

École polytechnique de Louvain

Inondations de l'été 2021 à Cortil-Noirmont : étude de zones d'extension de crues par modélisation hydrologique et hydraulique

Auteur: **Alice GIOT**

Promoteur: **Sandra SOARES-FRAZAO**

Lecteurs: **Charles BIELDERS, Masoumeh EBRAHIMI**

Année académique 2022–2023

Master [120] : ingénieur civil des constructions

Résumé

Ce travail traite de la modélisation hydrologique et hydraulique des crues de l'été 2021 à Cortil-Noirmont et plus particulièrement du débordement de l'Orne. Le contexte hydrologique du village est décrit sur base d'inondations antérieures, de la chronologie des événements de 2021, ainsi que des actions préventives déjà entreprises. Une modélisation hydrologique, pour produire des hydrogrammes de crue, est réalisée grâce au logiciel ATHYS. Celle-ci est calibrée sur les événements antérieurs connus, et validée sur la crue étudiée dans ce travail. Une modélisation hydraulique est ensuite réalisée avec le programme HydroFlow. En conclusion, l'ajout de zones d'expansion de crue sur l'amont de la rivière, est proposé, modélisé et analysé.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Premièrement ma promotrice le Professeur Sandra Soares-Frazão pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette étude.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur Nathan Delpierre qui m'a accordé son temps et son support à l'utilisation des différents outils de modélisation et de représentation utilisés lors de ce travail.

Quant à Monsieur Yves Zech, je le remercie pour son introduction et son support à l'utilisation des logiciels QGIS et ATHYS.

Merci au Professeur Charles Bielders et à Madame Masoumeh Ebrahimi d'avoir accepté d'être lecteurs de ce mémoire.

Je ne voudrais pas oublier ceux qui m'ont soutenu durant mon tout parcours universitaire, mes amis présents de longue date ou non qui ont tous pu contribuer à leur manière à mon évolution.

Finalement, je remercie plus particulièrement mes parents, Emile, Nathan, pour leur support tant émotionnel que logistique infaillible lors la production de ce travail. .

Table des matières

Résumé	i
Remerciements	iii
Table des matières	vi
Table des figures	ix
1 Introduction	1
1.1 Contexte général	1
2 Etat de l'art	6
2.1 Modèles hydrologiques	6
3 Contexte du village de Cortil-Noirmont	12
3.1 Zone d'expansion de crue (ZEC)	13
3.2 Inondations de l'été 2021 à Cortil-Noirmont.	16
4 Modélisation hydrologique	24
4.1 ATHYS	24
4.1.1 MERCEDES	24
4.2 Etablissement du modèle	30
4.2.1 Bassin versant	30
4.2.2 Données de débit	32
4.2.3 Données de pluie	35
4.2.4 Construction du modèle hydrologique	36
4.3 Calcul des hydrogrammes	41
5 Modélisation hydraulique	44
5.1 HydroFlow	44
5.1.1 Fonctionnement du programme	45
5.2 Choix du domaine étudié	47

5.3	Ajout de la zone d'expansion de crue dans le modèle numérique de terrain (MNT)	48
5.4	Situation initiale : remplissage de la rivière	49
5.4.1	Correction du MNT : ponts	50
5.5	Simulation sur un nouveau domaine	54
5.5.1	Situation initiale : remplissage de la rivière	54
6	Aménagements	57
6.1	ZEC existante	57
6.2	ZEC sur la Joncquière	59
6.3	ZEC sur l'Orne	62
6.4	Combinaison des aménagements	65
7	Conclusion	67
7.1	Perspectives	68
	Bibliographie	69
A	Synthèse de la problématique des inondations : bassin de l'Orne amont	74
B	Données de modélisation de la ZEC	76
C	Capacité de stockage et Curve Number.	85

