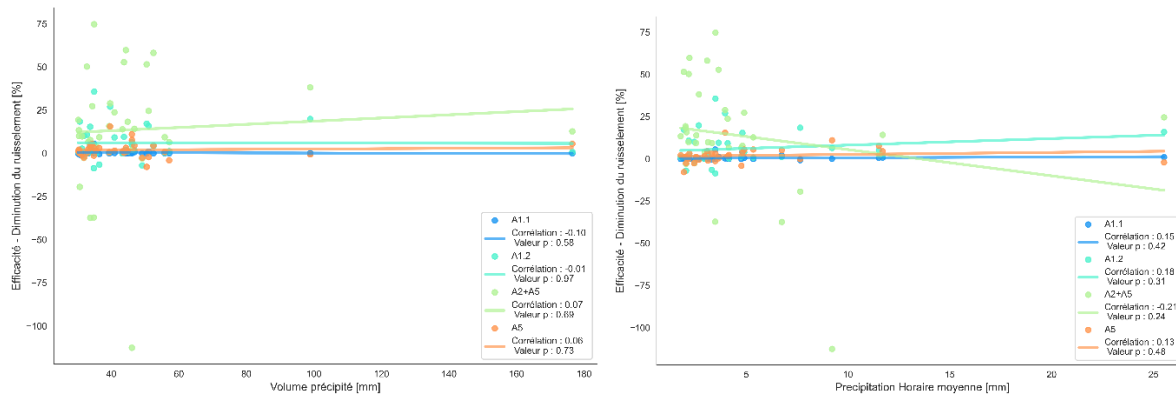


Figure 50 : Analyse de l'efficacité moyenne de la réduction du ruissellement par type d'aménagement au regard du volume et de l'intensité moyenne de précipitations durant l'évènement.

2.6.4 Effet des aménagements sur les sécheresses

Bilan simplifié

A1.1	53	24	170	20	7	7	262	36	-0	-0	421	429
A1.2	92	72	355	213	12	39	366	56	20	32	494	528
A2+A5	92	70	401	359	12	44	358	56	75	170	356	396
A5	98	53	433	456	27	35	424	52	86	303	320	371
Helle	75	41	305	250	118	146	336	44	44	114	533	561
A1.1	-0	-0	1	0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0
A1.2	-8	-37	25	7	-0	3	45	-9	-3	6	-6	-1
A2+A5	12	-35	10	55	0	-9	140	-4	-34	18	-18	-9
A5	-0	-0	-4	-0	-1	-3	1	0	-0	1	10	9
Helle	0	-6	2	8	-1	-2	17	-1	-3	4	0	1
	Interception - été	Interception - hiver	Infiltration - été	Infiltration - hiver	Résurgence - été	Résurgence - hiver	Evapotranspiration - été	Evapotranspiration - hiver	Recharge - été	Recharge - hiver	Stock sol- été	Stock sol - hiver

Figure 51 : Valeur (VO : en haut) et différence (POST – VO : en bas) absolue moyenne sur 19 ans des flux et stocks d'eau exprimés en mm par semestre hydrologique (été - hiver) en fonction des différents aménagements (A1.1, A1.2, A2+A5, A5) et sur l'ensemble du bassin versant de la Helle.

Les bilans moyens réalisés sur les différents types d'aménagements sont similaires sur la Helle à ceux faits sur la Hoëgne.

Indicateur de stress hydrique pour les plantes

A la Figure 52 sont présentés les nombres de jours consécutifs sous un seuil de stress modéré (-30 m de potentiel matriciel) pour différentes périodes de retour considérées (2, 5, 10 et 25 ans). Il est aisé de remarquer que le nombre de jours consécutifs de stress augmente avec les périodes de retour.

On remarque certaines zones du territoire où les plantes ne subissent jamais de stress hydrique modéré. Les zones où l'on observe un stress hydrique modéré correspondent globalement aux sols à drainage favorable situés sur les versants à fortes pentes, en aval du bassin de la Helle. Néanmoins, on constate l'existence d'un stress sur certains sols hydromorphes et para-tourbeux lorsque des périodes de retour élevées sont considérées. Certaines de ces zones correspondent parfois à des forêts de résineux destinées à devenir de futures tourbières (aménagements A1.2). Dans ces zones, le retour à des conditions hydriques favorable au développement de tourbières pourrait s'avérer être un processus long et complexe.

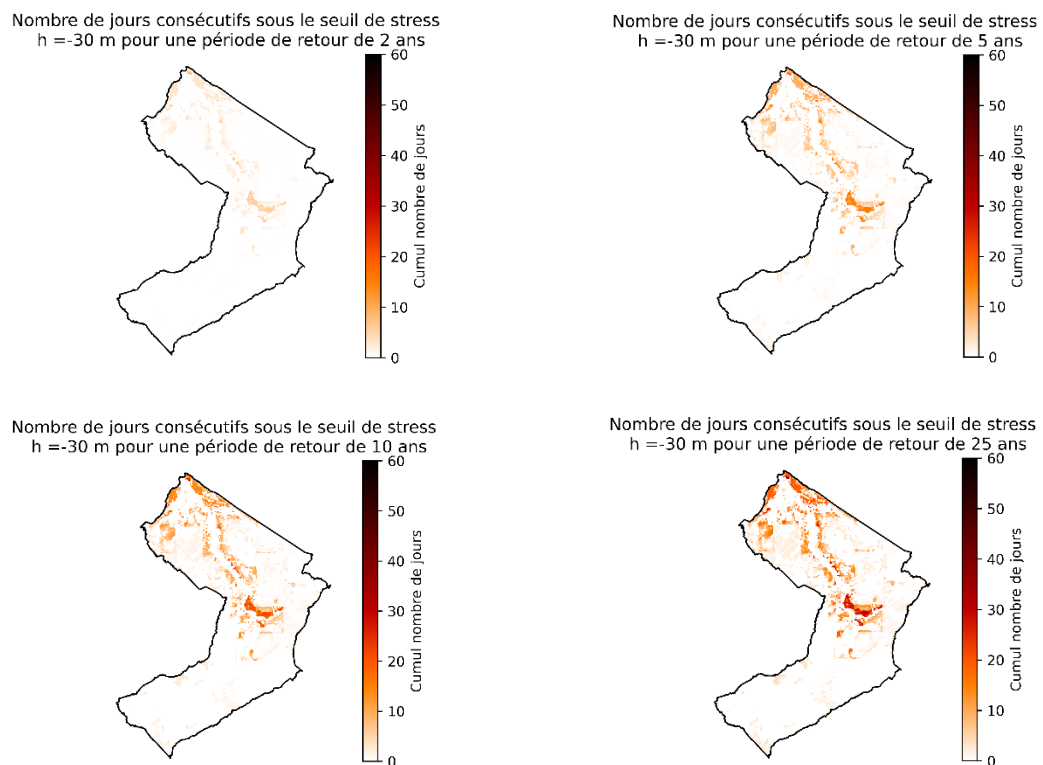


Figure 52 : Nombre de jours consécutifs sous un seuil de stress modéré (-30 m de pression hydrostatique) pour différentes périodes de retour considérées (2, 5, 10 et 25 ans).

On constate que les aménagements modélisés sur le bassin versant de la Helle permettent globalement de diminuer les stress hydriques des plantes (Figure 53). Néanmoins, au niveau de certaines zones, le nombre de jours de stress hydrique augmente. Ces zones correspondent globalement à des lieux où des forêts de résineux sont remplacées par de futures tourbières sur sols hydromorphes. Cela s'explique par le fait que les végétaux des zones humides ont une profondeur racinaire moins importante que les résineux. Un assèchement superficiel du sol en période estivale engendre alors un stress hydrique. Inversement, les zones où le nombre de jours de stress hydrique consécutifs a tendance à diminuer sont les lieux où les forêts de résineux sont remplacées par des forêts de feuillus mixtes ayant une profondeur racinaire plus importante. Par ailleurs, les feuillus ont tendance à moins transpirer durant l'hiver, conservant un stock d'eau plus important au début du printemps. Cette tendance peut s'inverser en milieu-fin d'été.

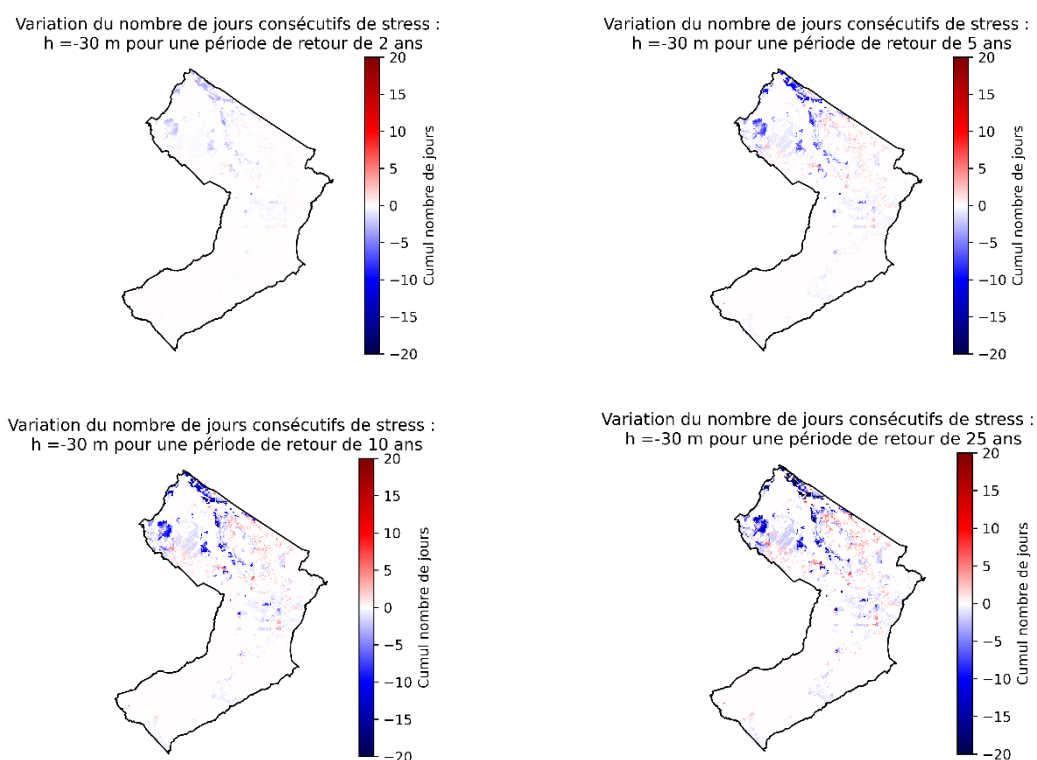


Figure 53 : Différence après – avant aménagement du nombre de jours consécutifs sous un seuil de stress modéré (-30 m de pression hydrostatique) pour différentes périodes de retour considérées (2, 5, 10 et 25 ans). Dans les zones en bleu, le nombre de jours de stress consécutif diminue.

2.7 Résultats de modélisation : bassin versant de la Magne

2.7.1 Calibration et validation

Validation des débits

La comparaison des hydrogrammes simulés et mesurés à l'exutoire du bassin versant agricole, à la station de Forêt sur la Magne, permet de montrer la bonne performance de la modélisation. Seule l'année hydrologique 2017 présente une anomalie qui est également visible au niveau de la modélisation conceptuelle. Une hypothèse pouvant expliquer ces mauvais NSE est que l'année 2017 a été plus sèche que les autres années (avec environ 790 mm de précipitations en 2017 alors que la moyenne entre 2011 et 2020 est 950 mm/an), entraînant peu de fluctuations de débits à l'exutoire. Dans ces conditions, l'indicateur de performance Nash devient plus strict, pour une même erreur absolue. D'ailleurs, l'erreur absolue moyenne (MAE) n'est pas sensiblement plus élevée pour 2017 que pour les autres années. En bref, l'erreur absolue est constante alors que l'erreur relative est variable en fonction des débits.

Tableau 7 : analyse des débits simulés et observés à l'exutoire de la Magne. ME : erreur moyenne (m³/s) ; MAE : erreur moyenne absolue (m³/s) ; RMSE : racine de l'erreur quadratique moyenne (m³/s) ; STDres : écart-type des résidus (m³/s) ; R : coef. corrélation ; R² - Nash : coefficient de Nash-Sutcliffe.

Année	ME	MAE	RMSE	STDres	R	R ² - Nash
Magne						
2012	-0,073	0,197	0,312	0,303	0,814	0,642
2013	-0,025	0,168	0,318	0,317	0,803	0,635
2014	-0,055	0,140	0,308	0,303	0,881	0,759
2015	-0,070	0,165	0,279	0,270	0,854	0,692
2016	0,045	0,305	0,524	0,523	0,813	0,653
2017	-0,186	0,219	0,292	0,225	0,750	-0,034
2018	-0,086	0,163	0,356	0,345	0,928	0,819
2019	-0,093	0,171	0,299	0,284	0,802	0,601
2020	0,085	0,230	0,401	0,392	0,849	0,677
2021	0,135	0,333	1,248	1,241	0,873	0,662
2012-2021	-0,036	0,207	0,491	0,490	0,831	0,680

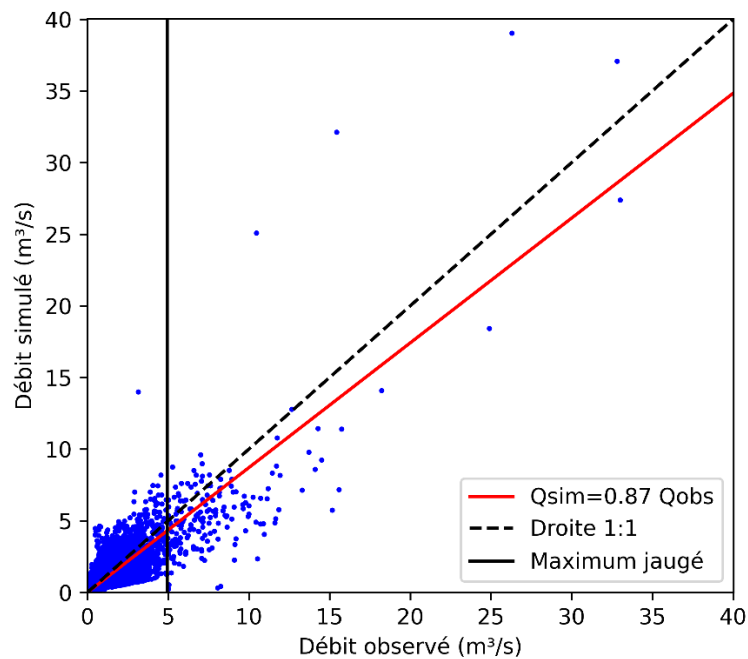


Figure 54 : Diagramme de dispersion à l'exutoire du bassin versant de la Magne (station de Forêt) réalisé de 2012 à 2021.

Validation de la dynamique verticale de la zone saturée

Comme pour les bassins de la Hoegne et de la Helle, la dynamique verticale de la zone saturée pour différents types de sols est cohérente avec le drainage naturel des sols référencé dans la CNSW (Figure 55).

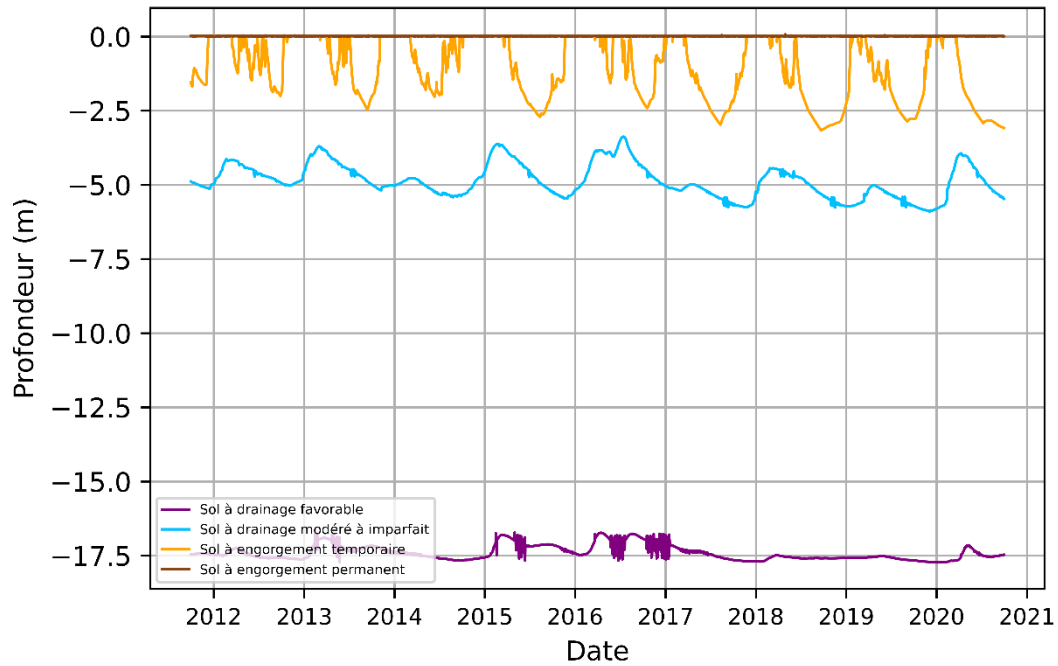


Figure 55 : Dynamique verticale de la zone saturée de 2012 à 2021 pour différents points de contrôles dans différents types de sols du bassin versant agricole (Magne).

Validation spatiale de la profondeur de la zone saturée

La profondeur moyenne de la zone saturée est comparable à l'information de drainage de la CNSW. On observe une chute brutale de la profondeur moyenne de la zone saturée en aval du bassin. Cela est, notamment, dû à la définition de formations calcaires (contenant du karst) au sein du module géologique du modèle. Ceci confirme la bonne distribution spatiale des caractéristiques hydrodynamiques de sols.

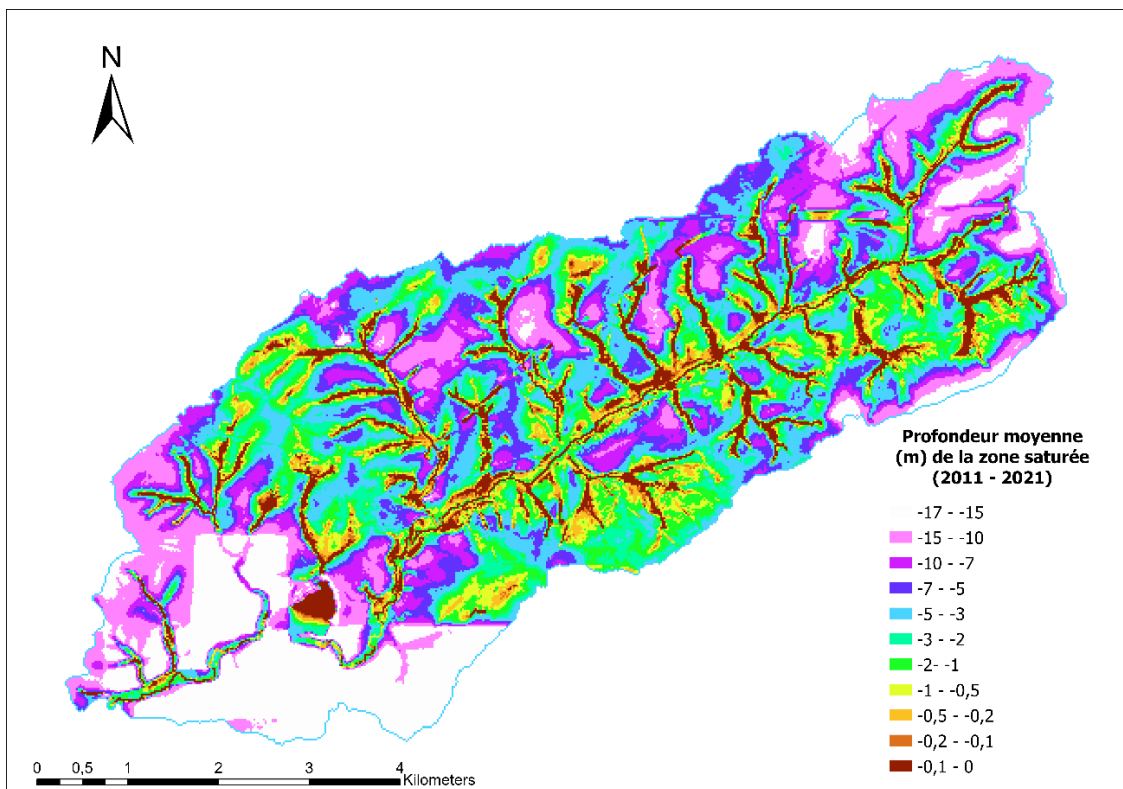
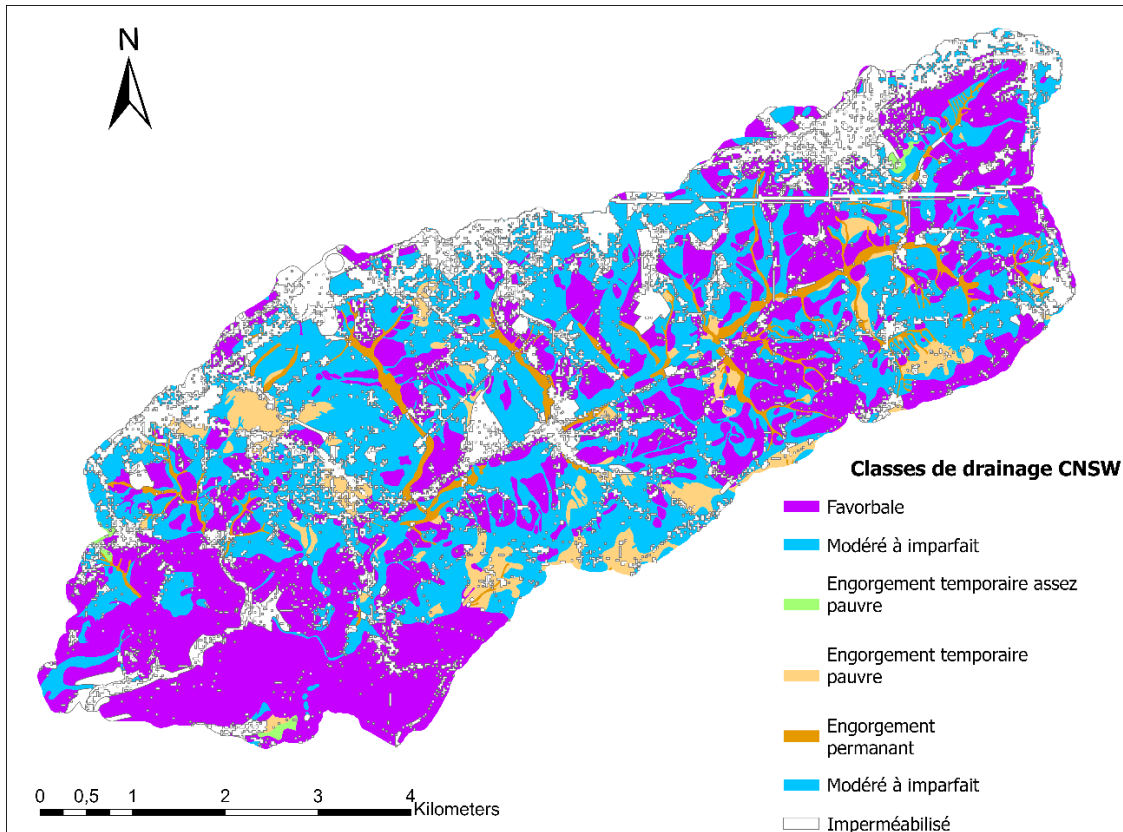


Figure 56 : Comparaison entre la modélisation de la profondeur (m) moyenne de la zone saturée (calculée de 2011 à 2021) et la carte des classes de drainage issue de CNSW sur le bassin versant agricole (Magne).

2.7.2 Effet des aménagements sur les inondations : Débits à l'exutoire

Hydrogrammes

La comparaison des débits à l'exutoire, avant et après aménagement, pour l'évènement allant du 13 au 18 juillet 2021 montre une diminution du pic de crue (Qmax) de l'ordre de 34%. Les volumes totaux modélisés à l'exutoire diminuent de 14% sur cette même période (Figure 57).

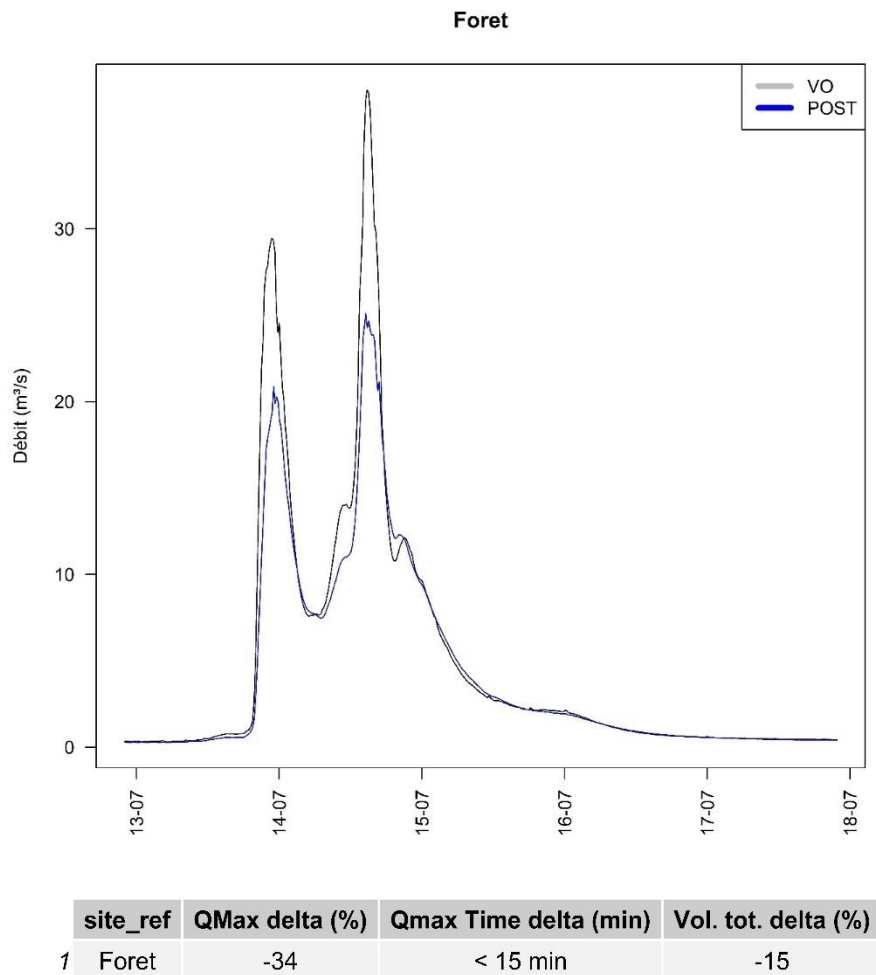


Figure 57 : Hydrogrammes, décalage temporel du pic de crue, différence relative en termes de débit maximal et de volume total modélisés à l'exutoire du bassin versant agricole (Magne) pour les périodes du 13 au 18 juillet 2021.

Débits maximums

Le nuage de points des débits maximums atteints à l'exutoire montre une réduction des débits de pointe d'environ 28% en moyenne.

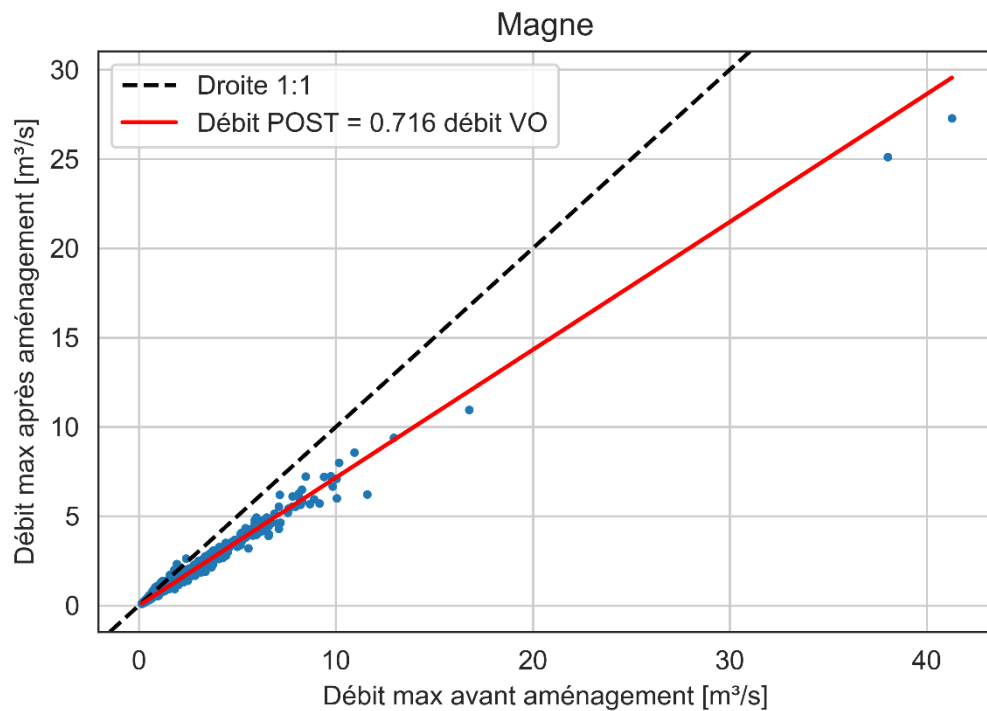


Figure 58 : Nuage de points représentant des couples de débits maximums modélisés avant et après aménagement par événement à l'exutoire du bassin versant agricole (Magne).

QDF et hydrogrammes monofréquences

La comparaison des relations durée-débit-fréquence montre, que pour une même période de retour et une même durée, les aménagements engendrent une réduction des débits relativement importante. Ainsi, pour des crues de 1h et 2h, la période de retour passe de 15 ans à 100 ans après aménagement. On observe également sur les hydrogrammes médians une légère augmentation du temps de montée après aménagement.

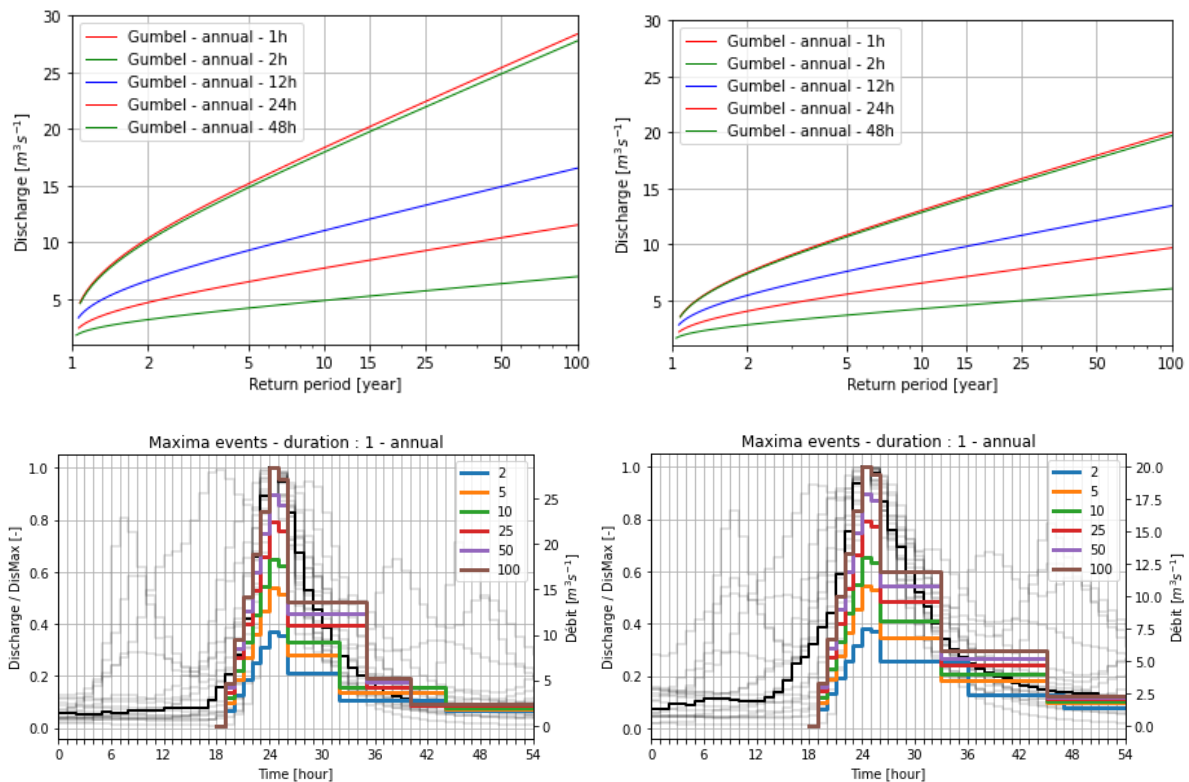


Figure 59 : courbes QDF (en haut) et hydrogrammes synthétiques (en bas ; temps de montée = 6h) générés à partir des chroniques de débits modélisés à l'exutoire du bassin versant agricole de 2003 à 2021, avant (à gauche) et après (à droite) aménagement.

2.7.3 Effet des aménagements sur les inondations : fonctionnement hydrologique du bassin versant

Coefficient d'écoulement

Concernant les coefficients d'écoulement lors de l'événement de juillet 2021, on constate que ceux-ci sont élevés dans les zones bâties (notamment de Herve), au niveau du réseau viare et dans les zones d'accumulation des flux d'eau où les sols sont engorgés temporairement ou en permanence. Les zones bâties et le réseau viare ont contribué à un quart de la production totale de ruissellement du bassin versant alors qu'ils ne constituent que 15% des surfaces. En revanche, les prairies permanentes ont produit 40% du ruissellement alors qu'elles constituent la moitié de la surface du bassin versant. A part égales, les zones bâties et le réseau viare ruissellent deux fois plus que les prairies permanentes.

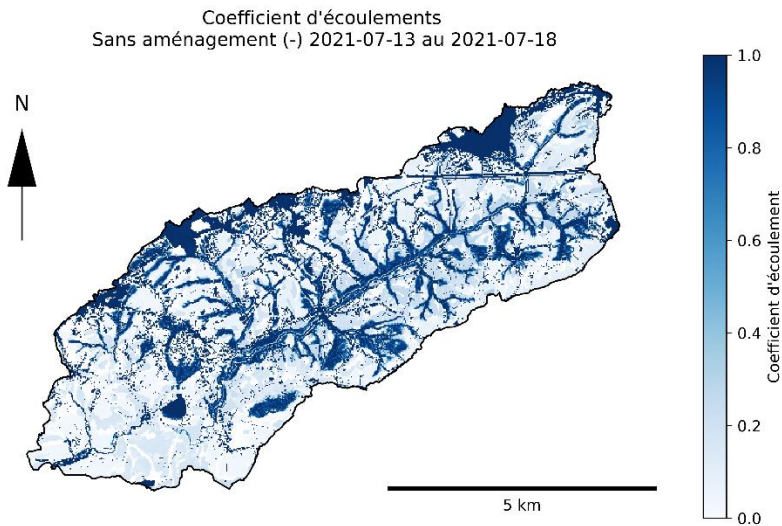


Figure 60 : Coefficients d'écoulement du 13 juillet au 18 juillet 2021 avant.

Les coefficients d'écoulements lors de l'événement de juillet 2021, diminuent globalement après aménagement, particulièrement dans les zones aménagées. Néanmoins, on observe des zones sans aménagements où les coefficients d'écoulements diminuent. Il semblerait donc que les effets de aménagements puissent se propager vers l'aval. Aussi, la diminution des coefficients d'écoulements semble être moins importante à l'aval du bassin versant, là où les sols sont majoritairement à drainages favorables. Inversement, la diminution des coefficients d'écoulements semble être plus importante au niveau des sols à engorgement temporaire (Figure 61).

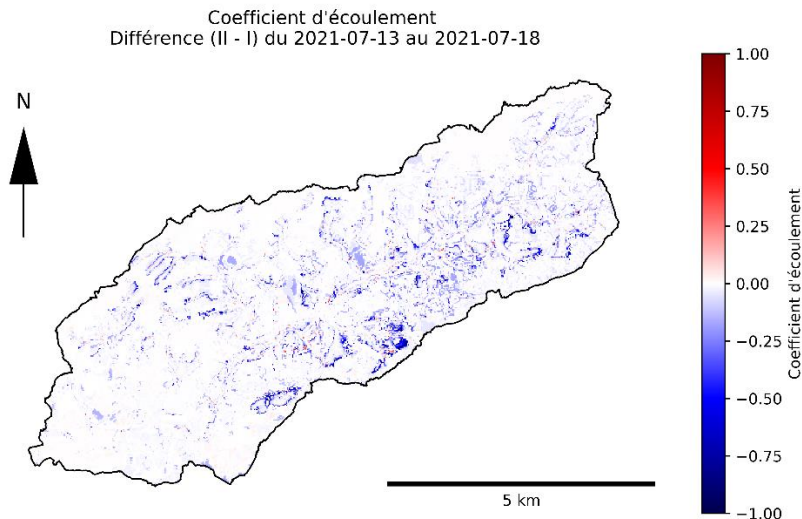


Figure 61 : Différence après – avant aménagement des coefficients d'écoulements du 13 juillet au 18 juillet 2021. Les quantités ruisselées diminuent dans les zones en bleu.

Dynamique des écoulements de surface et indice de connectivité

Concernant la dynamique des écoulements, les zones d'écoulements rapides correspondent aux zones urbanisées et aux zones de concentration du ruissellement, principalement localisées en fonds de vallées.

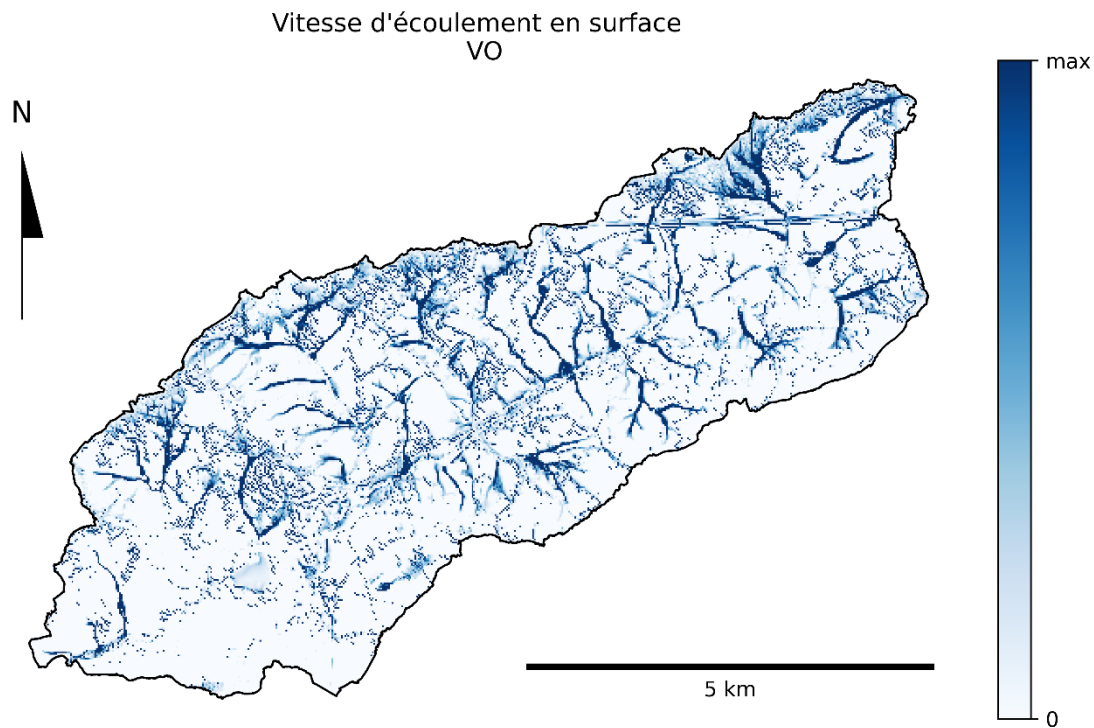


Figure 62 : Vitesse médiane des écoulements de surface pour les évènements pluvieux de plus de 30 mm : situation avant aménagement.

Concernant la différence des vitesses après aménagements, on remarque principalement une diminution des vitesses au niveau des fonds de vallées et une augmentation des vitesses au niveau de certaines zones urbanisée. Aucun élément permet d'expliquer cette seconde observation, étant donné qu'aucun changement n'a été effectué au niveau de ces zones dans le scénario d'aménagement.

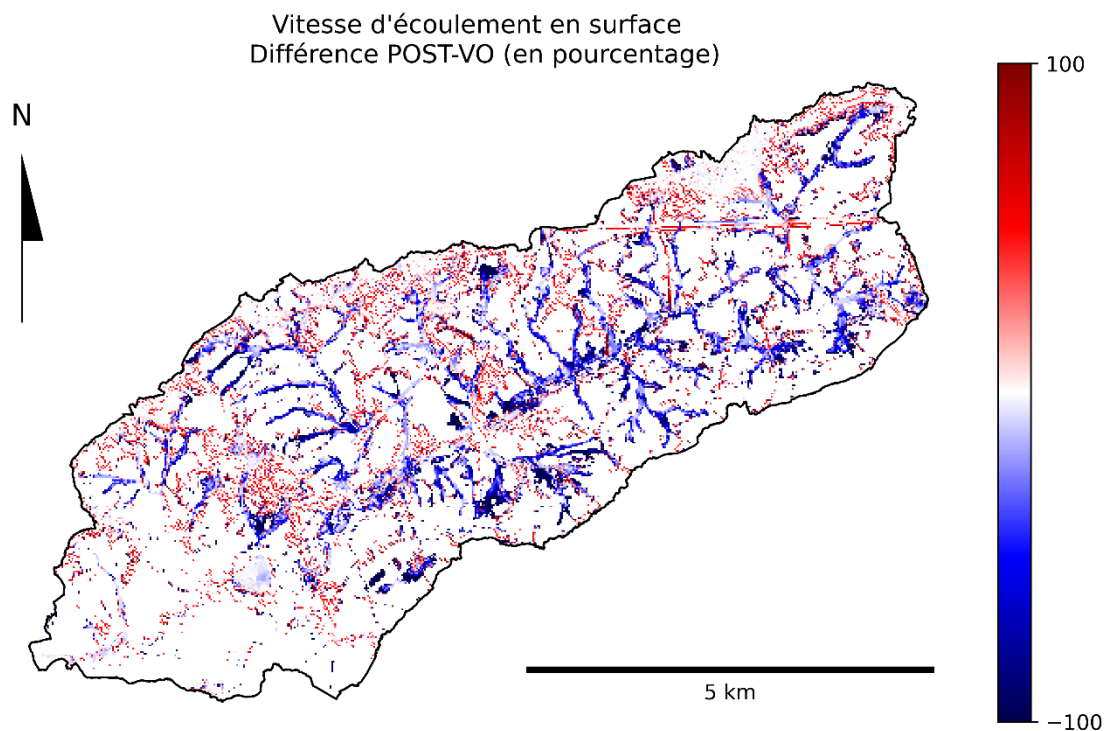


Figure 63 : Vitesses instantanées des écoulements : Différences après – avant aménagements (en pourcentages).

Effacité des aménagements en termes de réduction du ruissellement

La Figure 64 représente l'efficacité moyenne (en termes de réduction du ruissellement) par type d'aménagement pour les événements ayant générés plus 3 mm de ruissellement dans les zones concernées. Il semblerait que tous les aménagements soient efficaces en termes de réduction du ruissellement, avec des valeurs d'efficacité comparables, avec tout de même une médiane plus élevée pour les TCS. Néanmoins, si on considère uniquement l'évènement de juillet 2021, ce sont les barrières interparcellaires qui sont les plus efficaces avec une réduction de 38% du ruissellement (voir infiltration Figure 67), contre 9% pour les TCS et 15% pour le rouleau antiérosif en maïs.

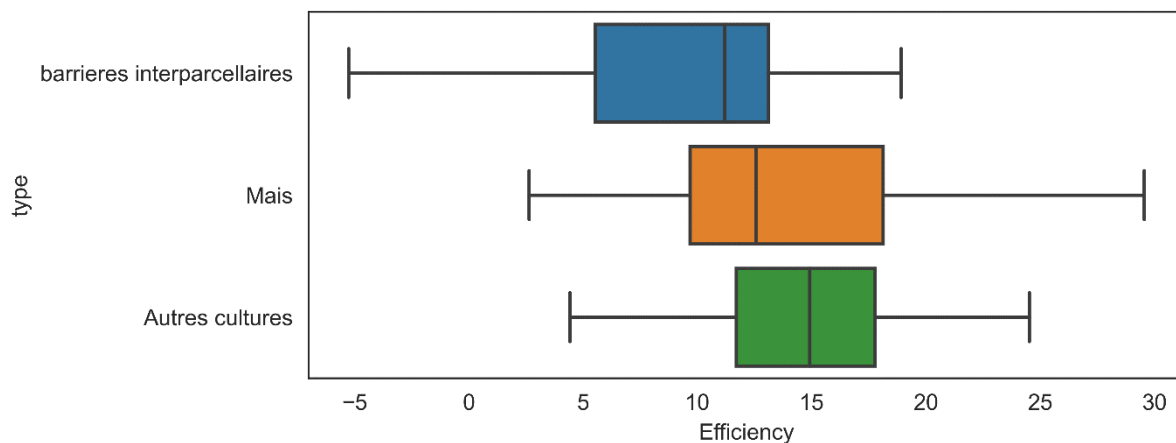


Figure 64 : Réduction du ruissellement (en %) selon la stratégie d'aménagement utilisée : restauration d'une trame bocagère en marge des parcelles agricoles (barrières interparcellaires), utilisation du rouleau anti-érosif sur cultures de maïs (Mais), adoption de techniques culturales simplifiées sur les autres cultures (Autres cultures).

Une corrélation positive est visible entre l'efficacité des barrières interparcellaires et le volume précipité.

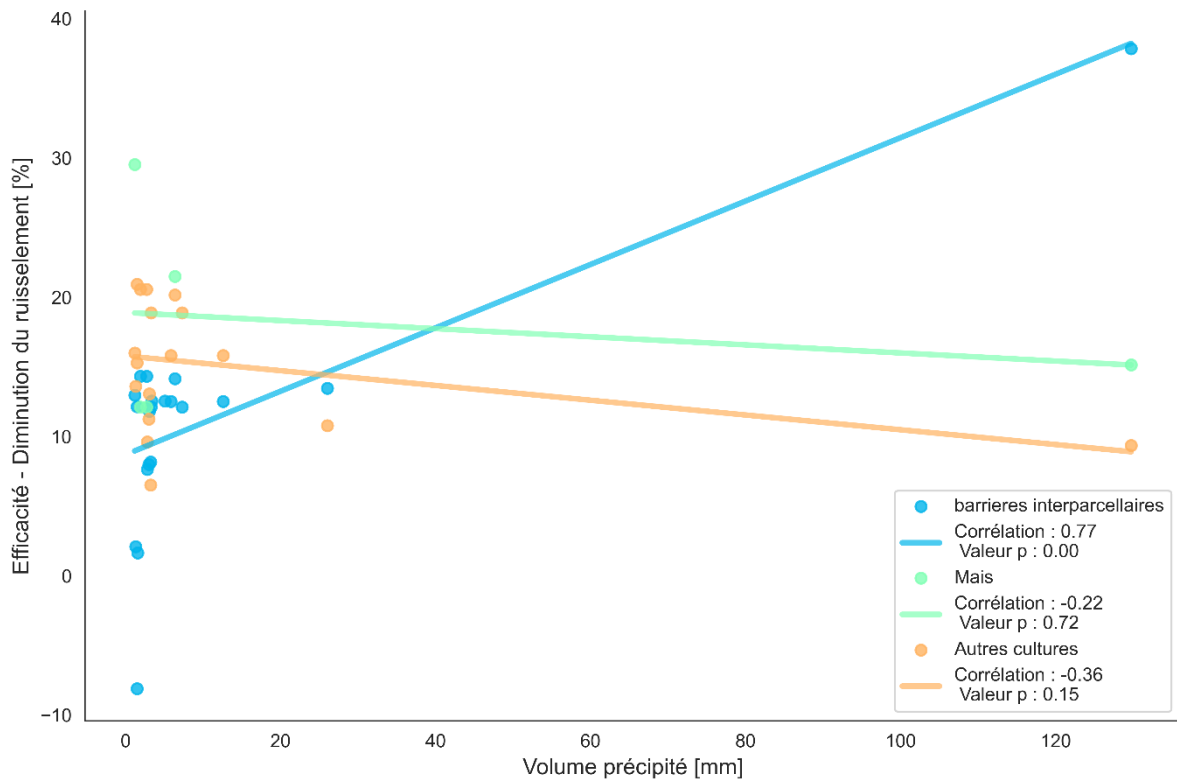


Figure 65 : Analyse de l'efficacité moyenne de la réduction du ruissellement par type d'aménagement au regard du volume de précipitations durant l'évènement

2.7.4 Effet des aménagements sur les sécheresses

Bilan simplifié

Autres cultures -	40	17	421	448	73	115	275	43	130	299	430	449
Mais -	41	18	400	440	33	59	274	44	123	309	410	430
barrières interparcellaires -	70	32	416	480	261	339	391	53	50	263	387	418
Magne -	61	28	373	427	210	265	358	51	51	243	363	391
Autres cultures -	6	1	8	11	-7	-10	-4	-1	3	17	-1	-1
Mais -	6	1	7	7	-4	-6	-6	-1	7	9	-2	-2
barrières interparcellaires -	26	4	-23	-8	-32	-29	173	16	-96	-71	-15	-11
Magne -	7	1	-2	3	-20	-20	38	3	-20	-8	-5	-3
	Interception - été	Interception - hiver	Infiltration - été	Infiltration - hiver	Résurgence - été	Résurgence - hiver	Evapotranspiration - été	Evapotranspiration - hiver	Recharge - été	Recharge - hiver	Stock sol - été	Stock sol - hiver

Figure 66 : Valeur (VO : en haut) et différence (POST – VO : en bas) absolue moyenne sur 19 ans des flux et stocks d'eau exprimés en mm par semestre hydrologique (été - hiver) en fonction des différents aménagements et sur l'ensemble du bassin versant de la Magne.

Une première constatation sur base des bilans réalisés sur les différents types d'aménagements est que l'aménagement de barrières interparcellaires semble avoir les effets les plus importants au niveau de la partition des flux verticaux d'eau (Figure 66). Au niveau de ces zones, on observe une large augmentation de l'évapotranspiration en été. Il peut paraître surprenant d'observer une diminution de l'infiltration de l'ordre de 20 mm en été dans ces zones. Cela s'explique néanmoins par une augmentation significative de l'interception en été, dû à l'augmentation de la surface foliaire au sein des barrières interparcellaires. Ainsi à chaque précipitation, une petite partie de l'eau est intercepté par la canopée et est directement renvoyée vers l'atmosphères par évaporation. Il y a alors moins d'eau qui atteint la surface du sol, ce qui cause cette diminution de l'infiltration (à l'échelle de la saison). Néanmoins, cette composante d'interception est négligeable lors d'importantes précipitations et exerce une influence uniquement lorsque l'on considère des temps longs. Ainsi lors de l'événement de juillet 2021, on observe une augmentation significative de l'infiltration au niveau des barrières interparcellaires (Figure 67). L'augmentation de l'évapotranspiration combinée à la diminution de

l'infiltration entraîne une diminution des quantités d'eau dans le sol (sauf en fin d'hiver) et diminution de la recharge annuelle.

Concernant les risques karstiques, ceux-ci ne seront pas aggravés par les aménagements de barrières interparcellaires. En effet, on observe moins de recharge, donc moins d'eau capables de dissoudre les roches carbonatées susceptibles à des phénomènes karstiques.