Table des figures

1.1	Précipitations accumulées sur 24h et 48h pour la période du 13 au 15 juillet 2021 [18].	2
1.2	Humidités des sols les 12 (à gauche) et 15 (à droite) juillet 2021 [18].	3
1.3	Indice de sécheresse (SPI-3, Standardized Precipitation Index sur les derniers 3 mois) au 16 juillet 2021- Belgique. Point rouge : Cortil-Noirmont [29].	3
1.4	A gauche : distribution des quantités de précipitations sur 3 jours pour la période du 13 juillet (8h CEST) au 16 juillet 2021(8h CEST). Point rouge : Cortil-Noirmont. A droite : périodes de retour des quantités de précipitations pour la période du 13 juillet au 16 juillet 2021. Point vert : Cortil-Noirmont [29].	4
2.1	Différentes répartitions de l'espace [27].	7
2.2	Composantes du cycle de l'eau[12].	8
2.3	Hydrogrammes dus à des pluies localisées [7].	10
2.4	Durées caractéristiques relatives à un hydrogramme de crue [22] . . .	10
3.1	Rivière et ruisseaux traversants Cortil-Noirmont.	12
3.2	Rue du Tilleul et Rue Octave Lotin [15].	13
3.3	Rue du Tilleul 34 lors d'inondations en juin 2012.	13
3.4	Localisation de la zone d'expansion de crue (ZEC).	14
3.5	Construction de la digue avec la prairie en arrière-plan[5].	15
3.6	Pertuis en béton côté aval. Photo prise en 2023.	15
3.7	Pertuis en béton côté amont avec la vanne[35].	15
3.8	Déversoir de sécurité de la ZEC en 2019[5].	16
3.9	Rue du Tilleul.	17
3.10	Etat des routes au lendemain d'une inondation[24].	17
3.11	Rue inondée par les pluies du 29 juin[24].	18
3.12	Evolution de la hauteur de l'eau à la sonde de la ZEC - 31 mai au 1 août 2021. En gris clair les hauteurs d'eau de l'année précédente pour la même période.	19
3.13	Etat général de la ZEC au lendemain d'une inondation [24].	20

3.14	Etat de la surverse et de la berge en face au lendemain d'une inondation[24].	20
3.15	Etat à l'amont de la vanne au lendemain d'une inondation[24].	21
3.16	Aval de la confluence entre l'Orne et la Joncquière au lendemain d'une inondation [24].	21
3.17	La surverse et la berge en face après travaux effectués en 2022.	22
3.18	Le haut de la surverse après travaux effectués en 2022.	23
4.1	Principe du module MERCEDES[21].	25
4.2	Schéma de fonctionnement général du modèle hydrologique MERCEDES [28].	26
4.3	Schéma du modèle SCS avec vidange[8].	28
4.4	Représentation de la fonction de Transfert [21].	29
4.5	Bassin versant de l'Orne à Blanmont.	31
4.6	Topographie du bassin versant de Blanmont.	31
4.7	Polygones de Voronoï pour le bassin versant de Blanmont.	31
4.8	Débit moyen horaire de la station L7520 depuis sa mise en service.	33
4.9	10 pires épisodes de la station L7520 en excluant les crues de 2021.	34
4.10	Précipitations aux trois stations pluviométriques couvrant le bassin versant du 12 au 17 juillet 2021.	35
4.11	Résultat du modèle - 12 au 17 juillet 2021.	36
4.12	Résultat du modèle après optimisation - 12 au 17 juillet 2021.	37
4.13	Résultat du modèle pour l'épisode du 11 au 17 juin 2012.	38
4.14	Localisation des pluviomètres par rapport au bassin versant.	39
4.15	Précipitations de trois stations pluviométriques du 11 au 17 juin 2012.	39
4.16	Résultat du modèle après optimisation - 23 au 23 juin 2016.	40
4.17	Comparaison des résultats obtenus pour différents calibrages - 12 au 17 juillet 2021.	41
4.18	Bassin versant de l'Orne et la Joncquière aux points de départ de l'étude.	42
4.19	Situation des bassins versants aux points de départ de l'étude par rapport au bassin versant à Blanmont.	42
4.20	Résultat du modèle calibré sur base de l'événement en 2016 pour le point de départ sur l'Orne - 12 au 17 juillet 2021.	42
4.21	Résultat du modèle calibré sur base de l'événement en 2016 pour le point de départ sur la Joncquière - 12 au 17 juillet 2021.	43
5.1	Domaine sélectionné pour l'étude.	47
5.2	Comparaison entre le MNT avec et sans ZEC, zoomée sur la zone.	48
5.3	Comparaison entre la ZEC modélisée manuellement et dans le MNT 2021-2022[40].	49