Pour ce qui est des éventuels risques de stabilité liés aux smectites de Herve, les aménagements de haies sont susceptibles d'augmenter la variation annuelle de teneur en eau dans les sols (de l'ordre de 8% en moyenne sur les 120 premiers cm), donc d'amplifier les déformations des smectites liées à leur gonflement-retrait (Figure 67). Néanmoins, cette augmentation des risques doit être nuancée par les considérations suivantes. Cette augmentation des variations annuelles semble être localisée principalement au droit des haies. Ces variations s'estompent plus on s'en éloigne. Les variations sont également plus importantes en surface qu'en profondeur, au niveau des fondations des ouvrages/bâtiments. Les tissus urbains construits sur les smectites sont peu concernés par les aménagements de haies, principalement localisés en zones agricoles. Sur les versants agricoles, l'enracinement profond des haies peut jouer un rôle de stabilisation mécanique du sol, contrant l'effet liée à l'amplification des gonflements-retraits.

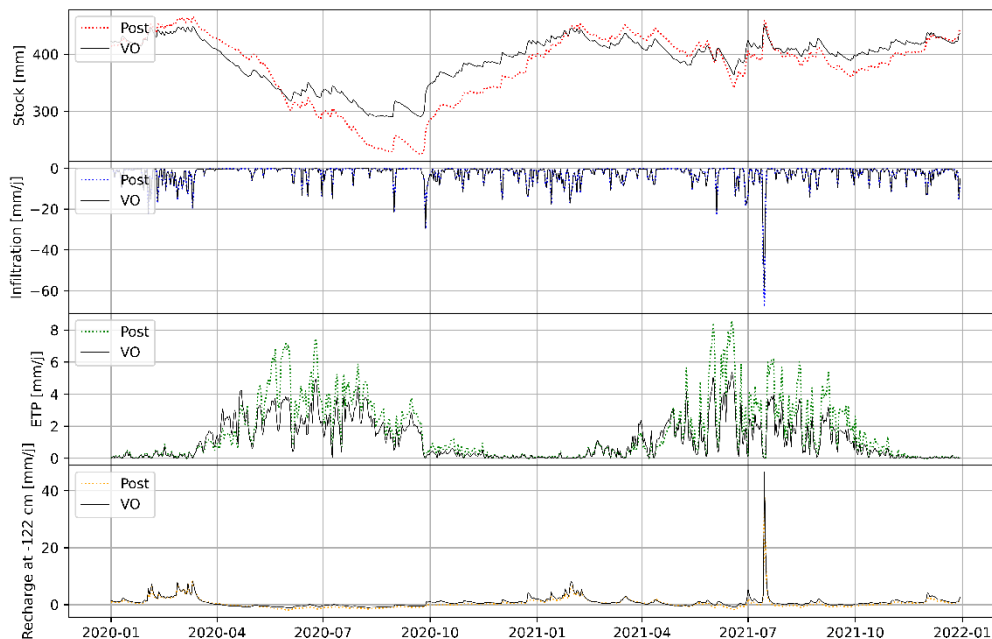


Figure 67 : Bilan moyen des zones concernées par les aménagements barrières interparcellaires : moyenne des stocks d'eau dans les 120 premiers centimètres du sol, de l'infiltration, de l'évapotranspiration et de la recharge à 120 centimètres entre 2020 et 2022.

Concernant les pratiques du rouleau antiérosif en maïs et les techniques culturales simplifiées dans les autres cultures, on peut constater que les effets sont assez bénéfiques en tous points (Figure 66). Ces effets concernent principalement l'infiltration et la recharge, qui augmentent. Dans le cas du rouleau antiérosif, cette augmentation est due à la création d'une microtopographie, où l'eau de ruissellement peut s'y accumuler et permet d'augmenter le temps d'opportunité pour s'infiltrer. Dans le cas des techniques culturales simplifiées, c'est une modification de la distribution de la taille des pores du sol de surface (liée à une meilleure agrégation) qui permet à la fois, de mieux conduire l'eau lorsque le sol est presque saturé et de mieux la retenir lorsque celui-ci est plus sec.

Il faut également noter qu'il est très probable que certains effets de barrières interparcellaires se prolongent au niveau des cultures. Cela peut notamment expliquer la légère diminution des stocks d'eau dans le sol au niveau des cultures. Il est également possible que ce léger assèchement du sol contribue à l'augmentation de l'infiltration.

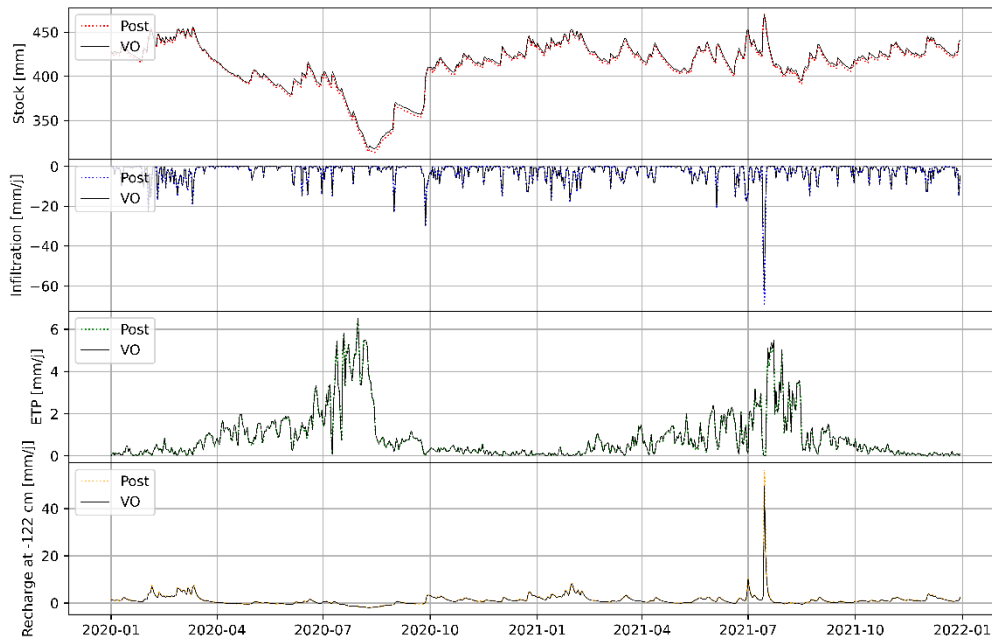


Figure 68 : Bilan moyen de cultures de maïs zones concernées par l'utilisation du rouleau anti-érosif: moyenne des stocks d'eau dans les 120 premiers centimètres du sol, de l'infiltration, de l'évapotranspiration et de la recharge à 120 centimètres entre 2020 et 2022.

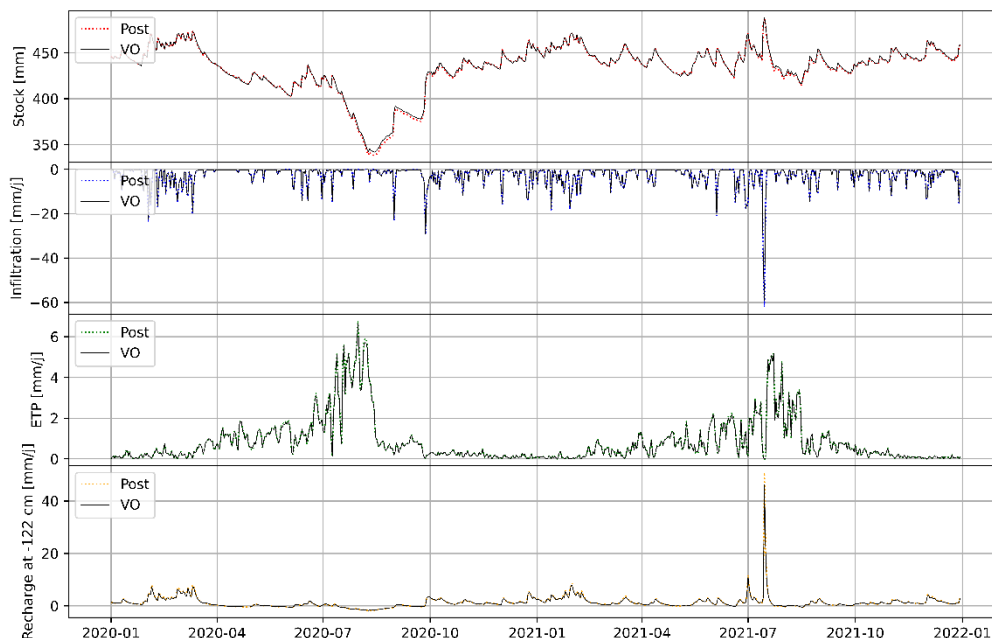


Figure 69 : Bilan moyen des autres cultures concernées par l'adoption de techniques culturales simplifiées : moyenne des stocks d'eau dans les 120 premiers centimètres du sol, de l'infiltration, de l'évapotranspiration et de la recharge à 120 centimètres entre 2020 et 2022.

Indicateur de stress hydrique pour les plantes

Les zones où l'on observe un stress hydrique modéré correspondent généralement aux sols à drainage favorable. Les zones en aval du bassin versant sont particulièrement concernées.

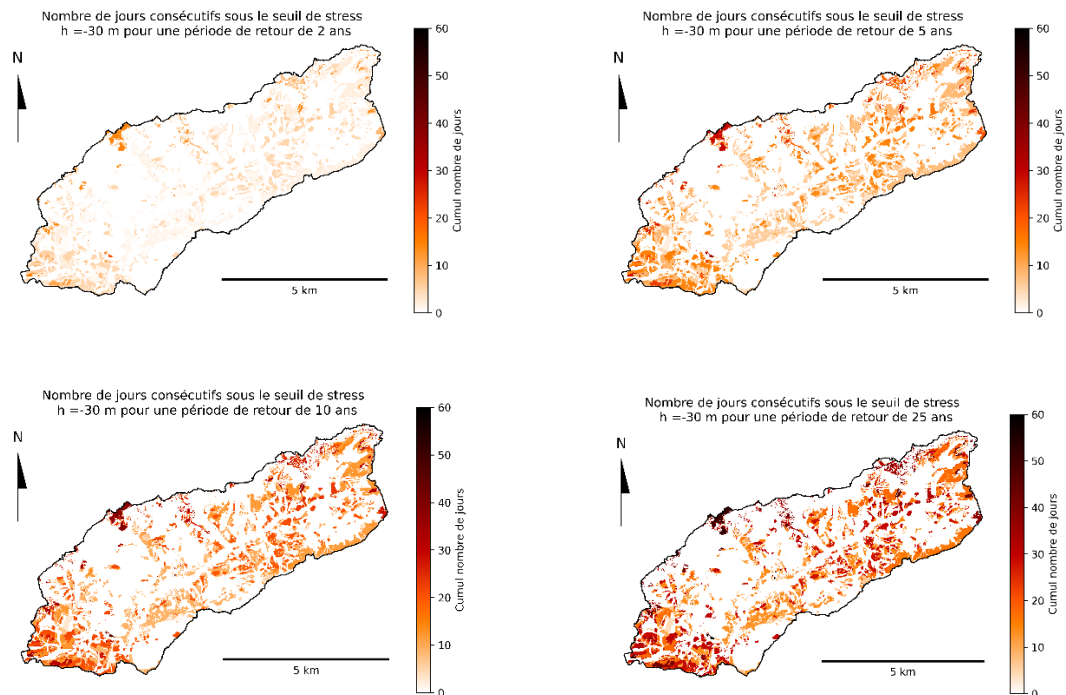


Figure 70 : Nombre de jours consécutifs sous un seuil de stress modéré (-30 m de pression hydrostatique) pour différentes périodes de retour considérées (2, 5, 10 et 25 ans).

Le nombre de jours de stress semble principalement diminuer après aménagements. Cette diminution du stress se concentre au niveau des barrières interparcelles et s'explique par une profondeur racinaire plus importante (dû au changement de végétation). En effet, le stock d'eau dans le sol est moins important au niveau des barrières interparcelles, mais l'augmentation de la profondeur racinaire permet de compenser cela en prélevant de l'eau plus en profondeur. Les haies plantées seront alors moins sensibles à une sécheresse que les prairies et pourront éventuellement servir de source de fourrage d'appoint lors d'un tel événement (Vandermeulen et al., 2018). En contrepartie, il est possible que par endroit cette augmentation du prélèvement de l'eau par les haies provoque une légère compétition pour l'eau en bordure de haies.

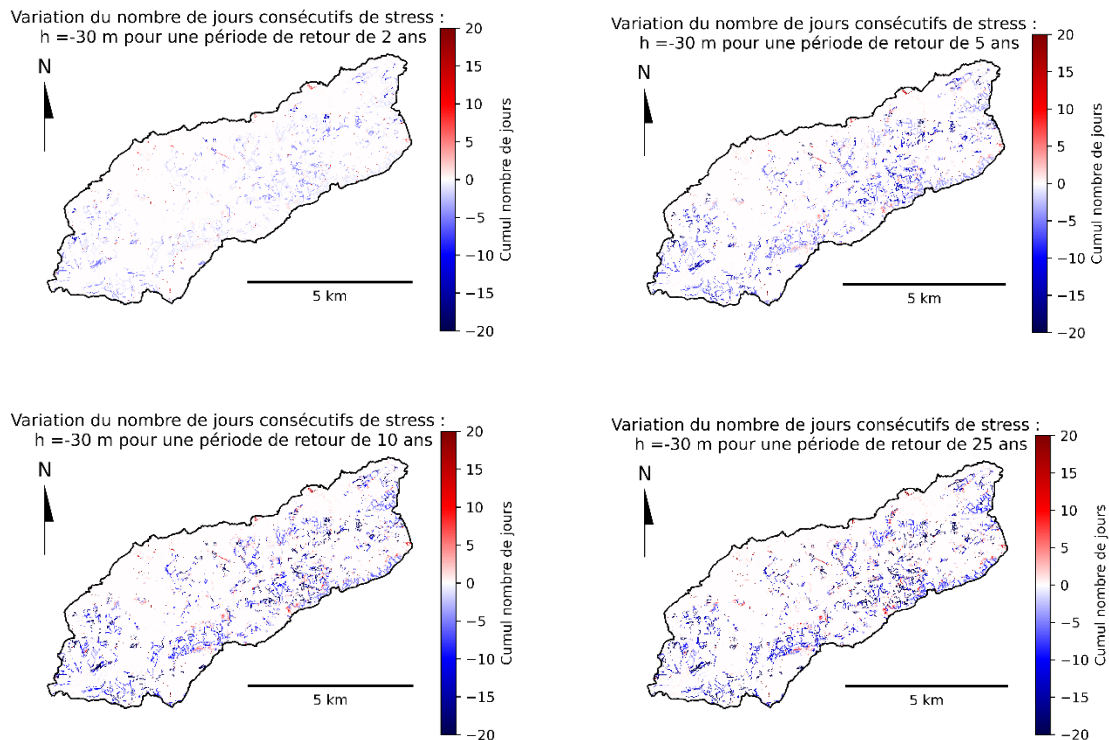


Figure 71 : Différence après – avant aménagement du nombre de jours consécutifs sous un seuil de stress modéré (-30 m de pression hydrostatique) pour différentes périodes de retour considérées (2, 5, 10 et 25 ans). Dans les zones en bleu, le nombre de jours de stress consécutif diminue.

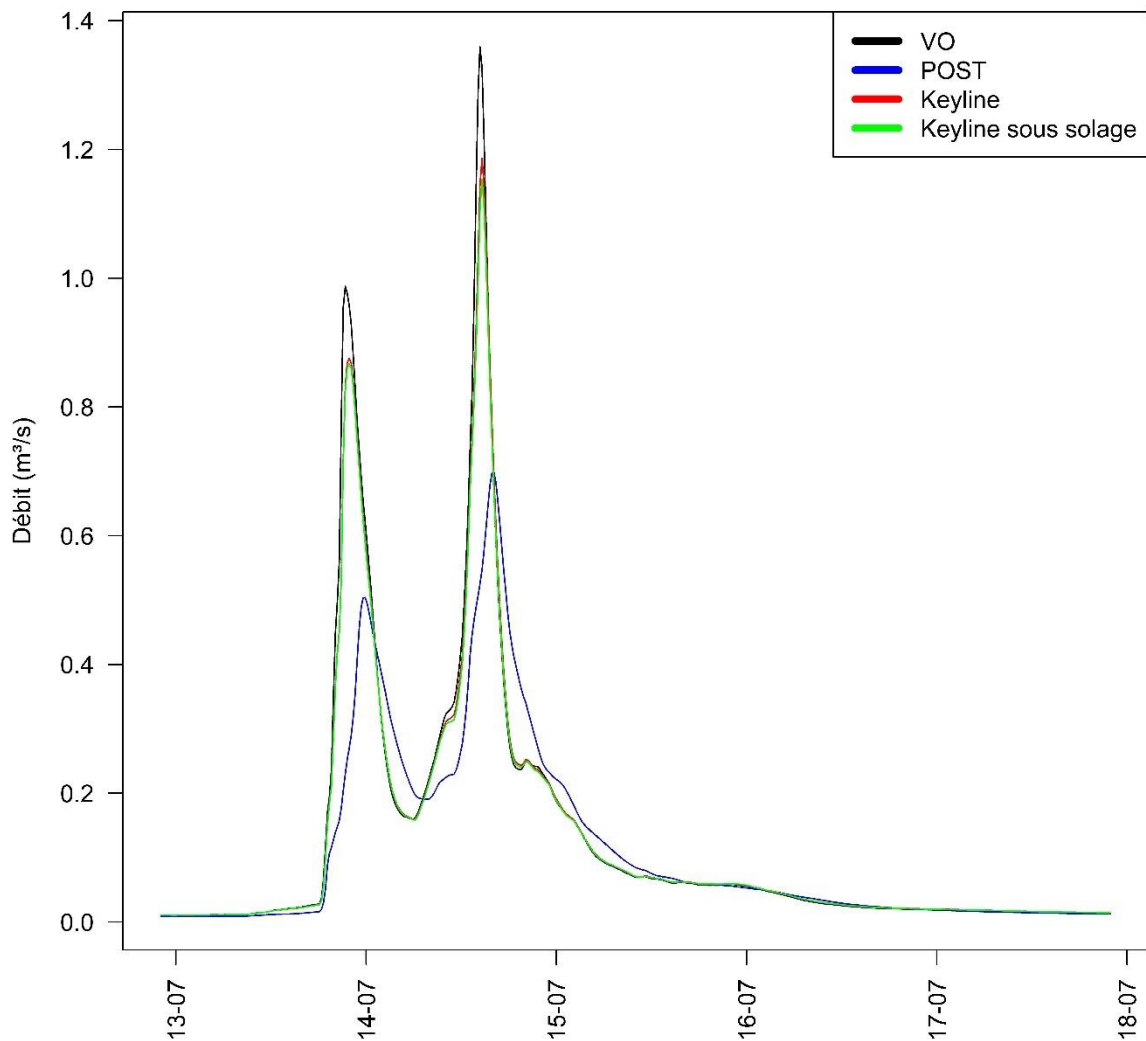
2.8 Résultats de modélisation : Keylines sur un bassin versant agricole pilote

2.8.1 Effet des keylines sur les inondations : débit à l'exutoire

Hydrogrammes

L'analyse des hydrogrammes de juillet 2021 montre une réduction de 13% du débit maximum atteint lors de l'événement à la suite de l'aménagement des keylines (Figure 72). Le passage d'une sous-solée dans les zones en aval des keylines pourrait permettre une réduction de 2% supplémentaires. Le volume total est, quant à lui, réduit de 4 à 5%. Aucun effet significatif n'est visible sur la vitesse d'arrivée du débit maximum pour les scénarios avec keylines.

Le scénario POST permet, quant à lui, de diminuer le débit maximal de juillet 2021 de l'ordre 49%. Néanmoins, 39% de la surface du bassin test est aménagée avec ce scénario (POST), contre 9.5% pour les deux autres scénarios.



	site_ref	QMax delta (%)	Qmax Time delta (min)	Vol. tot. delta (%)
1	POST	-49	105	-17
2	Keyline	-13	15	-4
3	keyline sous solage	-15	15	-5

Figure 72 : Hydrogrammes, décalage temporel du pic de crue, différence relative en termes de débit maximal et de volume total modélisés à l'exutoire du bassin versant pilote agricole (1.1 km²) pour les périodes du 13 au 18 juillet 2021, selon deux scénarios d'aménagements : keylines (à gauche) et keylines avec sous-solage (à droite).

Débits maximums

Les nuages de points des débits maximums atteints à l'exutoire montrent une réduction des débits de pointe de environ 12% en moyenne pour le scénario avec keylines et 13% en moyenne pour le scénario avec keylines et sous-solage (Figure 73).

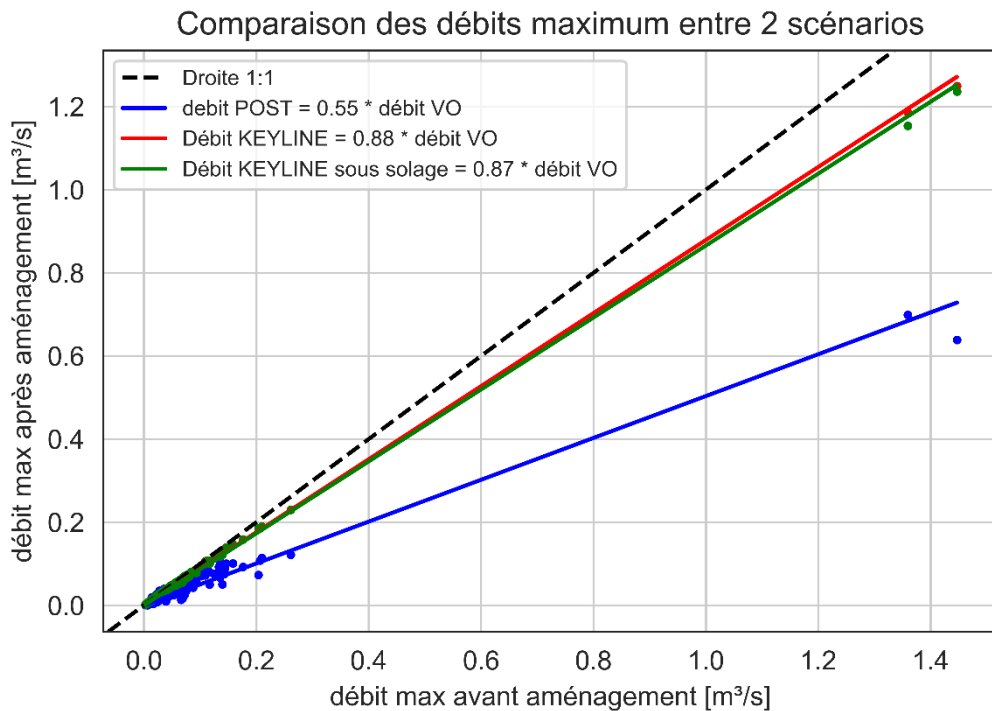


Figure 73 : Nuages de points représentant des couples de débits maximums modélisés avant et après aménagement par évènement à l'exutoire du bassin versant pilote agricole (1.1 km²), selon trois scénarios d'aménagements : POST (en bleu) keylines (en rouge) et keylines avec sous-solage (en vert).

2.8.2 Effet des keylines sur les inondations : fonctionnement hydrologique du bassin versant

Coefficient d'écoulement

Les différences de coefficients d'écoulement lors de l'évènement de juillet 2021 mettent en évidence le fonctionnement normal des keylines lors d'un évènement orageux. On observe une augmentation du ruissellement au niveau des fossés (en amont) car l'eau a tendance à s'y concentrer (Figure 74). En revanche, on observe une diminution du ruissellement au niveau des buttes en avec alignements d'arbres, ainsi que dans les zones en aval des keylines. Dans le cas du scénario avec sous-solage, l'infiltration augmente dans les zones en aval des keylines, concernées par cette pratique.

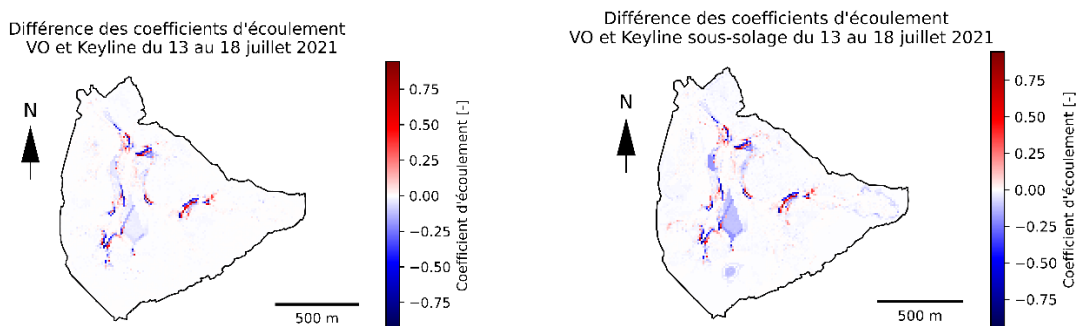


Figure 74 : Différence de coefficients d'écoulement entre les scénarios VO et keyline (à gauche) et les scénarios VO et keyline avec sous-solage (à droite) pour l'évènement du 13 au 18 juillet 2021.

2.8.3 Effet des keylines sur les sècheresses

La Figure 75 montre que les effets des aménagements du scénario POST sont similaires à ceux que l'on observe sur l'ensemble du bassin versant de la Magne.

Pour les scénarios avec keylines, il semblerait que l'infiltration moyenne sur l'ensemble du bassin augmente de l'ordre de 30 mm par an. Ce surplus d'eau ne contribue pas vraiment à augmenter la quantité d'eau dans les sols, mais ressort depuis la zone saturée vers la surface par résurgence et par évaporation. Cette résurgence (réactivation d'écoulements temporaires) apparaît avec un décalage d'environ 2 à 3 jours. Les autres composantes du bilan ne semblent pas être fortement influencées par les keylines, à l'échelle du bassin versant.

POST -	7	2	-7	0	-25	-17	50	5	-22	-27	-13	-10
KEYLINE -	0	0	14	16	12	15	3	0	-1	-1	-1	-1
KEYLINE + SUBSOILING -	1	0	13	16	12	15	3	0	-1	-1	-0	-0
	Interception - été	Interception - hiver	Infiltration - été	Infiltration - hiver	Résurgence - été	Résurgence - hiver	Evapotranspiration - été	Evapotranspiration - hiver	Recharge - été	Recharge - hiver	Stock sol - été	Stock sol - hiver

Figure 75 : Différence moyenne (POST - VO) des flux et stocks d'eau exprimés en mm réalisés sur l'ensemble du bassin versant pilote agricole selon les 3 scénarios d'aménagements et par semestre hydrologique (été - hiver).

Bilan simplifié (fossé, bute et zone aval)

En ce qui concerne le bassin versant agricole pilote avec des aménagements en keylines, des bilans ponctuels (à l'échelle d'une seule maille) sont présentés aux emplacements pertinents, permettant de mieux décrire le fonctionnement des keylines. Ces emplacements sont situés au niveau du fossé (F), de la keyline sur la butée (K) et de la zone aval à la keyline (A) (voir Figure 17). Les bilans sont réalisés pour l'années 2018.

Au niveau du fossé, on observe une augmentation des quantités d'eau dans le sol pendant l'été et l'automne (Figure 76). Cela est, entre autres, causé par une meilleure infiltration lors de la précipitation de juin 2018. On observe d'ailleurs un léger décalage vers la droite de la courbe d'infiltration (en bleu) lors de la précipitation de juin 2018, montrant que l'eau s'est d'abord accumulée, puis s'est infiltrée pendant quelques jours au niveau du fossé. De plus, cette eau percole en profondeur, contribuant à la recharge de la nappe (à 122 cm de profondeur), ce qui n'était pas le cas lors de situation initiale où l'eau n'a pas eu le temps de s'infiltrer. L'évapotranspiration augmente aussi légèrement lors de la période estivale (particulièrement sèche en 2018). Cela est dû à l'augmentation du stock d'eau dans le sol durant cette même période, diminuant ainsi le risque de stress hydrique pour les plantes. Au niveau du fossé, les scénarios avec et sans sous-solage montrent des résultats identiques.

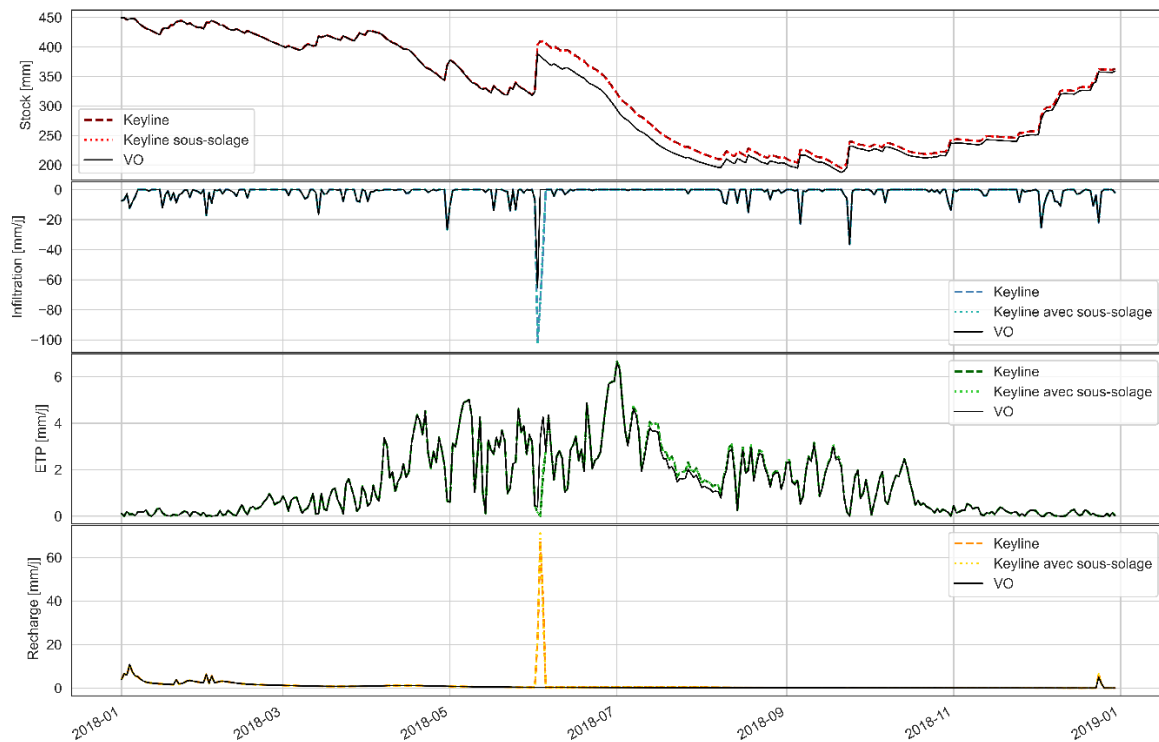


Figure 76 : Bilan en eau simplifié au cours de l'année 2018 pour les scénarios keyline et keyline avec sous-solage sur un sol à drainage favorable : dans le fossé (Figure 17 : F).

Au niveau de la butée, sur la keyline, on observe que les quantités d'eau dans le sol sont plus faibles en été et en automne par rapport à la situation initiale (Figure 77). Cela s'explique par la végétation plantée sur la butée qui transpire plus que la végétation d'origine. Néanmoins, cette transpiration plus importante indique que les plantes se développent et produisent de la biomasse, sans forcément être stressées. On observe également une augmentation de l'infiltration et de la recharge.

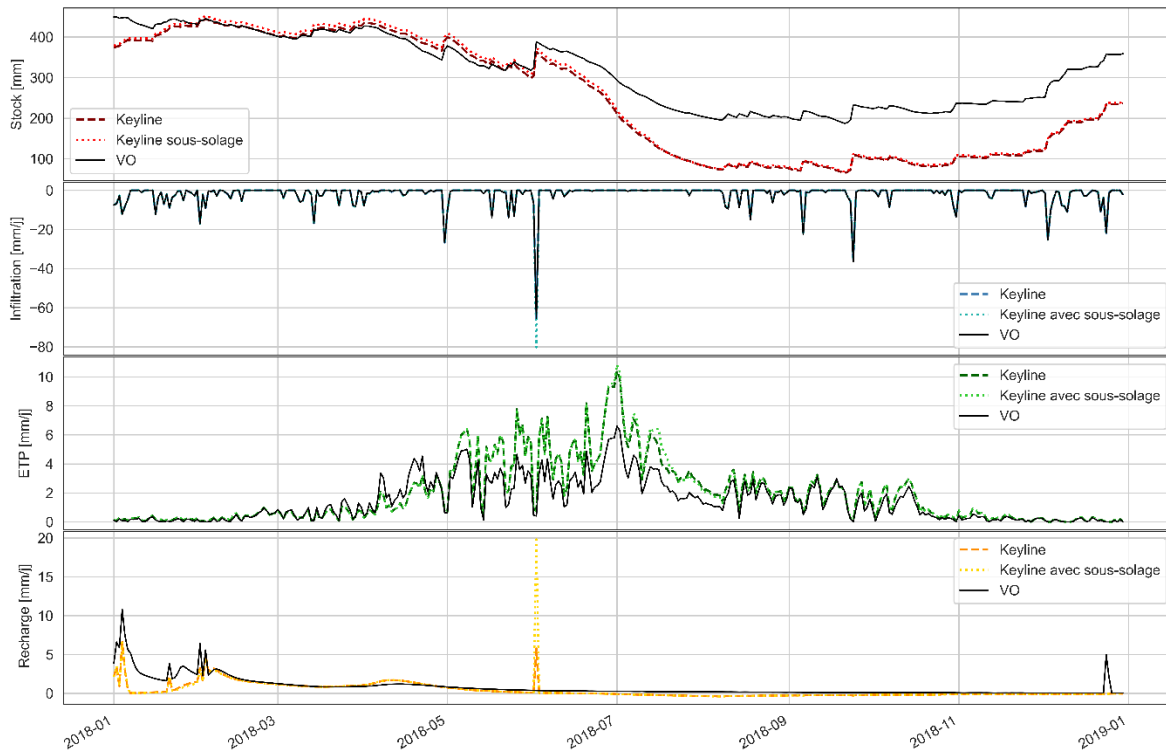


Figure 77 : Bilan en eau simplifié au cours de l'année 2018 pour les scénarios keyline et keyline avec sous-solage sur un sol à drainage favorable : sur la keyline (butée) (Figure 17 : K).

Dans la zone située en aval, nous observons des phénomènes similaires à ceux constatés dans le fossé, bien que l'impact soit légèrement plus marqué dans le scénario avec sous-solage (Figure 78). Contrairement au fossé, dans ce cas-ci, c'est la modification du paramètre destiné à rendre compte des accumulations d'eau dues à la microtopographie (Rétention superficielle), qui empêche l'eau de ruisseler et permet d'augmenter l'infiltration.

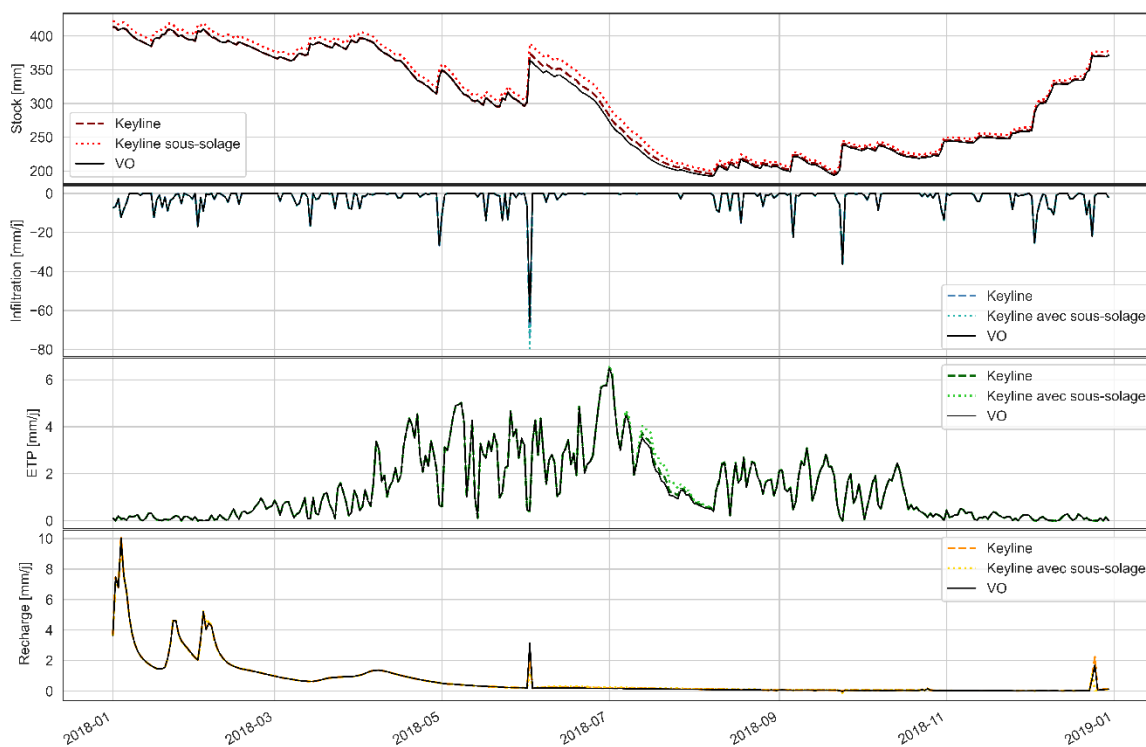


Figure 78 : Bilan en eau simplifié au cours de l'année 2018 pour les scénarios keyline et keyline avec sous-solage sur un sol à drainage favorable : dans la zone aval (Figure 17 : A).

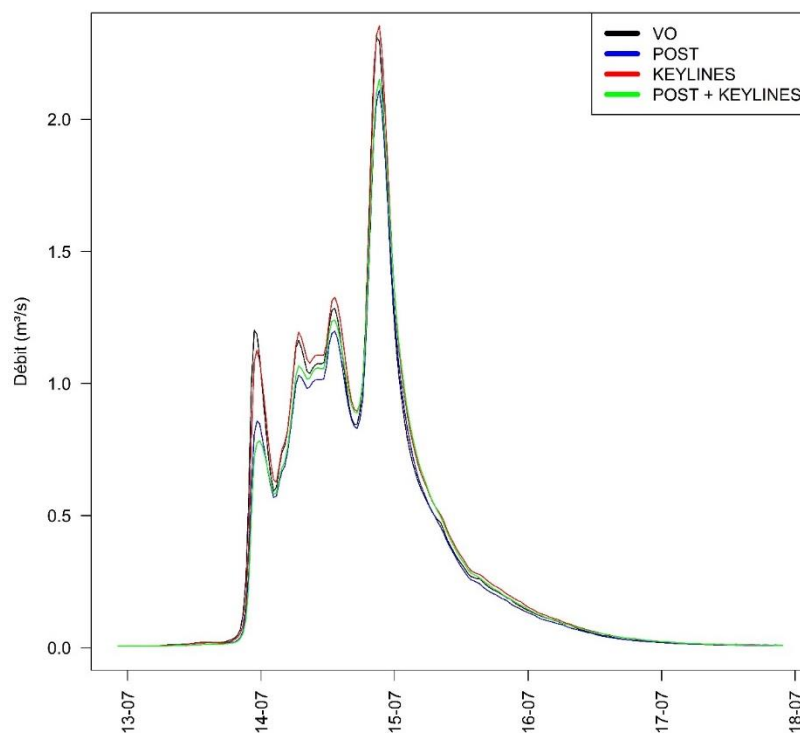
2.9 Résultats de modélisation : Keylines en contexte forestier

2.9.1 Effet des keylines sur les inondations : débit à l'exutoire

Hydrogrammes

L'analyse de l'hydrogramme de juillet 2021 semble montrer que l'aménagement de keylines dans le bassin versant pilote au sein de la Helle (en contexte forestier) ne permet pas de réduire le débit maximum pour un tel événement. En comparaison, les aménagements faits sur l'ensemble du bassin de la Helle (POST) permettent de diminuer de 9% le débit maximum à l'exutoire du bassin versant pilote. La combinaison de keylines aux autres aménagements (POST + KEYLINES) ne semble pas permettre d'améliorer l'efficacité des keylines. On remarque néanmoins que les keylines permettent un léger décalage temporel du pic de crue, de l'ordre de 30 minutes.

Il faut aussi noter que dans le scénario POST, les aménagements concernent 60% de la surface du bassin versant pilote, contre seulement 6% pour le scénario KEYLINES.



	site_ref	QMax delta (%)	Qmax Time delta (min)	Vol. tot. delta (%)
1	POST	-9	29	-7
2	KEYLINES	2	29	4
3	POST + KEYLINES	-7	29	-3

Figure 79 : Hydrogrammes, décalage temporel du pic de crue, différence relative en termes de débit maximal et de volume total modélisés à l'exutoire du bassin versant pilote forestier pour les périodes du 13 au 18 juillet 2021, selon trois scénarios d'aménagements : POST, KEYLINES et POST + KEYLINES.

Débits maximums

L'analyse des débits maximums confirme la faible efficacité des keylines dans le contexte de la Helle. On note tout de même un événement où une réduction du débit maximum est clairement visible (réduction de l'ordre de 20%). Il s'agit de la précipitation du 29 mai 2018. Cet événement est particulier car il s'agit d'une averse relativement courte mais intense et qui suit une période de deux mois presque sans pluies. Dans ce contexte pédologique particulier, ce sont dans ces conditions initiales où les sols ne sont pas saturés qui induisent le stockage et l'infiltration de l'eau par les keylines. On remarque d'ailleurs, qu'une seconde précipitation s'est produite 3 jours plus tard et les keylines n'ont eu aucun effet. Dans ces conditions où les keylines sont déjà remplies et les sols sont saturés, les keylines ne peuvent apporter de bénéfices en termes de réduction du ruissellement.

Comparaison des débits maximum entre 2 scénarios

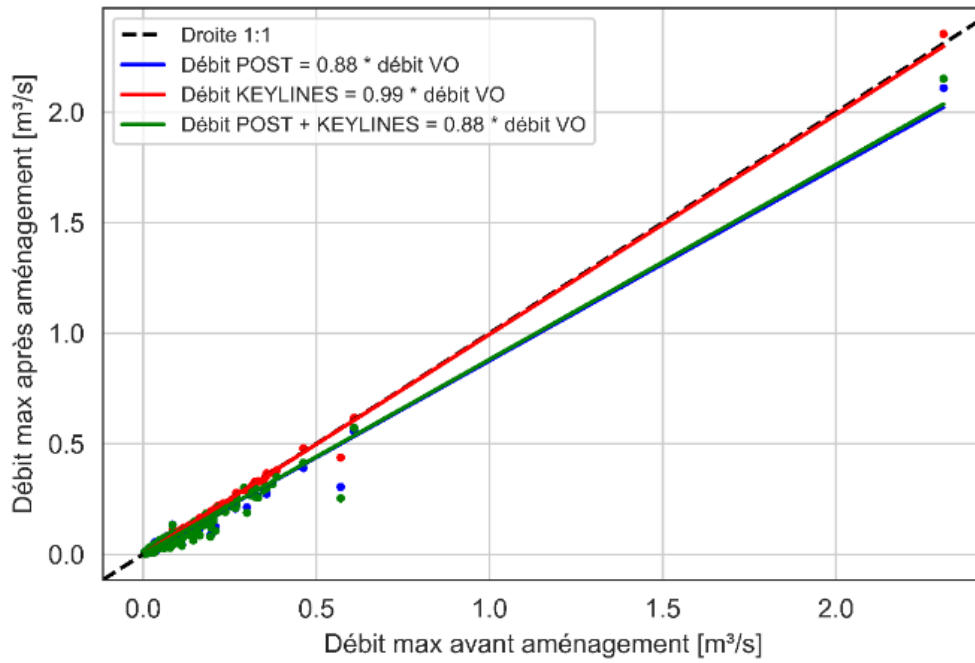


Figure 80 : Nuages de points représentant des couples de débits maximums modélisés avant et après aménagement par évènement à l'exutoire du bassin versant pilote forestier selon trois scénarios d'aménagements : POST (en bleu), KEYLINES (en rouge) et POST + KEYLINES (en vert).

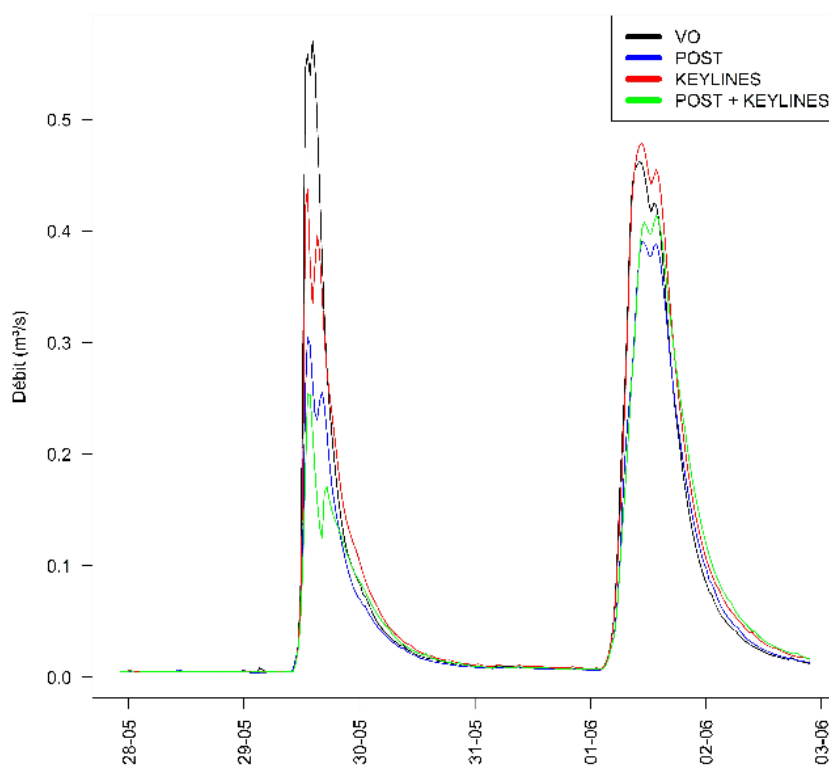


Figure 81 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant pilote forestier pour les périodes du 28/05/2018 au 3/06/2018.

2.9.2 Effet des keylines sur les inondations : fonctionnement hydrologique du bassin versant *Coefficient d'écoulement*

Au niveau des coefficients d'écoulement pour l'événement de juillet 2021, on peut remarquer que les coefficients sont unitaires pour tout l'amont du bassin versant.

On peut remarquer que à l'amont, les keylines permettent de diminuer les coefficients d'écoulements au niveau des buttes, là où des alignements de feuillus sont plantés. On observe une augmentation des coefficients d'écoulements au niveau des fossés à l'aval mais pas à l'amont car les coefficients d'écoulements étaient déjà unitaires (au maximum) avant l'aménagement de keylines. Pour le scénario POST on observe, une diminution des coefficients d'écoulements au niveau de zones d'interventions d'aménagements A2. Enfin pour le scénario POST + KEYLINE, on observe simplement une addition des effets entre le scénario KEYLINE et le scénario POST.

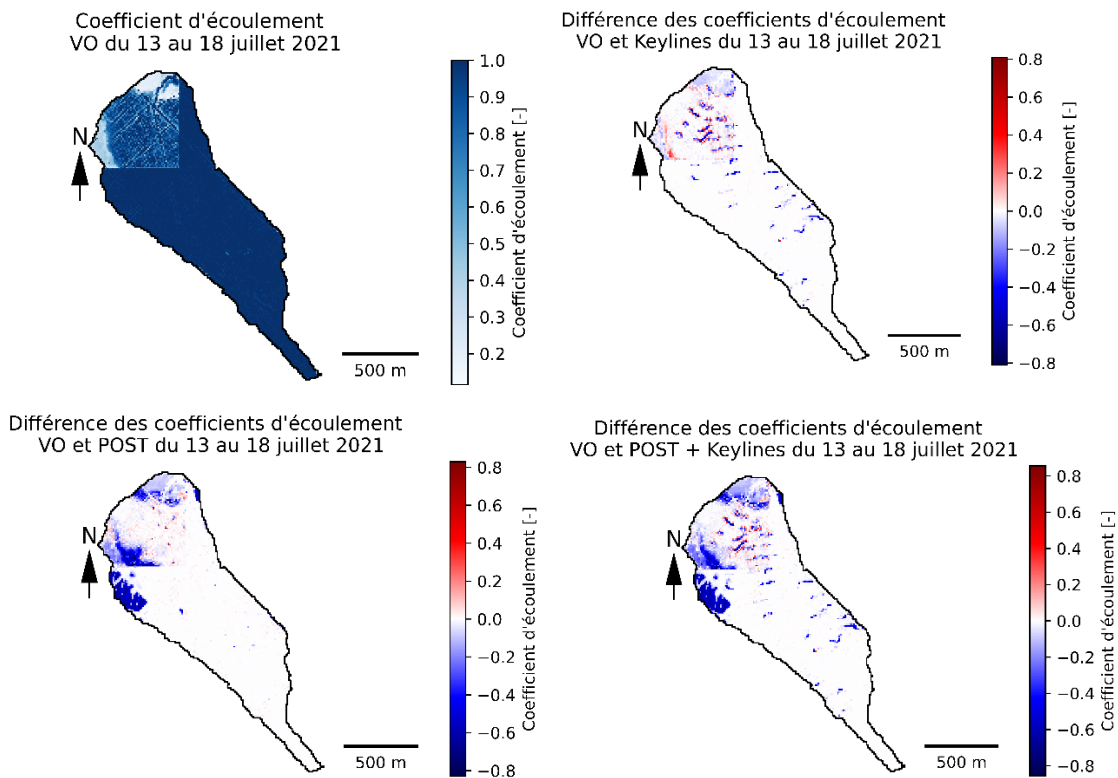


Figure 82 : Coefficients d'écoulement avant aménagement (en haut à gauche) et différence de coefficients d'écoulement entre les scénarios : VO et keyline (en haut à droite), VO et POST (en bas à gauche) et VO et POST+keyline (en bas à droite) pour l'évènement du 13 au 18 juillet 2021.

2.9.3 Effet sur les sécheresses

Etonnamment, au niveau des bilans en eau, la différence d'infiltration après l'aménagement de keylines semble être plus importante ici que dans le contexte de la Magne, ce qui semble contredire les précédentes observations. Néanmoins, il s'agit bien d'une situation biophysique moins favorable aux keylines. Premièrement, les keylines sont moins profondes (1m pour la Magne, contre 0,5m ici). Deuxièmement, la part du territoire aménagée par les keylines est moins importante (10% pour la Magne, contre 6% ici). Troisièmement, comme les sols sont plus souvent engorgés (principalement en hiver), il se peut que les keylines soient déjà remplies avant une précipitation. Tout cela engendre une moindre capacité de stockage d'eau en surface dans les keylines à l'échelle du bassin versant.

De plus, le décalage temporel entre l'infiltration et la résurgence semble être bien inférieure ici (2 à 3 jours pour la Magne, contre environs 1 jour ici). Ainsi, pour des précipitations durant plus de 24h, l'infiltration additionnelle semble être compensée par de la résurgence.

POST -	-0	-17	3	18	2	-12	41	-4	-6	10	-6	-4
KEYLINE -	1	-1	14	25	14	24	4	-0	-3	-2	1	-0
POST + KEYLINE -	2	-17	16	39	15	10	42	-4	-8	8	-4	-4
	Interception - été -	Interception - hiver -	Infiltration - été -	Infiltration - hiver -	Résurgence - été -	Résurgence - hiver -	Evapotranspiration - été -	Evapotranspiration - hiver -	Recharge - été -	Recharge - hiver -	Stock sol-été -	Stock sol - hiver -

Figure 83 : Différence moyenne (POST - VO) des flux et stocks d'eau exprimés en mm réalisés sur l'ensemble du bassin versant pilote forestier selon les 3 scénarios d'aménagements et par semestre hydrologique (été - hiver).

2.10 Synthèse et recommandations

Tableau 8 : Tableau de synthèse montrant l'efficacité en termes de réduction du ruissellement des principaux aménagements.

	Efficacité (diminution du ruissellement %) médiane lors d'événements ruisselants			Efficacité (diminution du ruissellement %) juillet 2021		
	Hoegne	Helle	Magne	Hoegne	Helle	Magne
Restauration des sols tourbeux et paratourbeux sur landes (A1.1)	-0%	-0%		-0%	-0%	
Restauration des sols tourbeux et paratourbeux sur résineux (A1.2)	-0.5%	-0.5%		-0.5%	-0.8%	
Diversification des milieux sur sols hydromorphes et Pratiques forestière limitant la compaction des sols (A2+A5)	-5%	-11%		-8%	-13%	
Pratiques forestières limitant la compaction des sols (A5)	-1%	-1%		-9%	-6%	
Barrières interparcellaires (B1)			-11%			-38%
Rouleau antiérosif en maïs (A4)			-13%			-15%
Techniques Culturelles Simplifiées - TCS (A4)			-15%			-9%

2.10.1 Précaution vis à vis de la modélisation physiquement basée

Les aménagements testés à travers les différents scénarios sont virtuellement mis en place en considérant que ceux-ci soient instantanément fonctionnels. Or, cela n'est pas le cas pour tous les aménagements. Par exemple, la conversion d'une forêt de résineux en une forêt de feuillus mature peut prendre plusieurs dizaines d'années. Une exception est faite pour la restauration des sols tourbeux et paratourbeux. En effets, pour ces aménagements des modifications des propriétés des sols se feront probablement voir dans des échelles de temps très longues (en centaines d'années) et n'ont pas été intégrées dans les scénarios d'aménagements.

Le modèle Mike She se veut être un modèle hydrologique physiquement basé. Il intègre le plus de processus possible susceptible de jouer un rôle sur l'hydrologie terrestre. Néanmoins, Mike She n'est pas capable d'intégrer certaines boucles de rétroactions entre des composantes eau-sol-plante-atmosphère. Ainsi, le développement de la végétation est préétabli (supposé optimal) et n'est pas conditionné par le statut hydrique des sols, ou d'autres facteurs de stress pour la végétation. Modéliser ce type d'interaction requiert un coupage explicite du modèle hydrologique avec un modèle de culture (style AquaCrop). De manière similaire, les précipitations et l'évapotranspiration potentielle en entrée du modèle sont préétablies (et correspondent à un historique). Ainsi, des variations du climat local (transpiration, ombre, vent, hygrométrie, etc) engendrées par des modifications d'occupation du sol ne sont pas prises en compte.

Enfin la réponse hydrologique des scénarios d'aménagements modélisée par Mike She est une réponse unique, sans aucune gammes d'incertitudes. Pour certains aménagements, la littérature ou des observations de terrains permettent de confronter les résultats du modèle. Néanmoins, cela n'est pas le cas pour tous les aménagements. Il est donc crucial de continuer à collecter des mesures de terrains afin de mieux rendre compte des phénomènes et de rendre les modèles plus sûrs et plus performants.

2.10.2 Restauration des sols tourbeux et paratourbeux (A1)

A court terme, il semblerait que la restauration de tourbières entraîne un impact limité sur l'hydrologie des bassins versants tourbeux et paratourbeux. Cet impact est d'autant plus limité pour des événements de précipitations extrêmes, tels que juillet 2021. En effet, comme observé sur le bassin versant tourbeux, il semblerait que ces aménagements ne soient efficaces que sur la « première pluie » suivant une période sèche.

Cet impact varie également selon l'occupation initiale du sol (landes ou forêts de résineux). Dans le cas de la conversion landes vers de futures tourbière (A1.1) l'impact hydrologique à court terme sera probablement quasiment nul. S'il s'agit de transformer des forêts de résineux vers de futures tourbière (A1.2), l'impact hydrologique à court terme sera légèrement plus important et favorable à une diminution du ruissellement. Cela s'explique par la modification de la végétation, modifiant différentes composantes du cycle hydrologique dont la dynamique d'interception et d'évapotranspiration. Et qui à son tour influence l'infiltration, le stock d'eau dans les sols et la recharge des nappes.

Nous avons également pu constater que par endroits (notamment sur la Helle), la conversion forêts de résineux vers de futures tourbières (A1.2) pouvait ne pas être compatible avec le niveau actuel d'engorgement du sol, qui est trop sec par moment. Dans ces endroits, il est possible que la nouvelle végétation mise en place puisse subir des stress hydriques en raison de sa faible profondeur racinaire. Cette difficulté pourrait croître sous l'effet de l'évolution du climat.

2.10.3 Diversification des milieux sur sols hydromorphes (A2)

La transformation des forêts monospécifiques de résineux vers des forêts de feuillus mixte sur les sols hydromorphes semble être l'action présentant le plus d'impact sur la résilience hydrologique dans le domaine forestier. Une fois adultes, les feuillus ont des racines profondes leur permettant de puiser l'eau là où les résineux en sont incapables. Cela contribue à une diminution du stress hydrique des forêts de feuillus mixtes en cas de sécheresses répétées. Cela a pour conséquence de diminuer la susceptibilité au dépérissement de nos forêts et de rendre les peuplements moins vulnérables à des stress secondaires comme les attaques d'insectes ou les maladies (dont l'ampleur devrait s'intensifier sous l'effet du changement climatique) (Frisson et al., 2011).

Le prélèvement d'eau plus important en été par les forêts de feuillus mixtes a pour conséquence une diminution des quantités d'eau présentes dans le sol de surface. Cela libère la porosité du sol et contribue à une augmentation visible de l'infiltration, en été comme en hiver. Cet effet joue un rôle prépondérant dans la diminution du ruissellement lors d'un événement comme juillet 2021.

Un autre effet sur la dynamique du cycle hydrologique est le passage d'une végétation à feuilles persistantes vers une végétation à feuilles caduques en hiver. Cela a principalement pour effet en hiver de diminuer l'interception, d'augmenter la quantité d'eau arrivant au sol et d'augmenter l'infiltration. Il est également possible que l'augmentation des quantités d'eau arrivant au sol entraîne par moment

une très légère augmentation du ruissellement. Néanmoins, cette différence d'interception est très négligeable si on considère un événement de pluie extrême.

La variation saisonnière du cycle végétatif des feuillus a également pour conséquence d'augmenter les variations de la recharge de la nappe entre l'été et l'hiver. En été la recharge diminue alors qu'elle augmente en hiver. Néanmoins, à l'échelle annuelle, la recharge semble légèrement diminuer dans les zones concernées par ces aménagements.

2.10.4 Pratiques limitant la compaction des sols (A5)

Concrètement, les pratiques limitant la compaction des sols forestiers impliquent principalement une réflexion autour du cloisonnement des peuplements, où la circulation des engins forestiers est exclusivement limitée à des couloirs d'environ 4m de largeur et espacés de 16 à 36m. Cela a pour but de minimiser la surface circulée par les engins et de permettre d'optimiser le travail d'abattage. Pour plus d'informations sur les pratiques limitant la compaction des sols forestiers, un guide technique de l'ONF et du FCBA est disponible ; « *Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt PROSOL* » (Pischedda et al., 2009).

Un effet attendu de ces pratiques est une augmentation moyenne de la porosité et de la perméabilité du sol de surface. Une réponse systématiquement observée est l'augmentation de la quantité d'eau dans le sol en surface. Dans les sols à drainages favorables, cette augmentation de la quantité d'eau contribue à une diminution visible de la sensibilité aux stress hydriques des peuplements liés à des périodes de sécheresses.

On observe également une tendance à la réduction de la production de ruissellement, qui peut s'avérer importante en cas d'événements extrêmes. Il se peut que l'efficacité de cette pratique (en termes de réduction de la production de ruissellement) soit plus importante sur des sols à drainages favorables, là où l'infiltration est fortement conditionnée par la perméabilité du sol en surface. Ces pratiques constituent un levier d'action important en faveur de la résilience hydrologique du bassin versant de la Vesdre, particulièrement dans les sols à drainage naturel favorable.

2.10.5 Redents et bouchage du réseau de drainage forestier (B2 + B3)

Ces éléments n'ont pas pu être évaluées indépendamment des autres aménagements mis en place sur le bassin versant forestier et tourbeux. Néanmoins, la faible réponse aux aménagements du bassin versant tourbeux semble indiquer qu'il n'y a peu, voir pas, de réduction des débits maximums associés au bouchage du réseau de drainage (par 197 redents). Cette observation semble être confortée par une littérature prônant que « Le rabattement du niveau de la nappe consécutif au drainage a généralement un effet plus important sur la formation du débit de pointe que l'augmentation de la capacité de transport des canaux dans les bassins—versants drainés » (IRITZ et al., 1994 ; Laudon et al., 2023). Ainsi, l'augmentation du niveau de la nappe, consécutive au bouchage des drains, peut avoir pour effet de limiter l'infiltration de l'eau dans des sols déjà partiellement saturés. Et cet effet (négalif en termes de réduction du débit de pointe) ne serait que partiellement compensé par la déconnexion hydrologique du bassin versant.

Si l'objectif primordial est de limiter les risques d'inondations, une alternative possible est d'installer des redents ajourés (plutôt que des redents pleins) dans le réseau de drainage, permettant à la fois le rabattement du niveau la nappe et la rétention de l'eau de ruissellement au-dessus d'un certain seuil de débit (Figure 84). Ce type d'action est néanmoins que peu compatible avec des objectifs de

restauration des tourbières. Ce type d'aménagement n'est à notre connaissance pas représentable dans la modélisation Mike She et n'a donc pas pu être testé.



Figure 84 : Fossé large en dalles de béton ajourées (GISER)

2.10.6 Pratiques agricoles de conservation des eaux et des sols (A4)

Ces pratiques ont été matérialisées par l'utilisation du rouleau antiérosif en maïs et des Techniques Culturelles Simplifiées (TCS). Les effets présumés du rouleau antiérosif est l'augmentation de la rétention de surface par la création de microcavités au moment du semis. L'effets attendu des TCS est une modification de la distribution de la taille des pores du sol de surface (liée à une meilleure agrégation) qui permet à la fois, de mieux conduire l'eau lorsque le sol est presque saturé et de mieux la retenir lorsque celui-ci est plus sec.

Il semblerait que ces deux techniques soient efficaces en termes de réduction du ruissellement avec une réduction de l'ordre de 10 à 20% du ruissellement pour des événements générant plus de 3mm de ruissellement avant aménagements. Ces valeurs sont aussi valables pour juillet 2021. Pour les TCS, ce résultat est assez cohérent avec une littérature indiquant des réductions de 8 à 53% du ruissellement (Intell'eau). En revanche, pour le rouleau antiérosif en maïs, la réduction du ruissellement observée dans cette modélisation est bien moins importante que celle observée en ceinture limoneuse par Clément et al. (2023) (qui est de 69%). Au-delà des choix méthodologiques d'implémentation de la pratique au sein du modèle, le meilleur drainage et les pentes plus faibles de la région limoneuse représentent un contexte nettement plus favorable à l'infiltration.

Assez étonnamment, au niveau des parcelles concernées par ces aménagements on observe que la quantité d'eau dans les sols, la résurgence et l'évapotranspiration diminuent légèrement. Néanmoins cela est très probablement dû à l'aménagement de barrières interparcellaires qui par effet de bord

peuvent provoquer un assèchement au sein des parcelles agricoles (aussi visible à l'échelle du bassin) et une légère compétition pour l'eau. Sans les effets des barrières interparcellaires qui viennent polluer les résultats au niveau des parcelles, on pourrait s'attendre à ce que ces pratiques agricoles permettent une amélioration de la résilience des cultures face aux sécheresses agronomiques. On remarque d'ailleurs que la diminution du stock d'eau dans les sols sous ces cultures est moins importante que la diminution moyenne sur l'ensemble du bassin versant (provoqué par les barrières interparcellaires). En parallèle, il semblerait que ces pratiques favorisent légèrement la recharge des nappes.

2.10.7 Trame bocagère en milieux agricoles et production inter-parcellaire de fourrage (B1 et B4)

Le passage de 22% de la surface du bassin versant d'une végétation de prairies, ou de cultures vers une végétation de feuillus constituant une trame bocagère dense semble provoquer des modifications hydrologiques importantes à l'échelle du bassin versant. L'augmentation estivale de l'évapotranspiration et de l'interception semble provoquer un assèchement des sols, une réduction de la recharge et une réduction de la résurgence, visible à l'échelle du bassin versant.

Malgré cette diminution des quantités d'eau dans les sols, nous observons une diminution du nombre de jours de stress hydrique au niveau des haies car la profondeur racinaire y est plus importante. Dès lors, la végétation des haies peut puiser de l'eau en profondeur lorsque l'eau en surface vient à manquer. Ainsi, lors d'une sécheresse des haies fourragères peuvent constituer un apport de fourrage non négligeable pour du bétail ne pouvant plus s'alimenter par des prairies roussies par le manque d'eau. L'implantation de haies peut donc contribuer à une agriculture plus résiliente face à des sécheresses agronomiques. On peut également citer d'autres services que les haies rendent tout au long de l'année à l'élevage et aux cultures comme une protection contre le vent/pluie/soleil, une source d'alimentation plus diversifiée (offrant des propriétés nutritives intéressantes). Les tanins présents dans certaines espèces ligneuses peuvent permettre une forme d'automédication du bétail face à certains parasites. Une alimentation plus riche en fibres ligneuses permet un passage de l'excrétion de l'azote (N) par les urines vers les fèces, dans lesquels il est moins volatile et moins lixiviable. Le N est alors moins susceptible de polluer les nappes et rivières ou de se transformer en N₂O, qui est un gaz à effet de serre à très haut potentiel radiatif (Vandermeulen et al., 2018).

Les haies contribuent également à modifier les propriétés hydrodynamiques du sol en surface par l'augmentation de la densité racinaire et de la teneur en matière organique. Cela augmente la porosité et la perméabilité des sols en surface. Les haies permettent également une augmentation de la rugosité en surface. Cela combiné à l'action d'assèchement du sol permet aux haies de diminuer significativement le ruissellement à l'échelle du bassin versant. Au niveau des haies, nous avons observé une diminution de 38% du ruissellement pour l'événement du juillet 2021.

Les haies constituent un levier important pour la constitution d'agroécosystèmes plus résilients. Les choix des lieux et des essences plantées peuvent être motivés par une logique de maximisation des services écosystémiques rendus à l'échelle de l'agroécosystème. Ainsi, l'action individuelle devrait tenir compte des contextes locaux tout en étant intégrée selon un plan d'action cohérent à l'échelle de l'agroécosystème.

2.10.8 Keylines (B5)

Les keylines semblent être un outil intéressant pour améliorer la résilience hydrologique des bassins versants. En moyenne sur une année, nous avons constaté que les keylines permettent une

augmentation de l'infiltration et de la résurgence. Concrètement cela représente le passage d'une quantité accrue d'eau de pluie par le sol et le sous-sol.

Il semblerait que le potentiel de régulation des inondations des keylines soit plus élevé en contexte agricole qu'en contexte forestier/tourbeux. Cela s'explique par différents facteurs, principalement liées au contexte hydro-géo-pédologique. Les sols sont généralement plus profonds en contexte agricole, permettant de creuser des keylines plus profondes. En contexte agricole, les sols sont plus drainants, permettant de plus rapidement infiltrer le surplus d'eau stocké dans les keylines. En contexte tourbeux et paratourbeux, la nappe est souvent affleurante, dès lors il se peut que les keylines soient déjà remplies avant même une précipitation. Pour que le fonctionnement des keylines soit optimal, il est important qu'elles puissent répartir l'eau venant de zones engorgées (souvent des vallées) vers des zones sèches (souvent des crêtes). Dans le contexte agricole, cette situation est commune, contrairement au contexte tourbeux et paratourbeux où la quantité d'eau dans les sols est élevée et relativement homogène dans l'espace. Dès lors, en contexte tourbeux, les keylines sont seulement efficaces lors d'une précipitation unique suivant une période sèche (orage d'été).

En contexte agricole, un sous-solage peut être pratiqué parallèlement à la keyline pour améliorer l'enracinement et les propriétés d'infiltration du sol. Néanmoins, nous n'avons pas remarqué d'effet important du sous-solage au niveau du bassin versant pilote agricole. Un sous-solage ne doit pas être réalisé systématiquement lors de l'aménagement de keylines et semble être indiqué uniquement lorsqu'une couche compacte et dense de sol (par exemple une semelle de labour) limite l'enracinement et l'infiltration.

En contexte agricole, une haie ou un alignement d'arbre est généralement planté sur la butte créée en aval du fossé constituant la keyline. Ainsi, les keylines peuvent être un outil intéressant pour recréer une trame bocagère hydrologiquement optimisée en milieux agricole. De cette manière, tous les services écosystémiques rendus par les haies peuvent également être fournis par les keylines. Le surplus d'eau infiltrée peut également compenser le surplus d'évapotranspiration causé par les haies et limiter les éventuels stress hydriques au niveau des parcelles. Néanmoins, nous avons remarqué que la disposition actuelle du réseau viaire et du parcellaire agricole peut s'avérer être une contrainte forte à l'installation optimale de keylines. Cela soulève la question d'un remembrement vers un tracé des parcelles repensé en fonction de la topographie du milieu.

3 Modélisation conceptuelle

3.1 Principes de modélisation conceptuelle

3.1.1 Généralités

La modélisation hydrologique pluie-débit permet d'étudier le fonctionnement d'un bassin versant en établissant une loi de conversion de données d'entrée en résultats, appelés sorties (Figure 85). Une première étape de calibration confronte des données d'entrée avec les sorties attendues, ce qui permet d'établir la relation pluie-débit.

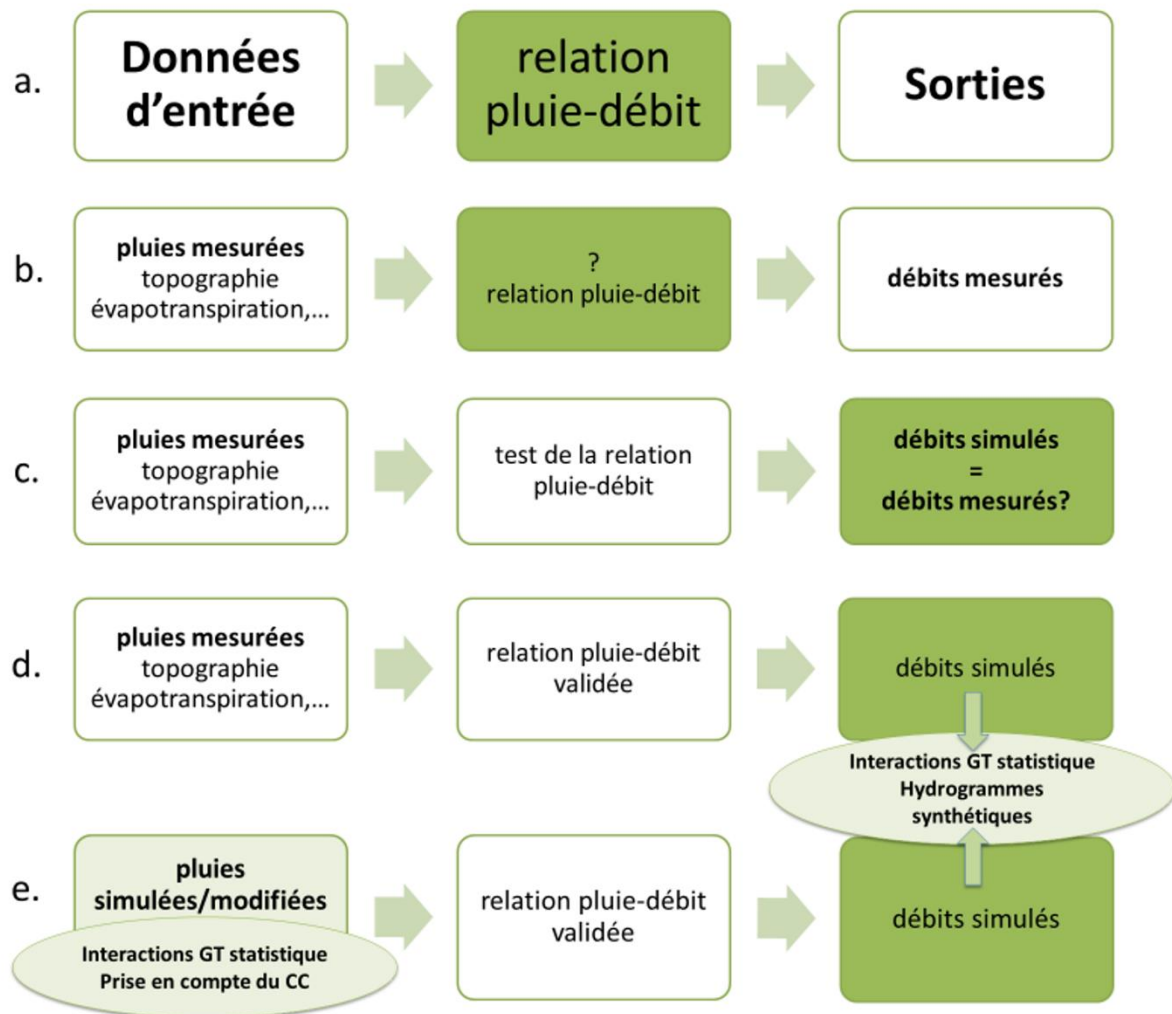


Figure 85 : Modélisation pluie-débit : a. Principe général b. Calibration c. Validation d. Modélisation sur base de séries de données historiques e. Modélisation prédictive sur base de pluies futures estimées dans un contexte de changement climatique

Une deuxième étape de validation du modèle teste la qualité de cette loi, en fournissant des données d'entrée, pour lesquelles les sorties attendues sont connues et comparées avec les sorties simulées via la relation pluie-débit. Si la qualité de simulation est suffisante, l'étape de modélisation peut s'effectuer. Dans le cadre de la présente convention, une modélisation sur base des séries de données historiques a été réalisée, ainsi qu'une modélisation sur base de prédictions de pluies. Cette seconde méthode vise à estimer le comportement hydrologique du bassin versant de la Vesdre dans un contexte de changements climatiques. De plus, une seconde calibration basée sur les séries issues des modélisations physiquement basées représentant les bassins versants aménagés a été réalisée et

permet d'extrapoler -en première approche et avec prudence- l'effet des aménagements sur d'autres bassins via l'ajustement des paramètres conceptuels.

3.1.2 Fonction objectif

Une fonction objectif est une relation mathématique que l'on utilise comme indicateur de la qualité de la modélisation.

Le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe, NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency), se calcule comme suit :

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q})^2} \right] \quad (0.1)$$

Sa valeur est comprise entre $-\infty$ et 1 avec un optimum à 1.

3.1.3 Indicateurs de qualité

3.1.3.1 Indicateurs globaux

Outre la fonction objectif, d'autres indicateurs peuvent être calculés en post-traitement lors de l'étape de validation, pour évaluer la qualité de la modélisation. Le coefficient de détermination (R^2) est un indicateur courant.

Les indicateurs proposés par Moriasi et al. (2007) sont le NSE, mais aussi le PBIAS :

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} 100 \quad (0.2)$$

et le RSR, ratio entre le RMSE et l'écart-type des observations :

$$RSR = \frac{RMSE}{\sigma_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q})^2}} \quad (0.3)$$

Ainsi, Moriasi et al. (2007) recommandent des valeurs de $NSE > 0,5$; $RSR \leq 0,7$; $PBias \leq \pm 25\%$ pour une modélisation de qualité satisfaisante.

3.1.3.2 Indicateurs événementiels

Pour un jeu de paramètres θ , différents indicateurs sont utilisables pour évaluer la qualité de modélisation d'évènements extrêmes.

L'erreur sur le débit de pointe $\varepsilon_{Q_{max}}$ se calcule comme suit :

$$\varepsilon_{Q_{max}}(\theta) = Q_{sim,max}(\theta) - Q_{obs,max} \quad (0.4)$$

L'erreur sur le volume ruisselé est déterminée par :

$$\varepsilon_{Vol}(\theta) = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (Q_{obs,j} - Q_{sim,j}(\theta)) \quad (0.5)$$

Le RSME, Root-Mean Square Error, ou erreur quadratique moyenne, vaut :

$$RMSE(\theta) = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \sqrt{(Q_{obs,i} - Q_{sim,i}(\theta))^2} \quad (0.6)$$

3.1.4 Algorithme de calibration

L'algorithme de calibration employé est le « recuit-simulé » ou « simulated annealing ». La calibration étant stochastique, dix répétitions sont réalisées et celle ayant le meilleur NSE est retenue comme l'optimale.

3.1.5 Type de modélisation

La modélisation peut être globale, ou « lumped », c'est-à-dire que les paramètres du modèle sont calés pour tout un bassin versant aux caractéristiques considérées homogènes spatialement. Une pluie uniforme tombe sur le bassin, et une évapotranspiration uniforme s'y produit.

Un modèle semi-distribué articule plusieurs sous-bassins indépendamment les uns des autres.

Un modèle distribué tire parti de caractéristiques variant spatialement sur la zone d'étude pour déterminer en chaque maille une loi d'écoulement.

3.1.6 Intérêt et limite de la modélisation

Il est important de souligner dès à présent l'intérêt mais aussi les limites de la modélisation. Une modélisation conceptuelle est un outil puissant pour décrire le fonctionnement d'un système sur base empirique, sans pour autant être infaillible. On gardera particulièrement à l'esprit que les résultats de modélisation ne sont pas des prédictions exhaustives de toutes les situations qu'il pourrait advenir. Une gamme de modèles et la gamme de résultats associés augmente le réalisme de prédiction des réponses possibles du bassin versant à des épisodes pluvieux, dans une optique de modélisation d'ensemble.

3.1.7 WOLFHydro

WOLF est une suite logicielle de modélisation hydrologique et hydraulique, développée par le département Hydraulics in Environmental and Civil Engineering (HECE) de la Faculté de Sciences Appliquées de l'ULiège.

La modélisation conceptuelle a été réalisée via le module WOLFHydro, composante hydrologique de WOLF. Ce module est constitué d'un code principal programmé en Orienté Objet en Fortran 2003 et d'un code Python3 de post-traitement.

Dans le cadre de ce projet, sa prise en main a été réalisée par l'équipe de Gembloux-Agro-Bio Tech et une documentation a été créée pour faciliter, à l'avenir, la prise en main par d'autres utilisateurs. En complément d'un manuel rédigé par HECE, un manuel « WOLF – notes pratiques » a été élaboré au fil de l'appropriation du logiciel. En outre, un document « WOLF – step by step » illustre des marches à

suivre pour effectuer certaines manipulations. Des codes de prétraitements, notamment de conversion des données du SPW en données d'entrée lisibles dans WOLF, ont également été développés et partagés avec le SPW. Une journée de formation a eu lieu en novembre 2023 pour faciliter la prise en main de l'outil par l'équipe de la DCENN.

Différents modèles sont implémentés dans WOLFHydro, notamment le modèle GR4H (Génie Rural à 4 paramètres Horaire) (Erreur ! Source du renvoi introuvable. a). Celui-ci a l'avantage d'être parcimonieux.

Le modèle VHM est également implémenté dans WOLFHydro (Erreur ! Source du renvoi introuvable. b). Il comporte 12 paramètres.

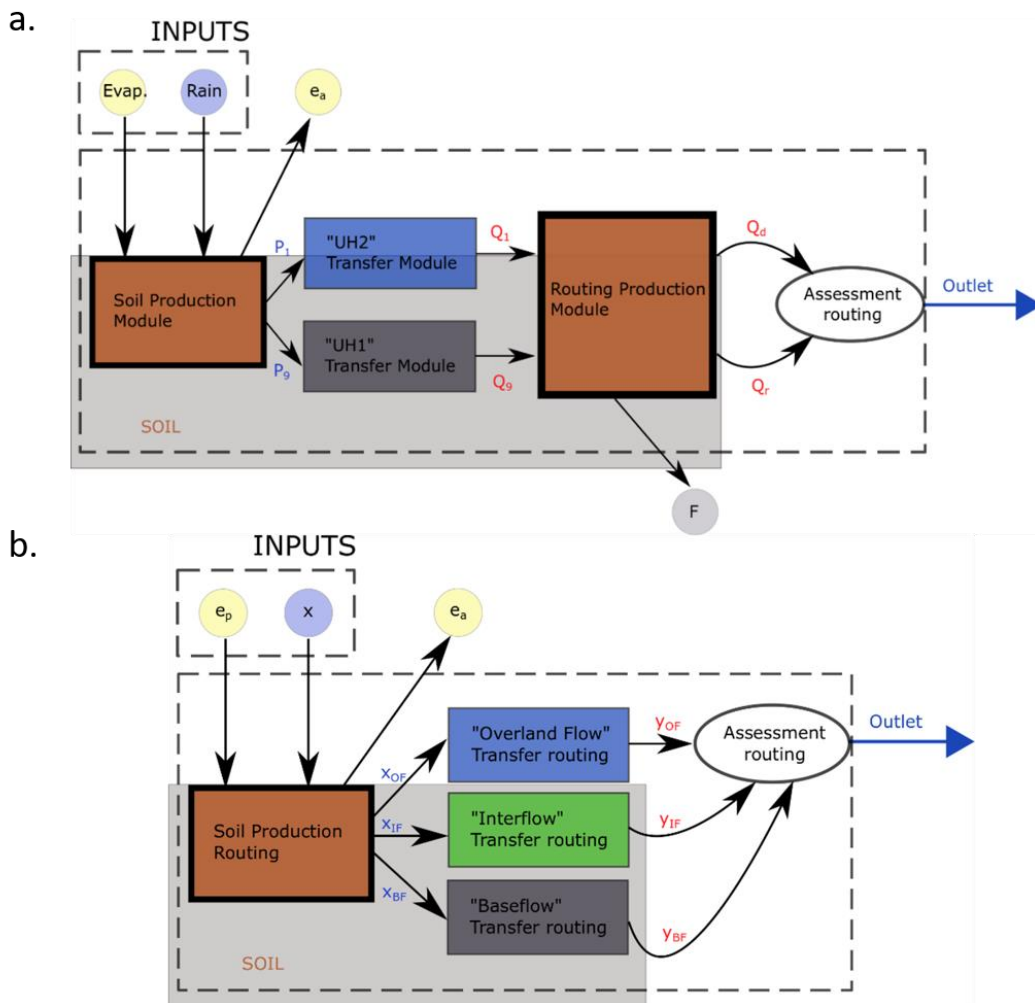


Figure 86 : a) conceptualisation du modèle GR4H. b) conceptualisation du modèle VHM. Des informations complémentaires sont disponibles dans le manuel HECE.

3.1.8 GR4H

Le modèle Génie Rural à 4 paramètres Horaire (GR4H) est un modèle conceptuel global dont les 4 paramètres sont :

- X1 [mm] : capacité du réservoir de production du sol
- X2 [mm/pas de temps] : coefficient d'échanges souterrains.
- X3 [mm] : La capacité du réservoir de routage
- X4 [heure] : Temps de base des hydrogrammes unitaires dans les modules de transfert.

Le modèle horaire permet une finesse de représentation temporelle nécessaire à la bonne compréhension des phénomènes de précipitations et leur impact sur le débit. Il est similaire au modèle GR4J, (journalier) qui ne permettrait pas une analyse temporelle suffisante. Les différences entre les deux sont uniquement liées à des valeurs de coefficients.

Ce modèle n'est pas conservatif : l'évapotranspiration est comptabilisée comme une perte, et les échanges souterrains peuvent également provoquer un apport ou un retrait d'eau au bassin versant.

Dans les premières étapes de test du module WolfHydro, il est apparu rapidement que le modèle GR4H était plus performant et plus rapide dans le contexte de la Vesdre que le modèle VHM. L'utilisation de GR4H a donc été privilégiée pour la suite du travail.

3.2 Données d'entrée

La qualité de modélisation est dépendante de la qualité de ses données d'entrée. Une première partie du travail a consisté à établir l'inventaire des différentes données à disposition, et de s'assurer qu'elles soient exploitables, à la fois par leur qualité et leur quantité suffisantes. Le cas échéant, des séries ont été construites, et/ou corrigées, dans l'optique de travailler avec les meilleures données disponibles.

3.2.1 Précipitations

3.2.1.1 Données ponctuelles

Les données de précipitations ponctuelles issues des réseaux de mesure Aqualim et WACONDAH, gérés respectivement par la Direction des Cours d'Eaux Non Navigables (DCENN - SPW ARNE²) et la Direction de la Gestion Hydrologique (DGH - SPW MI³) sont centralisées dans la base de données "hydrométrie" du SPW. Huit stations pluviométriques ont été retenues pour leur incidence sur une partie significative du bassin versant de la Vesdre (Figure 87). A noter que la station de Spa aérodrome a remplacé la station de Balmoral, ce qui amène à sept le nombre maximal de stations exploitables en même temps. Les mesures au pas de temps horaire les plus anciennes commencent en 2002. Néanmoins, les données ne sont validées quotidiennement par l'Institut Royal Météorologique (IRM) que depuis 2004. Il est donc judicieux de ne pas utiliser les données avant cette année, lorsque cela est possible.

3.2.1.2 Données spatialement distribuées

Les données de précipitations distribuées par mailles de 5x5km² de l'Institut Royal Météorologique (IRM) sont disponibles au pas de temps journalier de 1962 à 2021 inclus. Cependant, les données récentes sont à privilégier car les premières décennies de données n'ont pas été validées ou présentent des discontinuités. L'intervalle de données de 1980 à 2021 peut être retenu.

² SPW ARNE : Service Public de Wallonie Agriculture, Ressources naturelles et Environnement

³ SPW MI: Service Public de Wallonie Mobilité et infrastructures

3.2.2 Traitement de spatialisation

La spatialisation est la même que pour la modélisation physiquement basée.

Pour associer l'information spatialisée des précipitations journalières maillées à la distribution temporelle des données ponctuelles horaires, un pré-traitement a été effectué. Pour chaque maille de la grille IRM, le cumul journalier a été retenu. La station ponctuelle la plus proche a été identifiée. Les valeurs de précipitations horaires ont été transformées en leur proportion du cumul journalier IRM, pris comme référence. Une valeur de précipitation horaire a ainsi pu être attribuée pour chaque maille. Quand les valeurs ponctuelles étaient nulles sur l'ensemble d'une journée, le cumul journalier IRM a été divisé en 24, en faisant ainsi l'hypothèse d'une pluie homogène. Ces données horaires sont utilisées aussi bien pour la modélisation conceptuelle que pour la modélisation à base physique.

Les données de pluie retenues débutent le 1^{er} janvier 2002, et seront préférentiellement utilisées à partir du 1^{er} janvier 2004, soit à partir de la validation quotidienne par l'IRM.

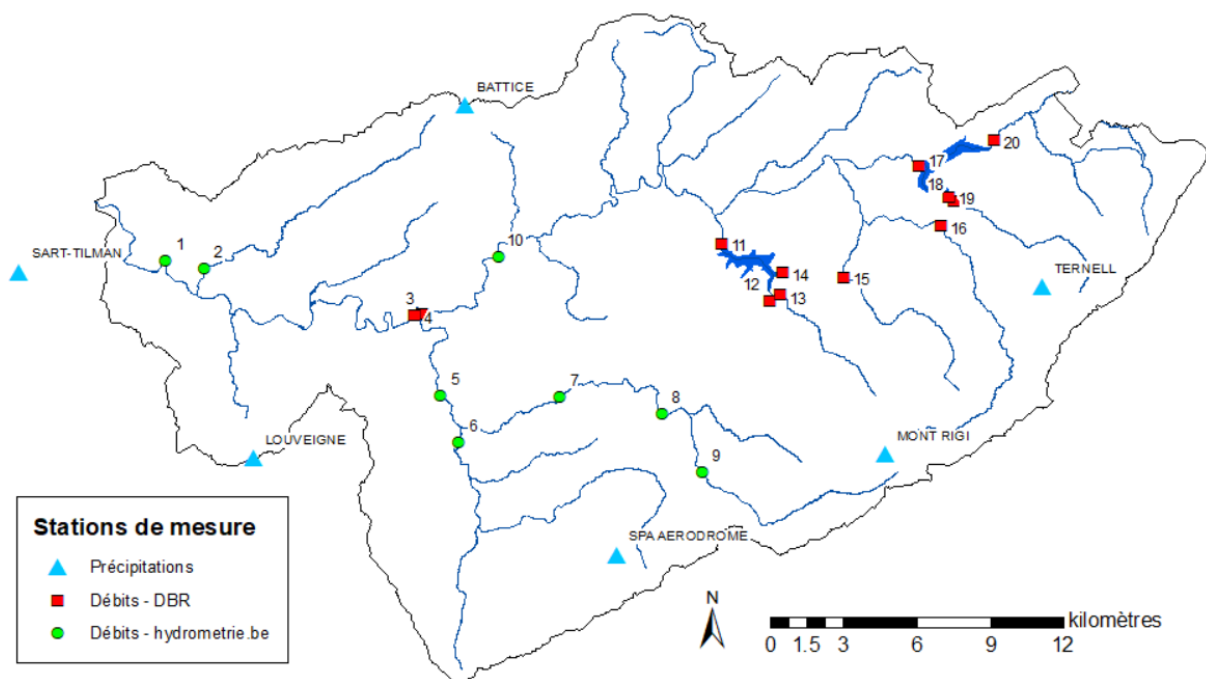


Figure 87 : Disponibilité des données ponctuelles de débit et de précipitation aux stations limnimétriques et pluviométriques ayant une influence sur le bassin versant.

3.2.3 Débits

3.2.3.1 Données Aqualim-WACONDAH

Les données issues du réseau Aqualim-WACONDAH (Figure 87) sont disponibles selon des plages reprises dans le Tableau 9. Elles bénéficient d'un contrôle de leur qualité. Les mesures de hauteur d'eau sont contrôlées au moins une fois par semaine. Ensuite, ces hauteurs sont validées par un contrôle renforcé sur de plus grandes périodes de temps et par comparaison avec les autres stations du réseau Aqualim-WACONDAH pour garantir une cohérence d'ensemble. Les données de débit sont obtenues par conversion des hauteurs via les courbes de tarage. Ces dernières sont régulièrement contrôlées et mises à jour. Elles sont considérées contrôlées et validées jusqu'en juillet 2021. Les débits ne sont pas validés systématiquement. Néanmoins, ils sont implicitement de qualité car issus des hauteurs d'eau et des courbes de tarage régulièrement validées.

Tableau 9 : Disponibilité des données de débits horaires sur les stations Aqualim-WACONDAH du bassin versant de la Vesdre

Station 1002		Début des mesures									
Code	Nom	1975	1979	1993	2002	2004	2005	2011	2015	2020	2021
6228	Chaufontaine Pisc.										
5860	Theux										
6526	Belleheid										
6790	Spixhe										
7150	Verviers										
7600	Forêt										
6517	Polleur										

3.2.3.2 Données DBR

Les données issues de la DBR sont disponibles depuis 1992 au plus tôt. Elles visent majoritairement à la gestion au quotidien des barrages. Leur archivage n'est pas précédé d'un contrôle pour validation ou correction. Ces données peuvent donc présenter des anomalies ponctuelles et continues comme illustré à la station de Pépinster, sur la Hoëgne (Figure 88). Ont notamment été observées des valeurs aberrantes, par un ordre de grandeur anormalement élevé ((Figure 88a, b), ou plus faible qu'à Theux, qui se trouve pourtant en amont (c), des anomalies ponctuelles basses (d) et hautes (e), des plateaux (f, g, h), ou des combinaisons de ces incohérences.

3.2.4 Occupation du sol

Les données d'occupation du sol de la Carte d'Occupation du Sol de Wallonie (COSW) sont implémentées dans WOLF. Les modèles « lumped » n'en font toutefois pas usage en calibration, même si elles sont nécessaires au démarrage de WOLF.

3.2.5 Topographie

Les données de topographie du MNT LIDAR 2013-2014 sont disponibles et déjà implémentées dans WOLFHydro.

3.2.6 Evapotranspiration

L'évapotranspiration est le processus décrivant le flux de vapeur d'eau qui est évaporé des surfaces d'eau libre et des sols et qui est transpiré par la flore et la faune (la contribution de la faune est souvent négligée). Ce terme regroupe les deux phénomènes car l'évaporation et la transpiration sont difficiles à considérer séparément. L'évapotranspiration potentielle, notée ETp, est la quantité de d'eau maximale qui peut être évapotranspirée sous un climat donné par un couvert végétal continu et bien alimenté en eau. L'évapotranspiration réelle est la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère par le sol et la végétation lorsque le sol est à son état d'humidité effectif, et non nécessairement maximal. L'ET réelle est toujours inférieure ou égale à l'ETp, et relie le bilan hydrique et le bilan énergétique de la surface terrestre.

Dans le cadre de la présente étude hydrologique, l'évapotranspiration est considérée comme étant la fraction du volume de pluie perdue, et qui ne contribuera donc pas au débit dans les différents modèles hydrologiques.

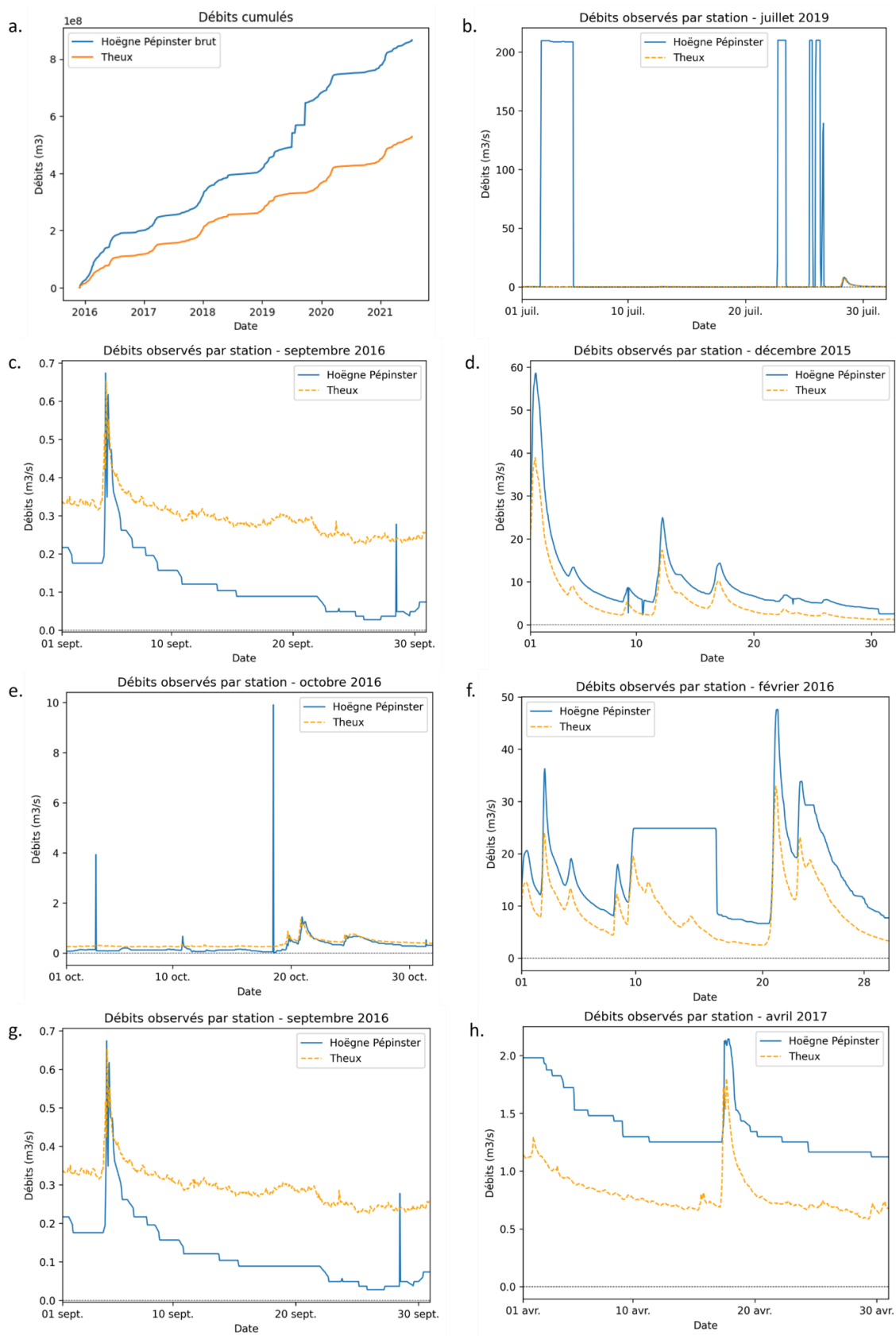


Figure 88 : Exemples d'anomalies détectées dans les séries de débits observées sur la Hoëgne à Pépinster (données DBR, non validées), en comparaison avec les tendances observées à Theux (données Aqualim-WACONDAH, validées)

Contrairement aux hauteurs de précipitations, l'évapotranspiration n'est pas une grandeur que l'on peut mesurer directement. Elle est souvent calculée sur base d'autres grandeurs mesurées. Les données de température au pas de temps journalier de l'IRM peuvent être employées pour évaluer l'évapotranspiration selon la formule d'Oudin (2005). En effet, Oudin a pu relever, lors de sa thèse, que la modélisation GR4 ne fait pas d'usage judicieux des données d'évapotranspiration à un pas de temps fin comparativement à des moyennes journalières interannuelles, d'une part. D'autre part, des évaluations de l'évapotranspiration via des formules peu demandeuses en données montraient des résultats tout aussi satisfaisants que l'équation de Penman-Montheith, citée comme référence. C'est pourquoi une formule qui ne tient compte que de la température a été développée par Oudin. Celle-ci est implémentée dans WOLFHydro. Des analyses de bilan sur de longues périodes indiquent toutefois des tendances de surestimation importante. C'est pourquoi des facteurs correctifs sont employés en prenant l'été comme saison de référence⁴.

3.3 Description du bassin de la Vesdre

3.3.1 Particularités du bassin versant

La Vesdre, qui prend sa source à l'Est des Hautes-Fagnes belges, est une rivière belgo-allemande, et un affluent en rive droite de l'Ourthe, qu'elle rejoint à Angleur. Son bassin versant s'étend sur 703 km². Le climat océanique tempéré associé à la topographie culminante des Hautes-Fagnes y fait naître des pluies orographiques. Le Tableau 10 reprend quelques caractéristiques du bassin, estimé à l'exutoire au droit de la station de Chaudfontaine, pour une résolution spatiale de 100x100m.

Tableau 10 : Caractéristiques moyennes du bassin versant de la Vesdre à l'exutoire au droit de la station de Chaudfontaine

Caractéristiques du bassin versant de la Vesdre		
Aire	679	km ²
Périmètre	173,2	km
Pente moyenne	7,6	%
Coefficient de Gravélius	1,87	
Altitude max	694	m
Altitude min	81,7	m

Le bassin comporte deux retenues, les barrages de la Vesdre, en amont d'Eupen, et de la Gilleppe, en amont de Limbourg. Les deux plans d'eau constituent une réserve d'eau potable, et alimentent chacun une centrale hydroélectrique. Une analyse des fonctionnements et particularités des barrages a été réalisée afin de définir une stratégie de prise en compte dans la modélisation.

3.3.1.1 Bassin versant en amont du barrage de la Vesdre

Le barrage de la Vesdre a été inauguré en 1950. La longueur de la retenue est de 410 m pour une hauteur de 66 m. La hauteur d'eau maximale est de 63 m. La superficie du plan d'eau s'étend jusqu'à 126 ha, pour une capacité de 25 millions de m³. Environ 50 000 m³ sont pompés chaque jour pour l'alimentation en eau potable. Les deux contributions naturelles principales sont la Vesdre et la Getzbach (Figure 89). Le sous-bassin du lac lui-même est non jaugé. La superficie du bassin versant drainé est de 102 km², correspondant à 65 km² de bassin versant naturel additionné des 36,9 km² du bassin de la Helle, qui est en partie détournée via un tunnel pour alimenter le barrage.

⁴ voir « WOLFHydro - manuel HECE ».

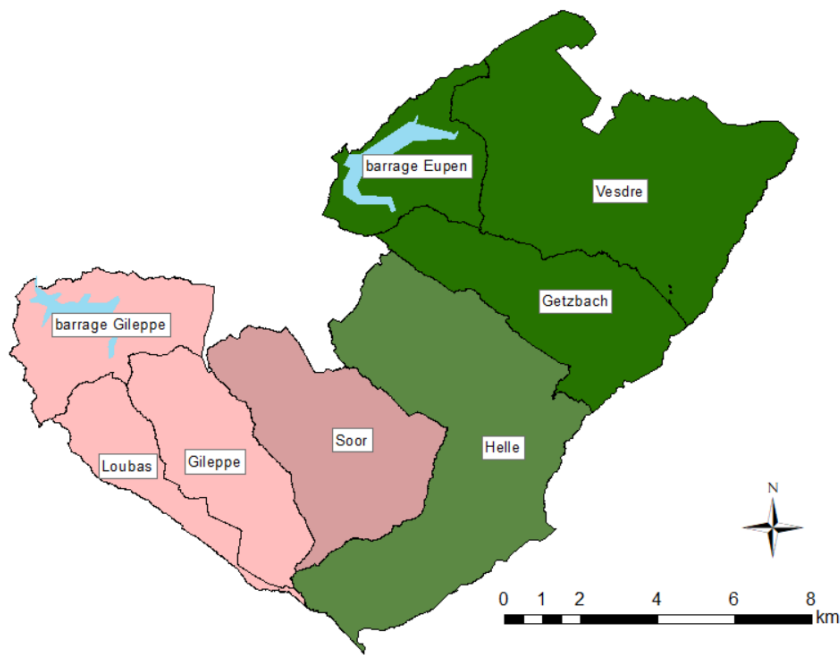


Figure 89 : Bassins naturalisés en amont des barrages ; la zone non jaugée du barrage de la Gileppe, le Loubas et la Gileppe forment le bassin versant naturalisé de la Gileppe (rose clair), la Soor contribue en partie à l'apport du barrage de la Gileppe (rose foncé) ; la zone non jaugée du barrage de la Vesdre, la Vesdre et la Getzbach forment le bassin naturalisé en amont du barrage de la Vesdre (vert foncé), la Helle contribue partiellement à l'apport du barrage de la Vesdre (vert clair).

En amont du tunnel de la Helle, la hauteur d'eau dans le bassin est mesurée à des fins de gestion de l'ouvrage. Il n'existe pas de courbe de tarage pour obtenir les débits. A l'aval de l'entrée du tunnel, un limnimètre et une loi hauteur-débit existent. Les débits sont établis dans cette branche qui restitue une partie de la Helle à son cours naturel. De même, à la sortie du tunnel, les données de hauteurs et de débits sont disponibles.

Les bassins de la Helle, de la Getzbach et de la Vesdre sont jaugés au niveau de trois déversoirs, représentés par des triangles dans la Figure 89. Les limnigraphes ont été équipés pour la télémessure dans les années 1990 et remplacés en 2020. La hauteur du plan d'eau est également mesurée par une sonde à pression, de même que le débit restitué à l'aval de l'ouvrage.

Une autre particularité de ce bassin est la déviation de la Vesdre par un canal éponyme avant d'entrer en Allemagne. Ce canal de 3,7 km longe la frontière belge et aboutit à un bassin d'amortissement. Pour la partie allemande, le même principe est appliqué, et l'eau provenant de l'écoulement en Allemagne est déviée de sorte qu'elle reste sur le territoire allemand. Cette déviation artificielle dans le canal induit une accélération de l'écoulement.