5.4	Résultat de simulation après 80 000 secondes.	50
5.5	Zoom du résultat de simulation à la sortie de la ZEC.	51
5.6	Zoom au 34 rue du Tilleul.	51
5.7	Exemple de correction d'un pont : pont après la ZEC.	52
5.8	Résultat de simulation après 19 000 secondes.	53
5.9	Nouveau domaine de simulation.	54
5.10	Résultat de simulation après 33 000 secondes.	55
5.11	Résultat de simulation après 39 000 secondes.	55
5.12	Zoom sur la d'intérêt de la simulation à 33 000 secondes.	56
6.1	Localisation de l'aménagement dans la zone d'étude.	58
6.2	Modélisation de l'aménagement de la ZEC existante : fermeture de la vanne.	58
6.3	Débordement de la ZEC lorsque la ZEC est fermée.	59
6.4	Localisation des aménagements dans la zone d'étude.	60
6.5	Modélisation de l'aménagement de la ZEC ajoutée en amont de la rue Try des Rudes.	60
6.6	Coupe longitudinale de l'aménagement.	61
6.7	Résultat de simulation après 26 000 secondes avec ajout d'une ZEC sur la Joncquière.	61
6.8	Etat de la ZEC ajoutée lorsque la ZEC existante déborde.	62
6.9	Localisation de aménagements dans la zone d'étude.	63
6.10	Modélisation de l'aménagement de la ZEC ajoutée en amont de la rue Sainte-Anne.	63
6.11	Coupe longitudinale de l'aménagement.	64
6.12	Etat de la ZEC existante après 26 000 secondes de simulation avec ajout d'une ZEC sur l'Orne.	64
6.13	Localisation des aménagements dans la zone d'étude.	65
6.14	Etat de la ZEC existante après 26 000 secondes de simulation avec ajout d'une ZEC sur la Joncquière et d'une ZEC sur l'Orne.	65
6.15	Etat de la ZEC existante après 40 000 secondes de simulation avec ajout d'une ZEC sur la Joncquière et d'une ZEC sur l'Orne.	66
B.1	Plan "as-built" de la ZEC.	77

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte général

2021 a été une année très humide en général. À Uccle, l'IRM (Institut Royal Météorologique de Belgique) enregistre 1011,8 mm de précipitations tombés au cours de l'année écoulée. C'est l'un des trois plus importants cumuls annuels enregistrés depuis 1991. Dans d'autres régions du pays, 2021 sera l'année des précipitations extrêmes [1].

En particulier, les 13, 14 et 15 juillet 2021, des quantités de précipitations exceptionnelles tombent sur l'est (13 et 14 juillet) et le centre du pays (15 juillet), générant des inondations catastrophiques consécutives aux crues éclair de nombreux fleuves et rivières du pays. Toutes les provinces wallonnes, le Limbourg et la Région de Bruxelles-Capitale sont touchées. En plus d'importants dégâts matériels, 39 personnes perdent la vie au cours de ces inondations.

Ces inondations en Belgique font partie d'une série d'inondations qui affectent l'Europe de l'ouest depuis le 13 juillet. Elles sont consécutives au blocage d'une goutte froide sur l'Europe occidentale [18].

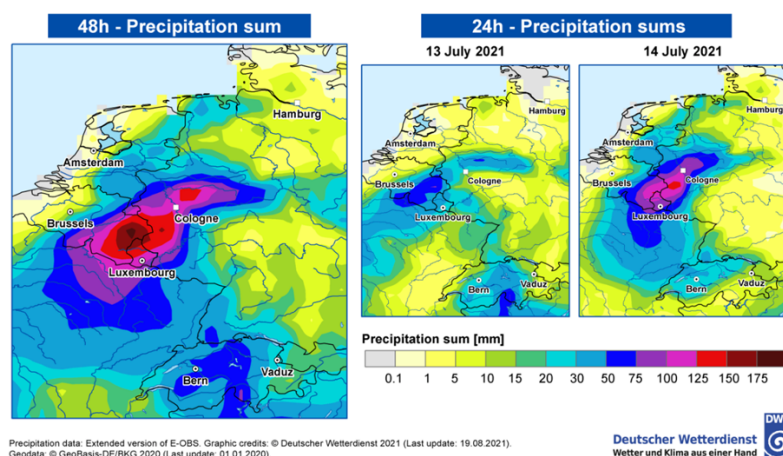


FIGURE 1.1 : Précipitations accumulées sur 24h et 48h pour la période du 13 au 15 juillet 2021 [18].