Figure 90 : Déviation du tunnel de la Helle : L'écoulement de la rivière est en partie déviée par le tunnel de la Helle, dans le bras de droite, et le reste est restitué à son cours naturel.

3.3.1.2 Bassin versant en amont du barrage de la Gileppe

Le barrage de la Gileppe, inauguré en 1878, présente une capacité de 26,5 millions de m³, pour une longueur de mur de 200m, le plan d'eau couvrant une superficie de 130 hectares. Il constitue une réserve d'eau potable et génère 3,3 millions de kWh annuellement, via la centrale hydro-électrique.

Il est alimenté par la Gileppe, le Loubas, et par le tunnel de la Soor (Figure 89). Celui-ci a été construit entre 1951 et 1953 dans le but d'augmenter de 19,7 km² le bassin versant du lac de la Gileppe (34,4 km²), portant sa superficie à 54,1 km². Ce tunnel de 2,5 km de long et 2,3 m de diamètre marque une pente moyenne de 2%.

A noter qu'il n'y a pas de restitution minimale de débit à la rivière Soor. Le tunnel capte la quasi-totalité de l'écoulement, et ne restitue qu'à de rares occasions où la hauteur du mur de déviation est dépassée.

3.3.1.3 Complément d'analyse des données disponibles

Les Travaux de Fin d'Etudes d'Annick Calles (2016) et de Sophie De Cock (2023) ont été exploités afin de mieux déterminer les enjeux et la topologie liée à l'amont du barrage de la Vesdre.

Le TFE de Calles s'est inscrit dans un contexte de collaboration entre la DBR et la DGH, au travers de la mutualisation des bases de données, les mesures hydrologiques se rapportant au lac n'étant alors gérées que par la DBR. L'objectif poursuivi par ce TFE était d'analyser les points d'attention pour réaliser cette fusion. D'une part, un travail sur les mesures de hauteur a vérifié leur qualité de prise de mesure et la qualité des mesures ensuite enregistrées dans la base de données. D'autre part, les débits et volumes calculés à partir des hauteurs ont été analysés, sur le plan de la qualité des lois hauteur-débit et hauteur-volume en usage. Des comparaisons entre ces lois et des jaugeages ainsi que des courbes théoriques ont été réalisées pour les déversoirs. En outre, des évaluations de bilans hydrologiques ont été menées.

Sur base de l'analyse des données, différentes corrections ont été réalisées sur les mesures de hauteur. Comme les feuilles limnigraphiques ne sont pas archivées, les corrections de Calles ont été faites sans pouvoir s'y appuyer. Celles-ci ont donc été réalisées par raisonnement logique sur les données aberrantes, telles que des pics anormaux, des hauteurs constantes durant des épisodes pluvieux, etc. En cas de doute, aucune correction n'a été effectuée. Lors d'une réunion avec la DGH, en février 2023, il a été admis que ces données corrigées sont la meilleure source disponible de données pour la période du 1er janvier 1995 au 31 décembre 2014. Il existe potentiellement des feuilles limnigraphiques, qui permettraient de valider ce travail de correction, mais leur archivage et analyse détaillée sortent du cadre de cette convention, et ne peuvent, de surcroît, s'ajuster à son échéancier.

Parmi les limites identifiées par Calles, on retrouve une imprécision liée à une conversion en temps réel de la hauteur en débit, approximée par des lois exponentielles pour différentes portions de la table de conversion de chaque déversoir. De plus, les enregistrements de hauteur dans la base de données sont de précision centimétrique, alors que les débits calculés l'ont été avec les hauteurs millimétriques. Une même hauteur enregistrée conduit ainsi à des débits différents. Il existe une différence entre les débits recalculés par la formule théorique et la valeur enregistrée dans la base de données, ainsi qu'entre les débits recalculés par la table de conversion et la base de données. Calles a établi de nouvelles lois hauteur-débit sur base de jaugeages et de formules théoriques, et a sélectionné la meilleure pour chaque déversoir. Ceci est un argument supplémentaire pour utiliser sa série de données de hauteur et les débits qui en sont issus, la loi hauteur-débit étant la plus robuste.

Trois autres points d'attention sont à noter. Tout d'abord, le fait que les déversoirs n'ont pas été étalonnés, à notre connaissance, préalablement aux mesures de hauteur, et qu'il est donc possible que le « zéro » de l'échelle limnimétrique soit inexact, ce qui entraînerait une erreur systématique sur les mesures, et donc sur les débits calculés. Ensuite, les maxima jaugés aux différents déversoirs sont relativement faibles, ce qui induit une extrapolation d'autant plus vaste sur des hauteurs importantes, augmentant l'incertitude. Enfin, le déversoir mesurant la hauteur à la sortie du barrage est soumis à une incertitude sur les hauteurs élevées, car il est placé dans une zone où un écoulement plus important induit beaucoup de turbulences, ce qui invalide la loi. Une partie du flux évite d'ailleurs le bassin de mesure en cas de débits trop élevés.

Il est à noter que les déversoirs sont d'architecture assez particulière, ce qui a compliqué les jaugeages à réaliser, ainsi que les choix de formules théoriques pour établir de nouvelles formules hauteur-débit théoriques.

Le TFE de De Cock, quant à lui, s'est concentré sur la reconstitution des débits naturalisés en amont de l'ouvrage, qui ont ensuite été convertis en débit de sortie par une équation de bilan de masse. Ces débits restitués calculés ont été comparés avec les débits restitués mesurés. Une analyse de l'impact de la présence du barrage a également été menée.

Ces deux TFE ont été une source précieuse d'informations et d'une grande utilité pour la compréhension globale du site du barrage d'Eupen, pour appréhender les limites des données disponibles, et pour une méthodologie de génération de séries de débits naturalisés.

3.3.2 Bilan des données disponibles

Les séries de débit disponibles au droit des ouvrages sont présentées dans le Tableau 11.

3.4 Stratégie de modélisation conceptuelle

En regard des données disponibles, les lignes méthodologiques suivantes sont appliquées :

La zone d'étude hydrologique est délimitée au bassin versant topographique de la Vesdre, jusqu'à l'exutoire situé au droit de la station de Chaudfontaine. En effet, l'absence de données de débit plus en aval ne permet pas de caler un modèle jusqu'à la confluence avec l'Ourthe.

Le bassin versant de la Vesdre peut être découpé en différents sous-bassins pour effectuer une modélisation semi-distribuée (Figure 91). Les points de mesure de débit sont des exutoires de choix, la donnée mesurée pouvant ainsi être comparée à la donnée simulée. Au vu de l'absence de validation dans les données de la DBR (Figure 88), ces séries ne sont pas retenues comme points de calages sur base des données observées. Dans un premier temps, les têtes de bassin, ne comportant aucun élément en amont, sont étudiées séparément, c'est-à-dire selon un schéma dit global, ou « lumped ».

Tableau 11 : Séries de débits disponibles au droit des ouvrages. Code : E= existant, ET = existant traité

Barrage	Débit	Code	Remarque	Description	Période
Vesdre	tunnel Helle	E1		débit sortant du tunnel de la Helle et alimentant le barrage de la Vesdre	1995-2021
	tunnel Helle AC	ET1	série à privilégier	débit sortant du tunnel de la Helle et alimentant le barrage de la Vesdre corrigé par A. Calles	1995-2014
	Helle aval	E2		débit restitué à la rivière en aval de l'entrée du tunnel	1995-2021
	Getzbach	E3		débit de la Getzbach alimentant le lac de la Vesdre	1995-2021
	Getzbach AC	ET3	série à privilégier	débit de la Getzbach alimentant le lac de la Vesdre corrigé par A. Calles	1995-2014
	Vesdre Belfort	E4		débit de la Vesdre alimentant le lac de la Vesdre	1995-2021
	Vesdre Belfort AC	ET4	série à privilégier	débit de la Vesdre alimentant le lac de la Vesdre corrigé par A. Calles	1995-2014
Gileppe	V400	E30		débit sortant du tunnel de la Soor par la vanne V400, alimentant le barrage de la Gileppe	1993-2021
	V1500	E31	incorrect ; série effective à générer	débit sortant du tunnel de la Soor par la vanne V1500, alimentant le barrage de la Gileppe	1993-2021
	Soor aval	E32		débit restitué à la rivière en aval de l'entrée du tunnel	1993-2021
	Loubas amont	E33	débit Loubas à générer	mesure de débit de la Loubas au limnimètre amont	2000-2021
	Loubas aval	E34		mesure de débit de la Loubas au limnimètre aval	1993-2021
	Gileppe amont	E35	débit Gileppe à générer	mesure de débit de la Gileppe au limnimètre amont	1993-2021
	Gileppe aval	E36		mesure de débit de la Gileppe au limnimètre aval	1993-2021

Dans ce cas, les données d'entrée du modèle doivent être valables pour l'ensemble du sous-bassin concerné. La modélisation semi-distribuée de l'ensemble du bassin, soit en une somme de plusieurs sous-bassins connectés, peut être envisagée dans un second temps. Les bassins en aval des têtes seront calibrés selon les données observées en amont.

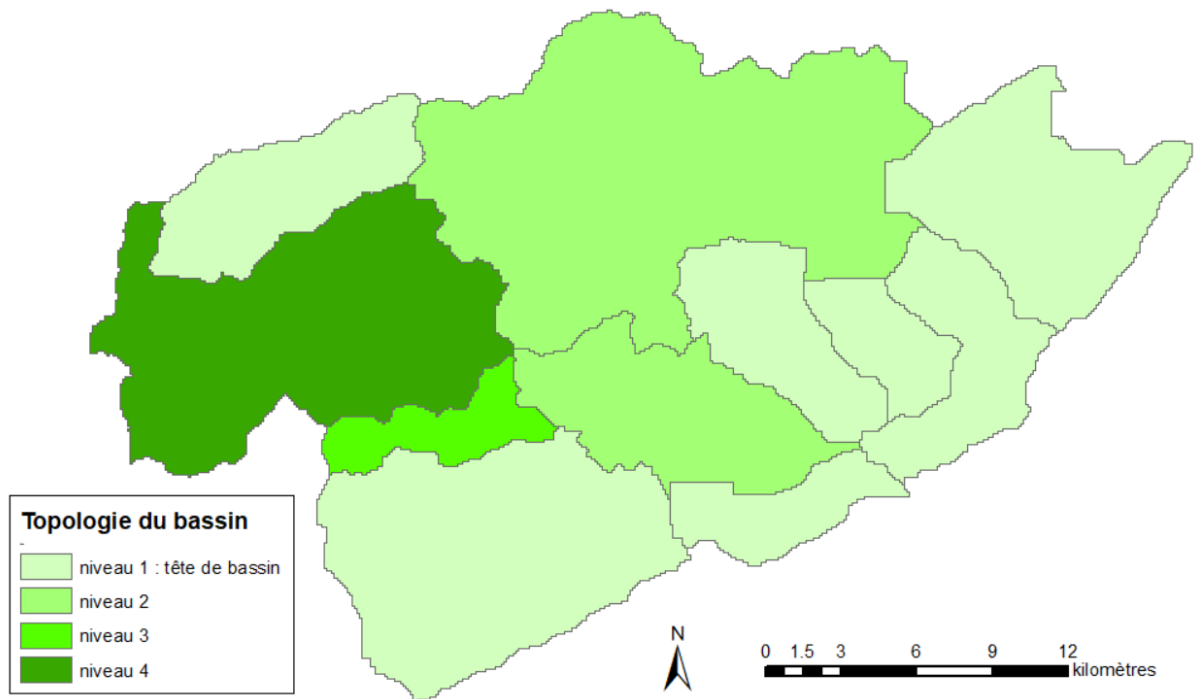


Figure 91 : Configuration du modèle semi-distribué : découpe WOLF du bassin de la Vesdre en sous-bassins à la résolution 100x100m

3.4.1 Conceptualisation des barrages

Deux bassins indépendants seront considérés en amont de chaque barrage. Le bassin versant en amont du barrage de la Vesdre se compose du sous-bassin de la Getzbach, de la Vesdre à Belfort, et de la zone non jaugée au niveau du lac de la retenue. Le bassin versant en amont du barrage de la Gileppe est constitué des sous-bassins de la Loubas, de la Gileppe, et de la zone non jaugée au niveau du lac du barrage (Figure 92).

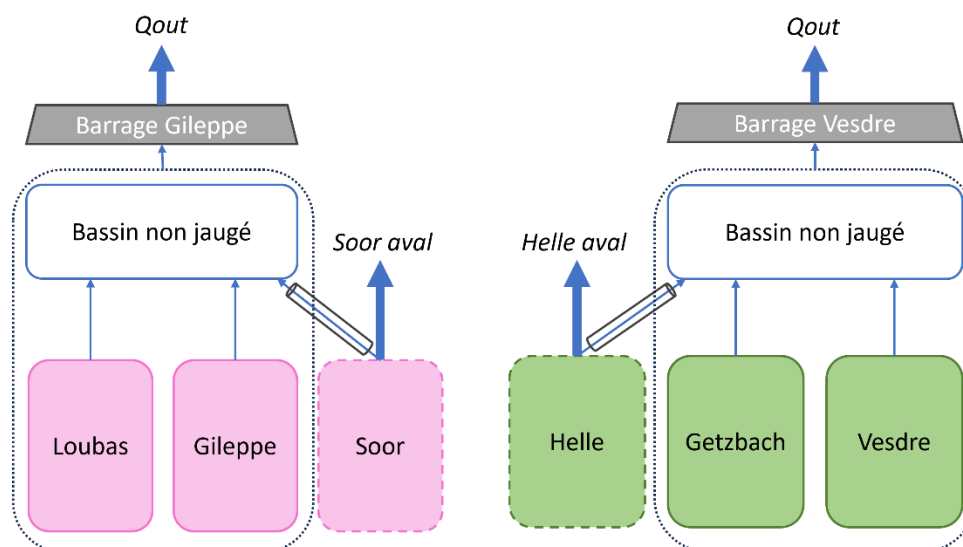


Figure 92 : Conceptualisation des bassins en amont des barrages de la Gileppe et de la Vesdre. La Soor et la Helle constituent un apport anthropique à la Gileppe et la Vesdre, respectivement. La Getzbach et la Vesdre alimentent le sous-bassin non jaugé du barrage d'Eupen. La zone non jaugée en amont du barrage de la Gileppe est alimentée par la Loubas et la Gileppe. Ce qui n'est pas dévié vers les barrages via les tunnels est restitué à la rivière.

3.4.2 Prise en compte du canal de la Vesdre

La Vesdre est déviée en Belgique par un canal aboutissant à un bassin d'amortissement, pour reprendre l'écoulement qui irait normalement en Allemagne. A son tour, l'Allemagne empêche la Vesdre de repasser la frontière vers la Belgique en la maintenant sur son territoire.

Pour considérer ces éléments de contrôle anthropiques, trois cas de figure ont été envisagés dans les séries de débits dits « naturalisés » en amont du barrage de la Vesdre.

1. Bassin naturel topographique

Le sous-bassin de la Vesdre est considéré selon la topographie, sans influence humaine. La portion de la Vesdre déviée avant la frontière allemande, de même que la déviation allemande qui conserve l'écoulement sur le territoire allemand, sont toutes deux ignorées.

2. Bassin « frontalier »

Le bassin de la Vesdre est délimité sur sa partie est par la frontière avec l'Allemagne. Cela représente une prise en compte géopolitique sensu stricto de la déviation belgo-allemande.

3. Bassin avec échanges forcés

Le bassin est délimité selon la topographie après détermination d'échanges forcés entre certaines mailles, qui représentent et reprennent l'écoulement du canal belge. La prise en compte de la déviation belgo-allemande est ici basée sur la représentation théorique du fonctionnement réel du sous-bassin de la Vesdre en amont au barrage.

Dans le cadre de la modélisation conceptuelle, la modification retenue est celle du bassin avec les échanges forcés. Ceux-ci ont été implémentés pour tenir compte de la déviation du canal de la Vesdre (Figure 93).

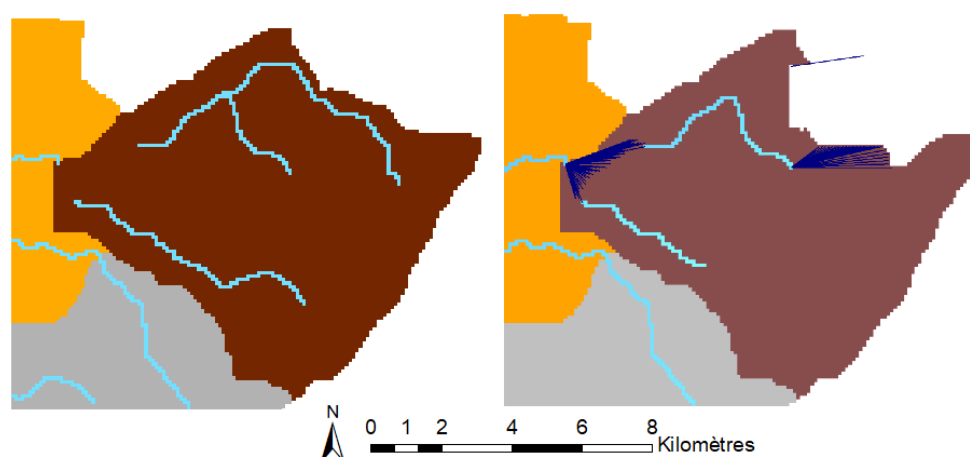


Figure 93 : Échanges forcés le long du canal de la Vesdre : situation initiale (gauche), découpe du bassin subséquente au forçage de l'écoulement jusqu'au bassin d'amortissement situé au bout du canal de la Vesdre, et forçage de l'écoulement en territoire allemand vers l'Allemagne (droite). La résolution spatiale est de 100x100m.

3.4.3 Calibration

3.4.3.1 Calibration des têtes

Pour calibrer les têtes de bassin, soit la Helle, la Soor, et les deux bassins en amont des barrages, il est nécessaire de disposer de séries de débits naturalisées. Pour la Helle et la Soor, cela implique de construire des séries en amont de l'entrée des tunnels. En effet, les données en sortie de tunnel et en restitution à la rivière existent, mais pas avant cette séparation de l'écoulement en deux.

Pour les bassins en amont des barrages, il faut créer des séries de débits qui cumulent les contributions des deux principaux affluents jaugés, et qui prennent également en compte la partie non jaugée du bassin.

3.4.3.2 Calibration du bassin en aval des ouvrages

Les bassins en amont des barrages s'écoulent jusqu'à la station suivante sur la Vesdre, située à Verviers. Pour calibrer ce sous-bassin, qui est, de toute évidence, impacté par la gestion anthropique des barrages, il faut donc pouvoir lui forcer en débits amont d'entrée des séries qui prennent en compte les débits de sortie des ouvrages.

Comme il est connu que les débits mesurés en sortie de barrage sous-estiment les débits élevés (cfr TFE A. Calles), il est nécessaire de générer ces séries.

Premièrement, des séries « débits entrants » sont à créer pour chaque retenue. Celles-ci reprennent l'ensemble des apports au barrage, incluant les écoulements forcés par le tunnel associé.

Deuxièmement, ces séries de débits entrants sont à utiliser dans un module anthropique, qui effectue un bilan du volume du lac, et dont les variations de hauteurs combinées aux apports permettent de déduire le débit sortant.

Troisièmement, la modélisation hydraulique nécessite un découpage en tronçons plus réduits, les sous-bassins calibrés seront redécoupés et les débits seront évalués proportionnellement à la superficie du bassin drainée (voir section 3.4.4).

3.4.4 Interactions hydrologie-hydraulique

3.4.4.1 Modules anthropiques

Les débits entrants dans les barrages sont convertis en débit de sortie par une équation de bilan de masse. Ces débits serviront ensuite d'entrée pour la calibration du sous-bassin de Verviers.

3.4.4.2 Redistribution des débits

Pour les besoins de la modélisation hydraulique, des points d'entrée aux principaux affluents de la Vesdre sont redistribués à partir de la série de débits simulés sur les sous-bassins versants de Verviers et de Chaudfontaine. Une fois la valeur seuil de 10km² d'aire d'accumulation atteinte, un point intérieur est défini. Aucun décalage temporel n'est appliqué (Figure 94). En effet, dans un contexte de manque de données, le problème est considéré au plus simplement possible, avec la possibilité de revenir au débit de départ facilement. De plus, la possibilité de reprendre les paramètres optimaux de Verviers, et de les déporter aux points intérieurs est une hypothèse peu robuste. Le bassin global pour lequel ont été calés ces paramètres conceptuels n'est pas résumable, hydrologiquement, à une somme de petits sous-bassins au comportement identique.

En outre, l'évaluation des temps de transfert par calibration n'est pas possible facilement en l'état. Ainsi, la mise en place d'une méthodologie fiable dans WOLF, au vu du manque de données, n'est pas évidente.

Les débits qui seront fournis pour le modèle hydrologique sont les sorties des modules anthropiques de la Helle, la Soor, des barrages de la Gileppe et de la Vesdre.

Ces débits sont utilisés comme débits forcés en amont de Verviers, et seront les 4 entrées employées pour calibrer Verviers. Une fois Verviers calibré, son *hydrogramme simulé* est redistribué en différents points intérieurs, proportionnellement à leur surface drainée. La méthode de positionnement des points se fait sur base d'un incrément absolu de surface drainée fixé à 10km². Cette méthodologie a été développée pour intégration dans les paquets wolfhcece dans le cadre de cette convention.

Le même raisonnement sera applicable au sous-bassin de Chaudfontaine (Figure 94).

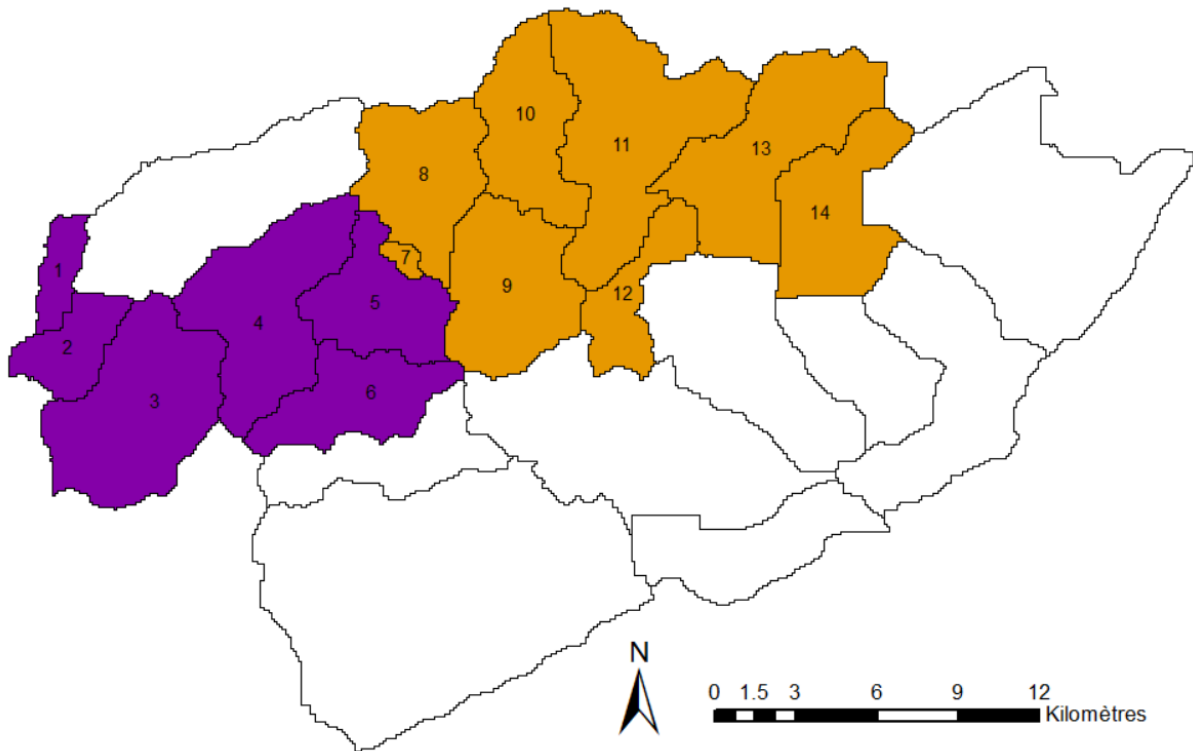


Figure 94 : Exemple de fragmentation des sous-bassins de Verviers (orange) et Chaudfontaine (mauve) en sous-bassins intermédiaires aux points d'injection du modèle hydraulique.

3.4.5 Constitution des séries de débit

NB : WOLF ne prend pas de données d'entrée comportant des NaN. Toute donnée d'entrée du modèle a donc été interpolée linéairement au niveau de ses valeurs NaN. Cependant, ces plages de données peuvent présenter des valeurs aberrantes, et la précaution sera prise de ne pas calibrer le modèle sur ces données « fictives », ni de les utiliser en validation.

Pour une analyse statistique des extrêmes, la même recommandation est valable. Il est préférable de travailler sur les données brutes, et pas sur des données traitées avec forte filtration des valeurs extrêmes, ni sur des plages contenant des NaN interpolés.

La reconstitution des débits naturalisés réalisée par De Cock a été analysée et a servi de base pour une reconstitution améliorée. Les détails sont disponibles dans la note technique 5 (7/06/2023).

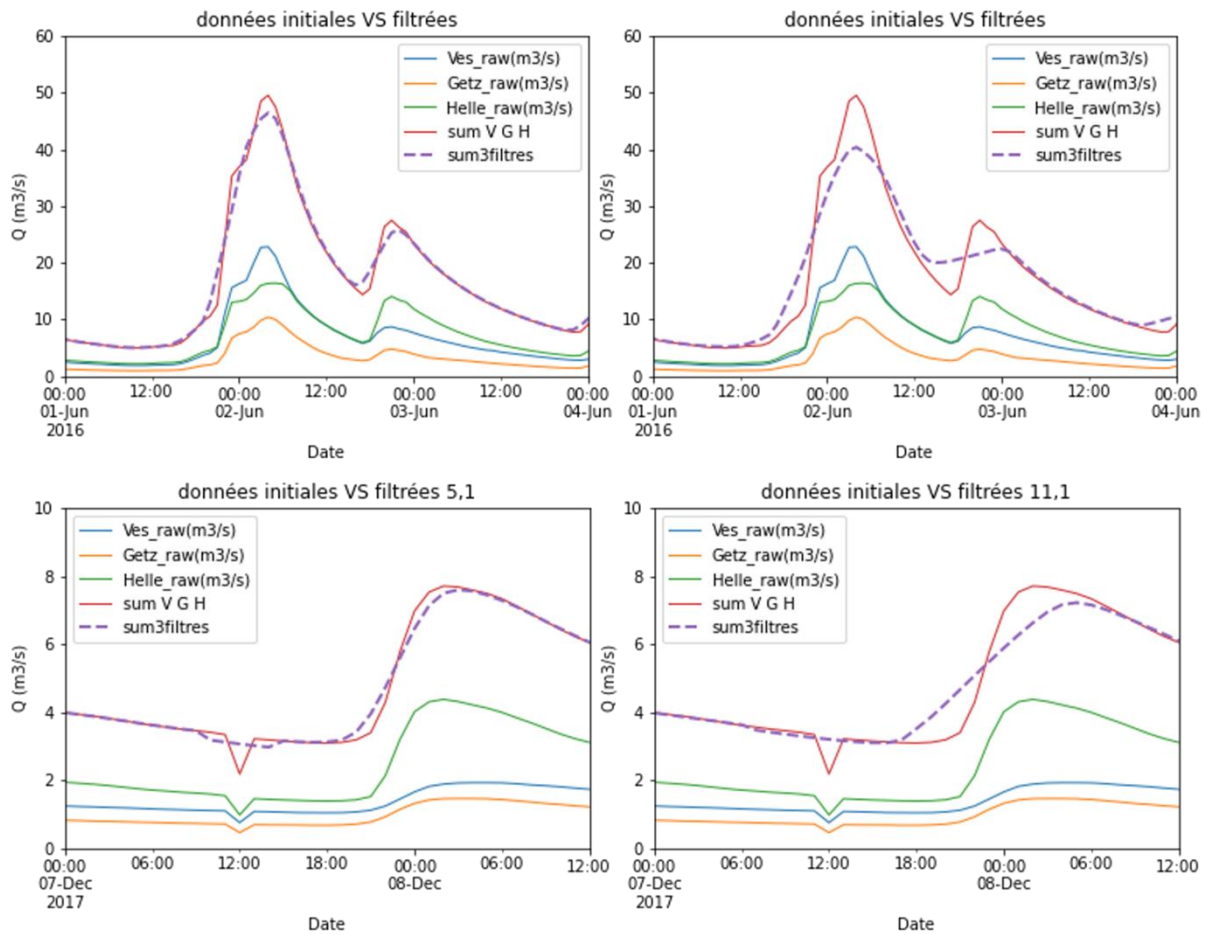


Figure 95 : Filtre Savitsky-Golay de fenêtre de longueur 5 (mauve, gauche) et 11 (mauve, droite). La somme des contributions au débit total non corrigé (rouge) est la somme de la Vesdre amont (bleu), la Getzbach (orange), et la Helle (vert). L'évènement de début juin 2016 (haut) est moins estompé par la fenêtre (5), tandis que la fenêtre (11) gomme la contribution de la Helle sur l'amplitude du second pic sur la somme des contributions avant filtrage (rouge). Des bruits dans les données le 7/12/17 à 12h (bas) sont mieux éliminés par la fenêtre 11 (droite) que (5) (gauche), mais l'amplitude et le temps de montée le 8/12/17 à minuit sont respectivement sous estimé et surestimé par la fenêtre (11) tandis que la fenêtre (5) les préserve.

Les séries ont donc été reconstituées dans le cadre de la présente convention, sur base des données d'Annick Calles, corrigées jusqu'en 2014 inclus, et sur base des données brutes, corrigées par le filtre Savitsky-Golay (Figure 95), en s'inspirant de la méthodologie proposée par De Cock.

Les séries de débits ont été reconstituées à partir du 1^{er} janvier 2002 pour la modélisation, date à partir de laquelle les données de précipitations horaires commencent à être contrôlées régulièrement. Pour rappel, celles-ci sont contrôlées quotidiennement, et donc de qualité, depuis le 1^{er} janvier 2004.

3.4.5.1 Séries de débits élémentaires

Tout d'abord, certaines séries inexistantes ont été créées : la Loubas, la Gileppe, la sortie du tunnel de la Soor, la Soor amont et la Helle amont.

3.4.5.1.1 Gileppe et Loubas

Les données des limnimètres amont et aval de ces deux cours d'eau ont été analysées, et les NaN ont été interpolés linéairement sur les séries de hauteur et de débit. La Loubas et la Gileppe disposent en particulier d'un double déversoir, et la loi de conversion hauteur débit à déduire de la limnimétrie dépend de la valeur de la hauteur mesurée. Les séries de débits enregistrées et employées par la DBR se réfèrent systématiquement au déversoir amont, ce qui est en réalité à nuancer. Le débit à considérer

est celui lié au déversoir aval dans le cas où la hauteur d'eau mesurée à ce déversoir est inférieure à 0.5m ; à partir de 0.5m, le débit à considérer est celui lié au déversoir amont. Ces séries Loubas et Gileppe ont donc été créées en suivant ce principe (Figure 96). A noter que les hauteurs d'eau comportaient également une précision centimétrique, à l'instar des données du barrage de la Vesdre, il a donc été préféré de conserver les valeurs de débits enregistrées dans la base de données de la DBR, de précision millimétrique, au lieu de générer les débits sur base des hauteurs pour limiter la perte de précision subséquente.

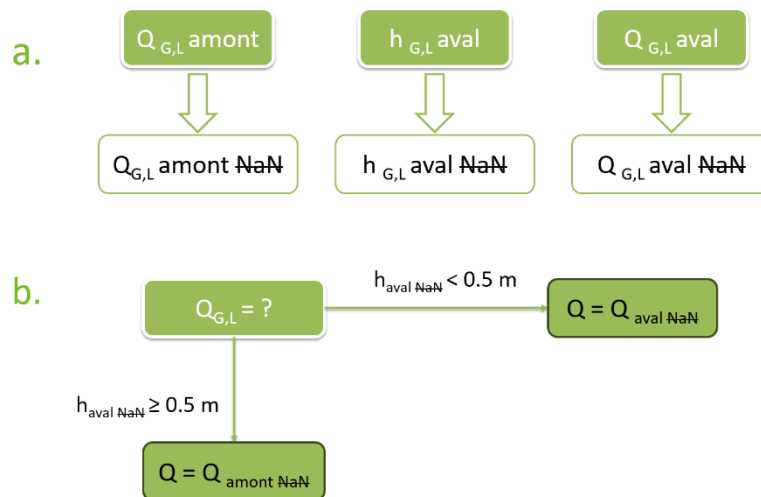


Figure 96 : Création des séries de débit de la Gileppe et du Loubas ; a) interpolation des NaN, b) sélection de la valeur de débit amont/aval selon la hauteur au déversoir aval

Ces séries de débit interpolées sur la Gileppe et la Loubas ont ensuite été filtrées selon Savitsky-Golay (5,1).

La moyenne interpolée des débits Loubas-Gileppe a aussi été calculée, celle-ci intervenant dans le calcul des débits de la Soor (section 3.4.5.1.2).

3.4.5.1.2 Sortie du tunnel de la Soor

3.4.5.1.2.1 Vanne V1500

Les corrections pour une prise en compte réelle du débit V1500 sont faites en temps réel pour la gestion, mais ne sont pas sauvegardées dans la base de données. La série de débit V1500 a été corrigée pour intégrer un débit de fuite issu de la vanne V1500, en sortie du tunnel, selon les indications de la DBR (Figure 97).

Si la hauteur d'eau au limnimètre Soor aval est inférieure à 368m ; et que a) le débit moyen de la Gileppe et du Loubas est inférieur ou égal à $0.15\text{m}^3/\text{s}$, alors le débit V1500 est égal au débit moyen Gileppe-Loubas ; b) le débit moyen est supérieur à $0.15\text{m}^3/\text{s}$; alors le débit V1500 est plafonné à $0.15\text{m}^3/\text{s}$. Si la hauteur d'eau au limnimètre Soor aval est supérieure ou égale à 368m, alors le débit V1500 conservé est la mesure de débit V1500 après interpolation des NaN.

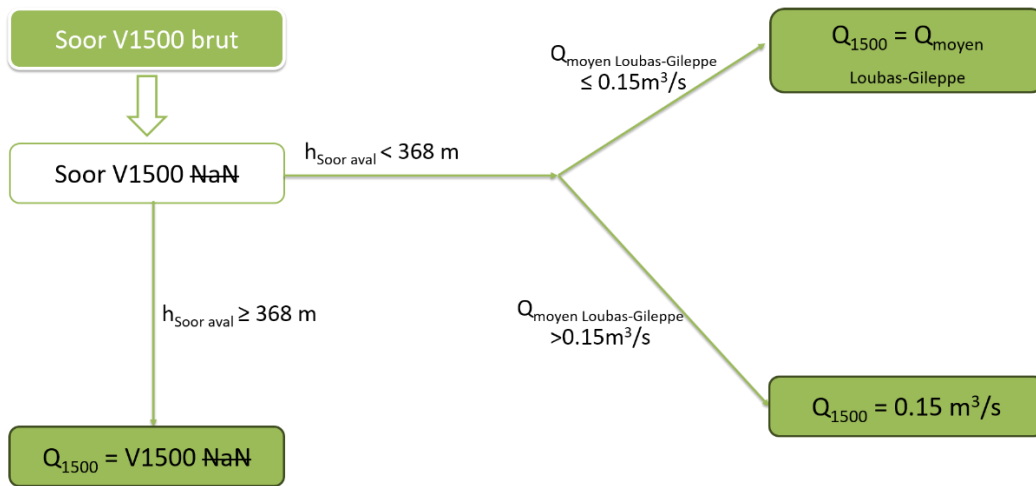


Figure 97 : Construction de la série V1500 ; si la hauteur au déversoir Soor aval est inférieure à 368m, le débit de fuite de la vanne 1500 est approximé par une moyenne du Loubas et de la Gileppe, avec un plafond à 0.15m³/s. Sinon, le débit interpolé est conservé.

3.4.5.1.2.2 Soor amont

Les débits naturalisés de la Soor en amont du tunnel ont été reconstruits sur les données de base interpolées.

La sortie totale du tunnel est obtenue en sommant la série corrigée V1500 (voir section 3.4.5.1.2.1) avec la série interpolée V400. Les débits « bruts » en amont du tunnel sont obtenus en sommant la sortie totale du tunnel avec les débits Soor aval interpolés. Cette série est ensuite filtrée pour générer les débits filtrés FSG en amont du tunnel de la Soor (Figure 98).

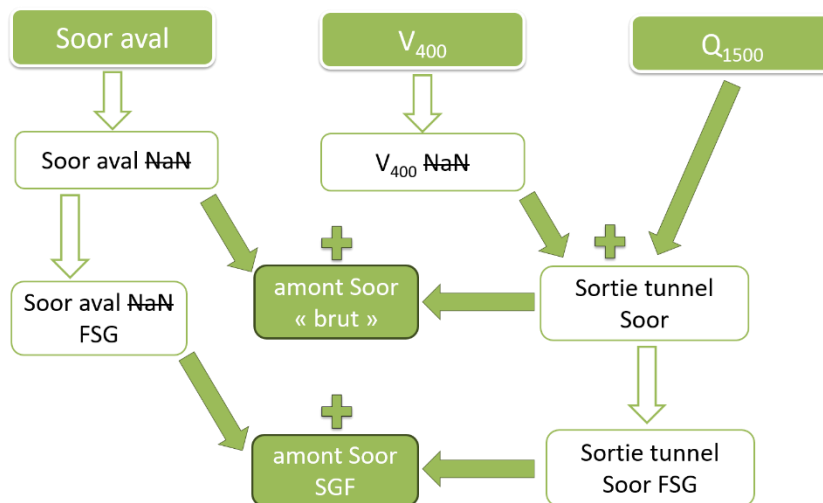


Figure 98 : Création des séries de débit en amont du tunnel de la Soor après correction du Q1500 ; somme des séries restitution à la rivière et des sorties du tunnel, brutes et filtrées FSG (5,1).

3.4.5.1.3 Helle amont

L'objectif visé est de générer les séries de débits en amont du tunnel, et obtenir ainsi le débit naturalisé avant l'ouvrage. Celui-ci permettra la calibration du sous-bassin naturalisé de la Helle. (Figure 99). Tout d'abord, les débits bruts ont été interpolés linéairement pour combler les valeurs manquantes. Ensuite, les débits en sortie du tunnel et les débits restitués à la rivière ont été sommés sans déphasage pour reconstituer la série de débits interpolée à l'amont du tunnel. Les deux contributions ont aussi été

filtrées (Savitsky-Golay 5,1), puis sommées afin de générer la série de débit filtrée (FSG). Enfin, la série corrigée par Annick Calles en sortie du tunnel de la Helle a aussi été sommée à la série FSG en aval de l'entrée du tunnel, constituant la série « Helle mixte ».

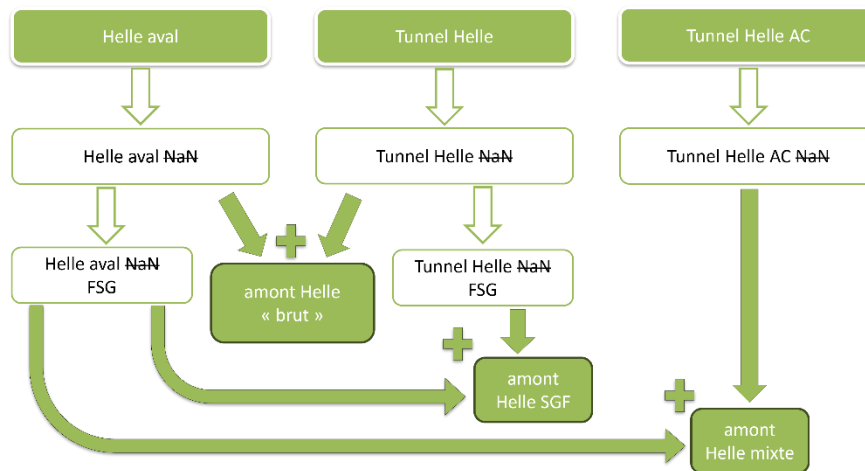


Figure 99 : Constitution des séries de débit Helle amont en sommant la sortie du tunnel avec la restitution à la rivière : séries brute, filtrée (FSG; 5,1), et mixte, avec les données corrigées à la sortie du tunnel par Annick Calles (AC).

3.4.5.2 Séries de débits jaugés

Les séries de débits jaugés brutes et filtrées ont été constituées en sommant les débits entrant dans le lac :

$$Q_{jau,i} = \sum_{i,j,k} Q_{i,j,k} \quad (0.7)$$

Avec i, le sous-bassin de la Vesdre ou de la Gileppe

j, les données brutes, filtrées, ou A. Calles

k, les sous-bassins jaugés en amont du barrage concerné

3.4.5.3 Séries de débits non jaugés

Les débits du sous-bassin non jaugé sont établis selon deux méthodologies, sur adaptation du travail de De Cock. La première se base sur l'apport des précipitations sur sa superficie et considère un coefficient d'écoulement de 1, soit aucune perte par évapotranspiration ou infiltration, et un temps de concentration nul, soit aucun déphasage temporel entre l'occurrence de la pluie et sa contribution au débit. La seconde fait l'hypothèse que les débits sont proportionnels à l'aire contributive.

3.4.5.3.1 Débit non jaugé issu des précipitations tombées sur la zone

$$Q_{nj,p}(t) = P_{nj}(t) \frac{A_{nj}}{3,6} \quad (0.8)$$

Le débit sur la zone non jaugée déterminé par contribution directe des précipitations $Q_{nj,p}(t) (m^3 / s)$ est obtenu au temps t en considérant $P_{nj}(t) (mm / h)$; les précipitations au temps t tombées sur cette zone, converties en débit par multiplication par l'aire de la zone non jaugée $A_{nj} (km^2)$. Le facteur 3,6 est un facteur de conversion des unités.

Avec la précipitation tombée sur la partie non jaugée au temps t valant :

$$P_{nj}(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i P_i(t) \quad (0.9)$$

Où :

N est le nombre de mailles contributives à la zone non jaugée,

α_i est la proportion surfacique de la maille i contributive de la zone non jaugée (-),

$P_i(t)$ sont les précipitations au temps t sur la maille i en (mm / h).

Les proportions contributives ont été calculées sur base des aires des sous-bassins déterminées par la découpe issue de la topologie définie dans WOLF, sur base d'un maillage de précision 100x100m.

3.4.5.3.2 Détermination d'un débit sur base de proportionnalité de l'aire contributive du bassin versant

En faisant l'hypothèse que le débit à l'exutoire est proportionnel à l'aire contributive de son bassin versant, les débits de la zone jaugée $Q_{jau}(t)$ et non jaugée $Q_{nj,Qprop}(t)$, exprimés en m^3 / s s'écrivent :

$$Q_{jau}(t) = \frac{A_{jau}}{A_{tot}} Q_{tot}(t) \quad (0.10)$$

$$Q_{nj,Qprop}(t) = \frac{A_{nj}}{A_{tot}} Q_{tot}(t) \quad (0.11)$$

Avec :

A_{jau} l'aire jaugée du sous-bassin versant (km^2),

A_{nj} l'aire non jaugée du sous-bassin versant (km^2),

A_{tot} l'aire totale du sous-bassin versant (km^2),

$Q_{tot}(t)$ le débit total s'écoulant à l'exutoire du sous-bassin versant (m^3 / s).

En découlent l'équation 1.12:

$$Q_{tot}(t) = \frac{A_{tot}}{A_{jau}} Q_{jau}(t) \quad (0.12)$$

Et l'équation 1.13, donnant le débit proportionnel à l'aire contributive de la zone non jaugée :

$$Q_{nj,Qprop}(t) = \frac{A_{nj}}{A_{jau}} Q_{jau}(t) \quad (0.13)$$

Le débit total ci-dessus est lié à l'aire de la partie jaugée se limitant aux sous-bassins de la Vesdre et de la Getzbach pour la Vesdre, la Loubas et la Gileppe pour cette dernière. Les sous-bassins de la Helle et de la Soor étant gérés anthropiquement, l'hypothèse d'une contribution proportionnelle à leur aire n'est pas robuste.

3.4.5.4 Séries naturalisées

3.4.5.4.1 Constitution des séries

La contribution au débit issue du tunnel de déviation est prise en compte dans la somme des entrées jaugées pour la reconstitution de la série de débit naturalisé (Eq. 1.14) :

$$Q_{nat,i,j,k}(t) = Q_{jau,corr(i,j)}(t) + Q_{nj,corr((j),k)}(t) \quad (0.14)$$

Les séries de débits naturalisés sont ainsi reconstituées, selon :

Avec i , le sous-bassin de la Vesdre ou de la Gileppe

j , les données brutes, filtrées, ou A. Calles

k , la façon de prendre en compte la partie non jaugée à partir des débits jaugés corrigés ; soit par écoulement direct des précipitations locales, soit par proportionnalité de l'aire contributive en regard du débit total des sous-bassins non anthropisés.

La Figure 100 illustre la méthodologie de construction pour le bassin versant en amont du barrage de la Gileppe. La Figure 101 présente la méthodologie utilisée pour l'amont du barrage de la Vesdre.

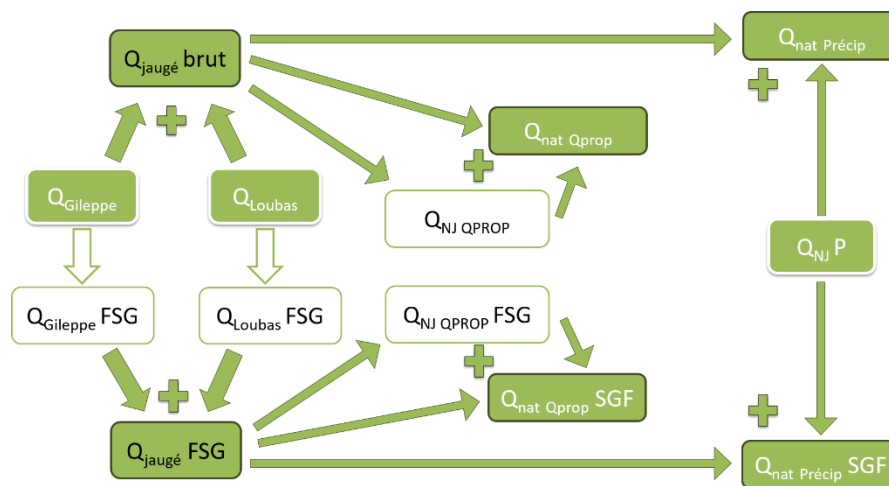


Figure 100 : Construction des séries naturalisées pour l'amont du barrage de la Gileppe

3.4.5.4.2 Choix de la meilleure série

Les débits basés sur les précipitations directes, bien que sécuritaires pour capter les ordres de grandeurs élevés, présentent une dynamique peu probable dans leur contribution aux débits. Particulièrement, le déphasage inexistant entre les précipitations et l'augmentation du débit est une hypothèse dont la robustesse peut être invalidée par des calibrations sur les têtes de bassin en amont de chaque barrage pour le modèle GR4H (voir note technique hydrologique 6 – 28/09/2023). Le paramètre X4, conceptualisant ce déphasage, présente des valeurs inférieures à sa plage attendue (Annexe I).

Les séries naturalisées retenues sont celles prenant compte la contribution au débit de la partie non jaugée du bassin selon une loi de proportionnalité à son aire.

3.4.5.5 Séries entrant dans le barrage

Les séries de débit entrants dans le barrage (Eq. 1.15) sont constituées en sommant les débits naturalisés aux apports des tunnels, pour les types de données brutes, FSG, ainsi que AC pour la Vesdre.

$$Q_{in\ i,j} = Q_{nat\ i,j} + Q_{tunnel\ i,j} \quad (0.15)$$

Avec i , le barrage de la Vesdre ou de la Gileppe ;

j , le type de données (brut, FSG, AC).

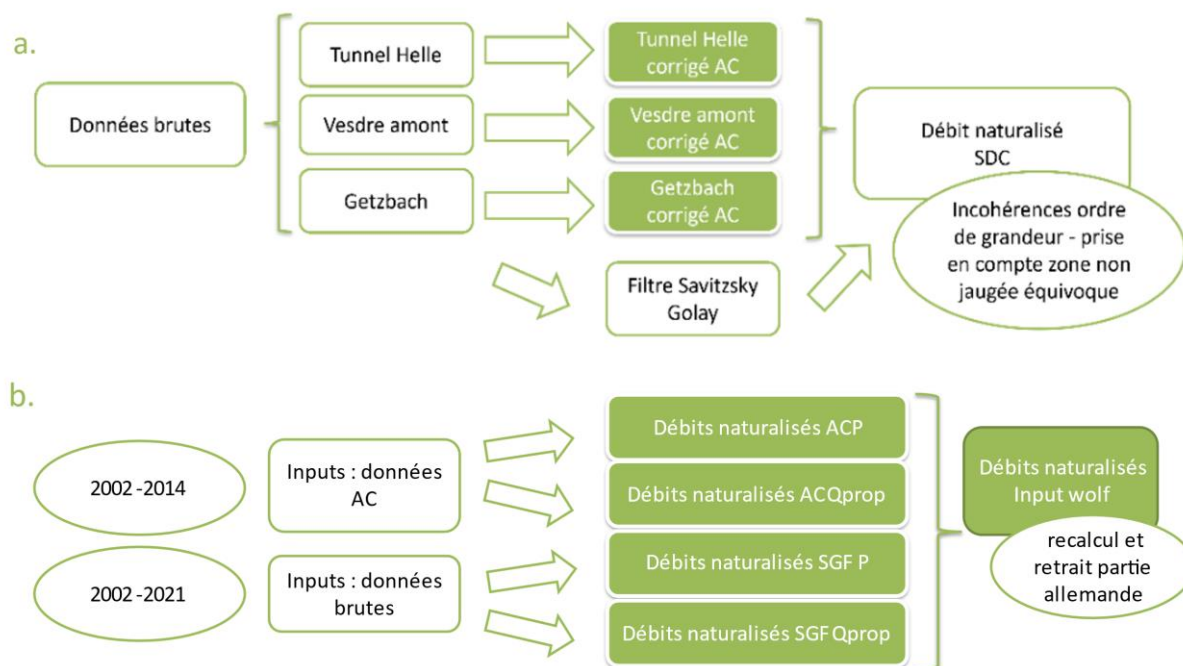


Figure 101 : Reconstitution des débits naturalisés en amont du barrage de la Vesdre : a. méthodologie initiale développée par S. De Cock ; b. méthodologie revue pour la convention MODREC-Vesdre. i) ACP : données Annick Calles et prise en compte de la partie non jaugée via ruissellement de toutes les pluies y tombant, ii) ACQprop : données Annick Calles et prise en compte de la partie non jaugée par proportionnalité de l'aire contributive, iii) SGF P : données brutes filtrées (Savitsky-Golay Filter) et prise en compte de la partie non jaugée par ruissellement de toutes les pluies y tombant ; iv) SGF Qprop : données brutes filtrées (Savitsky-Golay Filtre) et prise en compte de la partie non jaugée par proportionnalité de l'aire contributive

3.4.6 Calibration des sous-bassins

3.4.6.1 Méthodologie de calibration

Une analyse des choix de périodes de calibration a été menée pour déterminer une méthodologie applicable à la reproduction des débits maximaux. La méthode retenue est de choisir des périodes « hiver hydrologique+pic », soit l'hiver qui observe le plus de pics dépassant le seuil p95 de l'ensemble de la série, et le plus grand pic annuel après 2021. Des périodes longues sont également calibrées, mais celles-ci servent de comparaison avec l'hiver+pic, ce dernier cas ayant présenté les meilleurs résultats pour éviter une sous-estimation des pics. Le détail des choix retenus est disponible dans la note technique hydrologique 4 du 22 mars 2023.

Par ailleurs, les séries reconstruites, notamment l'amont des barrages, ont été analysées et les plages sur lesquelles des NaN ont été interpolés pour créer des séries continues ont été retirées des périodes de calibration ou validation, afin de ne pas prendre en compte ces zones de remplissage dans la modélisation. Ainsi, les années pour lesquelles plus de 50 valeurs NaN existaient avant interpolation n'ont pas été retenues. En outre, un test a été fait sur la Helle, où les indicateurs en post-traitement ont été évalués en maintenant les NaN dans les séries, pour comparaison avec les séries où les NaN ont été retirés, et aucune différence significative n'a été observée.

Le Tableau 12 reprend les statistiques de variations d’amplitude entre les débits simulés et observés sur les quatre plus grands maximums annuels de Spixhe et la Magne. On observe une sous-estimation systématique et conséquente, hormis quelques exceptions de surestimation.

Hormis 2016 sur la Magne, qui montre des valeurs très insatisfaisantes dues au routage du modèle, les sous-estimations les plus marquées s’atteignent 76% sur la Magne et 70% à Spixhe, pour le pic de 2018 selon le modèle GR4H. Elles sont plus marquées encore pour VHM, à 87 et 81%, respectivement. Les sous-estimations les plus faibles sont réalisées par GR4, avec 20%. On observe aussi une différence d’amplitude plus importante pour le modèle VHM que GR4 pour les deux bassins, toutes validations . Un autre point d’attention relève la fiabilité des données de débits extrêmes observées. En effet, ces valeurs sont extrapolées à partir de la courbe de tarage, au-delà du maximum jaugé. Une incertitude, en particulier sur les données de juillet 2021, dont certaines sont issues de reconstructions, doit être prise en compte.

Tableau 12 : Variation d’amplitude des pics simulés par rapport aux pics observés à Spixhe et sur la Magne (%) sur les 4 plus grands maximum annuels

Station	Année	GR4		VHM	
		Calibration	Validation	Calibration	Validation
Magne	2014	-38	-54	-57	-88
	2016	-63	-96	-44	79
	2018	-76	-58	-87	-82
	2021	-20	12	-23	-59
Spixhe	2010	-23	-24	-47	-49
	2011	-51	-60	-61	-69
	2018	-70	-77	-81	-82
	2021	29	20	-60	-69

3.4.6.2 Méthodologie retenue

En plus des périodes longues permettant une calibration et validation croisée, l’hiver hydrologique présentant le plus de dépassement de la valeur P95 de l’ensemble de la série retenue est considéré, en association avec l’évènement du maximum annuel hors 2021. Cela permet, d’une part, de simuler 2021 et de le confronter avec les données observées lorsqu’elles existent, et d’autre part, d’éviter l’incertitude de calibrer sur les données observées de qualité incertaine.

3.4.6.3 Modèle retenu

Le modèle GR4H a montré de meilleures performances sur la Magne à Forêt, pour toutes les périodes de calibration confondues, par rapport à VHM (voir note technique hydrologique 4 – 22/03/2023). La calibration du bassin de Vesdre s’est concentrée sur ce modèle pour la suite des calibrations et in fine, des simulations.

3.4.7 Validation des calibrations

Les critères de Moriasi seront employés pour quantifier la qualité des ajustements aux observations.

3.5 Modélisation du fonctionnement du bassin versant GR4H

3.5.1 Scénarios courbes enveloppes

Une fois les différents sous-bassins calibrés, différents scénarios de simulation ont été envisagés, en regard de la topologie du bassin et des ouvrages anthropiques. L’objectif est de considérer 2 scénarios

« extrêmes » de prise en compte de l'influence des ouvrages. D'une part, les ouvrages sont invisibilisés. On considère donc dans ce cas un scénario dit « naturalisé », où les deux tunnels sont fermés. Il n'y a donc pas de déviation de la Helle et de la Soor vers les barrages, et où les barrages de la Vesdre et de la Gileppe ne retiennent rien ; le débit entrant correspond au débit sortant instantané. (Figure 102a). D'autre part, on considère un scénario où les tunnels sont ouverts et où les deux barrages ont une capacité de stockage infinie, ce qui correspond à un débit sortant nul (Figure 102b).

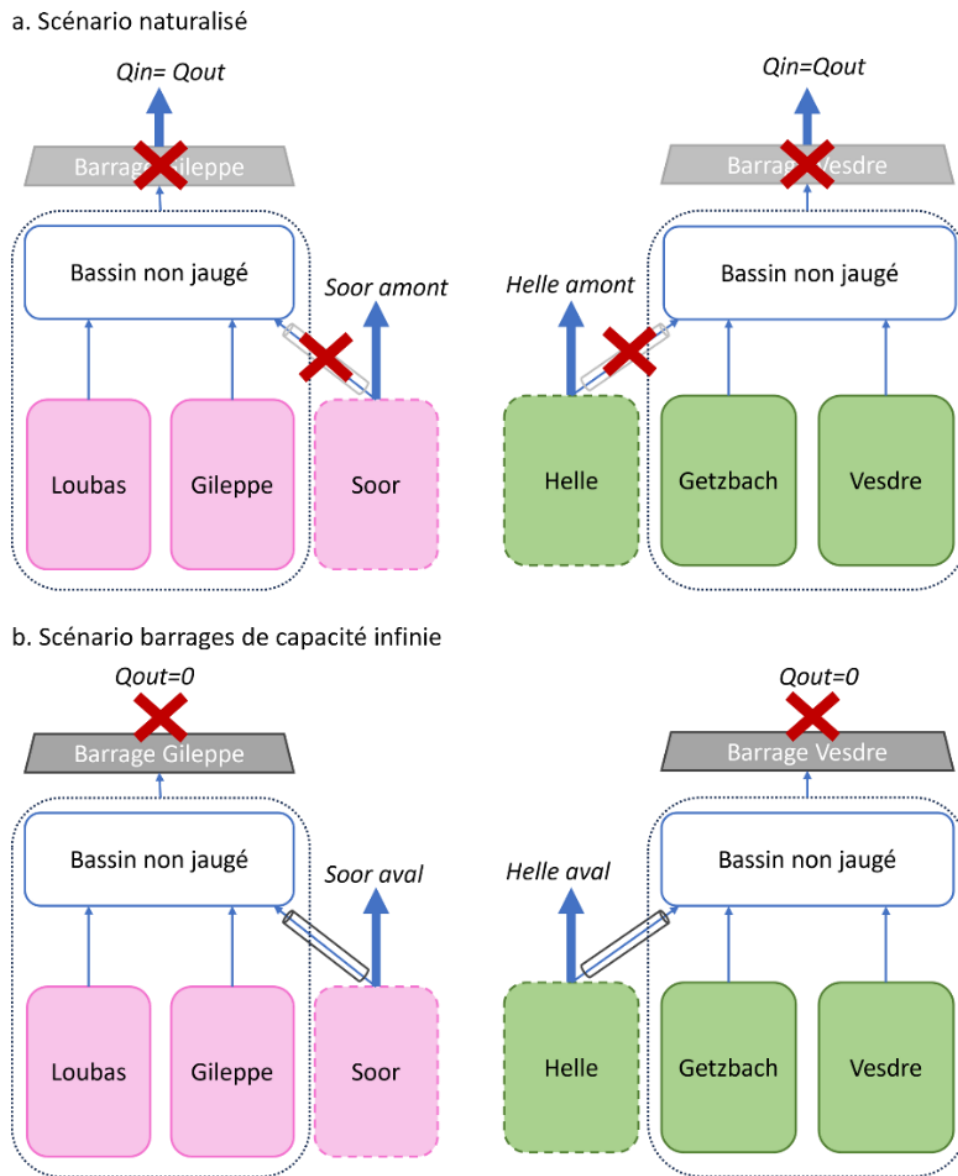


Figure 102 : Scénarios considérés en modélisation GR4H

3.5.2 Calibration sur base des modèles physiquement basés

Les aménagements du territoire modélisés dans MIKESHE (volet modélisation physiquement basée de ce projet) représentent des changements d'occupation du sol, des modifications de pratiques culturales et différents autres dispositifs de gestion de l'eau (pose de redents, creusement de mares, keylines, ...). Les résultats de ces modélisations sont des séries chronologiques de débits sur lesquelles une recalibration de WolfHydro peut être opérée dans le but d'étudier la sensibilité du modèle et de permettre une transposition –prudente- sur d'autres sous bassins. Selon la construction du modèle

conceptuel GR4H, seuls les paramètres X1, la capacité du réservoir de production du sol, et X4, le temps de base des hydrogrammes unitaires seraient a priori impactés par les mesures de gestion hydrologique. En effet, les échanges souterrains (conceptualisés par le paramètre X2) et les phénomènes d'infiltration profonds (conceptualisés par X3) n'ont pas vocation à être modifiés par de tels aménagements (Figure 103).

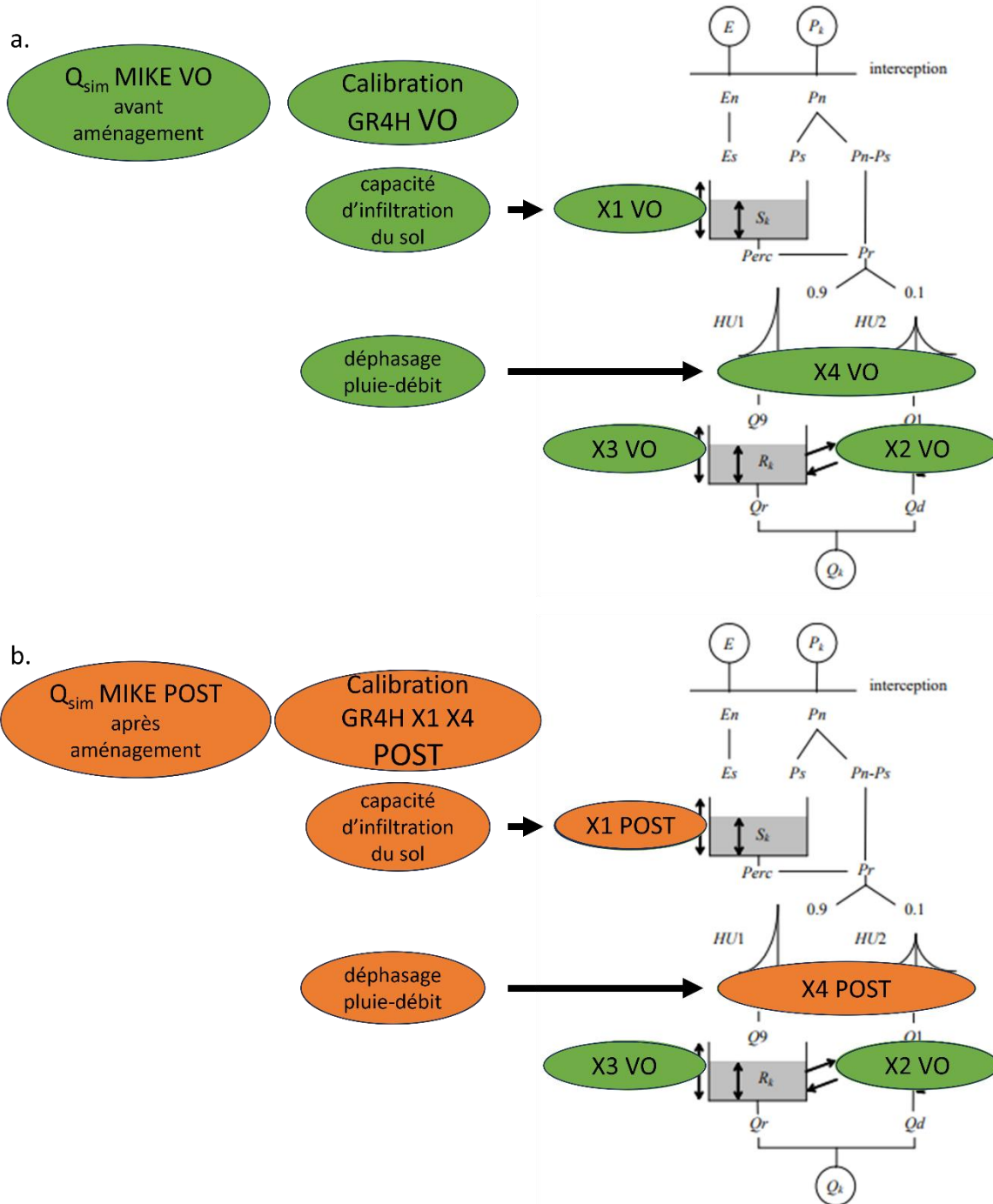


Figure 103 : Les paramètres X1 et X4 (a), conceptualisant l'infiltration du sol et le déphasage entre la pluie et la contribution au débit à l'exutoire, sont impactés par les aménagements (b) de la modélisation physiquement basée. Adapté de Perrin et al. (2007)

Afin de tester dans quelle mesure les aménagements implémentés pouvaient faire varier les paramètres X1 et X4, les sorties de la modélisation physiquement basée avant (VO) et après (POST)

aménagements ont été utilisées comme données d'entrée en calibration des bassins concernés dans WOLF. Les bassins concernés sont Belleheid, Sart-Lez-Spa, Polleur, la Magne et le bassin de la Helle. Les séries couvrent la période 2003-2021. Comme la fonction objectif est le NSE et que celle-ci est meilleure sur de longues périodes, la plage totale 2003-2021 a été prise comme période de calibration. Pour chaque bassin, la valeur des 4 paramètres de GR4H a été estimée sur base des séries avant aménagement, puis les paramètres X1 et X4 ont été calibrés sur les séries après aménagement, en forçant les paramètres X2 et X3 à leur valeur avant aménagement, faisant l'hypothèse que ceux-ci ne sont pas impactés. Pour les bassins situés en aval des têtes de bassin (Sart-Lez-Spa et Polleur), les temps de transfert par rapport aux bassins amonts ont aussi été conservés à leur valeur avant aménagement.

3.6 MAR

Le modèle MAR (Modèle Atmosphérique Régional) permet d'adapter des modèles globaux à des échelles temporelles et spatiales plus fines et d'ainsi pouvoir disposer de données météorologiques à l'échelle régionale. Les modèles climatiques globaux sont étudiés selon différents scénarios de développement socio-économiques (Shared Socio-economic Pathways (SSP)) (S. Doutré et al., 2022). Dans le cadre de ce projet, le modèle MIROC-6 a été utilisé, avec le scénario de forçage radiatif actuellement considéré comme étant le plus en ligne avec les observations récentes, selon les tendances actuelles, le ssp3-7.0. Parmi les différents modèles disponibles, MIROC-6 a été sélectionné pour sa bonne capacité à représenter les extrêmes, même si la température présente une hausse moins marquée.

3.6.1. Comparaison IRM-MAR et évolutions selon MAR MIROC6 ssp3-7.0

Avant d'utiliser les données pour les simulations hydrologiques, diverses analyses ont été réalisées afin de déterminer les éventuels biais entre les données MAR historiques et les données IRM (période 1980-2014), puis pour étudier les tendances dans le futur (2015-2050).

En ce qui concerne les précipitations, les données MAR comprennent les précipitations pluvieuses et les précipitations neigeuses, qui ont été sommées pour obtenir les précipitations totales. Afin d'éviter un bruit numérique dû à des données très faibles de précipitations, les précipitations totales horaires inférieures à 1/24mm (correspondant à des précipitations journalières inférieures à 1mm) ont été considérées comme nulles pour la modélisation. Pour la comparaison des jeux de données IRM-MAR, les jours sans pluie ont été comptabilisés lorsque la précipitation est inférieure à 1mm.

Les variables étudiées sont :

- Température moyenne annuelle
- Température moyenne par saison et par an
- Précipitations annuelles cumulées
- Précipitations cumulées moyennes par saison et par an
- Précipitation maximale journalière par saison et par an
- Nombre de jours de pluie intense (précipitations >20 mm) par saison et par an

Pour chaque variable, le biais standardisé a été calculé comme suit, en accord avec les analyses déjà réalisées sur les jeux de données MAR précédents (Fiol, 2023) :

$$\text{Biais standardisé} = \frac{|\text{moyenne(IRM)} - \text{moyenne(MAR)}|}{\text{écart-type(IRM)}}$$

Le biais est considéré comme significatif si la valeur absolue du biais standardisé est supérieure à 1.

L'erreur relative, exprimée en pourcents correspond à : $\frac{\text{moyenne}(MAR) - \text{moyenne}(IRM)}{\text{moyenne}(IRM)} \times 100$

Ces variables ont été calculées sur l'ensemble des mailles du bassin de la Vesdre (données moyennes de toutes les mailles), puis des comparaisons maille par maille ont été effectuées sur deux mailles d'altitudes contrastées (maille A – altitude basse et maille B – altitude haute, dont les centroïdes respectifs en Lambert 72 sont (245500,147500) et (265500,132500)), afin de rendre compte de la variabilité spatiale sur le bassin.

Ensuite, des comparaisons graphiques ont été effectuées.

L'analyse des évolutions des paramètres dans le futur a porté sur

- La variabilité annuelle et mensuelle des températures et précipitations
- Le nombre de jours sans pluie par an
- Le nombre de jours de pluie intense (précipitations journalières cumulées >20mm) par an
- Le nombre de jours de forte chaleur (température moyenne journalière >25°C) par an

Celle-ci a essentiellement porté sur des comparaisons graphiques.

3.6.3.Simulations MAR

Les simulations basées sur les données MAR ont porté sur les séries historiques (1980-2014) et sur les prédictions futures. Les résultats des simulations ont été analysés via le module wolf_eva sur base des relations entre les débits et les périodes de retour pour des débits maximums annuels dépassés pendant une période d'une heure sur les trois bassins situés les plus en aval (Theux, Verviers, Chaudfontaine).

Les simulations basées sur les prédictions météorologiques selon MAR MIROC6 ssp3-7.0 fonctionnent sur le même principe que pour les simulations sur les données historiques (IRM). En effet, il s'agit d'appliquer les paramètres optimaux trouvés en calibration, en ayant cette fois-ci comme données d'entrée de température et de précipitations les prédictions futures (ou historiques selon MAR). Cependant, la présence des quatre modules anthropiques en amont de Verviers ne peut être prise en compte de la même manière. Dans la version actuelle de Wolf, le développement des modules anthropiques et la possibilité de prise en compte de lois de gestion n'est pas encore opérationnel. Ces éléments doivent donc être pris en considération différemment. Il a donc été décidé d'adopter l'approche des « courbes enveloppes », via les deux scénarios présentés précédemment (section 3.5.1). Les simulations sur Chaudfontaine et Verviers considèrent d'une part les débits naturalisés (absence d'ouvrages anthropiques) et d'autre part des réservoirs de capacité infinie. Pour ce second scénario, les séries de débits de la Helle en aval du tunnel ont été générées en considérant que tout débit inférieur à 20m³/s était repris par le tunnel et que seul l'excédent était rendu à la Helle. En réalité, un débit de l'ordre de 20l/s est transféré à la Helle en raison d'une fuite de la vanne, mais cela n'est pas considéré dans les simulations. En aval du tunnel de la Soor, les débits ont été considérés comme nuls, faisant l'hypothèse que l'intégralité du débit était déviée par le tunnel. Pour le scénario de débits naturalisés, les débits simulés dans les bassins de la Gillepe, la Vesdre, le Helle et la Soor en amont des ouvrages ont été fournis en entrée du bassin de Verviers sans transformation.

La Hoëgne, par contre, reprenant les bassins de Belleheid, Polleur, Spixhe et Theux, n'est pas impactée par ces modules.

3.7 Résultats

3.7.1 Paramètres optimaux

Le

Tableau 13 reprend les différents paramètres obtenus pour les calibrations « hiver+pic » sur les différents sous-bassins, et leurs séries distinctes, le cas échéant. Il est intéressant de noter que les

Bassin	X1	X2	X3	X4
Belleheld	161.96	0.33	49.03	5.34
Gileppe FSG_Qprop	69.07	1.32	59.74	4.76
Vesdre AC_Qprop	39.79	0.13	64.28	5.37
Vesdre FSG_Qprop	26.11	0.81	107.20	6.65
Magne	871.75	0.85	39.36	3.50
Helle mixte	105.79	0.94	61.16	5.62
Helle FSG	106.33	1.21	67.00	5.33
Polleur	1.16	-0.43	91.04	6.38
Soor	40.67	-0.37	50.92	8.07
Spixhe	43.16	-0.15	101.59	6.30
Theux	102.69	5.10	283.46	20.40
Verviers	281.81	0.69	305.72	3.74
Chaufontaine	109.92	4.42	112.65	5.40
Gamme attendue	[1 ; 1200]	[-5 ; 3]	[44 ; 663]	[0.5 ; 96]

paramètres optimaux trouvés pour chaque sous-bassin sont très variables. Cela traduit la variabilité spatiale inhérente à un bassin de 700km².

A quelques exceptions près, l'ensemble des paramètres calibrés sont dans les gammes attendues. La calibration de la Magne présente un X3 plutôt faible, à 39,4. Le X2 de Theux (5,1) est trop élevé, de même qu'à Chaufontaine (4,9). Ces deux sous-bassins ont deux niveaux de bassins en série à leur amont (Figure 91).

Tableau 13 : Valeurs des paramètres GR4H obtenus pour les calibrations "hiver+pic" des sous-bassins de la Vesdre, et leur gamme attendue.

Bassin	X1	X2	X3	X4
Belleheld	161.96	0.33	49.03	5.34
Gileppe FSG_Qprop	69.07	1.32	59.74	4.76
Vesdre AC_Qprop	39.79	0.13	64.28	5.37
Vesdre FSG_Qprop	26.11	0.81	107.20	6.65
Magne	871.75	0.85	39.36	3.50
Helle mixte	105.79	0.94	61.16	5.62
Helle FSG	106.33	1.21	67.00	5.33
Polleur	1.16	-0.43	91.04	6.38
Soor	40.67	-0.37	50.92	8.07
Spixhe	43.16	-0.15	101.59	6.30
Theux	102.69	5.10	283.46	20.40
Verviers	281.81	0.69	305.72	3.74
Chaufontaine	109.92	4.42	112.65	5.40
Gamme attendue	[1 ; 1200]	[-5 ; 3]	[44 ; 663]	[0.5 ; 96]

L'Annexe II reprend les paramètres optimaux pour les calibrations sur des périodes continues.

Ceci soulève également les limites à venir liées à la réplication des paramètres d'un bassin jaugé à un bassin qui ne l'est pas, et à la répartition de la contribution au débit à l'exutoire de sous-bassins basée sur l'aire contributive, par exemple. Ces hypothèses simplificatrices et nécessaires, faute de données disponibles, ne peuvent être prises comme loi rigide traduisant du comportement hydrologique réel du bassin.

3.7.2 Evaluation quantitative des calibrations et validations

Le Tableau 14 synthétise les ratio d'adhésion au triple critère d'évaluation quantitative d'un modèle hydrologique défini par Moriasi et al. (2007). Pour un total de deux fois 35 séries et périodes calibrées ou validées, soit un ensemble de 70 séries et périodes, 32 des 35 séries calibrées valident les 3 critères en présentant à la fois un NSE > 0,5 ; un RSR inférieur ou égal à 0,7 ; et un Pbias maximal de $\pm 25\%$. Parmi les séries ne satisfaisant pas au moins un des trois critères, on retrouve une calibration en amont du barrage de la Gileppe, sur la période de calibration « hiver+pic » de la série FSG_Qprop, avec un Pbias = - 41,5%.

Tableau 14 : Nombre de séries et périodes validant simultanément les trois critères de Moriasi et al.(2007)

Bassin	Nombre de périodes ou séries testées en calibration et validation	Ratio de calibrations vérifiant les trois critères de Moriasi	Ratio de validations vérifiant les trois critères de Moriasi
Belleheid	6	3/3	2/3
amont barrage Gileppe	6	2/3	1/3
amont barrage Vesdre	4	2/2	2/2
Magne	6	2/3	0/3
Helle	12	6/6	5/6
Polleur	6	3/3	2/3
Soor	6	2/3	2/3
Spixhe	6	3/3	2/3
Theux	6	3/3	3/3
Verviers	4	2/2	2/2
Chaufontaine	4	2/2	2/2
Nombre de bassins	Total des séries et périodes	Ratio global	
11	66	30/33	23/33

On peut conclure que les calibrations effectuées sont satisfaisantes, dans l'ensemble, aucune n'échouant aux trois critères.

Les validations, en revanche, se montrent moins enclines à valider les trois critères. La Magne ne coche pas les trois cases simultanément sur aucune période de validation. Pour la Belleheid, la Soor, l'amont du barrage de la Gileppe, Polleur, et Spixhe, un point commun est observable : les périodes « hiver+pic » en validation n'atteignent pas les trois critères. Ces périodes de validation étant complémentaires à l'hiver+pic retenu en calibration, elles sont beaucoup plus longues. En particulier, les « hiver+pic » se centrent sur des hivers aux débits particulièrement élevés, et un pic. Le reste de la

série utilisé alors en validation, plus nuancé, comportant aussi des valeurs basses, des périodes d'été, n'est pas équivalent à ces périodes « hiver+pic » en calibration, qui peinent davantage à les reproduire. La qualité des données disponibles impacte aussi la fiabilité et la pertinence de la validation. Les choix opérés dans les calibrations visaient à favoriser la modélisation des pics de crue et induit logiquement des performances moindres en dehors de ces périodes.

Les indicateurs de qualité calculés pour chaque calibration se trouvent à l'Annexe III. Les diagrammes de dispersion associés sont consultables à l'Annexe IV. Pour chaque calibration, la période de données complémentaire constitue les données de validation, hors période de chauffe, et données exclues pour cause de NaN. A noter que les résultats des périodes longues en calibration et en validation se ressemblent parfois, les calibrations convergeant vers des paramètres très similaires dans la plupart des sous-bassins.

3.7.3 Validation sur base des débits observés amonts

Le modèle calibré à Chaudfontaine montre un pattern assez classique, avec une surestimation des débits d'été généralisée, compensée par des sous-estimations sur les pics de crue (Figure 104). Le rapport Q/P, soit le cumul des débits sur le cumul des précipitations est surestimé en simulation, à 0,54 ; par rapport aux observations, valant 0,45.

Ce comportement peut s'expliquer par la fonction objectif choisie : le NSE, soit l'erreur quadratique entre les valeurs observées et prédites, divisée par la variance des observations, sera d'autant plus satisfaisant que les simulations seront semblables au comportement moyen de la série, un NSE de 0 conduisant à la conclusion que les simulations n'apportent pas de gain prédictif comparativement à la moyenne des observations. On retrouve un compromis entre des débits élevés trop bas, et le corolaire des débits d'été surestimés, comme en attestent les rapports Q/P.

3.7.4 Validation sur base des simulations

Après la validation effectuée en fournissant les entrées ayant servi à calibrer le modèle, soit les débits observés sur les sous-bassins amonts, une validation des données simulées sur les bassins aval permet de tester la qualité du modèle en combinant les incertitudes.

Les diagrammes de dispersion (Annexe V) montrent une surestimation systématique des débits observés. Naturellement, le phénomène s'amplifie au plus le nombre de niveaux de sous-bassins en amont est élevé. Le paramètre X2 sort de sa gamme attendue selon la même corrélation. Ainsi, Polleur et Verviers sont au même niveau, les bassins à leur amont sont des têtes. La surestimation est moins marquée, avec un coefficient angulaire moyen de 1,08 pour Polleur, et 1,18 pour Verviers. Cette surestimation peut constituer une forme de considération sécuritaire des débits élevés, bienvenue pour la modélisation des crues. Le sous-bassin de Theux présente une pente de 1,19. En revanche, le sous-bassin de Chaudfontaine, alimenté par Theux, la Magne et Verviers, voit ces surestimations en aval s'accumuler, montrant un coefficient angulaire de 1,62 ; conduisant à une simulation excessive systématisée.

3.7.5 Simulations

3.7.5.1 Simulation à Verviers

3.7.5.1.1 Analyse des maximums annuels

A Verviers, les maximums annuels simulés par les paramètres « hiver+pic », selon le scénario « gestion courante » se retrouvent entre les deux courbes enveloppes, soit la courbe simulée inférieure,

considérant une capacité de rétention infinie des barrages, et la courbe simulée supérieure, invisibilisant les ouvrages et restituant un débit naturalisé en entrée du barrage de Verviers (Figure 105). Les dynamiques et ordres de grandeur des différents scénarios sont cohérents entre eux, avec plus de variabilité sur les mesures et la série de gestion courante. La redistribution des débits sur le sous-bassin de Verviers semble, dès lors, être une hypothèse plausible. On peut deviner les contours de la loi de gestion dans le maximum annuel de 2007 (Figure 105d), où la courbe des observations affiche une dynamique plutôt similaire à un rétention importante des ouvrages, tandis que les débits simulés ressembleraient plutôt à la dynamique des débits naturalisés.

3.7.5.1.2 Reconstitution de l'hydrogramme - juillet 2021

Les simulations à Verviers étant tout à fait satisfaisantes, il est possible d'accorder un certain degré de confiance à la reconstitution de juillet 2021 par le modèle (Figure 106). On peut imaginer que les données mesurées perdent leur fiabilité le 14/07/21 à 12h, (UTC), lorsqu'elles chutent soudain sous la courbe orange, qui serait le débit minimal théorique à Verviers, selon l'hypothèse que les barrages seraient capables de stocker toute l'eau venant de leur sous-bassins amonts. La courbe bleue, de gestion théorique courante, montre un premier pic de crue durant l'évènement presque inexistant, à 14h UTC le 14/07. On se rappellera aussi l'éloignement des débits estimés du maximum jaugé, ce qui

	Q peak [m³/s]	t peak (GMT+0)	Q cumul [mm]	P cumul [mm]	Ratio [-]
GR4 flow	149	07/14/2021, 05:00	5733.959	10658.420	0.538
Mesures	195	07/14/2021, 08:00	4804.968	10658.420	0.451

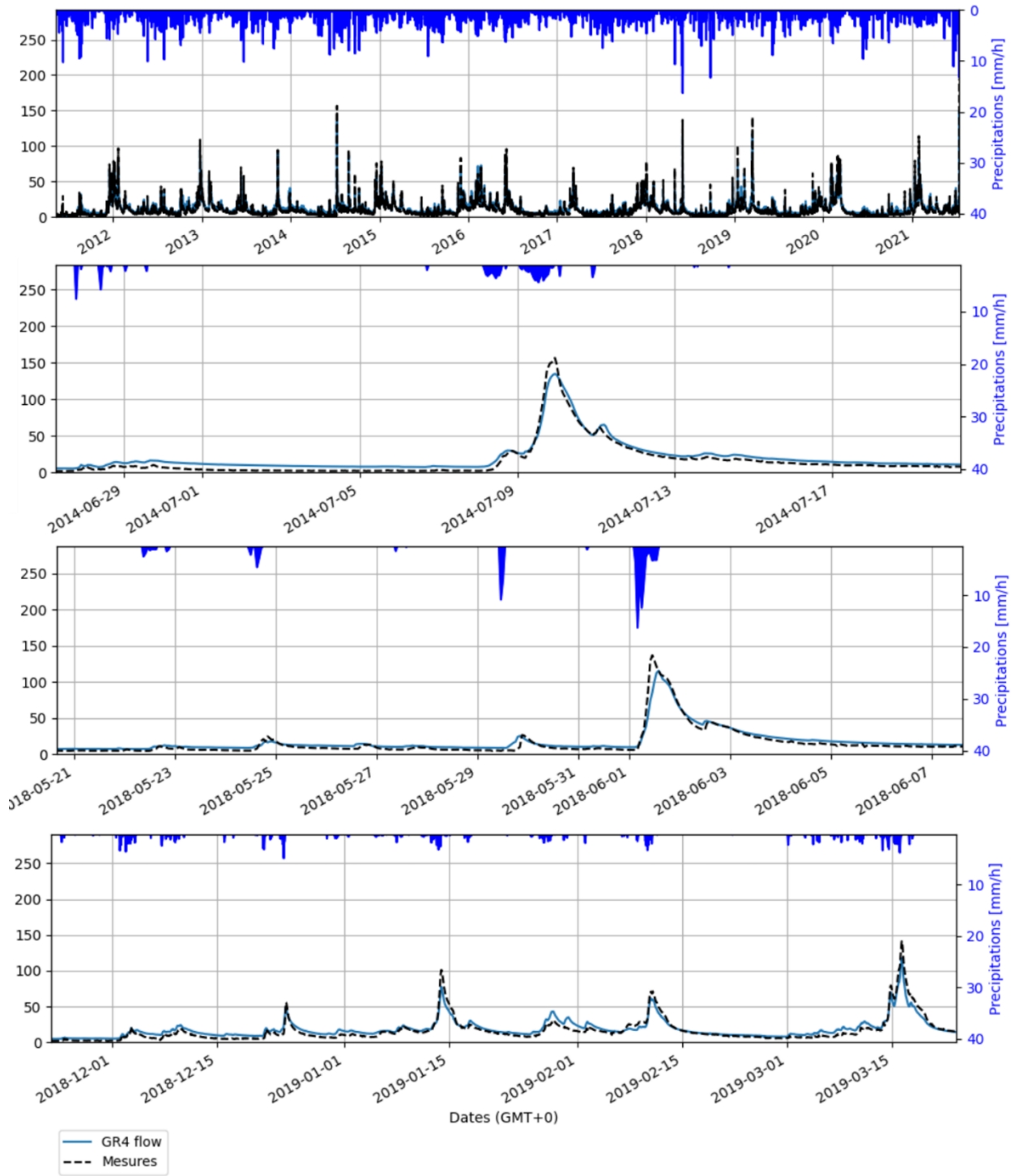


Figure 104: analyse de la calibration sur la période 2011-2021 : les débits d'étiage sont plus élevés en simulation, tandis que les débits de pointe sont sous-estimés.

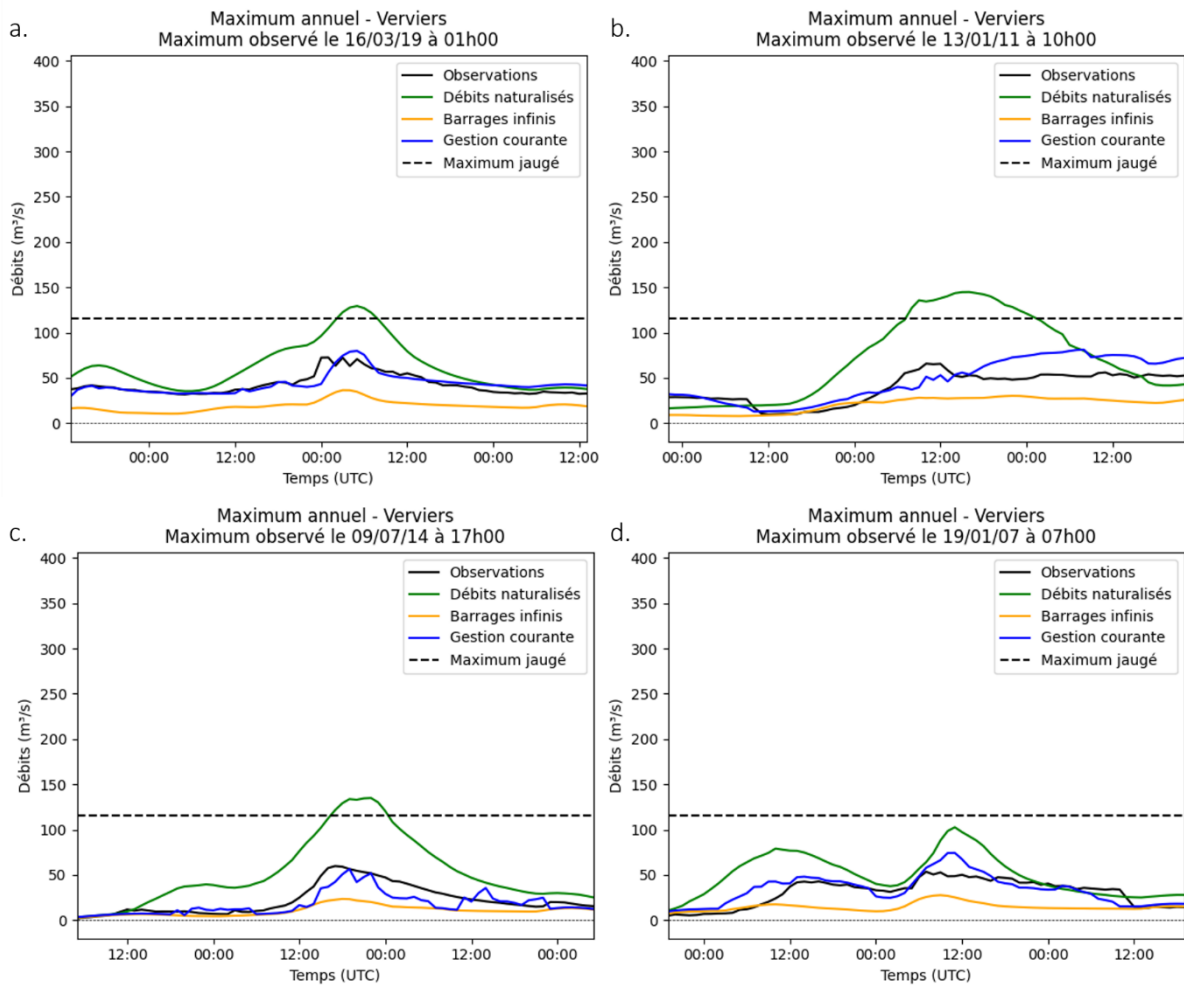


Figure 105: Maxima annuels à Verviers: les débits observés et simulés se retrouvent entre les deux courbes enveloppes.

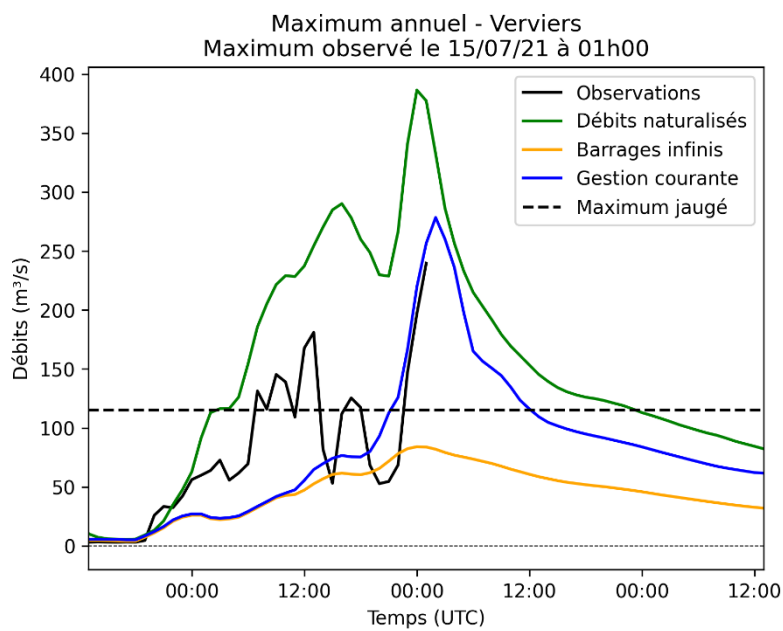


Figure 106 : les scénarios « barrages infinis » et « débits naturalisés » fournissent une courbe enveloppe pour les débits reconstitués pour l'évènement de juillet 2021

augmente l'incertitude sur les débits élevés mesurés. Le maximum annuel de juillet 2021 (Figure 106) culmine à 387 m³/s pour le scénario naturalisé, 279 m³/s selon la simulation « hiver+pic ». Les données simulées au niveau du pic de crue semblent plausibles, vu que le barrage d'Eupen a atteint sa capacité de rétention maximale durant l'évènement, ce qui tend vers le scénario enveloppe des débits naturalisés.

3.7.5.2 Scénarios de simulations à Chaudfontaine

3.7.5.2.1 Analyse de la surestimation des débits à Chaudfontaine

Pour tenter d'expliquer et d'améliorer la surestimation systématisée à Chaudfontaine, différentes pistes ont été explorées.

Les calibrations ont été faites selon la stratégie « hiver+pic », mais aussi sur base de périodes continues plus longues, dépendant toujours de la plage de données observées disponibles et de qualité (exclusion de valeurs NaN interpolées ou de valeurs aberrantes de la plage de calibration). Des simulations ont été réalisées avec les paramètres optimaux issus des calibrations sur base des périodes longues. Comme deux périodes longues étaient testées pour chaque sous-bassin, le meilleur NSE a été préféré parmi les deux calibrations confondues pour choisir les paramètres optimaux à retenir. Comme l'analyse de la représentation des pics avait été plus favorable aux « hivers+pic », et que les périodes sous-estimaient plus fortement les pics de crue, le résultat attendu était que les simulations basées sur les périodes longues viendraient sous-estimer les débits observés, formant la courbe enveloppe basse des simulation, complémentaire à la courbe de simulation « hiver + pic », qui formerait la limite supérieure. Néanmoins, les simulations « périodes longues » ont également surestimé fortement les débits observés. Il a été remarqué que les paramètres ne changeaient pas toujours beaucoup, d'un type de calibration à l'autre, proposant des dynamiques finalement similaires pour les différents jeux de paramètres optimaux.

Les temps de transfert, paramètres également calibrés, viennent ajuster l'apport des débits amonts au sous-bassin en cours de calibration, avec une précision de la seconde. Ces temps de transfert ont été maintenus à valeur constante, selon l'hypothèse que l'ajustement du modèle pouvait se faire inutilement finement sur ces temps, alors que, d'une part, le modèle est horaire et fonctionne par seuils multiples de 3600 secondes, et d'autre part, les paramètres d'intérêt principaux, X1, X2, X3 et X4, pourraient voir leur ajustement immobilisé et compensé par ces temps de transfert. Cela n'a pas pu se vérifier, les débits simulés restant très élevés.

Une simulation sur base des résultats de simulation des sous-bassins amonts a également été tentée. D'une part, les temps de transfert ne pouvaient pas prendre des valeurs dans une fourchette paramétrable, ce qui pouvait mener à des incohérences, avec par exemple la Soor contribuant à Verviers en moins de dix minutes, contre pratiquement cinq jours pour la Gileppe en amont du barrage. D'autre part, le risque était d'invisibiliser le problème, en calibrant le débit en aval sur des estimations plus ou moins biaisées en amont.

Une recalibration a été faite à Theux et à Chaudfontaine, présentant les X2 les plus anarchiques, en imposant la valeur de ce paramètre à 0. Ce forçage traduit une absence de perte ou d'apport d'eau au bassin autre que l'apport de la pluie et la « perte » via l'évapotranspiration, donc aucun phénomène d'infiltration ou de transfert souterrain. Bien que peu justifiable méthodologiquement, l'exercice a simplement été mené pour essayer de déterminer si la surestimation venait peut-être de transferts souterrains mal évalués, car difficilement identifiables et quantifiables. Rien de tel n'a pu être conclu. En outre, les résultats en calibration basés sur les débits observés amonts se sont avérés, comme attendu, très inférieurs en termes de bilans. En effet, remplacer des valeurs de X2 anormalement

grandes par des valeurs ne permettant pas d'échanges a mené à un manque d'eau clair, sans pour autant améliorer la combinaison des surestimations en amont, et leur impact sur le sous-bassin aval.

L'effet du rôle des carrières et des captages associés sur les sous-bassins de Theux et de Chaudfontaine mériterait d'être étudié. Le lien éventuel entre les paramètres X2 particulièrement élevés, les surestimations importantes lors des simulations combinant tous les sous-bassins, et des modifications de bilans de cause anthropique actuellement non considérées par le modèle présentent un intérêt d'investigation pour l'amélioration du modèle. Ce développement dépasse la portée du présent projet.

3.7.5.2.2 Reconstitution des débits de juillet 2021

L'évènement de juillet 2021 a été simulé selon les paramètres optimaux « hiver+pic » et comparé au pic de crue modélisé par HECE pour la reconstruction (Figure 107). La simulation en gestion courante indique un maximum à 697 m³/s, convergeant avec la valeur reconstruite de 677 m³/s. La différence relative est de 3%.

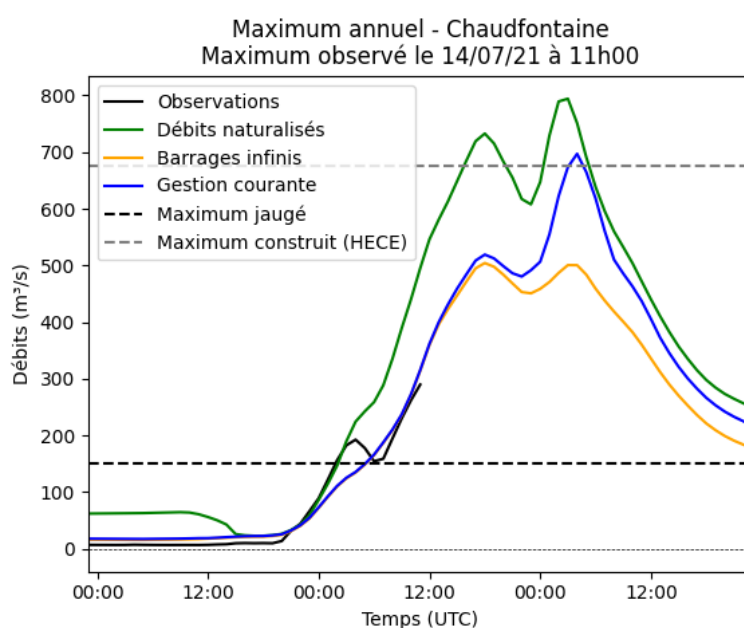


Figure 107 : reconstitution de l'évènement de juillet 2021, selon un scénario « gestion courante » encadré par les deux scénarios « barrages de capacité infinie » et « débits naturalisés ». L'ordre de grandeur « hiver+pic » est similaire et un peu supérieur à la reconstitution effectuée par HECE.

3.7.6 Redistribution des débits

Les débits redistribués depuis Verviers et Chaudfontaine aux principaux affluents de la Vesdre sont illustrés pour l'année 2005 à la Figure 108.

A noter que les erreurs de surestimations à Chaudfontaine ne sont pas impactantes pour l'opération de redistributions des débits. En effet, le sous-bassin, pris isolément, répond bien aux précipitations et s'aligne avec les observations.

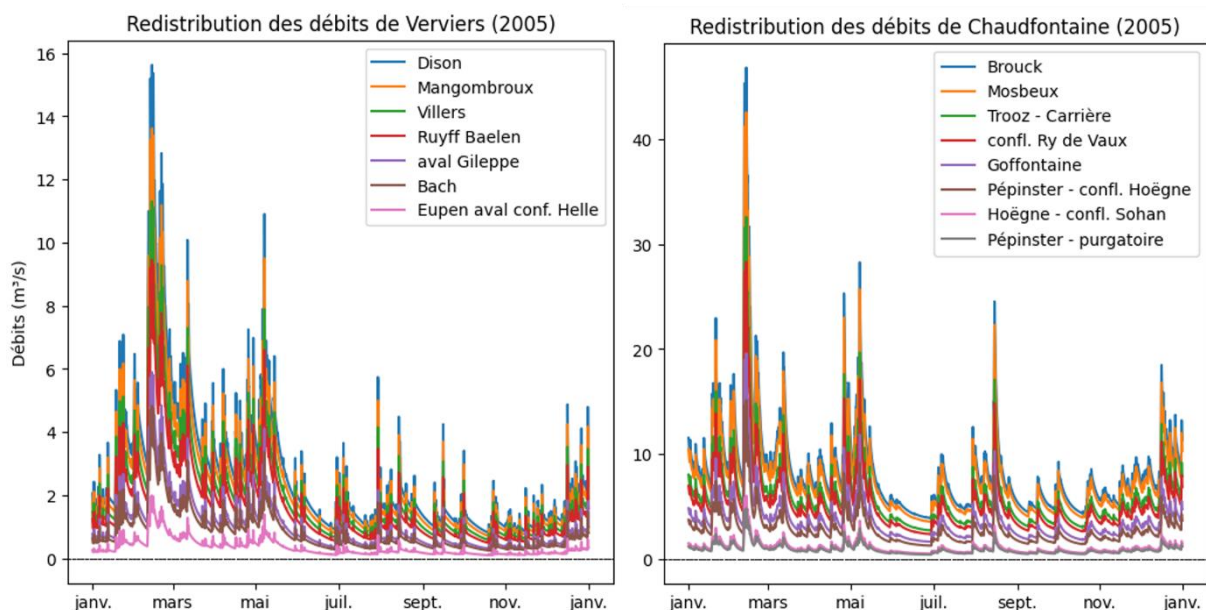


Figure 108 : Les débits en aval des têtes de bassins et en amont de la station de Verviers sur la Vesdre sont redistribués proportionnellement à leur aire contributive avec un déphasage nul. Le même principe s'applique à Chaudfontaine.

3.7.7 Calibrations issues de MIKE

Le Tableau 15 reprend les % de superficie comportant des aménagements évalués efficaces pour chaque sous-bassin. Le Tableau 16 présente la valeur des paramètres obtenus avant et après aménagement ainsi que leur variation en %.

Tableau 15 : Pourcentage de superficie aménagée efficacement par sous-bassin versant, et type d'aménagement

Sous-bassin	% de superficie d'aménagements efficaces	Type d'aménagement
Belleheid	40	restauration de forêts
Statte	41	
Polleur	38	
Helle	33	
Magne	25	Δ pratiques agricoles

Tableau 16 : Comparaison des paramètres X1 et X4 issus des calibrations basées sur les sorties du modèle physiquement basé avant et après aménagements

Sous-Bassin	VO						POST		(POST-VO)/VO*100	
	X1	X2	X3	X4	T. transfert Belleheid (s)	T. transfert Sart-Lez-Spa (s)	X1	X4	X1	X4
Belleheid	133.5	-0.26	27.7	5.6			155.9	6.7	16.8	18.8
Sart-lez-Spa	190.0	-0.34	29.6	5.6	3870		233.0	6.4	22.7	14.7
Polleur	134.8	0.46	20.5	10.6	12276	8406	156.6	11.3	16.2	6.9
Helle	138.4	-0.27	57.6	6.5			152.3	7.3	10.1	11.5
Magne	1288.0	-0.02	16.0	3.3			1953.3	4.4	51.7	31.4

Les variations de ces paramètres ont été mises en relation avec le pourcentage de la superficie du bassin aménagée efficacement. Sur la Hoëgne (sous-bassins de Belleheid, Sart-lez-Spa, et Polleur), et la Helle, correspondant respectivement à des bassins forestiers et tourbeux, les aménagements efficaces reprennent les conversions de résineux en feuillus et les pratiques limitant la compaction des sols (A5). Sur le bassin agricole de la Magne, il s'agit de barrières interparcellaires, l'utilisation de rouleaux anti-érosifs en culture de maïs et la mise en place de techniques culturales simplifiées. Les figures Figure 109 et Figure 110 présentent la variation, exprimée en pourcents, des paramètres X1 et X4, en fonction du pourcentage de superficie aménagée efficacement.

Afin de minimiser le risque que les résultats soient impactés par valeurs optimales correspondant à des optimums locaux, 10 calibrations ont été effectuées par sous-bassin. Pour chaque bassin, les résultats convergent lorsque les paramètres X2, X3 et les temps de transfert (si applicable) sont fixés. Pour des types d'aménagements similaires, l'évolution de X1 semble suivre l'évolution de la surface aménagée. La tendance est moins claire pour X4. Il est à noter que le bassin agricole de la Magne, dont les aménagements sont différents de ceux de la Hoëgne et de la Helle, se positionne sur une autre relation qui devrait s'enrichir d'autres tests pour être construite de manière plus robuste.