Une goutte froide ou goutte d'air froid désigne en météorologie un volume limité d'air froid qui est représenté, sur une carte météorologique, entouré d'isothermes fermés. On parle également de dôme froid ou dôme d'air froid. Le diamètre d'une goutte froide peut varier de quelques centaines à un millier de kilomètres. L'air y est homogène et sans ligne de front le séparant des masses environnantes, tout en ayant une influence déterminante sur le temps. La goutte froide mène alors le plus souvent à une situation atmosphérique de blocage où on assiste à la formation d'une dépression coupée d'altitude [17].

Depuis le début de l'été, 2021 l'Europe de l'Ouest est frappée par de fréquents passages pluvio-orageux, en lien avec de régulières gouttes froides, circulant sur le flanc occidental de conditions anticycloniques de blocage sur l'Europe du Nord et de l'Est. C'est le cas en juin et aussi à la mi-juillet. Ainsi, les rivages de la Baltique et la Scandinavie connaissent un été très chaud qui contribue à un fort contenu en vapeur d'eau sur une grande partie de l'Europe du Nord. Ce fort contenu en eau de l'atmosphère est souvent invoqué par les climatologues comme la principale raison de l'augmentation de la fréquence des événements pluvieux extrêmes, déjà observée, à cause du réchauffement climatique [18].

Selon le site «meteobelgique.be», l'épisode pluvieux que le territoire connaît en juillet 2021 est l'un des plus graves du dernier siècle [29].

À la mi-juillet, la moitié orientale de la Belgique est donc frappée par de fortes pluies et de graves inondations, avec des cumuls de précipitations sur trois jours atteignant 300 mm [1]. Ces précipitations se produisent sur des sols déjà proches

de la saturation comme on le voit sur ces cartes issues du modèle IFS (Integrated Forecasting Model , système de prévision numérique du temps global - entre lundi 12 juillet 2021 et jeudi 15 juillet 2021), avec des lames d'eau régulières, encore une fois, depuis le début de l'été sur l'Europe de l'Ouest [18].

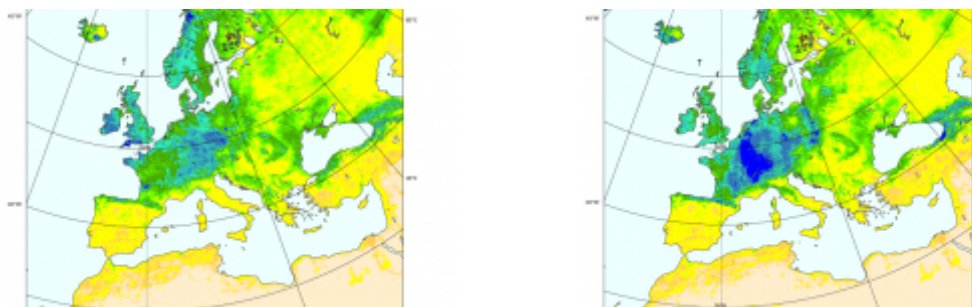


FIGURE 1.2 : Humidités des sols les 12 (à gauche) et 15 (à droite) juillet 2021 [18].

En Belgique, l'indice de sécheresse (ou plutôt d'humidité dans le cas présent), calculé sur 90 jours (avril à juillet 2021), nous montre que de vastes régions du centre et de l'est du pays atteignent les critères d'«extrêmement humide» [29].

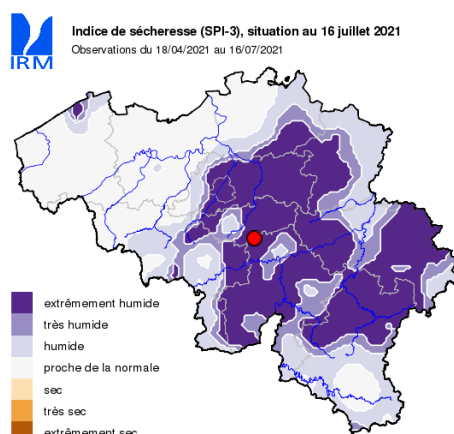


FIGURE 1.3 : Indice de sécheresse (SPI-3, Standardized Precipitation Index sur les derniers 3 mois) au 16 juillet 2021- Belgique. Point rouge : Cortil-Noirmont [29].