Assez logiquement, le type d'occupation de sol majoritaire sur le bassin ainsi que le type d'aménagement mis en place impacte la réponse des paramètres GR4H. Il n'est donc à ce stade pas possible de déterminer une règle générale permettant d'ajuster directement les paramètres GR4H par bassin pour simuler l'effet d'aménagements agricoles dans ceux-ci, bien que l'on puisse admettre que les aménagements se traduisent en une augmentation des paramètres X1 et X4.

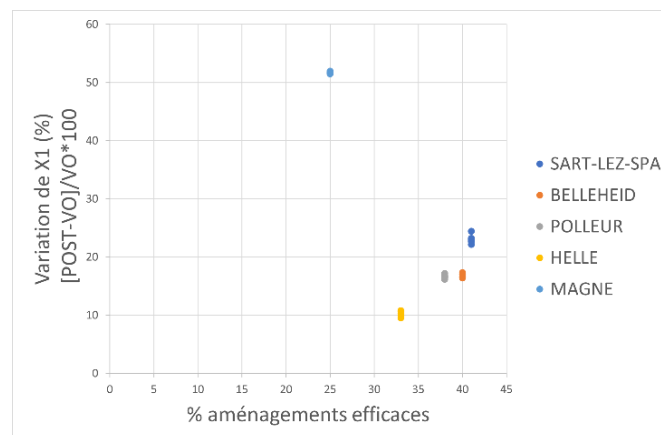


Figure 109 : Variation de X1 par bassin selon le % d'aménagements efficaces

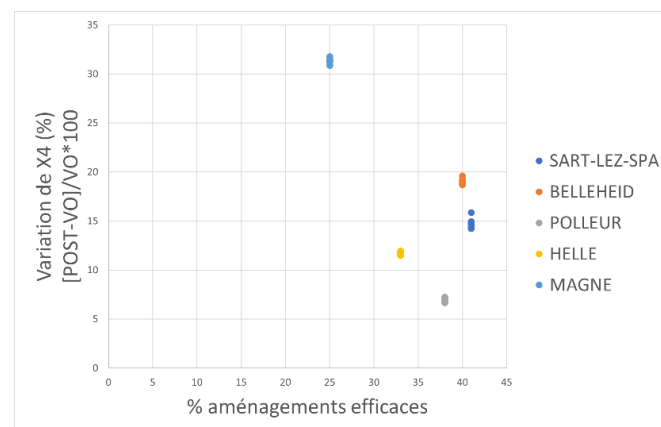


Figure 110 : Variation de X4 par bassin selon le % d'aménagements efficaces

Tableau 17 : NSE calculés entre les simulations MIKE et les observations (OBS-MIKE), les simulations GR4H dans WOLF et les simulations MIKE comme référence (MIKE(ref)—WOLF(simMPB)), et les simulations GR4H issues des simulations MIKE et les observations (OBS-WOLF(simMPB)).

Bassin	Belleheid		Sart-lez-Spa		Polleur		Helle		Magne	
	VO	POST	VO	POST	VO	POST	VO	POST	VO	POST
OBS-MIKE	0.63	0.67			0.70	0.70	0.56	0.55	0.67	0.66
MIKE(ref)-WOLF(simMPB)	0.90	0.90	0.98	0.98	0.94	0.94	0.88	0.89	0.88	0.86
OBS-WOLF(simMPB)	0.68	0.70			0.71	0.71	0.53	0.53	0.66	0.64

Les tendances observées sur les NSE (Tableau 17) sont uniformes entre tous les sous-bassins. Les simulations GR4H basées sur les simulations MIKE présentent les NSE les plus élevés, et très bons, entre 0,88 et 0,98. Il était attendu qu'un modèle sache reproduire les résultats d'un autre modèle avec fiabilité. Les NSE des deux modèles MIKE et WOLF comparativement aux observations sont compris entre 0,55 et 0,7, ce qui est satisfaisant à bon.

3.7.8. MAR

Comparaison IRM-MAR et évolutions selon MAR MIROC6 ssp3-7.0

Les résultats des tests statistiques sont présentés dans le Tableau 18. La seule variable présentant un biais significatif est la température moyenne estivale. Le modèle MAR surestime les températures en été. Les analyses relatives aux comparaisons des mailles d'altitude contrastée présentées en Annexe VI montrent les mêmes conclusions. Les tendances générales semblent être bien représentées dans le modèle MAR, que ce soit pour les données moyennes du bassin (Figure 111, Figure 121) ou pour les comparaisons par maille (Figure 116). On observe en effet des précipitations plus importantes et des températures plus faibles sur la maille B que sur la maille A (Figure 116). Cependant, d'autres indicateurs tels que le nombre de jours sans pluie (Figure 114, Figure 118), le nombre de jours de pluie intense (Figure 112, Figure 117) et le nombre d'heures de pluie intense semblent être plus faibles selon le modèle MAR MIROC-6 historique. Le nombre de jours de température moyenne supérieure à 25°C a lui tendance à être plus élevée selon MAR (d'autant plus dans le futur) (Figure 122) ce qui concorde avec les analyses statistiques précédentes indiquant des températures estivales plus élevées selon MAR.

Tableau 18 : Résultats des test statistiques effectués pour la comparaison IRM-MAR (1980-2014)

		Erreur relative (%)	Moyenne (IRM) - Moyenne(MAR)	Ecart-type(IRM)	Biais standardisé
Précipitations annuelles cumulées (mm)		6.75	-76.06	133.65	0.57
Précipitations cumulées par saison et par an (mm)	printemps	9.78	-24.28	73.57	0.33
	été	0.92	-2.74	70.48	0.04
	automne	8.02	-22.13	83.36	0.27
	hiver	8.86	-26.91	84.63	0.32
Nombre de jours de pluie intense (>20mm) par saison et par an	printemps	-46.67	0.60	0.99	0.61
	été	-57.89	1.26	1.82	0.69
	automne	-14.04	0.23	1.26	0.18
	hiver	-41.79	0.80	1.70	0.47
Précipitations maximales par saison et par an (mm)	printemps	-8.29	1.99	7.30	0.27
	été	-20.42	6.20	10.65	0.58
	automne	-20.80	6.64	15.61	0.43
	hiver	-14.27	3.95	9.18	0.43
Températures moyennes annuelles (°C)		-0.77	0.07	0.80	0.09
Températures moyennes par saison et par an (°C)	printemps	-9.09	0.76	1.20	0.63
	été	6.16	-0.99	0.94	1.06
	automne	-4.00	0.38	1.11	0.34
	hiver	-7.29	0.13	1.48	0.09

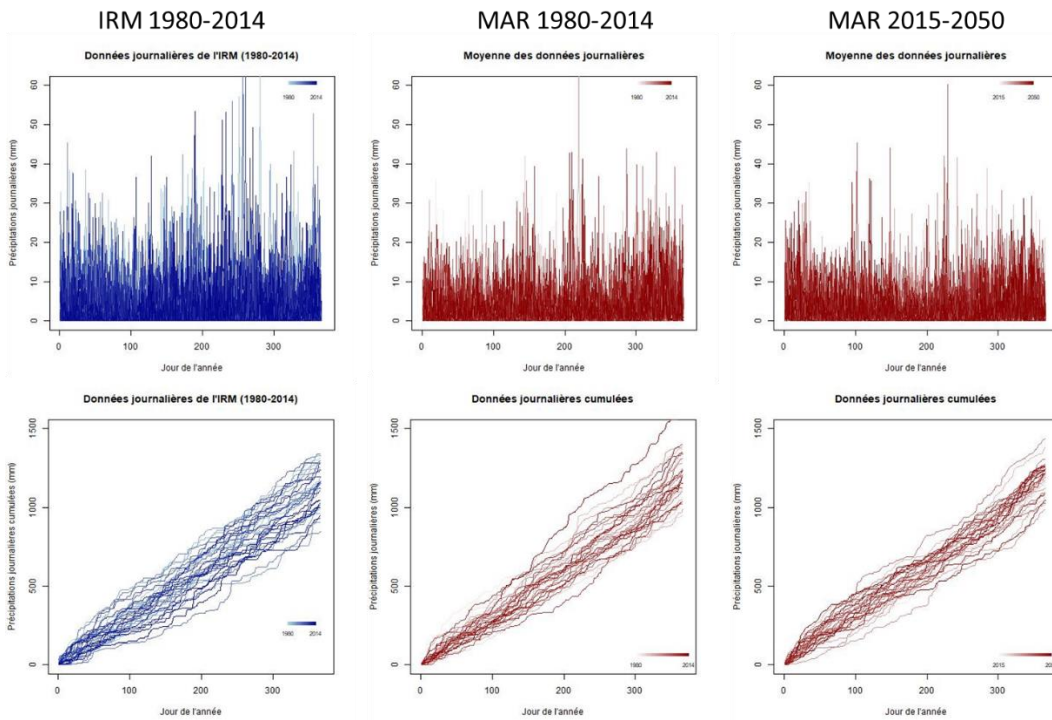


Figure 11 : Comparaisons des données journalières de précipitations moyennes (haut) et cumulées (bas) par jour de l'année selon l'IRM (gauche), MAR historique (milieu) et MAR futur (droite)

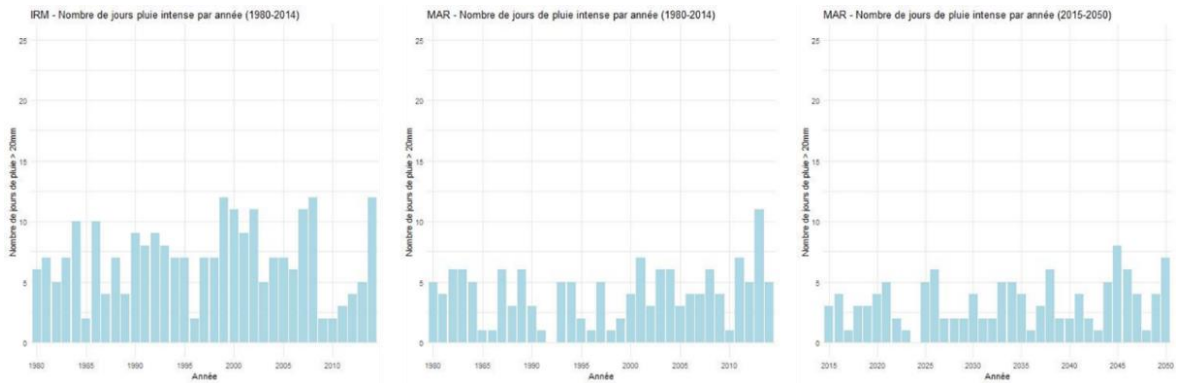


Figure 12 : Nombre de jours de pluie intense par année selon l'IRM (gauche), MAR historique (milieu) et MAR futur (droite)

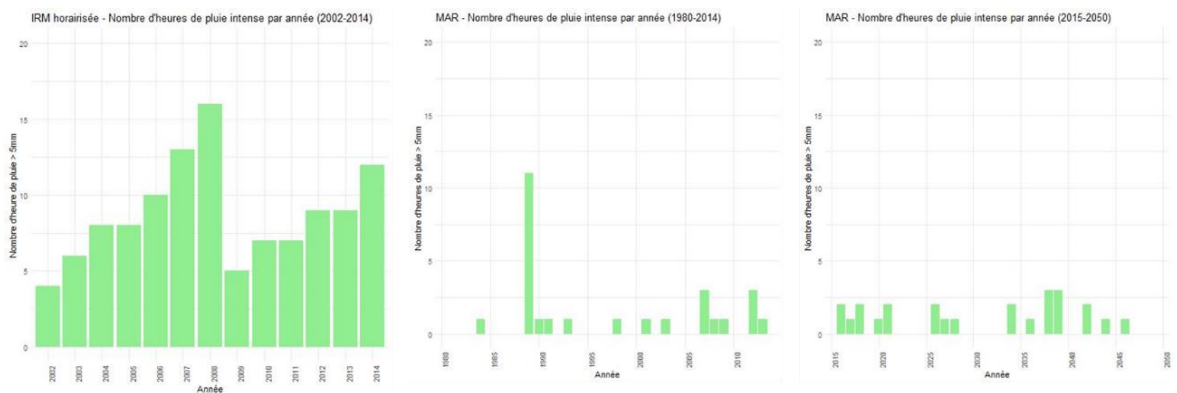


Figure 13 : Nombre d'heures de pluie intense par année selon l'IRM (gauche), MAR historique (milieu) et MAR futur (droite)

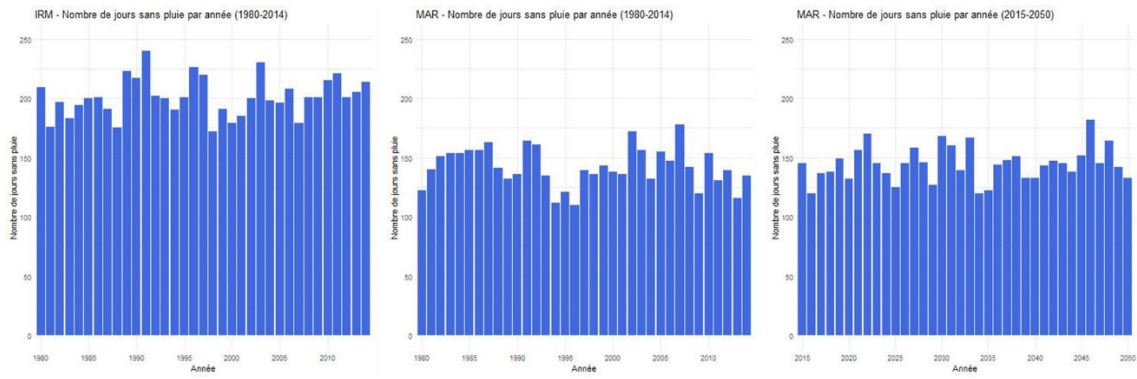


Figure 114 : Nombre de jours sans pluie par année selon l'IRM (gauche), MAR historique (milieu) et MAR futur (droite)

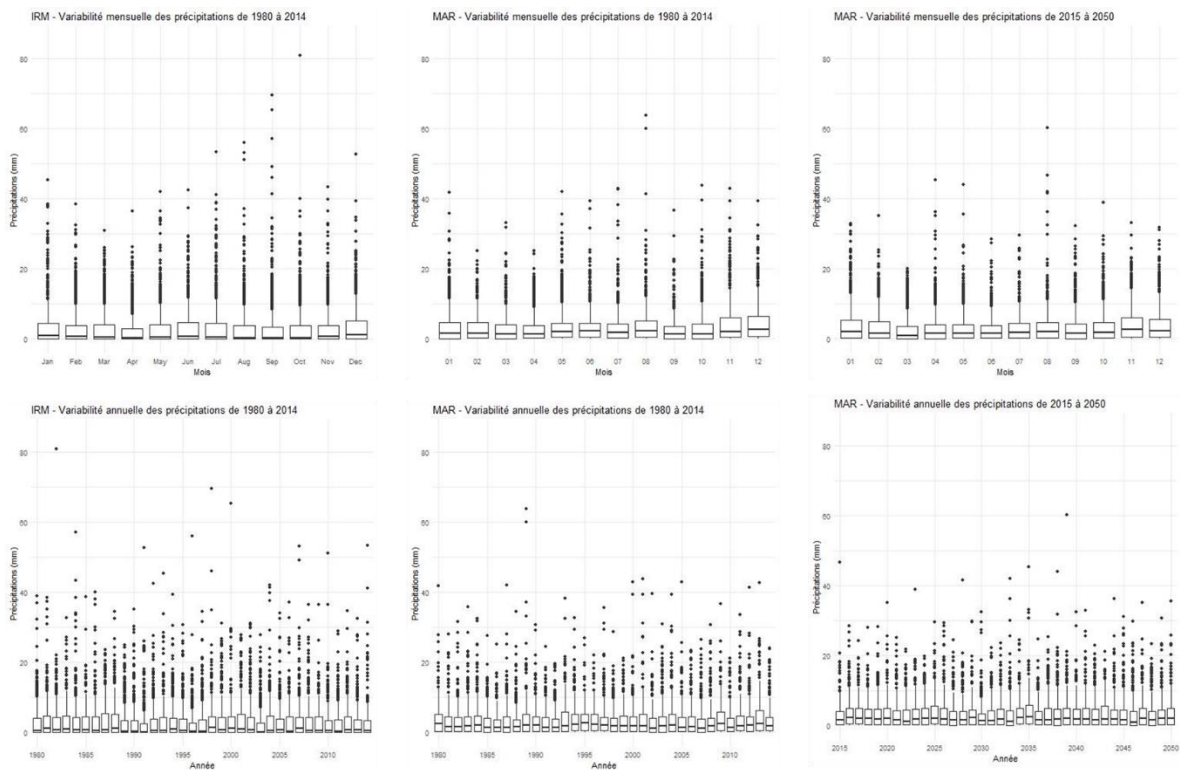


Figure 115 : Variabilité mensuelle (haut) et annuelle (bas) des précipitations selon l'IRM (gauche), MAR historique (milieu) et MAR futur (droite)

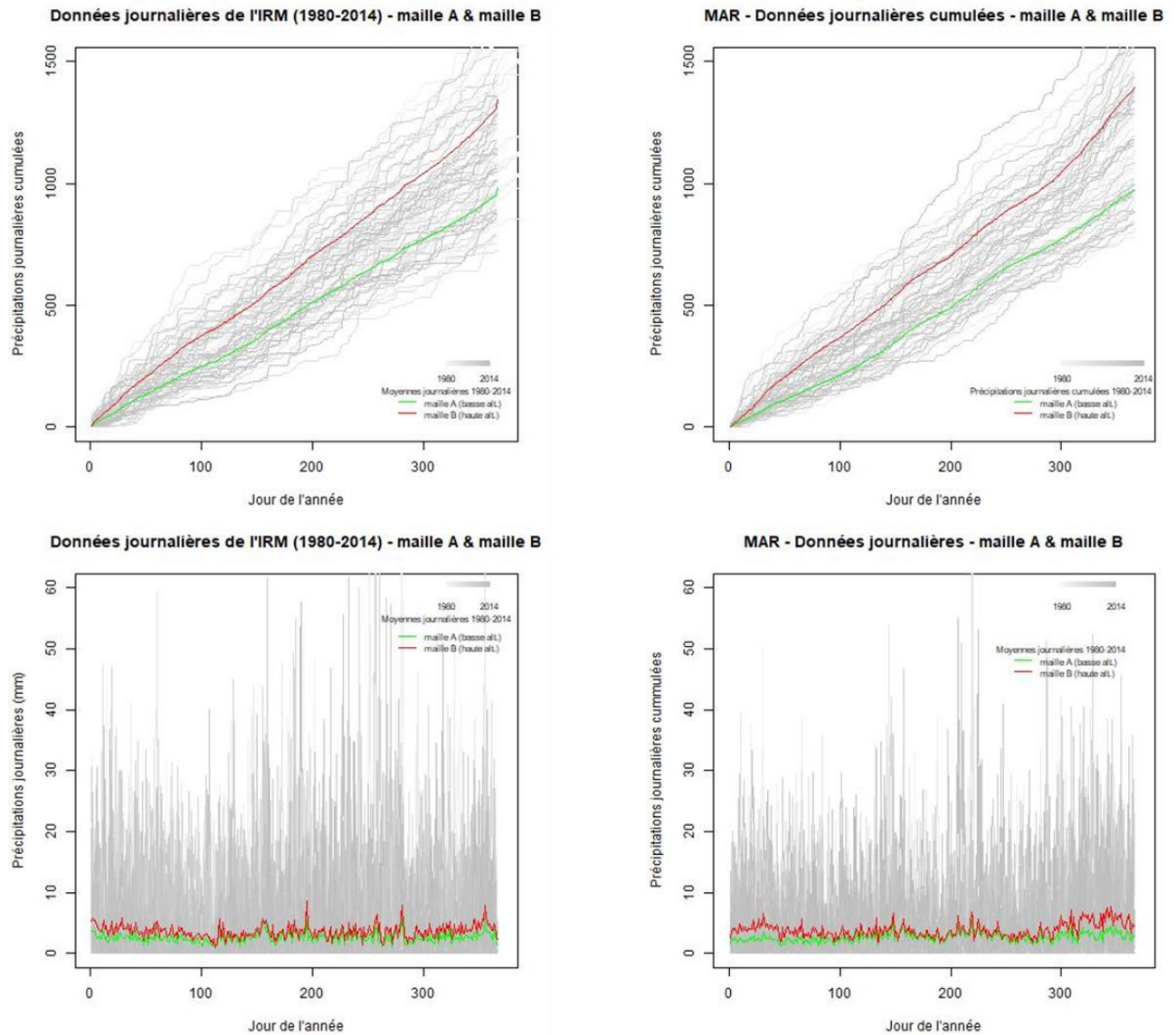


Figure 116 : Comparaisons des données journalières de précipitations moyennes (haut) et cumulées (bas) par jour de l'année selon l'IRM (gauche), MAR historique (droite) pour une maille de basse (A) et haute (B) altitude

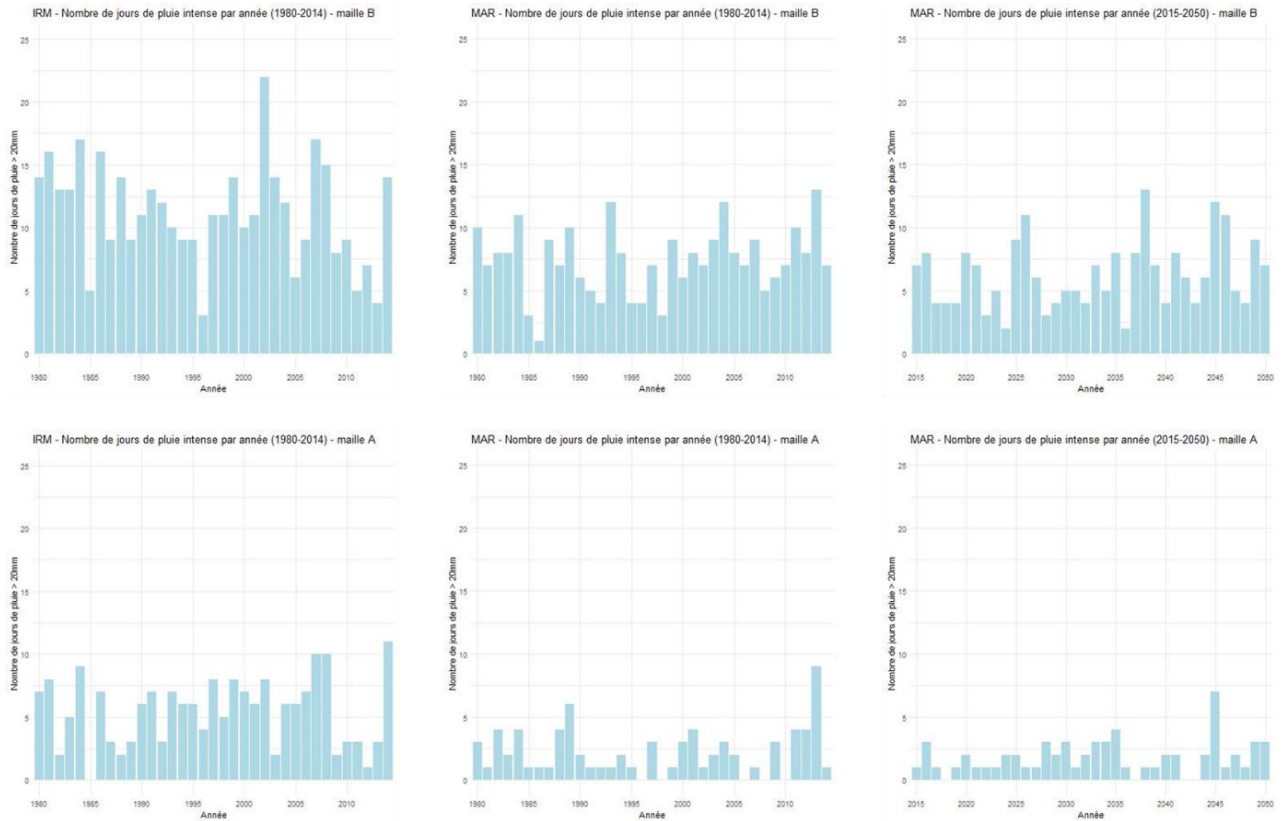


Figure 117 : Nombre de jours de pluie intense par année selon l'IRM (gauche), MAR historique (milieu) et MAR futur (droite) pour une maille de basse (A) et haute (B) altitude

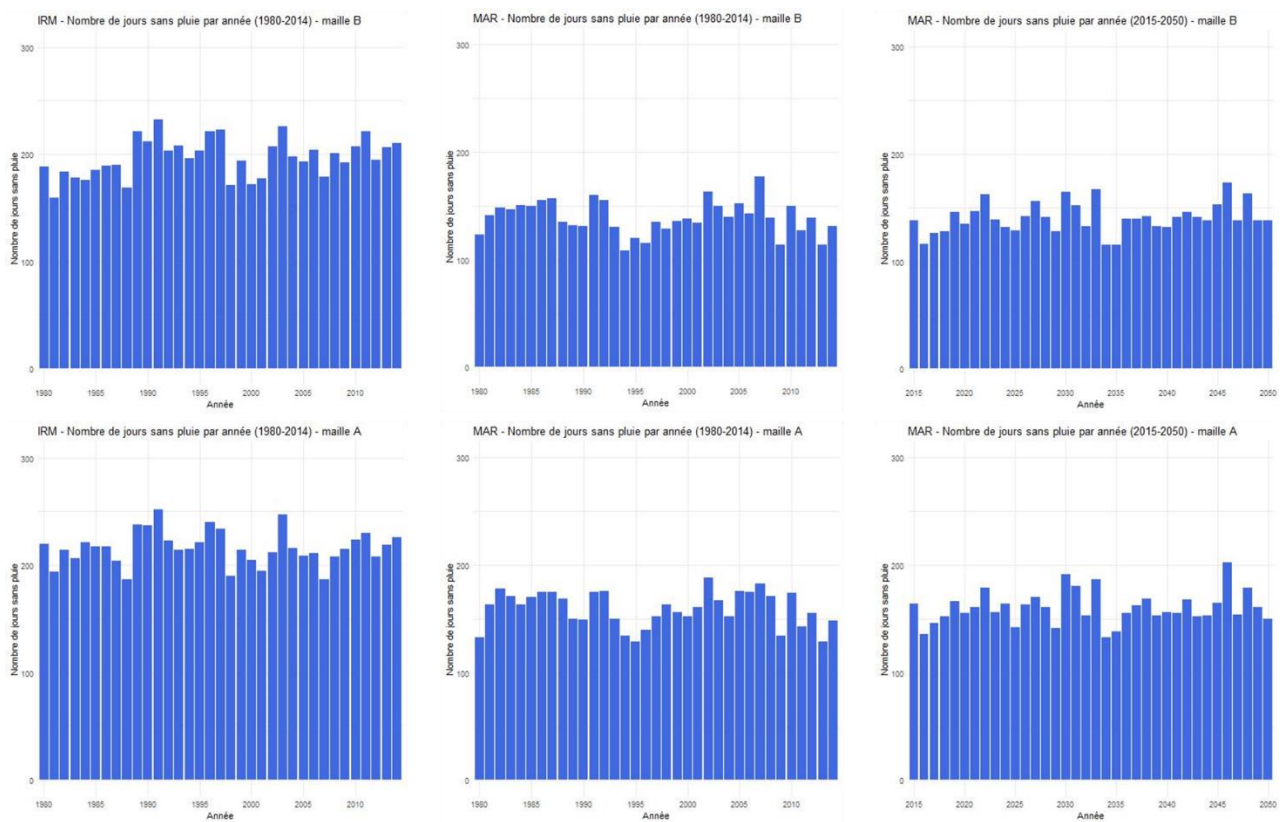


Figure 118 : Nombre de jours sans pluie par année selon l'IRM (gauche), MAR historique (milieu) et MAR futur (droite) pour une maille de basse (A) et haute (B) altitude

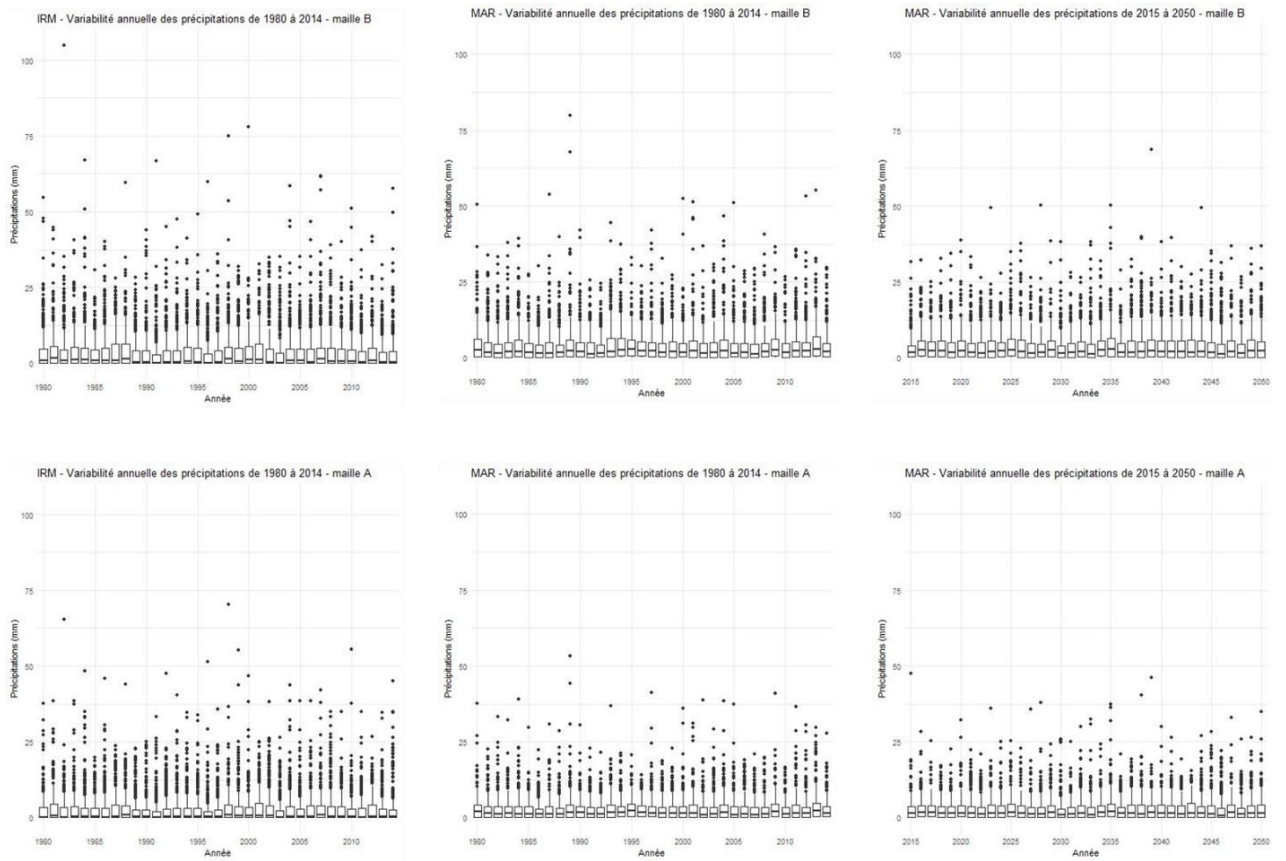


Figure 119 : Variabilité annuelle des précipitations selon l'IRM (gauche), MAR historique (milieu) et MAR futur (droite) pour une maille de basse (A - bas) et haute (B - haut) altitude

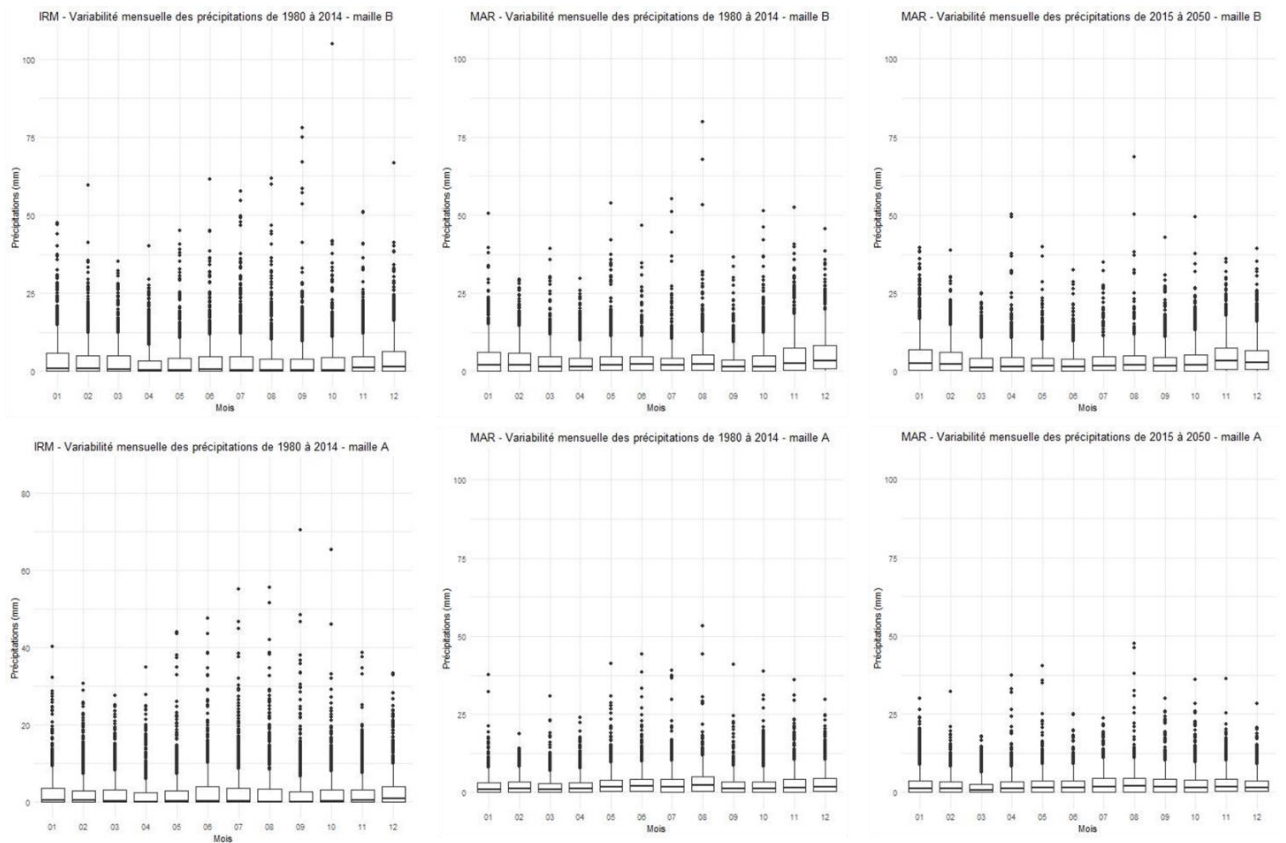


Figure 120 : Variabilité mensuelle des précipitations selon l'IRM (gauche), MAR historique (milieu) et MAR futur (droite) pour une maille de basse (A - bas) et haute (B - haut) altitude

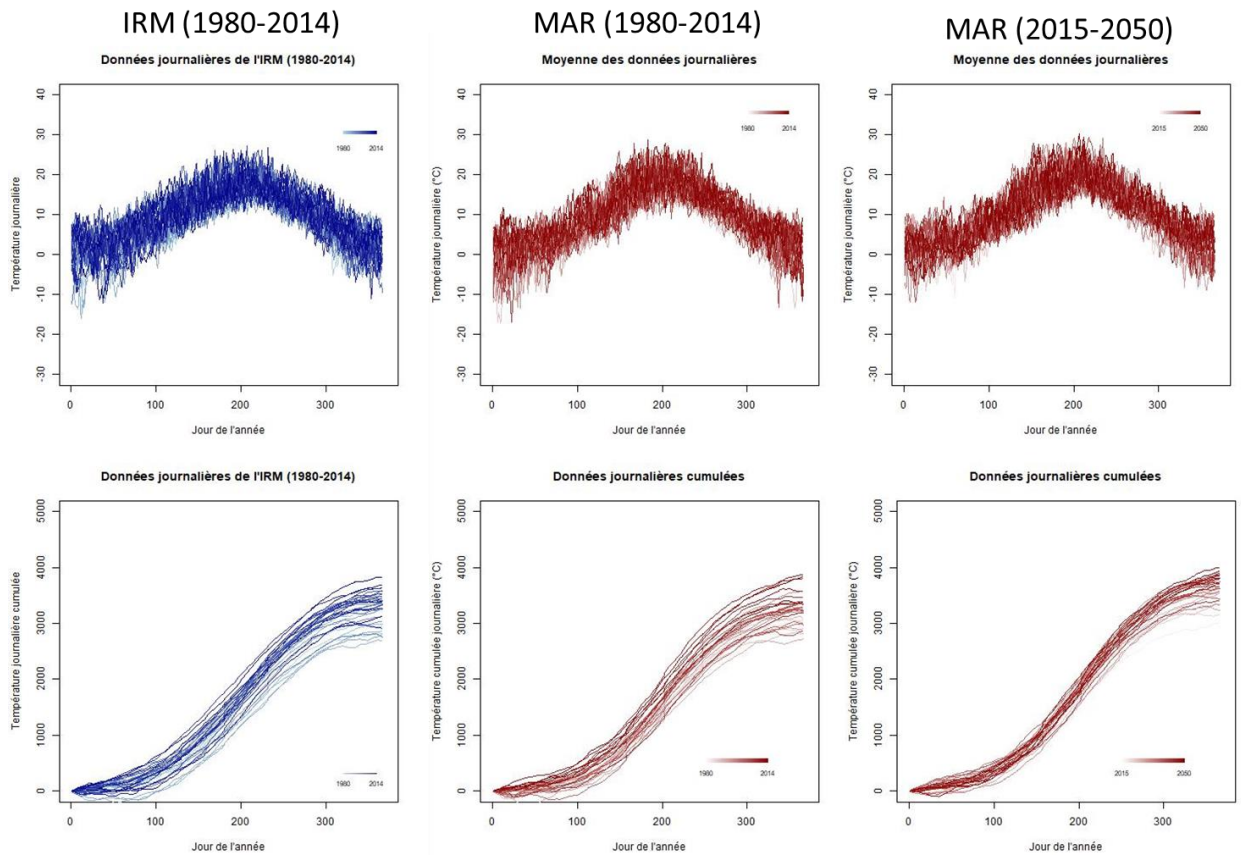


Figure 121 : Comparaisons des données journalières de températures moyennes (haut) et cumulées (bas) par jour de l'année selon l'IRM (gauche), MAR historique (milieu) et MAR futur (droite)

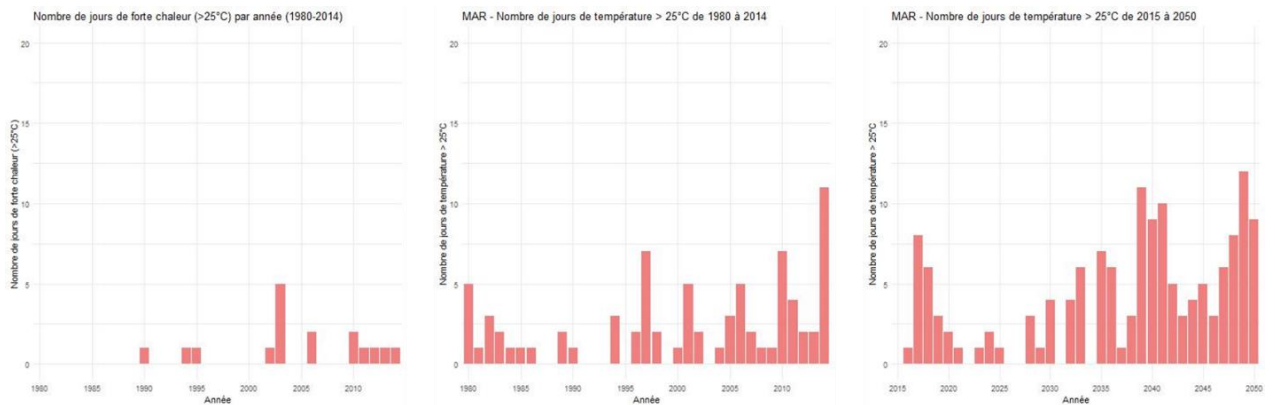


Figure 122 : Nombre de jours de température supérieure à 25°C par année selon l'IRM (gauche), MAR historique (milieu) et MAR futur (droite)

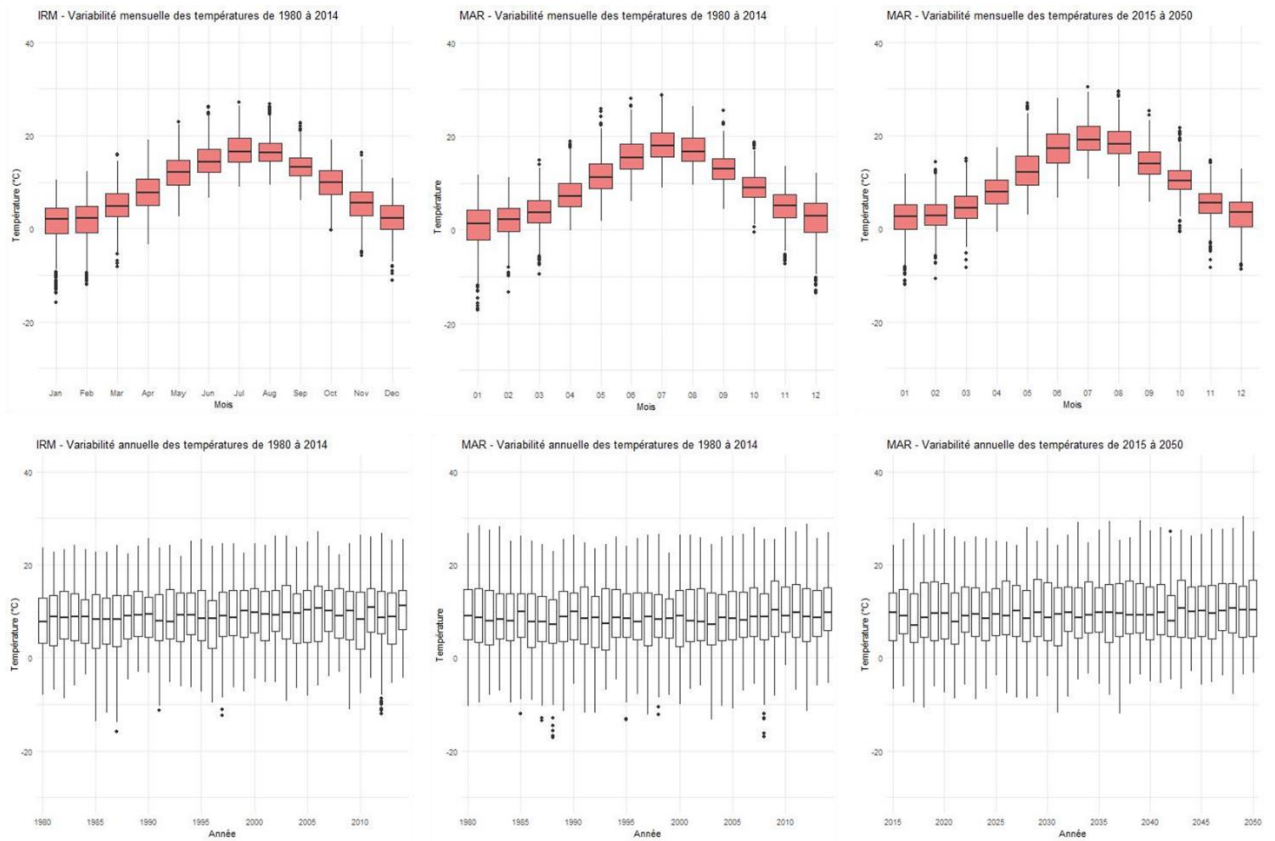


Figure 123 : Variabilité mensuelle (haut) et annuelle (bas) des températures selon l'IRM (gauche), MAR historique (milieu) et MAR futur (droite)

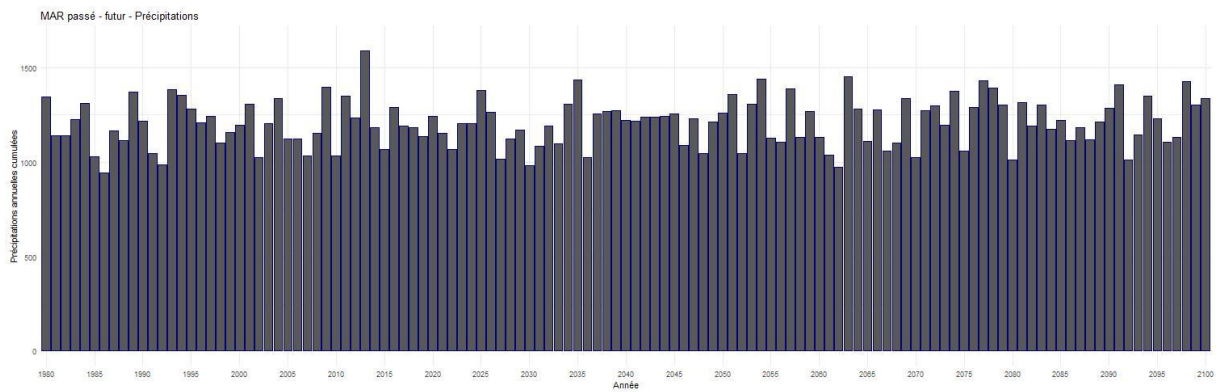


Figure 124 : Evolution des précipitations annuelles cumulées selon MAR MIROC6 ssp3-7.0. de 1980 à 2100

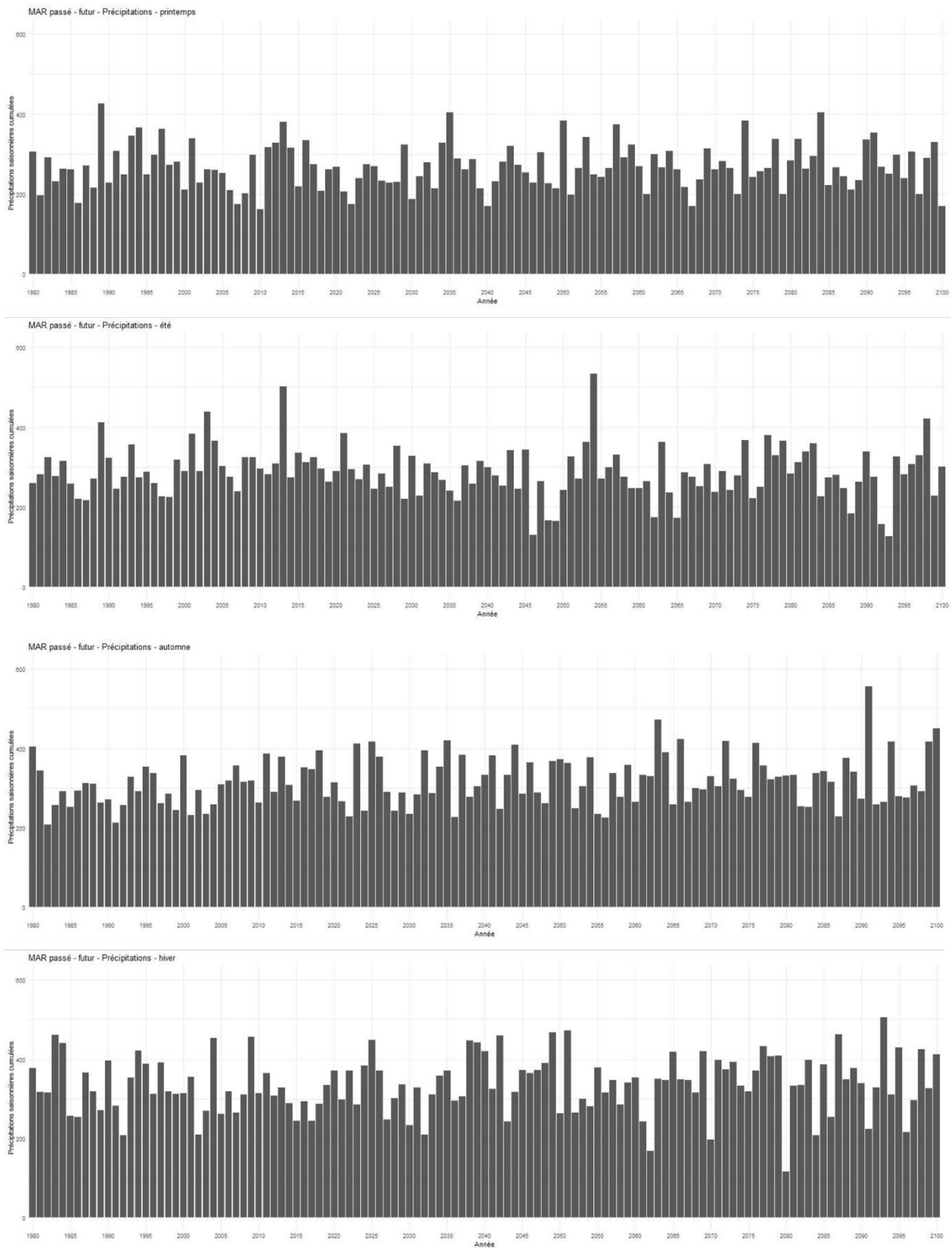


Figure 125 : Evolution des précipitations saisonnières cumulées selon MAR MIROC-6 ssp3-7.0. de 1980 à 2100

Précipitations cumulées annuelles moyennes (mm)

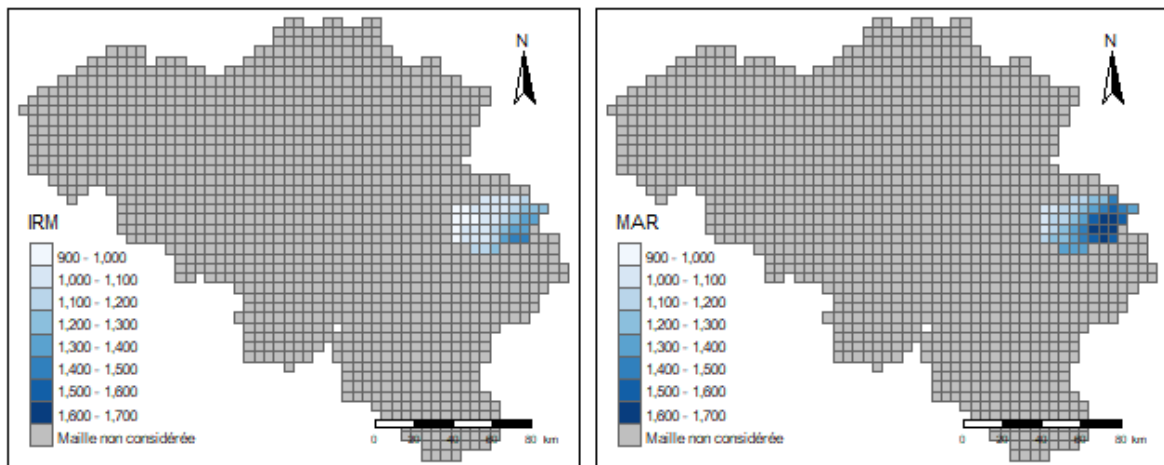


Figure 126 : Variabilité spatiale des précipitations cumulées annuelles moyennes sur la période 1980-2014

Températures moyennes annuelles (°C)

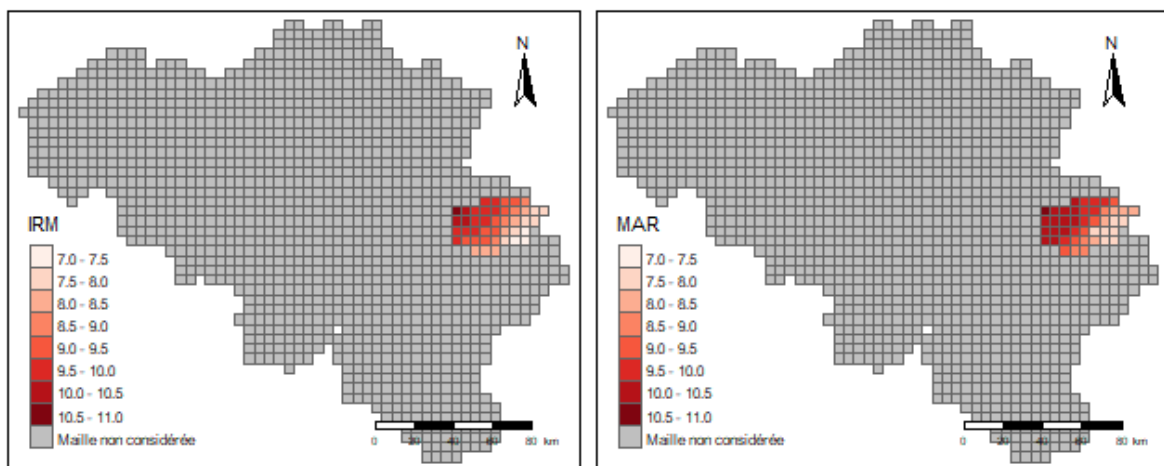


Figure 127 : Variabilité spatiale des températures moyennes annuelles sur la période 1980-2014

3.7.2.2. Simulations MAR

Le résultat des simulations sur base des modélisations climatiques futures a été traité via le module wolf_eva et a porté sur les relations débits-périodes de retour pour des débits maximums annuels dépassés pendant une période d'une heure, pour les trois bassins les plus en aval (Theux, Verviers, Chaudfontaine). Elles ont été étudiées pour les simulations basées sur les données climatiques MAR historiques (Figure 129Figure 130Figure 132 - gauche) et futures (Figure 129Figure 130Figure 132 - droite). D'autre part, ces relations ont été comparées aux relations obtenues à partir des données observées (Figure 128Figure 130Figure 131 - gauche) ainsi que des simulations WOLF faites sur les données climatiques historiques (Figure 128Figure 130Figure 131 - droite) sur la période 2004-2021. Que ce soit pour les séries historiques ou futures des simulations MAR, la première année (respectivement 1980 et 2015), incluant la « période de chauffe du modèle » a systématiquement été exclue de l'analyse.

Verviers

La comparaison des observations aux « simulations présent » basées sur les données IRM (Figure 128) permet de mettre en évidence le caractère exceptionnel de l'épisode pluvieux de juillet 2021 (point au-delà de 200 m³/s). Les simulations MAR futures sont à comparer aux simulations MAR historiques (Figure 129). Les tendances observées dans ces deux séries sont globalement similaires. Elles ne montrent pas d'évènement aussi extrême que juillet 2021, mais il est important de garder à l'esprit qu'il s'agit de modélisations et que des évènements extrêmes pourraient à nouveau se produire.

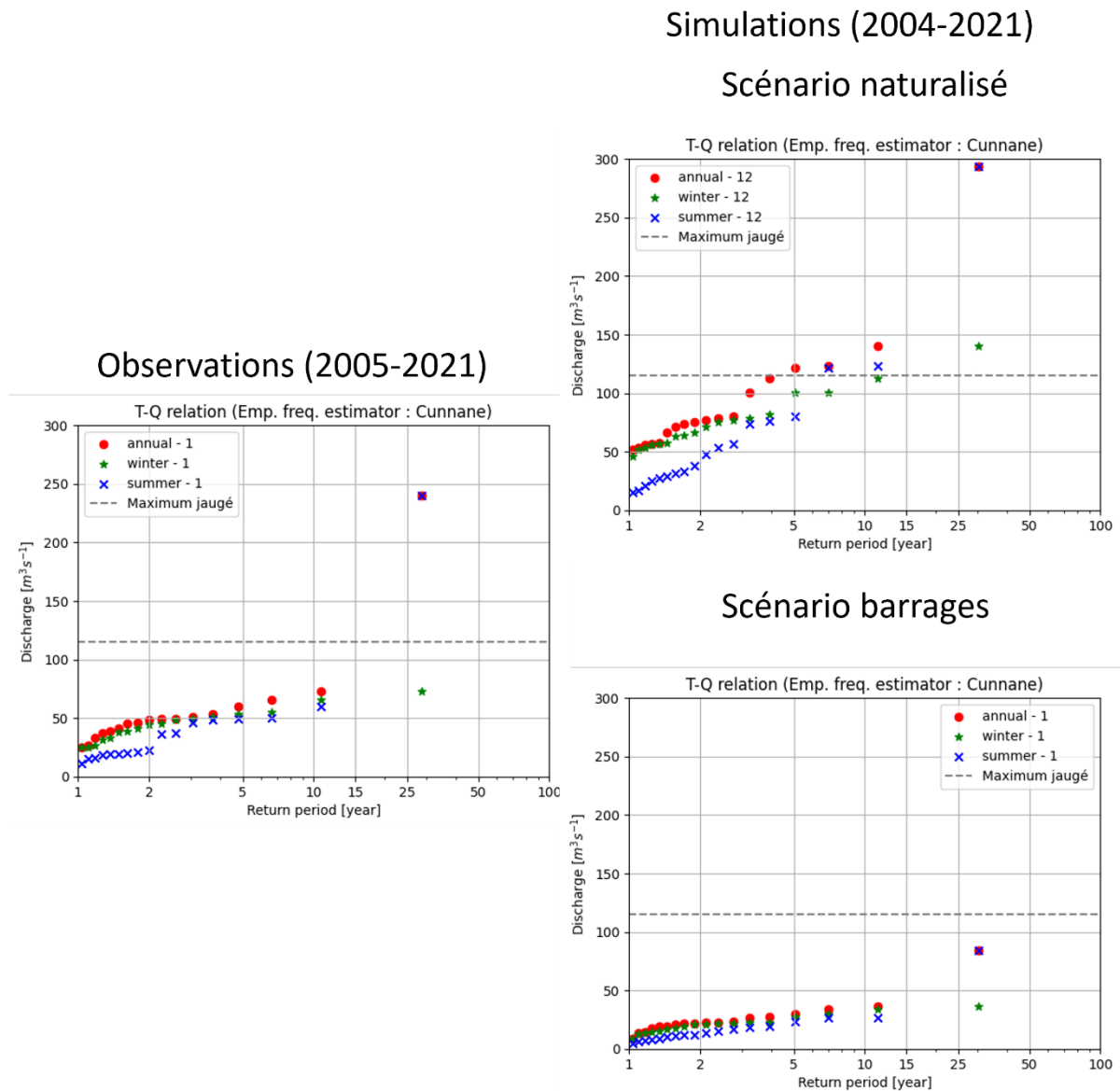
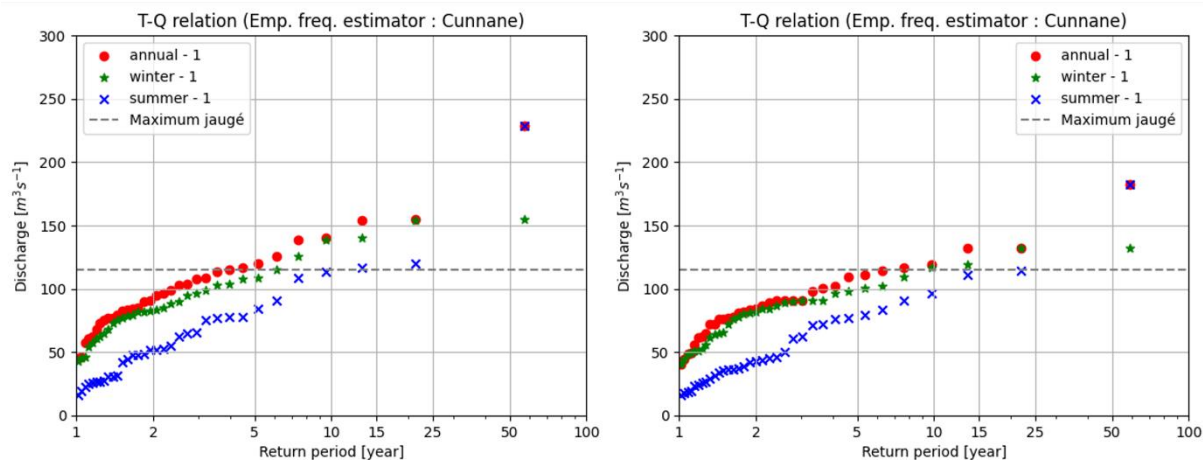


Figure 128 : Relation période de retour-débit pour une durée de dépassement de débit de 1h à Verviers à partir des observations (gauche) et des simulations sur base des données météorologiques historiques, selon le scénario de débits naturalisés (droite - haut) et de barrages de capacité infinie (droite - bas)

MAR historique (1981-2014)

MAR futur (2016-2050)

Scénario naturalisé



Scénario barrages

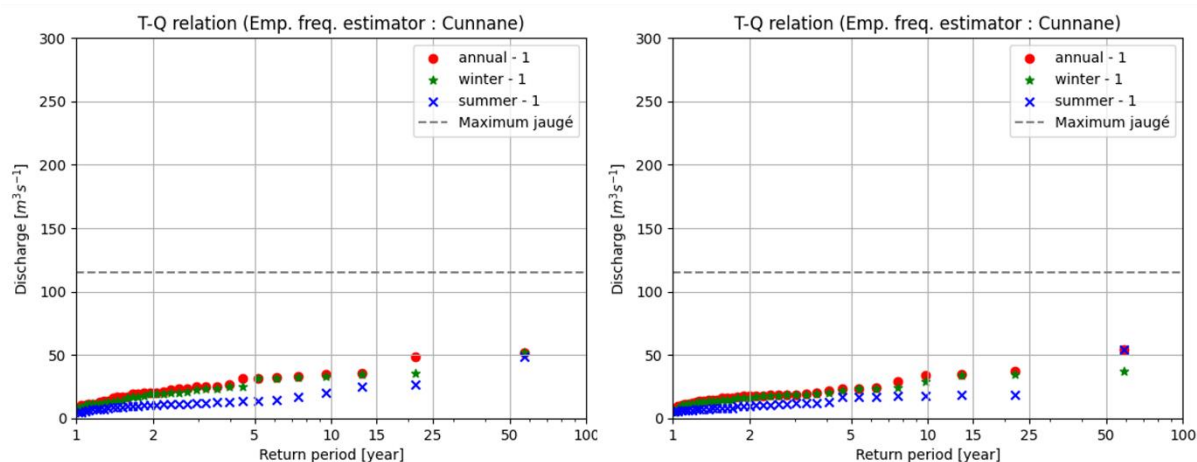


Figure 129 : Relation période de retour-débit pour une durée de dépassement de débit de 1h à Verviers à partir des simulations sur base des données MAR historiques (gauche) et futures (droite), selon le scénario de débits naturalisés (haut) et de barrages de capacité infinie (bas)

Theux

Les mêmes interprétations que celles faites à Verviers concernant juillet 2021 peuvent être faites à Theux. En complément, n'ayant pas la contrainte des modules anthropiques en amont il est possible de comparer les tendances entre les observations et les simulations basées sur les données historiques (Figure 130 - haut) sans les différents scénarios. Les simulations ont tendance à être surestimées par rapport aux observations. En ce qui concerne les comparaisons MAR-historique – MAR-futur (Figure 130 - milieu), on peut observer une légère diminution des débits maximums les plus fréquents en été (croix bleues).

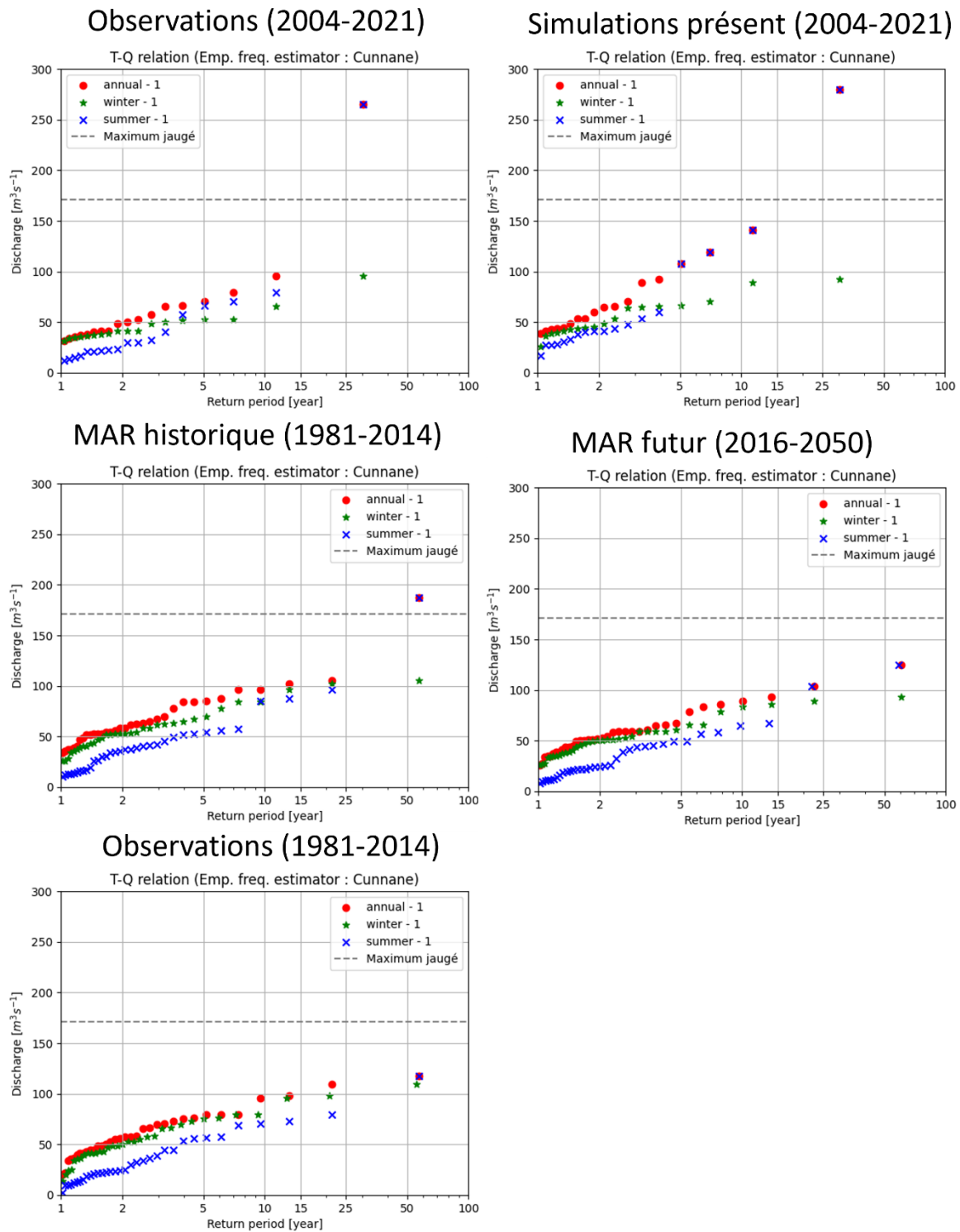


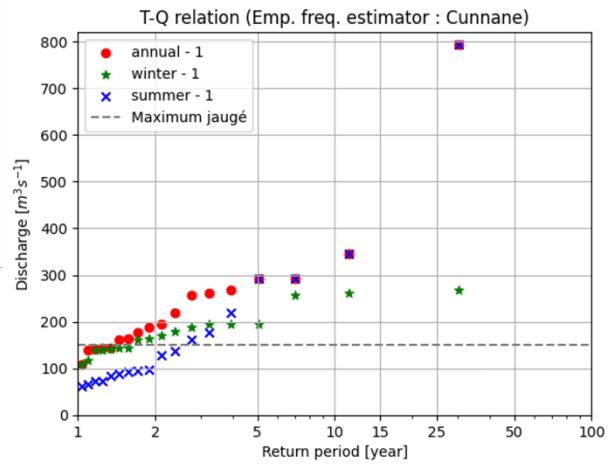
Figure 130 : Relation période de retour-débit pour une durée de dépassement de débit de 1h à Theux à partir des observations (2004-2021 et 1981-2014), des simulations sur base des données météorologiques historiques (2004-2021) et des données prédites selon MAR (historiques et prédictions futures)

Chaufontaine

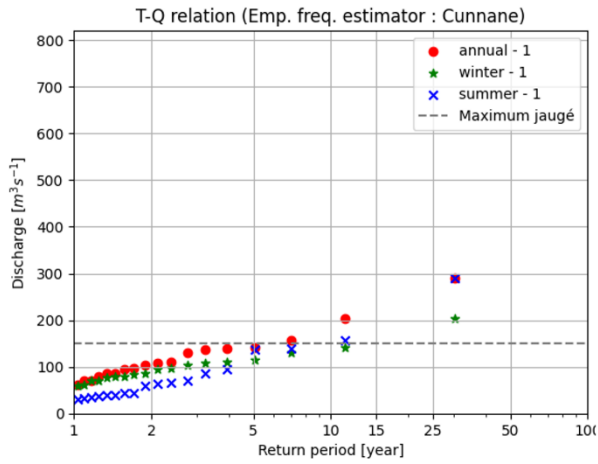
A Chaufontaine, les conclusions sont similaires à Verviers, même si l'épisode de juillet 2021 n'est pas complètement représenté dans les observations étant donné l'arrêt des mesures durant la crue (Figure 131). Les tendances observées entre les simulations MAR-historique et MAR-futur (Figure 132) restent similaires.

Simulations (2004-2021)

Scénario naturalisé



Observations (2004-2021)



Scénario barrages

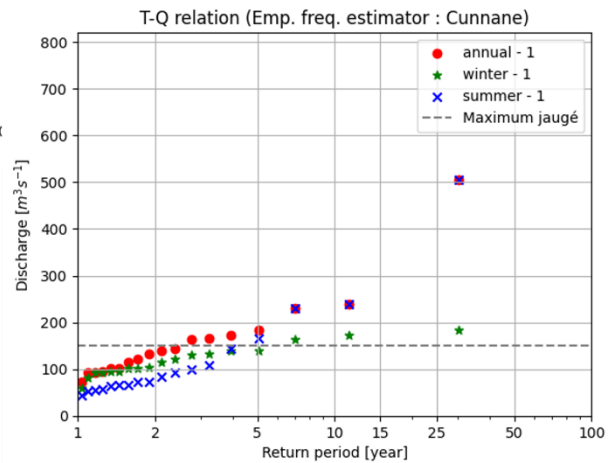
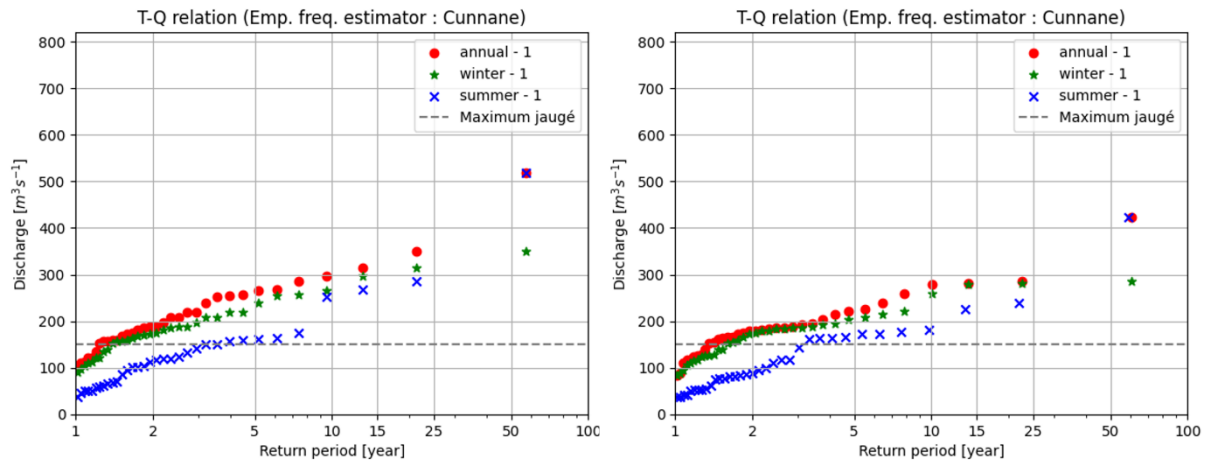


Figure 131 : Relation période de retour-débit pour une durée de dépassement de débit de 1h à Chaudfontaine à partir des observations (gauche) et des simulations sur base des données météorologiques historiques, selon le scénario de débits naturalisés (droite - haut) et de barrages de capacité infinie (droite - bas)

MAR historique (1981-2014)

MAR futur (2016-2050)

Scénario naturalisé



Scénario barrages

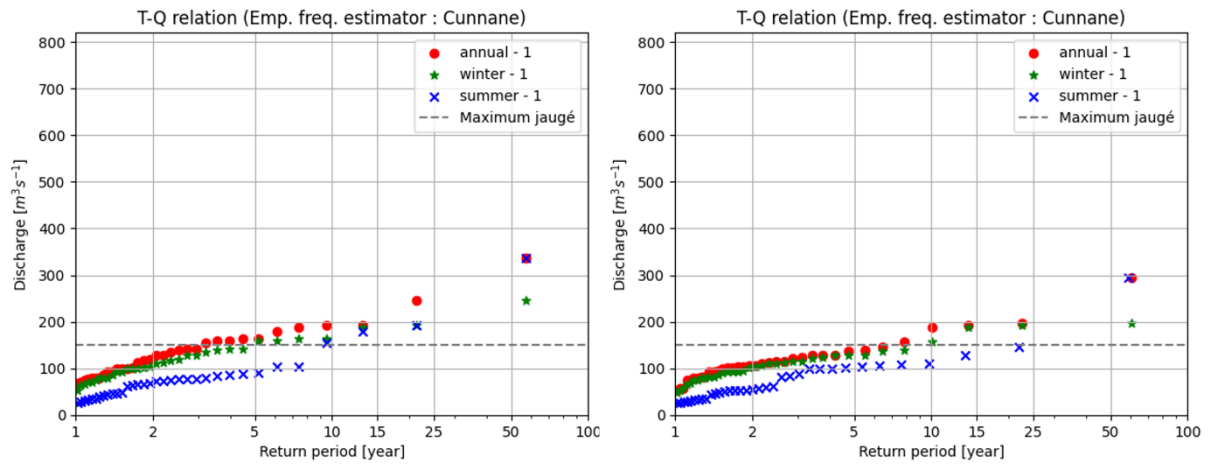


Figure 132 : Relation période de retour-débit pour une durée de dépassement de débit de 1h à Chaudfontaine à partir des simulations sur base des données MAR historiques (gauche) et futures (droite), selon le scénario de débits naturalisés (haut) et de barrages de capacité infinie (bas)

3.7 Conclusion

Les calibrations ont fourni des gammes de paramètres satisfaisant, dans l'ensemble, les critères quantitatifs de qualité proposés par Moriasi et al. (2007), et appartenant presque toujours à la gamme de valeurs attendues. Lorsque ce n'était pas le cas, la cause a pu être identifiée et imputée aux limites intrinsèques des données d'entrée.

Les simulations conduites sur base des paramètres « hiver+pic » ont montré satisfaction sur le bassin de Verviers, supposant qu'on puisse avoir un certain degré de confiance dans la première itération de redistribution des débits dans le bassin en amont de Verviers. Les simulations sur Chaudfontaine sont encore améliorables.

La reproduction de l'évènement de juillet 2021 à Chaudfontaine semble satisfaisante. Cependant, d'autres maximums annuels portent un effet de surestimation en cascade depuis l'amont, menant à une représentation des maximums inadéquate.

Une première estimation de l'impact des aménagements a pu être évaluée en termes de modification des paramètres X1 et X4 dans le modèle GR4H, tous deux augmentant suite aux aménagements considérés efficaces. Il est nécessaire de rester prudent, dans la mesure où le type d'aménagement et le contexte biophysique jouent un rôle prépondérant dans l'effet induit sur la modification des paramètres. En outre, si une tendance est observable, elle ne permet pas de tirer, sur si peu de répétitions, une loi robuste entre les changements de paramètres GR4H et les réelles conséquences des propriétés hydrologiques du bassin. Une grande prudence est donc à recommander pour cette approche.

La calibration des sous-bassins en amont des barrages, soit la Loubas, la Gileppe, la Getzbach et la Vesdre au droit de leurs limnimètres respectifs pourrait être envisagée après correction manuelle de leurs données d'entrée. En effet, des méthodes de filtre ont l'avantage d'être automatisées et peu coûteuses en temps. Cependant, elles ne permettent pas d'enlever des valeurs aberrantes, et lissent les maxima. L'idéal reste de valider régulièrement les données que l'on enregistre dans une base de données.

L'emploi de différents modèles ou variantes de ceux-ci permettrait, via leur comparaison, d'obtenir une modélisation d'ensemble plus robuste. Notamment, le modèle VHM existant dans WOLFHydro pourrait être calibré sur l'ensemble des sous-bassins. En outre, une variante de VHM pourrait être employée, avec des réservoirs en cascade pour représenter la couche supérieure du sol. Un modèle distribué pourrait aussi être employé, après implémentation dans WOLFHydro de données d'occupation de sol telles que les données WALOUS, plus récentes que la COSW de 2006, actuellement utilisable dans le logiciel. Ces approches n'étaient pas compatibles avec le calendrier du présent projet.

4 Références

- Clement, Timothée, Charles L. Biielders, Aurore Degré, Gilles Manssens, et Guy Foucart. « Soil pitting mitigates runoff, erosion and pesticide surface losses in maize crops in the Belgian loess belt ». *Soil and Tillage Research* 234 (1 octobre 2023): 105853. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105853>.
- Doutreloup, S., Fettweis, X., Rahif, R., Elnagar, E., Pourkiaei, M. S., Amaripadath, D., et Attia, S. Historical and future weather data for dynamic building simulations in Belgium using the regional climate model MAR: typical and extreme meteorological year and heatwaves, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 3039–3051, <https://doi.org/10.5194/essd-14-3039-2022>, 2022.
- Fiol, L., Réalisation et analyse des projections climatiques futures de MAR sur la région wallonne, 2023.
- Frisson Gwenn, Arnaud Monty, et Grégory Mahy. « L'adaptation au changement climatique en région wallonne : Fiche thématique : Biodiversité », 2011. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/113401>.
- IRITZ LÁSZLÓ, BARBRO JOHANSSON, et LARS LUNDIN. « Impacts of forest drainage on floods ». *Hydrological Sciences Journal* 39, n° 6 (1 décembre 1994): 637-61. <https://doi.org/10.1080/02626669409492785>.
- Laudon, Hjalmar, Virginia Mosquera, Karin Eklöf, Järvi Järveoja, Shirin Karimi, Alisa Krasnova, Matthias Peichl, et al. « Consequences of Rewetting and Ditch Cleaning on Hydrology, Water Quality and Greenhouse Gas Balance in a Drained Northern Landscape ». *Scientific Reports* 13, n° 1 (18 novembre 2023): 20218. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47528-4>.
- Liu, Yuxin, Yan Xin, Yun Xie, et Wenting Wang. « Effects of slope and rainfall intensity on runoff and soil erosion from furrow diking under simulated rainfall ». *CATENA* 177 (1 juin 2019): 92-100. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.004>.
- Metawal - Catalogue pour l'information géographique de Wallonie. « Carte Numérique des Sols de Wallonie ». Consulté le 14 novembre 2023. <https://metawal.wallonie.be/geonetwork/geoportailwal/fre/catalog.search#/metadata/38c2a87e-d38a-4359-9899-9d4a6b9f0c2a>.
- Metawal - Catalogue pour l'information géographique de Wallonie. « LIDAXES (version 2) - MNT ». Consulté le 13 novembre 2023. <https://metawal.wallonie.be/geonetwork/geoportailwal/api/records/346a048d-ead3-45c2-8953-fe144faa15ee>.
- Metawal - Catalogue pour l'information géographique de Wallonie. « Relief de la Wallonie - Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2013-2014 ». Consulté le 13 novembre 2023. <https://metawal.wallonie.be/geonetwork/geoportailwal/fre/catalog.search#/metadata/6029e738-f828-438b-b10a-85e67f77af92>.
- Metawal - Catalogue pour l'information géographique de Wallonie. « Textures et fractions granulométriques de référence des sols de Wallonie - Série ». Consulté le 13 novembre 2023. <https://metawal.wallonie.be/geonetwork/geoportailwal/fre/catalog.search#/metadata/e90eb7cf-8f7d-40ab-9df9-5c34ddf387ea>.
- Moriassi, Daniel N., Jeffrey G. Arnold, Michael Liew, Ronald L. Bingner, R. Daren Harmel and Tamie L. Veith. "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations." *Transactions of the ASABE* 50 (2007): 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

Perrin, Charles, Michel, Claude, Andréassian, Vazken. « Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR) ». (juin 2007). https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/2012/08/Modeles_GR_Resume.pdf

Szabó, Brigitta, Melanie Weynants, et Tobias K. D. Weber. « Updated European Hydraulic Pedotransfer Functions with Communicated Uncertainties in the Predicted Variables (Euptfv2) ». *Geoscientific Model Development* 14, n° 1 (12 janvier 2021): 151-75. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-151-2021>.

Vandermeulen, Sophie, Carlos Ramirez Restrepo, Yves Beckers, Hugues Claessens, et Jérôme Bindelle. « Agroforestry for Ruminants: A Review of Trees and Shrubs as Fodder in Silvopastoral Temperate and Tropical Production Systems ». *Animal Production Science* 58 (2018). <https://doi.org/10.1071/AN16434>.

5 Annexes

Annexe I : Paramètres X4 issus de la calibration des bassins en amont des barrages pour les séries de débits constituées selon la méthode des pluies appliquée sur la zone non jaugée

Bassin	X1	X2	X3	X4
Gileppe FSG_P	64.51	0.68	63.75	0.09
Vesdre AC_P	41.71	0.09	85.76	0.08
Vesdre FSG_P	23.86	0.60	123.99	0.07
Gamme attendue	[1 ; 1200]	[-5 ; 3]	[44 ; 663]	[0.5 ; 96]

Annexe II : Paramètres issus des calibrations sur périodes longues et continues

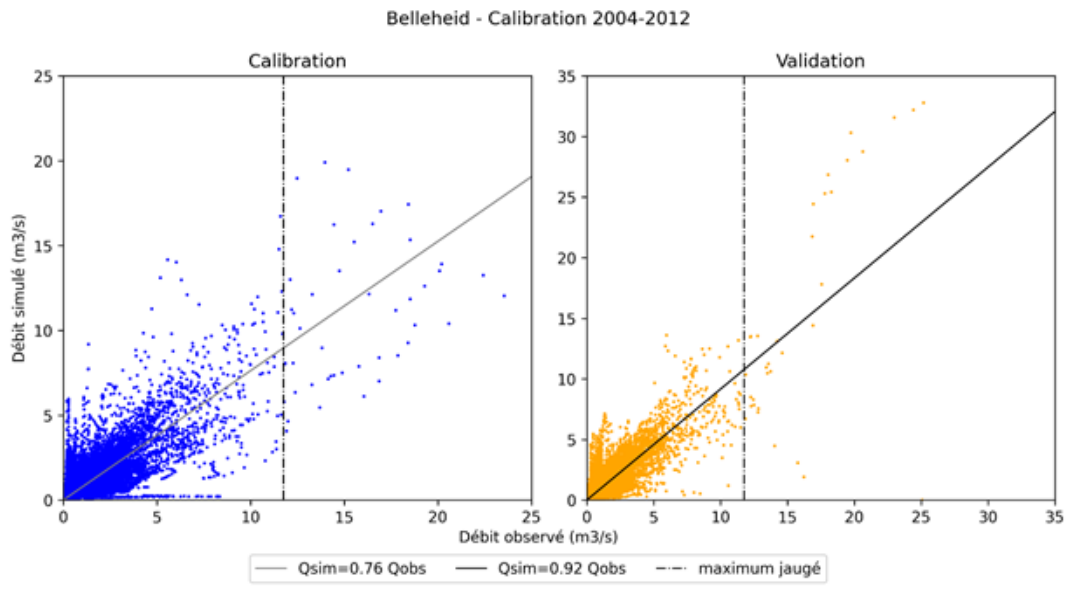
Bassin	X1	X2	X3	X4
Belleheid	173.6	-0.32	50.27	4.86
Gileppe FSG_Qprop	123.49	0.89	56.53	5.36
Magne	1.51	-5.04	149.97	3.55
Helle mixte	140.03	0.4	70.64	6.34
Helle FSG	152.22	0.64	72.25	6.3
Polleur	91.94	-0.58	88.29	5.51
Soor	72.55	-1.01	50.63	5.91
Spixhe	114.06	-0.48	64.92	3.32
Theux	127.97	2.97	159.88	33.44
Verviers	153.48	-1.35	159.73	3.41
Chaufontaine	99.8	2.92	75.93	7
Gamme attendue	[1 ; 1200]	[-5 ; 3]	[44 ; 663]	[0.5 ; 96]

Annexe III : Indicateurs de qualité des calibrations et validations des sous-bassins

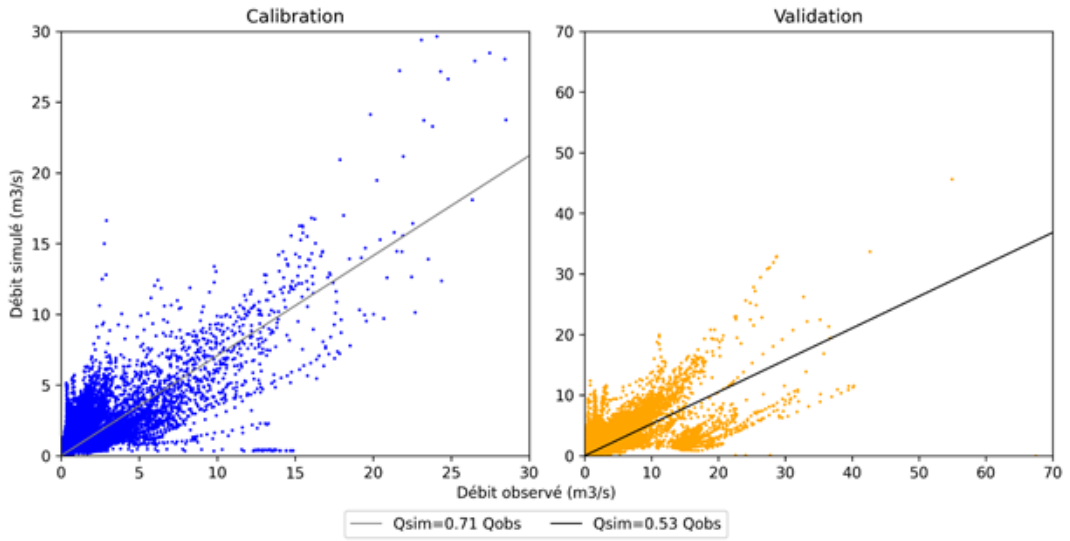
Bassin (et série)	Périodes	NSE (-)	R ² (-)	RSR (-)	Pbias (%)
Belleheid	cali 2004-2012	0.68	0.75	0.56	2.79
	vali 2004-2012	0.75	0.82	0.5	-1.37
	cali 2013-2021	0.77	0.82	0.48	4.65
	vali 2013-2021	0.68	0.76	0.57	8.5
	cali 07-08+p11	0.71	0.79	0.54	-4.92
	vali 07-08+p11	0.65	0.79	0.59	-31.84
BV amont barrage Gileppe (FSG Q. prop.)	cali 2004-2009	0.64	0.71	0.6	-1.77
	vali 2004-2009	0.55	0.66	0.67	24.91
	cali 2009-2014	0.77	0.83	0.48	-9.36
	vali 2009-2014	0.5	0.6	0.71	-42.37
	cali 08-09+p11	0.66	0.83	0.58	-41.51
	vali 08-09+p11	0.08	0.55	0.96	-87.75
BV amont barrage Vesdre (A.C. Q.prop.)	cali 08-09+p07	0.85	0.88	0.39	4.68
	vali 08-09+p07	0.66	0.74	0.59	-15.83
BV amont barrage Vesdre (FSG Q. prop.)	cali 08-09+p07	0.74	0.82	0.51	4.56
	vali 08-09+p07	0.52	0.71	0.69	-17.53
Magne	cali 2011-2016	0.4	0.67	0.78	-3.17
	vali 2011-2016	0.39	0.5	0.78	-13.39
	cali 2016-2021	0.75	0.79	0.5	7.67
	vali 2016-2021	0.27	0.64	0.85	17.68
	cali 11-12+p18	0.79	0.85	0.46	22.93
	vali 11-12+p18	0.05	0.63	0.97	-106.06
Helle mixte	cali 2003-2007	0.7	0.79	0.55	0.91
	vali 2003-2007	0.57	0.71	0.65	19.06
	cali 2010-2014	0.73	0.8	0.52	-4.25
	vali 2010-2014	0.57	0.71	0.65	12.22
	cali 05-06+p11	0.7	0.78	0.55	-7.16
	vali 05-06+p11	0.55	0.74	0.67	-25.42
Helle FSG	cali 2003-2007	0.71	0.8	0.54	0.13
	vali 2003-2007	0.58	0.73	0.65	17.14
	cali 2010-2014	0.73	0.81	0.52	-2.32
	vali 2010-2014	0.58	0.73	0.65	12.3
	cali 05-06+p11	0.7	0.79	0.54	-7.17
	vali 05-06+p11	0.55	0.76	0.67	-24.1
Polleur	cali 2015-2018	0.89	0.92	0.33	-3.51
	vali 2015-2018	0.74	0.8	0.51	1
	cali 2018-2021	0.74	0.8	0.51	-1.45
	vali 2018-2021	0.88	0.91	0.34	-6.08
	cali 15-16+p19	0.78	0.88	0.47	8.28

	vali 15-16+p19	0.48	0.71	0.72	-37.13
Soor	cali 2003-2006	0.51	0.58	0.7	17.08
	vali 2003-2006	0.61	0.68	0.62	22.1
	cali 2010-2014	0.61	0.65	0.63	-7
	vali 2010-2014	0.6	0.66	0.63	-8.02
	cali 17-18+p14	0.87	0.89	0.36	-12.31
	vali 17-18+p14	0.46	0.62	0.74	-39.04
Spixhe	cali 2004-2012	0.73	0.81	0.52	0.94
	vali 2004-2012	0.78	0.85	0.47	10.63
	cali 2013-2021	0.83	0.87	0.41	3.01
	vali 2013-2021	0.68	0.79	0.57	-7.18
	cali 07-08+p11	0.74	0.84	0.51	1.22
	vali 07-08+p11	0.63	0.8	0.61	-27.72
Theux	cali 2015-2018	0.97	0.99	0.16	-0.36
	vali 2015-2018	0.98	0.98	0.15	-3.1
	cali 2018-2021	0.98	0.98	0.15	-2.57
	vali 2018-2021	0.97	0.98	0.16	0.26
	cali 19-20+p19	0.98	0.99	0.15	-1.4
	vali 19-20+p19	0.97	0.98	0.16	-7.17
Verviers	cali 2004-2008	0.76	0.89	0.49	7.75
	vali 2004-2008	0.75	0.86	0.5	13.79
	cali 19-20+p19	0.86	0.93	0.37	-7.55
	vali 19-20+p19	0.75	0.87	0.5	-9.27
Chaufontaine	cali 2016-2021	0.9	0.95	0.31	-3.25
	vali 2016-2021	0.91	0.96	0.3	-0.66
	cali 19-20+p14	0.91	0.96	0.31	-3.41
	vali 19-20+p14	0.87	0.94	0.36	-20.94

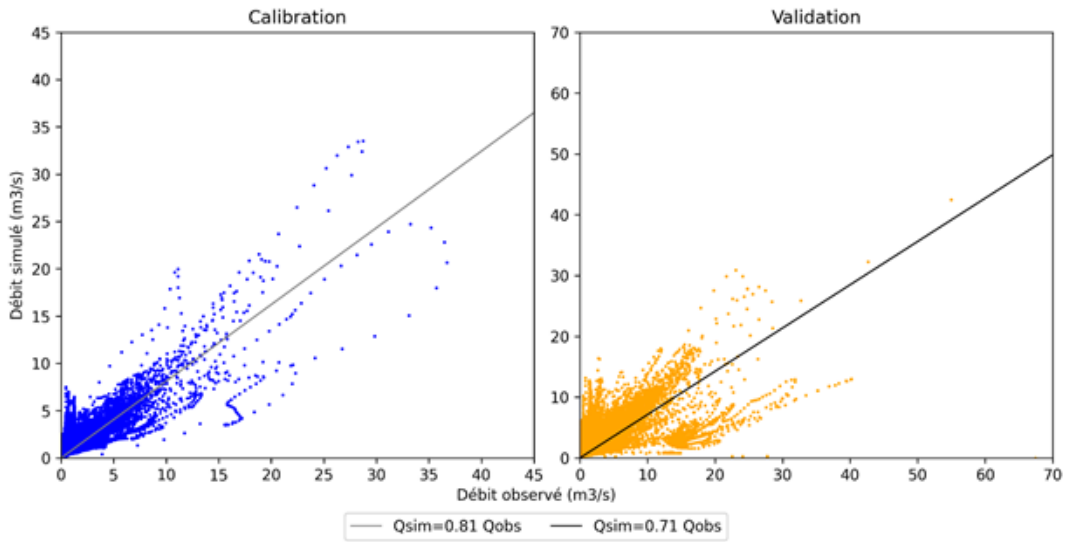
Annexe IV : Diagrammes de dispersion des calibrations des sous-bassins



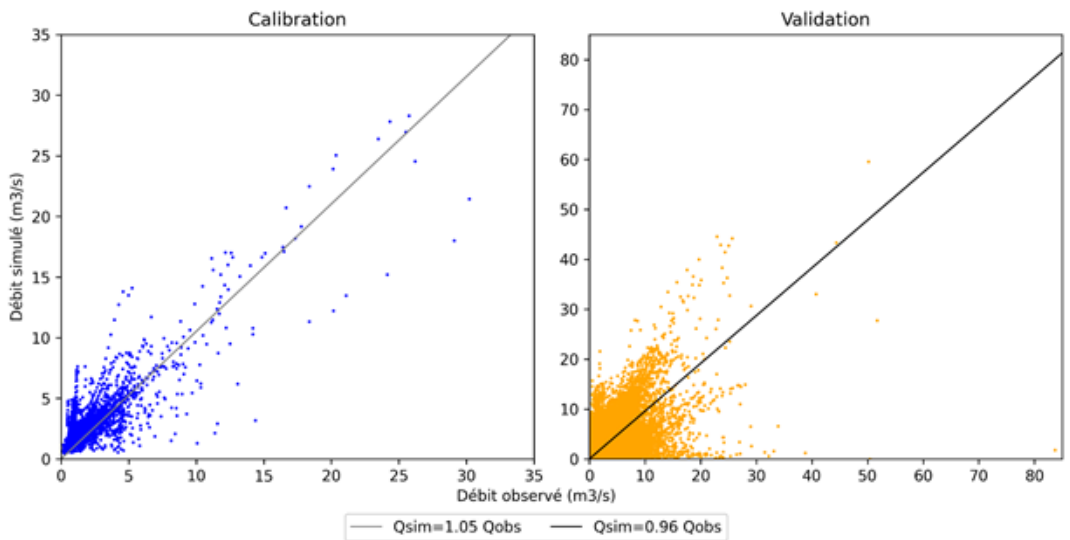
BV amont barrage Gileppe SGF Q. prop. - Calibration 2004-2009



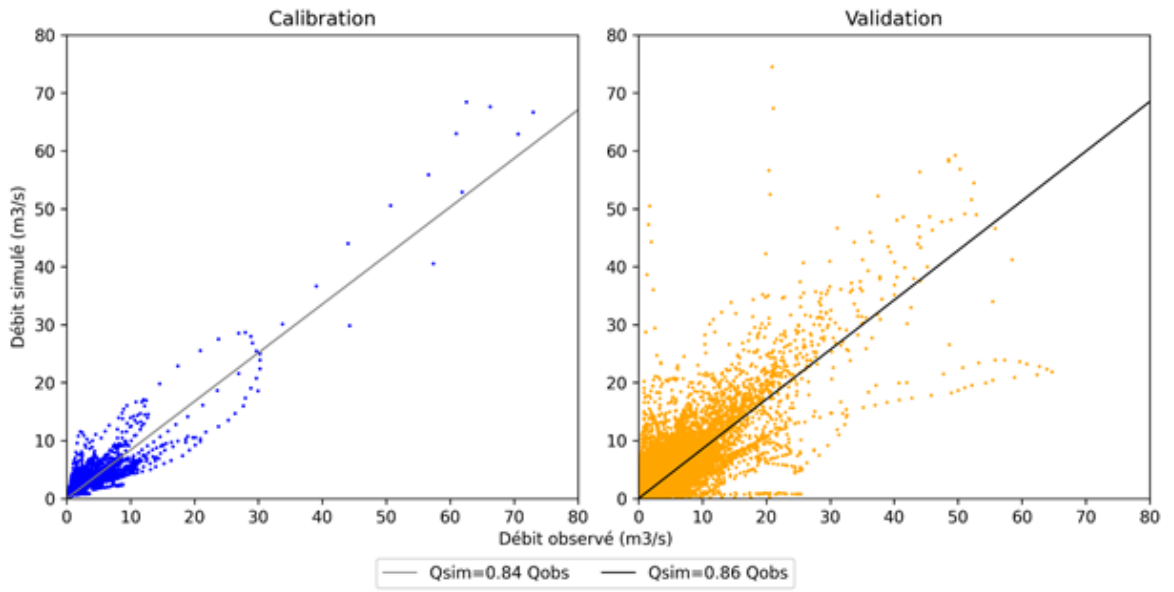
BV amont barrage Gileppe SGF Q. prop. - Calibration 2009-2014



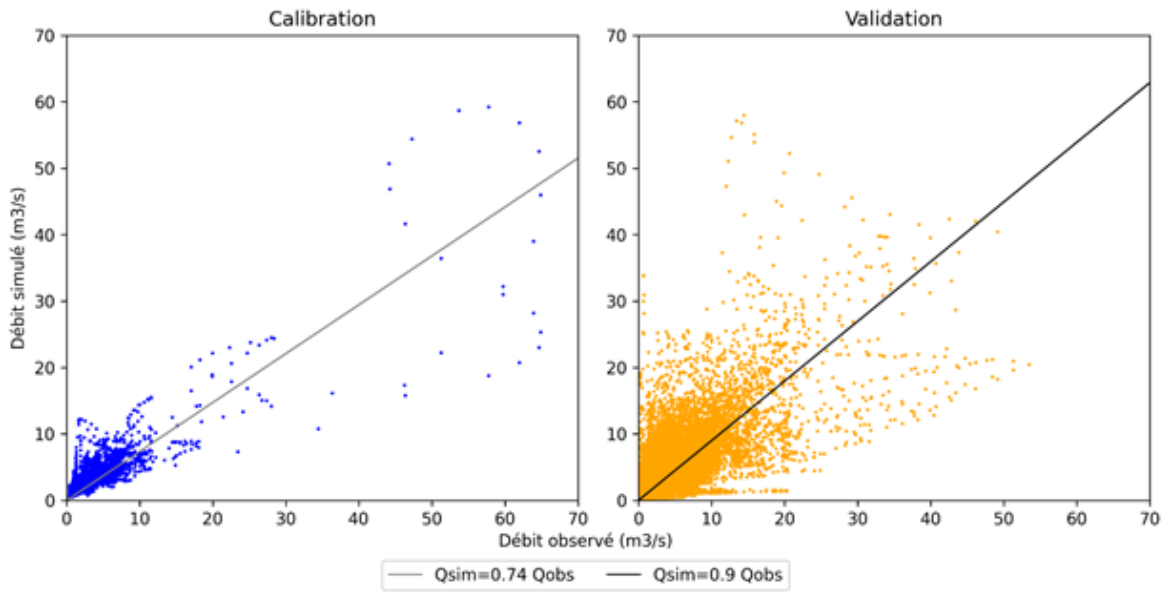
BV amont barrage Gileppe SGF Q. prop. - Calibration 08-09+p11



BV amont barrage Vesdre A.C. Q.prop. - Calibration 08-09+p07

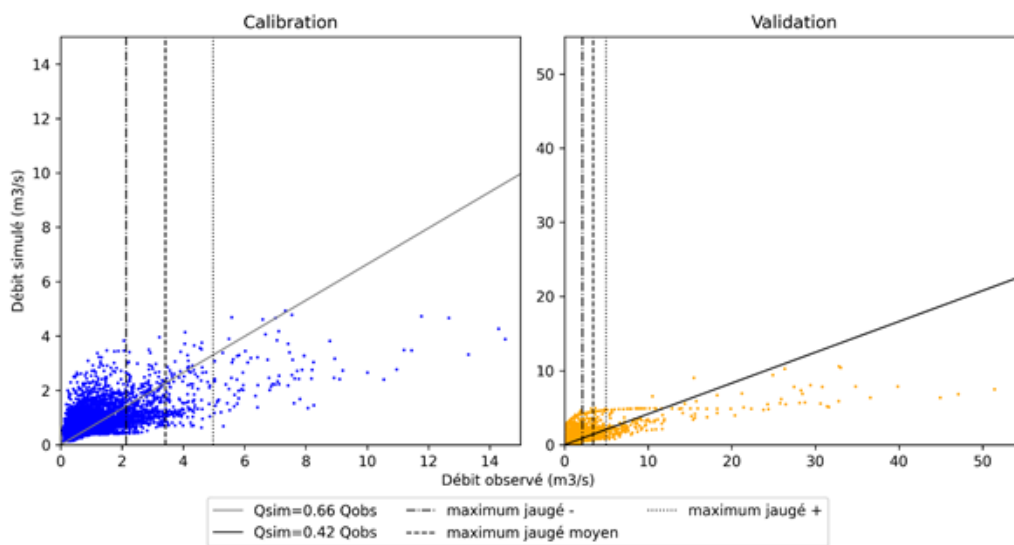


BV amont barrage Vesdre SGF Q. prop. - Calibration 08-09+p07

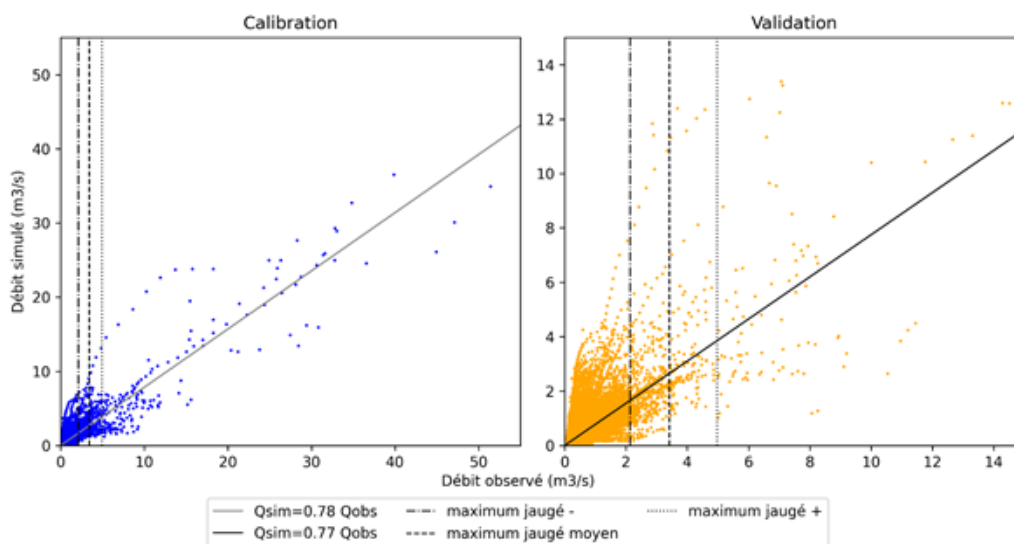


Bassin de la Magne

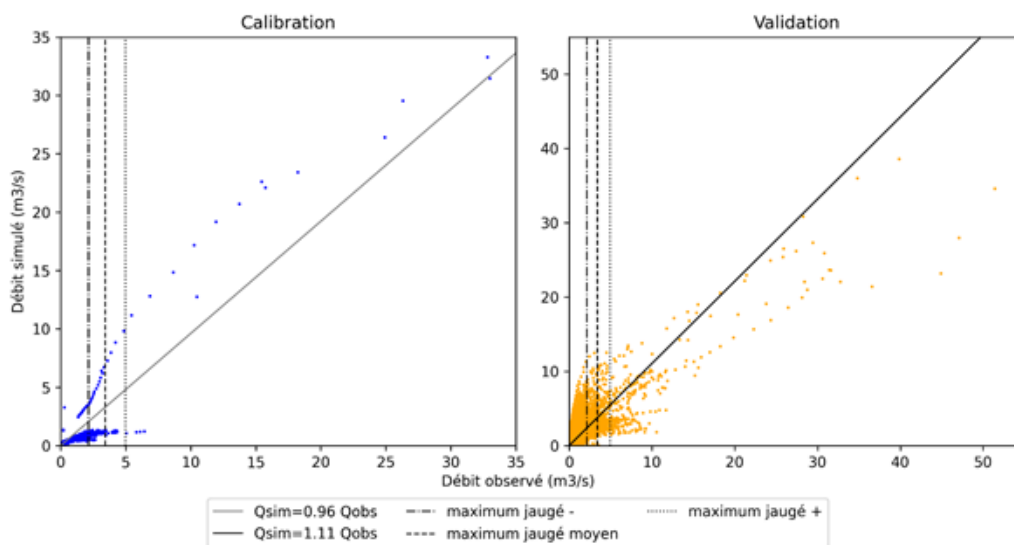
Forêt - Calibration 2011-2016



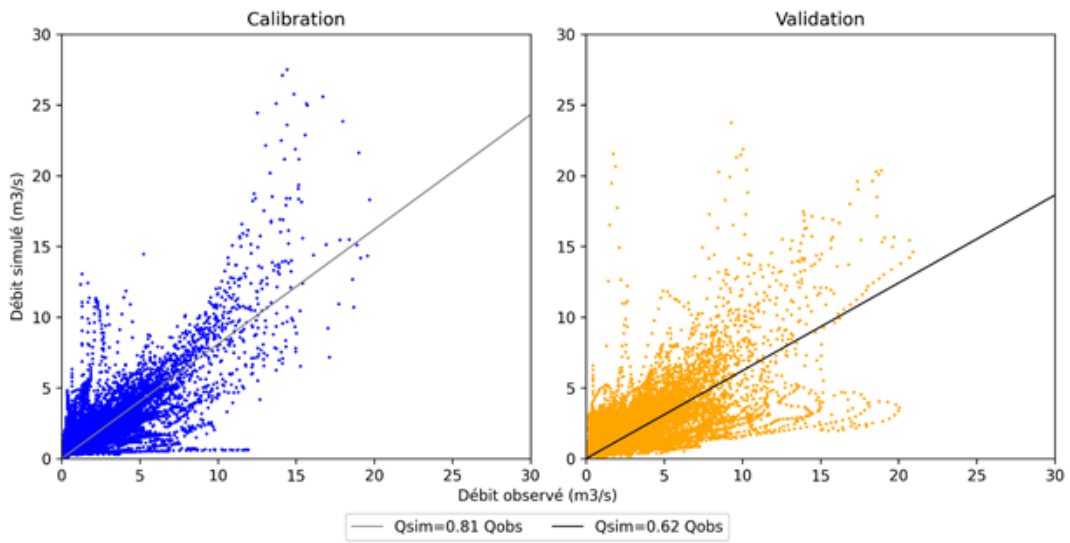
Forêt - Calibration 2016-2021



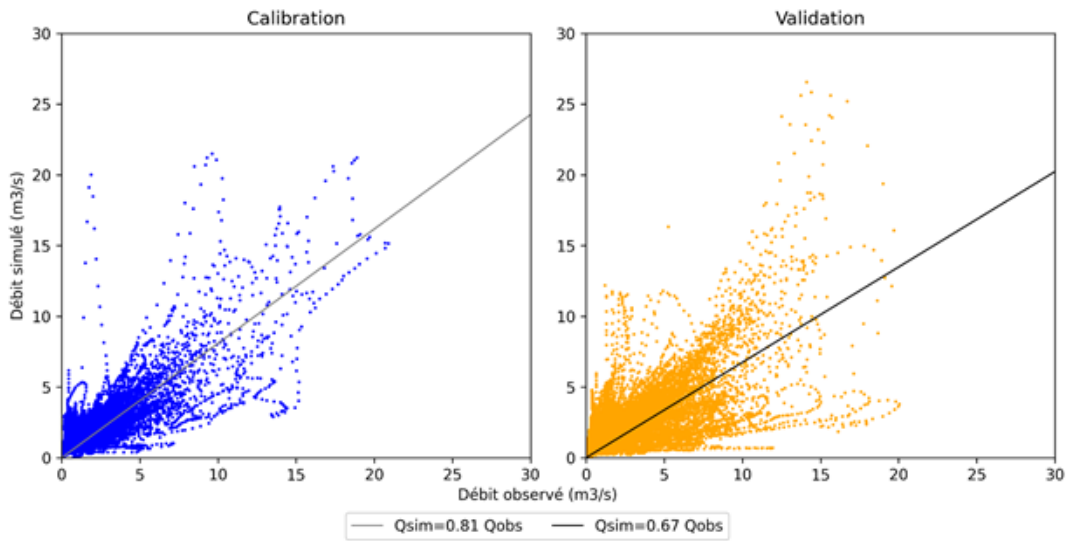
Forêt - Calibration 11-12+p18



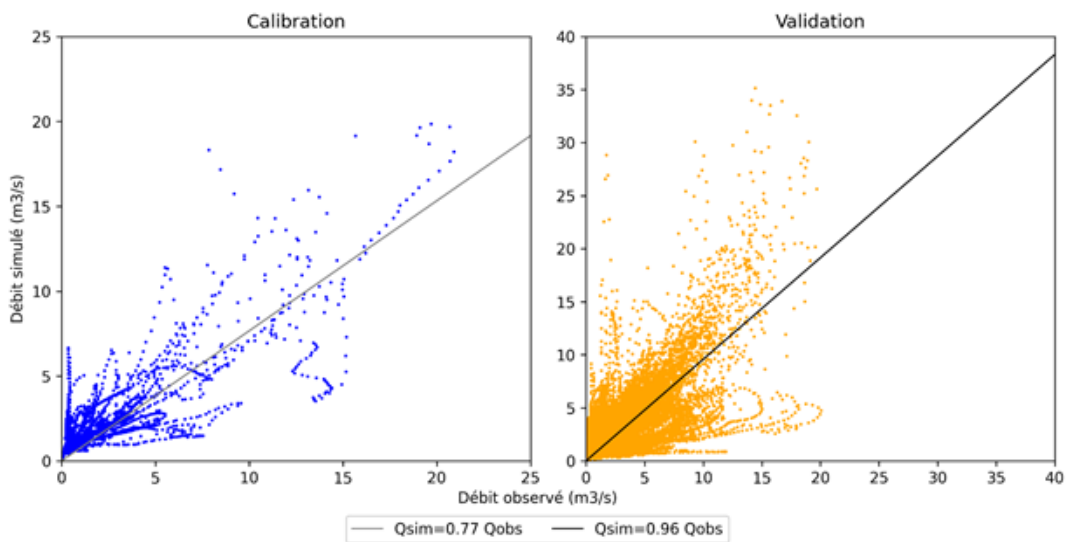
Helle mixte - Calibration 2003-2007



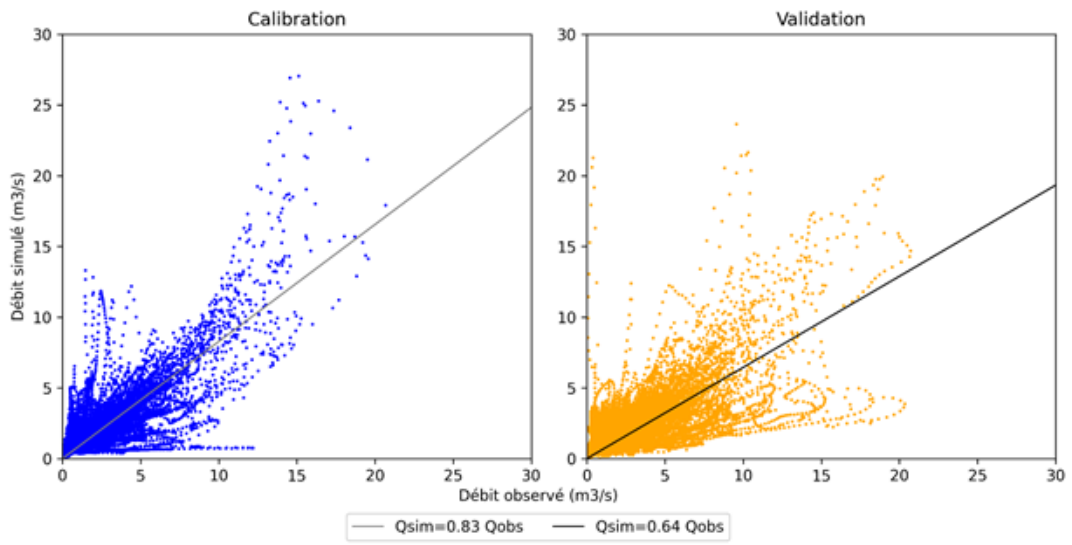
Helle mixte - Calibration 2010-2014



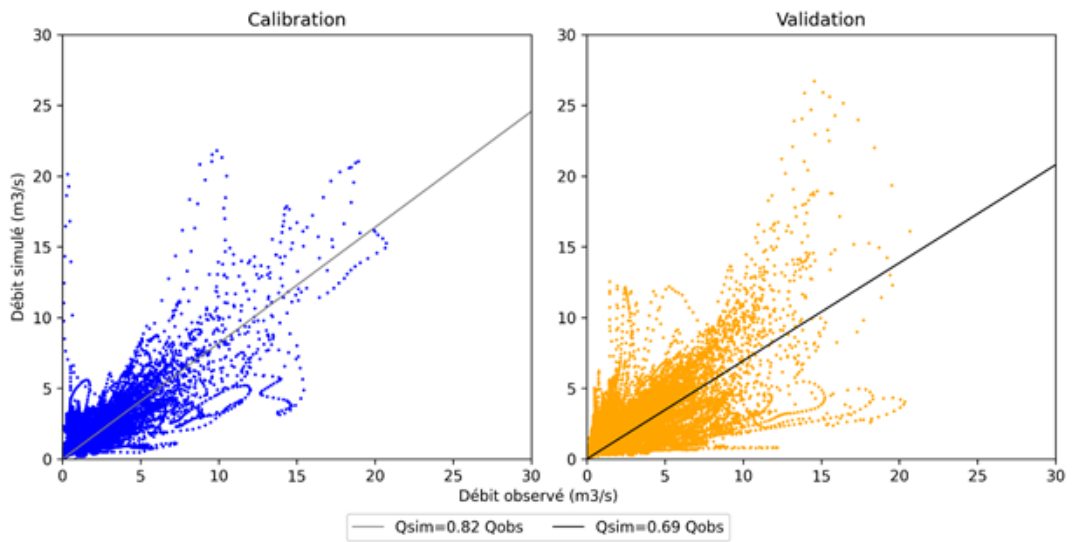
Helle mixte - Calibration 05-06+p11



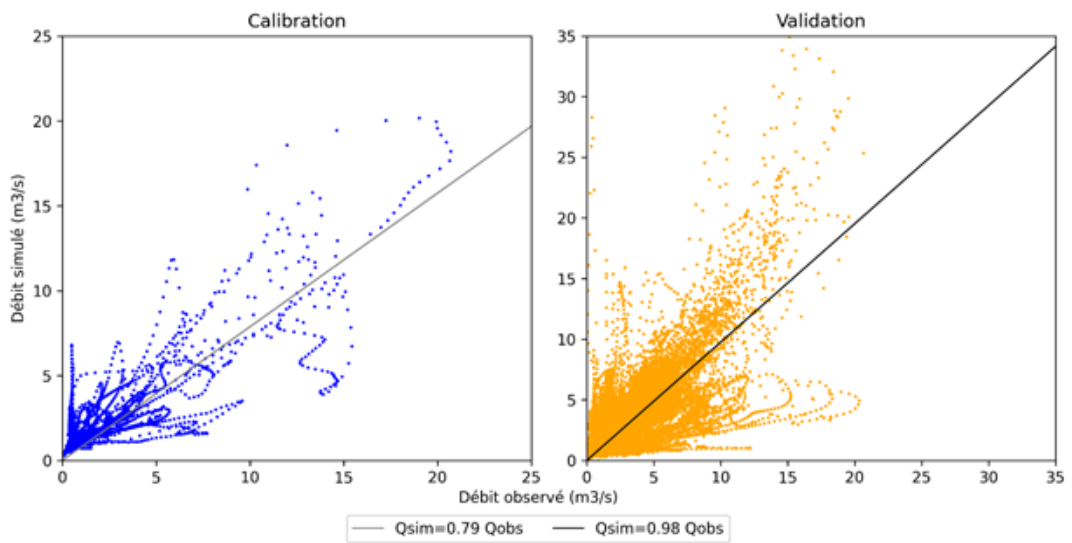
Helle SGF - Calibration 2003-2007



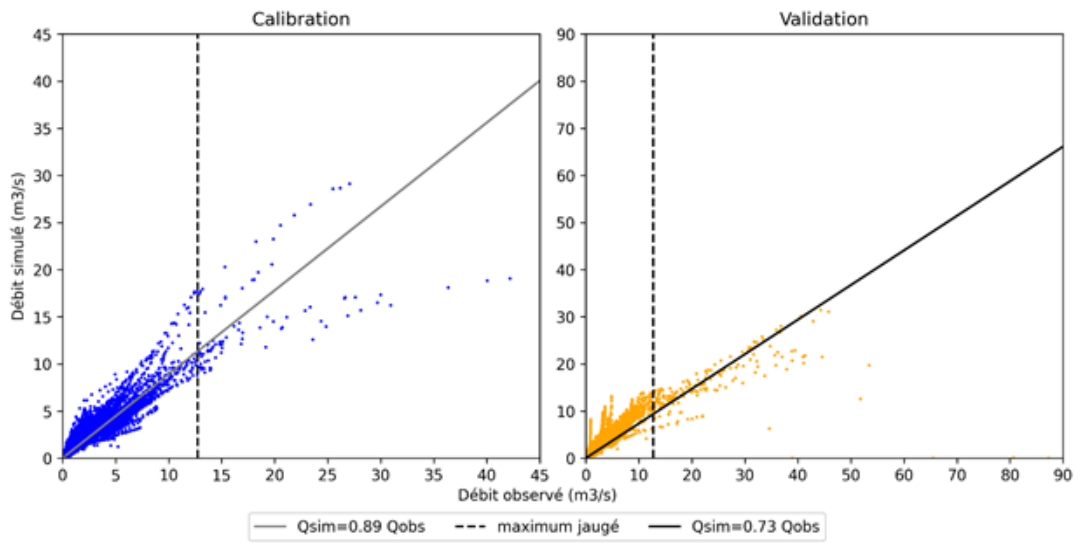
Helle SGF - Calibration 2010-2014



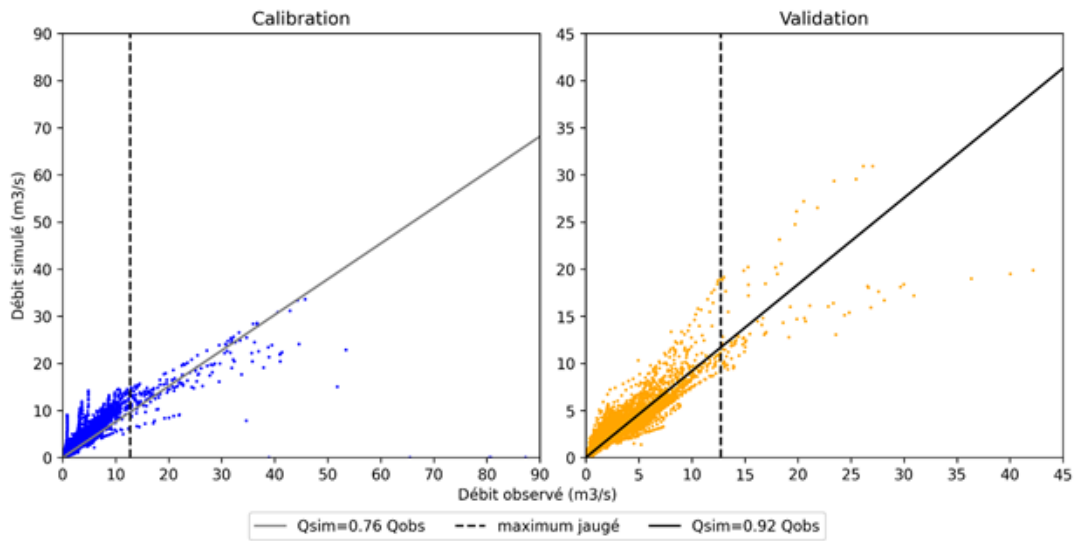
Helle SGF - Calibration 05-06+p11



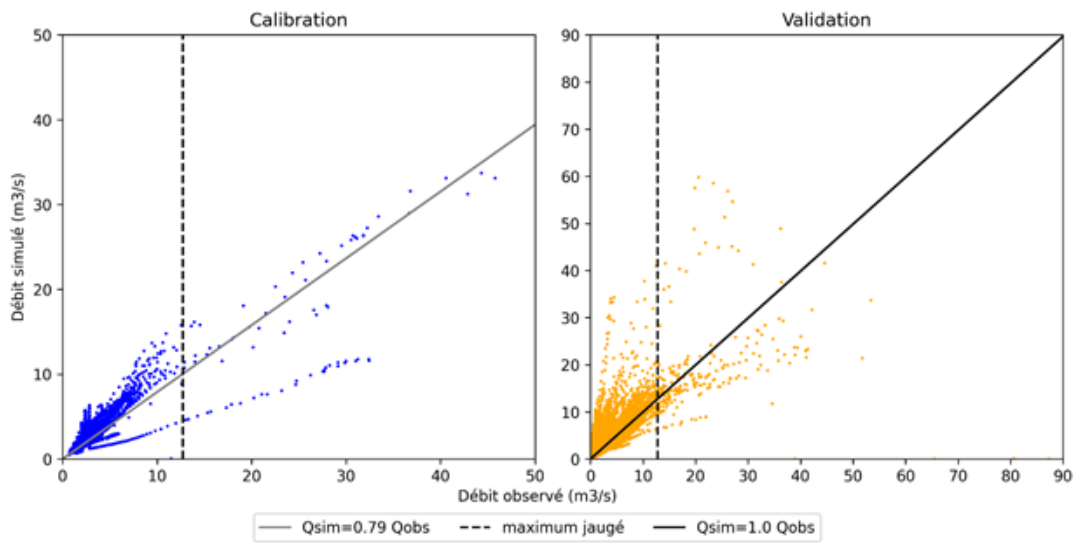
Polleur - Calibration 2015-2018



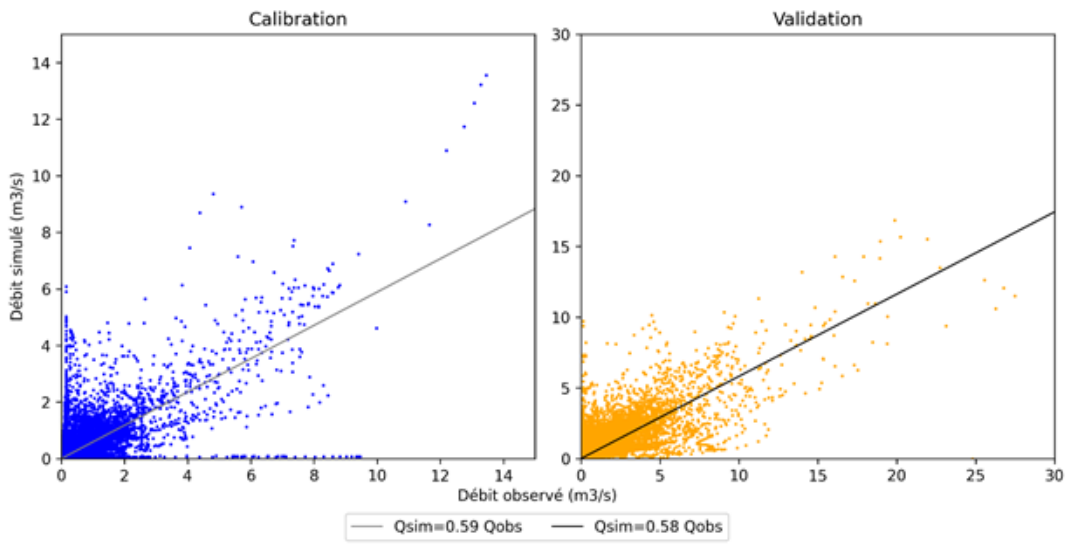
Polleur - Calibration 2018-2021



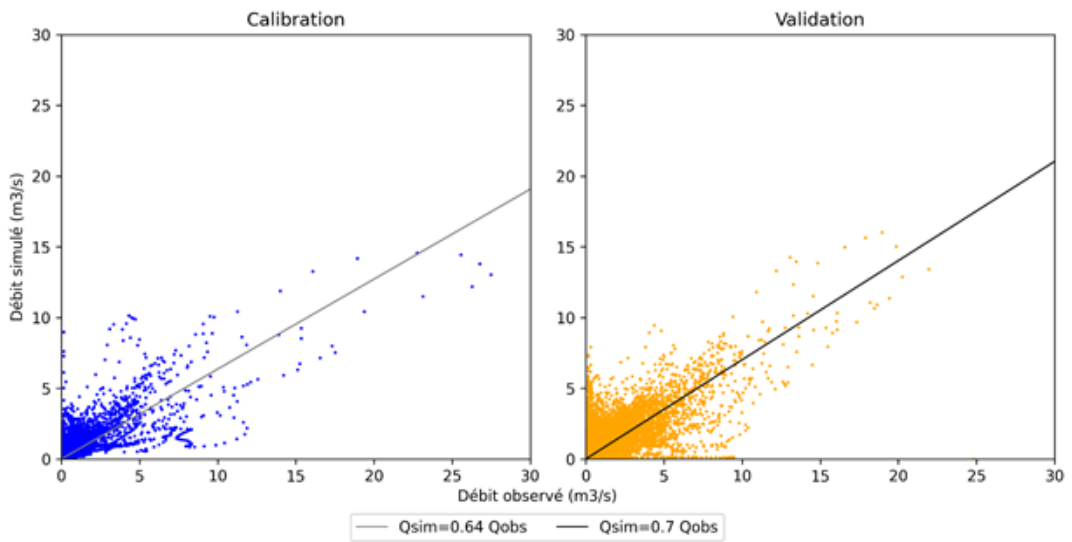
Polleur - Calibration 15-16+p19



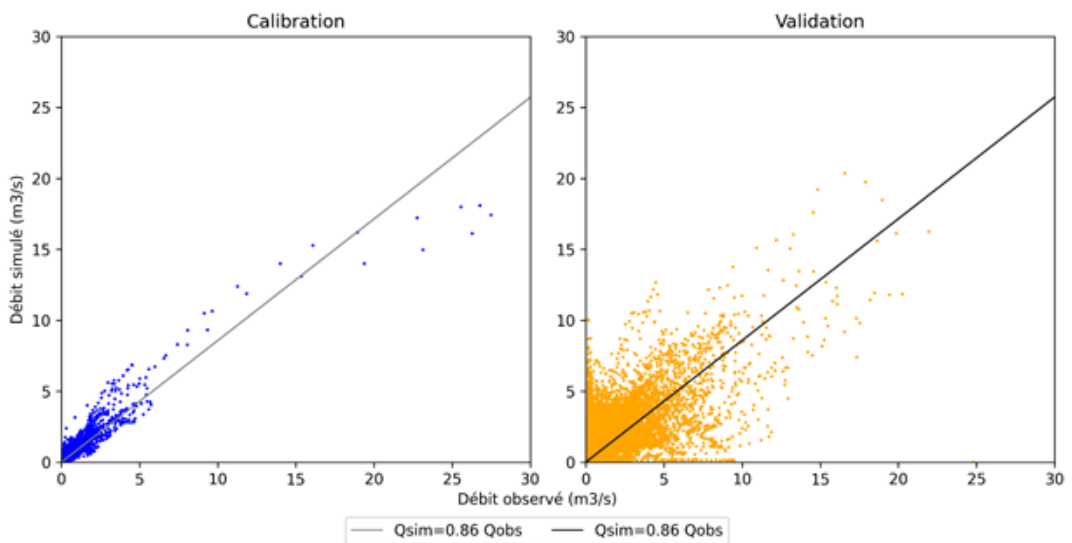
Soor - Calibration 2003-2006



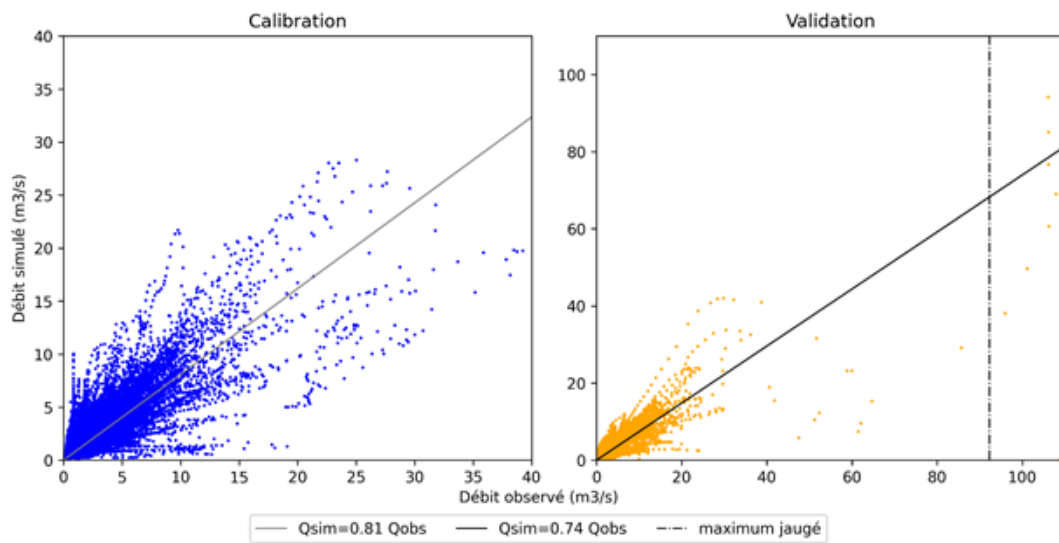
Soor - Calibration 2010-2014



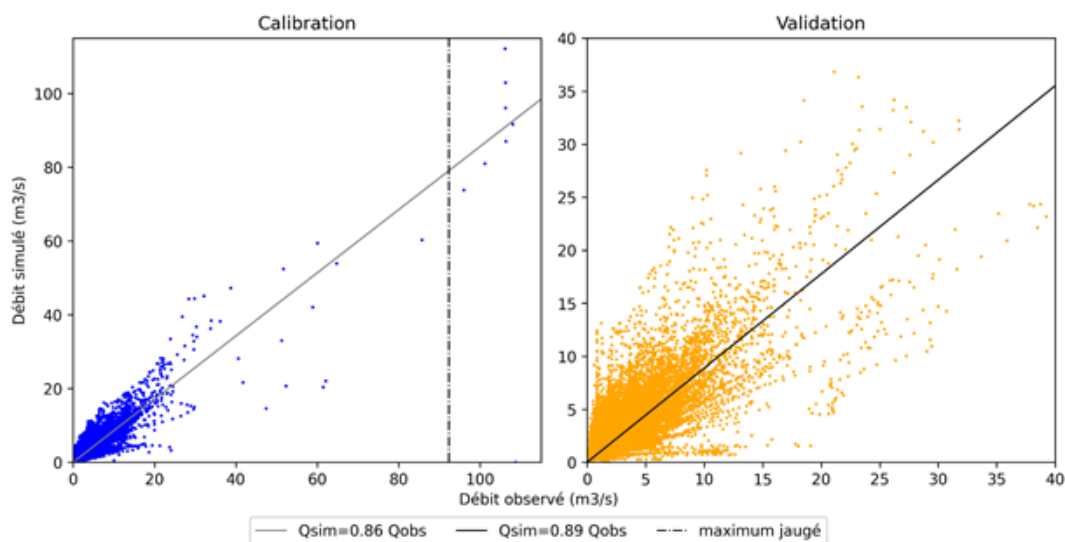
Soor - Calibration 17-18+p14



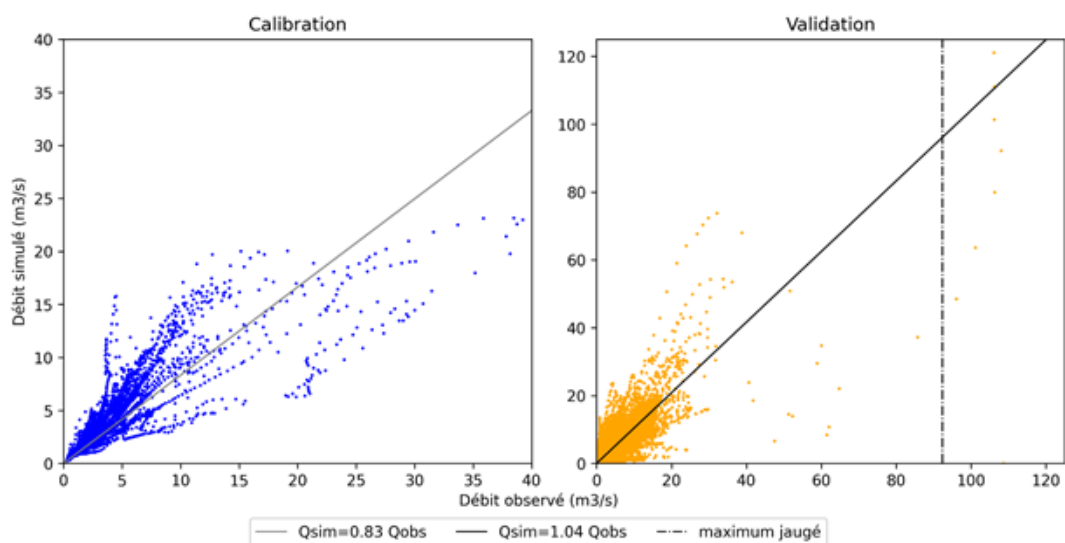
Spixhe - Calibration 2004-2012



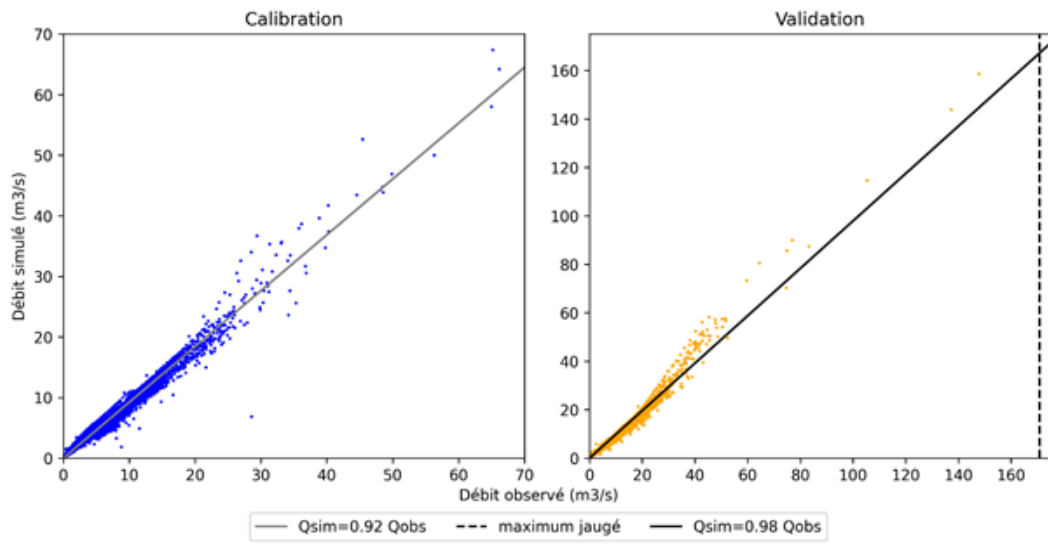
Spixhe - Calibration 2013-2021



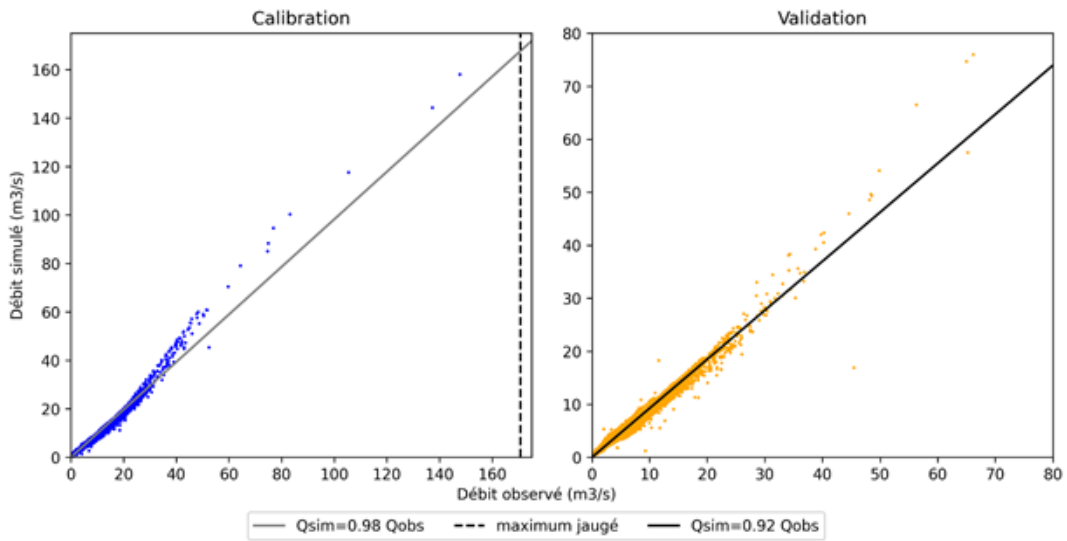
Spixhe - Calibration 07-08+p11



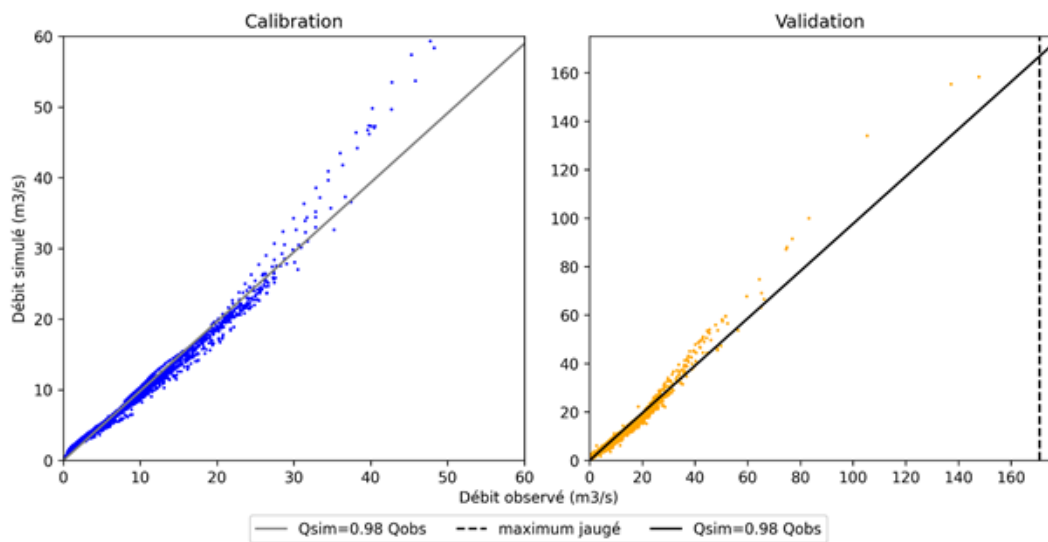
Theux - Calibration 2015-2018



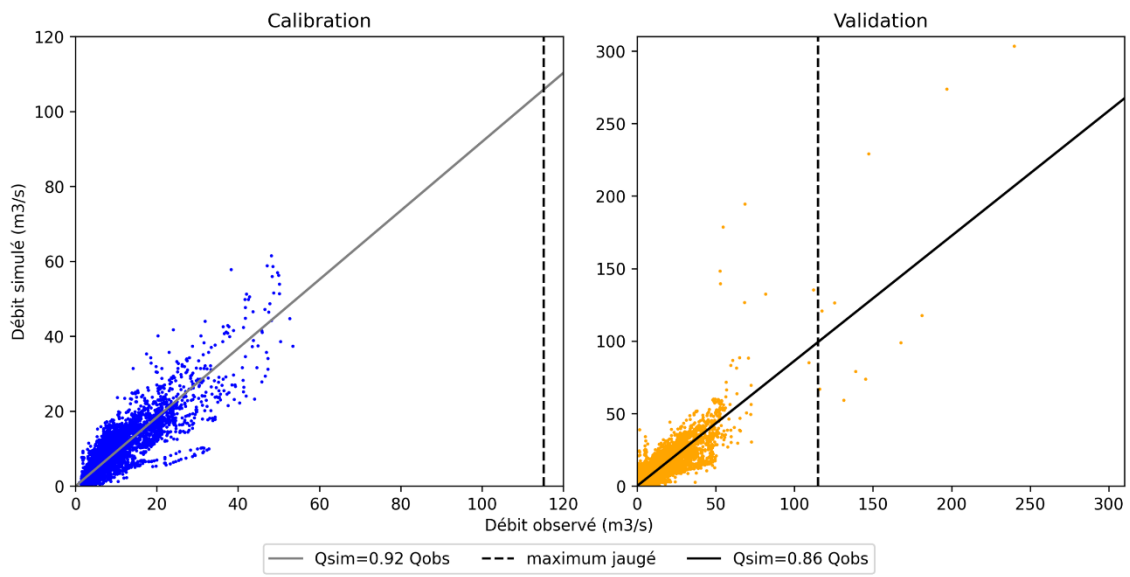
Theux - Calibration 2018-2021



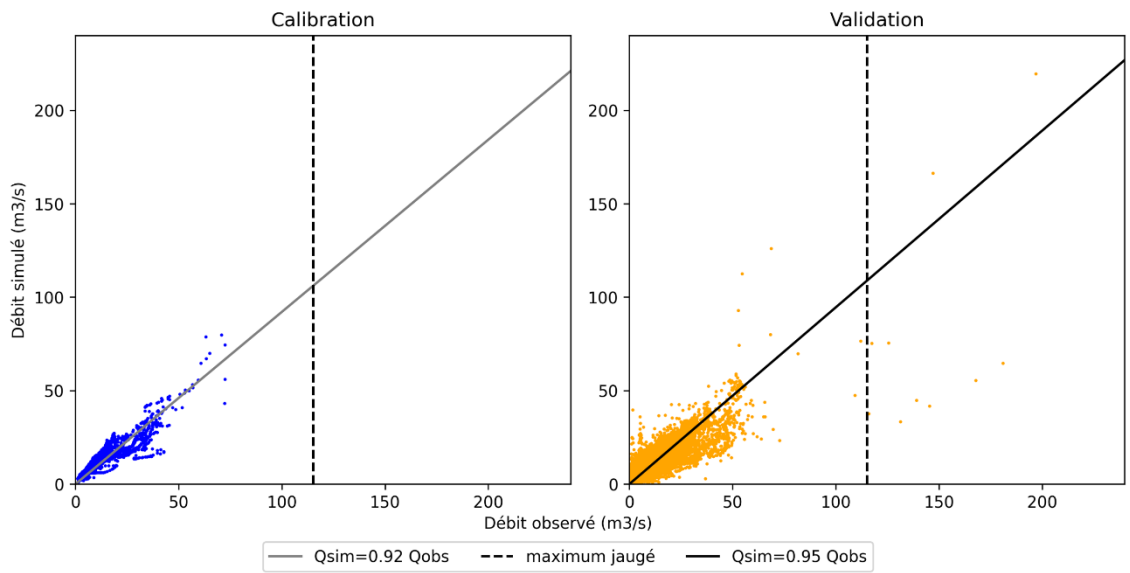
Theux - Calibration 19-20+p19



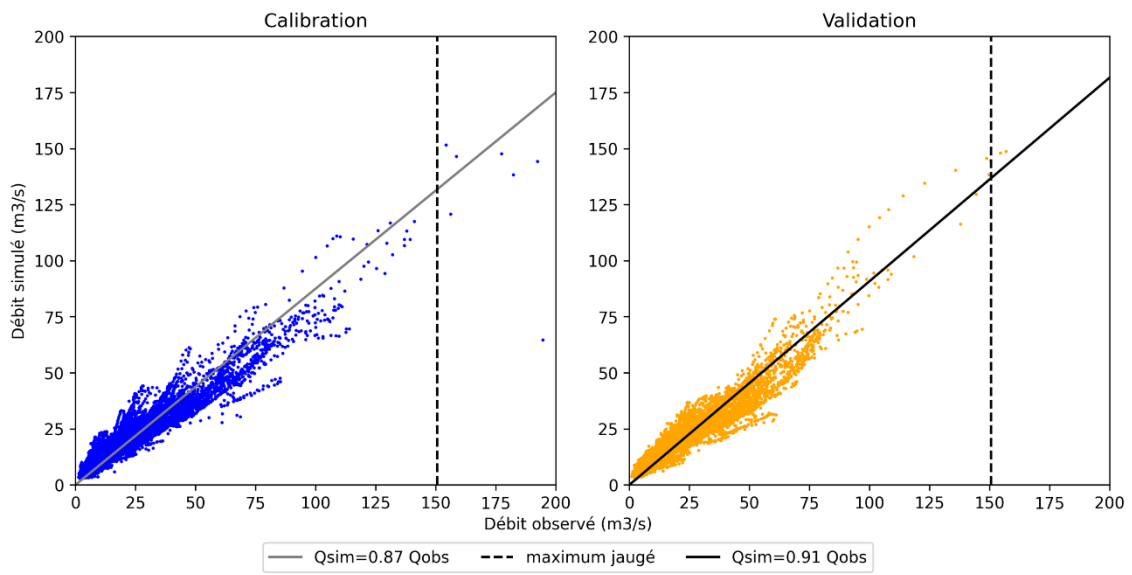
Verviers - Calibration 2004-2008



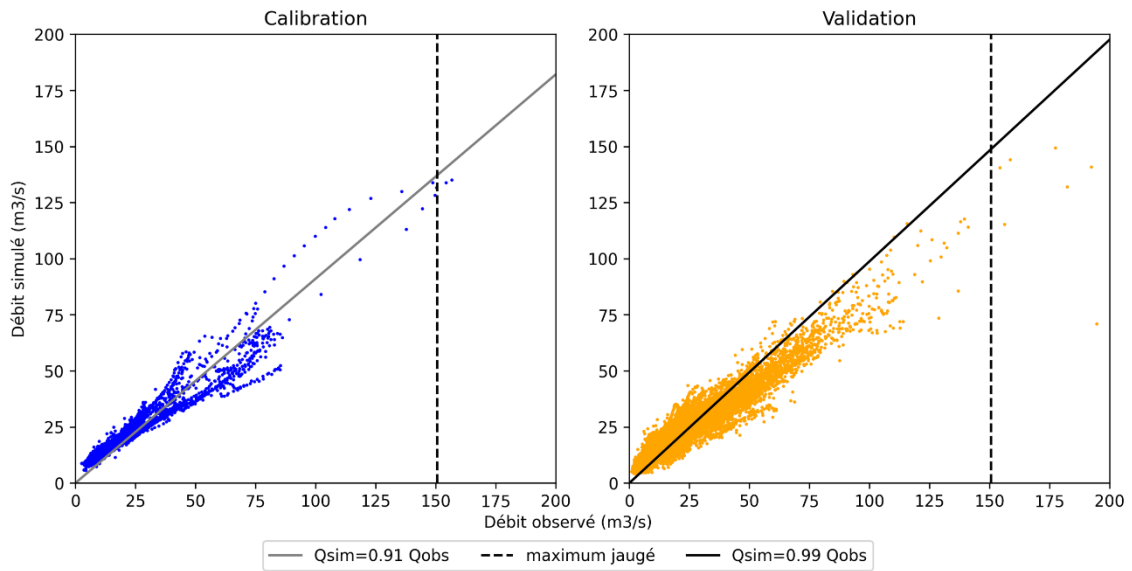
Verviers - Calibration 19-20+p19



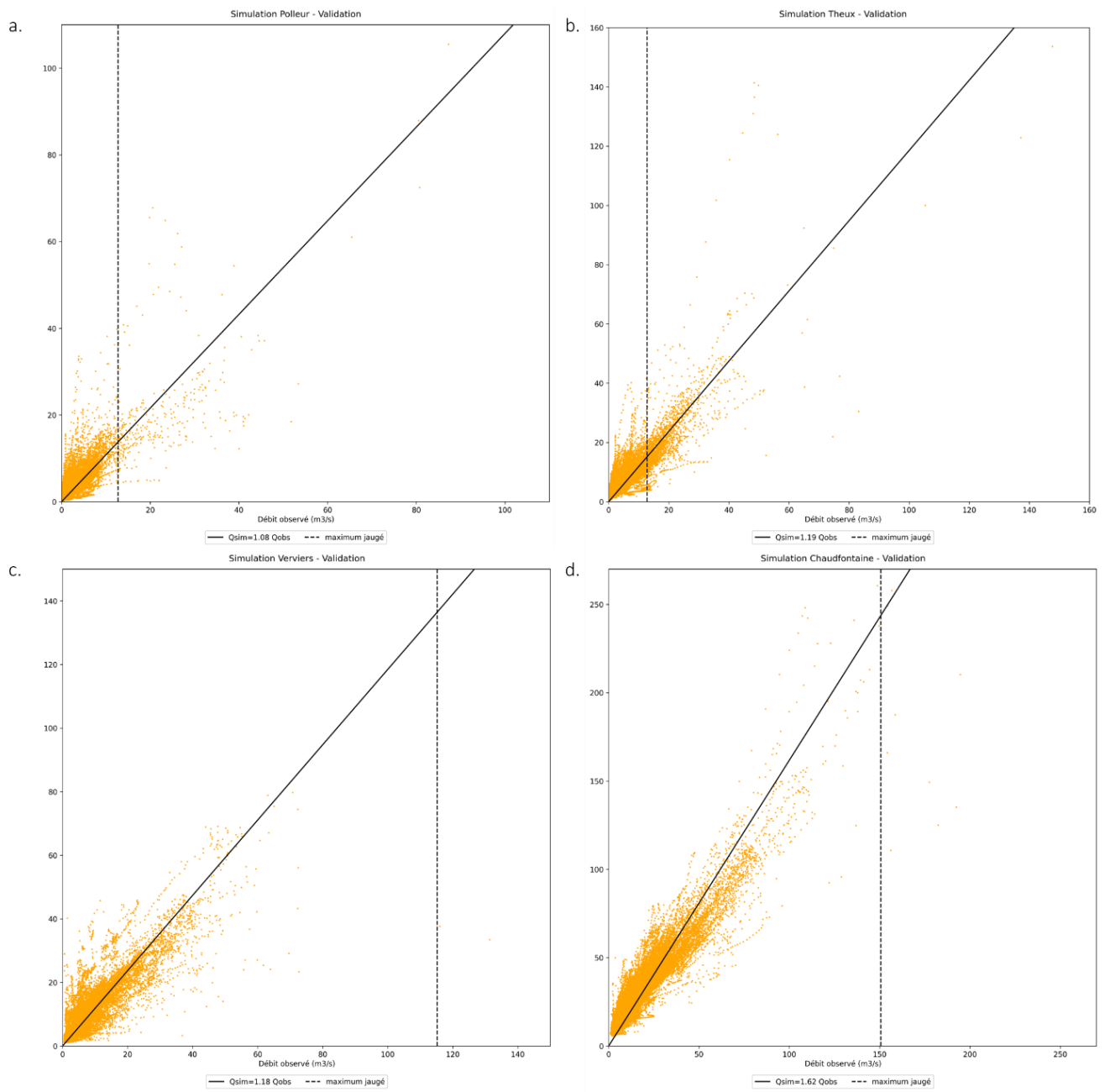
Chaufontaine - Calibration 2016-2021



Chaufontaine - Calibration 19-20+p14



Annexe V : diagrammes de dispersion en validation sur base des débits simulés en amont des sous-bassins. a) Polleur, b) Theux, c) Verviers, d) Chaudfontaine



Annexe VI : Tableau de résultats des statistiques effectuées sur les comparaisons des données IRM et MAR historiques pour une maille de basse (A) et haute (B) altitude

		Erreur relative (%)	Moyenne (IRM) - Moyenne (MAR)	Ecart-type (IRM)	Biais standardisé
MAILLE B					
Précipitations annuelles cumulées (mm)		5.41	-71.19	175.26	0.41
Précipitations cumulées par saison et par an (mm)	printemps	7.37	-21.20	93.67	0.23
	été	-3.11	10.19	87.52	0.12
	automne	7.41	-24.15	99.30	0.24
	hiver	9.64	-36.03	106.01	0.34
Nombre de jours de pluie intense (>20mm) par saison et par an	printemps	-40.85	0.83	1.56	0.53
	été	-51.82	1.63	2.17	0.75
	automne	-22.11	0.60	1.69	0.35
	hiver	-23.28	0.77	2.39	0.32
Précipitations maximales par saison et par an (mm)	printemps	-2.31	0.61	8.07	0.08
	été	-21.71	7.68	11.71	0.66
	automne	-18.89	6.99	19.65	0.36
	hiver	-12.03	3.98	11.19	0.36
Températures moyennes annuelles (°C)		3.56	-0.28	0.73	0.38
Températures moyennes par saison et par an (°C)	printemps	-6.07	0.44	1.21	0.36
	été	8.43	-1.26	0.93	1.35
	automne	-0.64	0.05	1.10	0.05
	hiver	55.07	-0.35	1.37	0.25
MAILLE A					
Précipitations annuelles cumulées (mm)		1.12	-10.73	118.01	0.09
Précipitations cumulées par saison et par an (mm)	printemps	4.32	-9.21	67.11	0.14
	été	5.84	-15.56	67.31	0.23
	automne	0.83	-1.95	72.03	0.03
	hiver	-6.50	15.99	67.36	0.24
Nombre de jours de pluie intense (>20mm) par saison et par an	printemps	-55.26	0.60	1.20	0.50
	été	-66.20	1.34	1.62	0.83
	automne	-38.46	0.43	1.13	0.38
	hiver	-74.42	0.91	1.24	0.74
Précipitations maximales par saison et par an (mm)	printemps	-18.34	4.31	8.91	0.48
	été	-30.10	9.58	11.39	0.84
	automne	-23.63	6.76	13.75	0.49
	hiver	-23.62	5.49	6.57	0.84
Températures moyennes annuelles (°C)		-0.14	0.01	0.76	0.02
	printemps	-7.01	0.66	1.16	0.57
	été	6.92	-1.20	0.93	1.28

Températures moyennes par saison et par an (°C)	automne	-3.80	0.40	1.10	0.37
	hiver	-6.74	0.19	1.49	0.13