Des niveaux de précipitations aussi élevés dépassent de loin les observations historiques et se produisent habituellement tous les 200 ans ou plus. Une équipe internationale, dont des scientifiques de l'IRM, a étudié le lien entre le changement climatique et les fortes précipitations des 14 et 15 juillet dans le nord-ouest de l'Europe. L'étude conclut que la probabilité et l'intensité de ces précipitations extrêmes ont déjà augmenté en raison du changement climatique et continueront à

le faire si le réchauffement de la planète se poursuit [29].

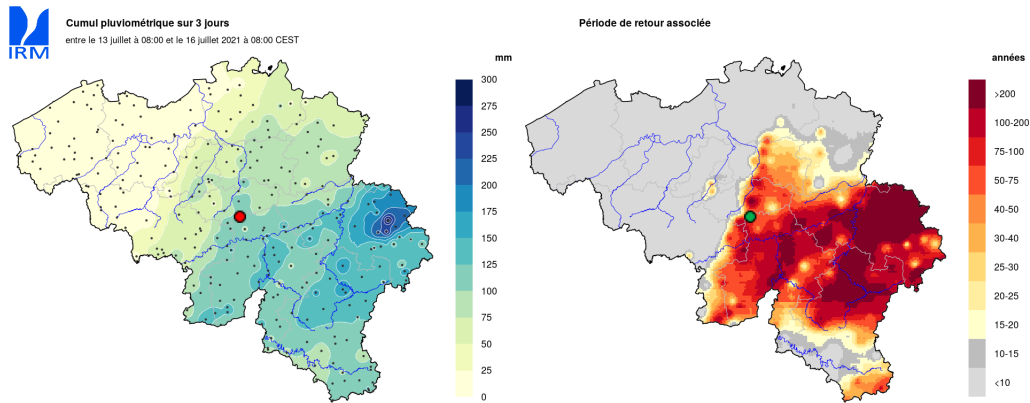


FIGURE 1.4 : A gauche : distribution des quantités de précipitations sur 3 jours pour la période du 13 juillet (8h CEST) au 16 juillet 2021(8h CEST). Point rouge : Cortil-Noirmont. A droite : périodes de retour des quantités de précipitations pour la période du 13 juillet au 16 juillet 2021. Point vert : Cortil-Noirmont [29].

Le changement climatique ne joue pas directement sur l'occurrence d'un événement météo lié à la circulation atmosphérique de grande échelle, comme le déplacement d'une goutte froide sur l'Europe de l'Est qui est à l'origine des pluies de juillet 2021. Ce sont des phénomènes météorologiques connus et documentés de longue date, mais le changement climatique amplifie leur intensité. On constate ces dernières années que l'intensité des événements météorologiques remarquables augmente. Leur sévérité a ainsi été aggravée par le changement climatique. Même sans étude spécifique d'attribution, qui permet de quantifier dans quelle mesure le changement climatique a modifié la probabilité qu'un événement d'une telle intensité ne survienne, la signature du changement climatique se manifeste par l'intensification de tels événements de précipitations extrêmes [18].

En réponse à ces événements, une collaboration a été initiée entre Marc Bastin, député provincial du Brabant Wallon, en charge entre autres de la lutte contre les inondations, et le Professeur Soares-Frazão de l'UCLouvain, afin qu'un travail de fin d'études porte sur un cas d'inondation dans la province du Brabant wallon. Après concertation avec le Service Hydrologie de l'administration wallonne, il a été proposé de se focaliser sur le bassin versant de Cortil-Noirmont. Cette zone du territoire ayant été particulièrement touchée en juin et juillet 2021, tant par débordement de cours d'eau, que par ruissellement.

L'objectif du présent travail est donc de modéliser le plus fidèlement possible les inondations s'étant produites à cette période, pour ensuite proposer des solutions prévenant des événements similaires futurs.

Pour ce faire, le travail va se structurer comme suit :

Dans le chapitre 2, différents modèles hydrologiques vont être expliqués et classifiés selon leur type et leur domaine d'application.

Le chapitre 3 présente les caractéristiques hydrologiques du village de Cortil-Noirmont confirmant qu'il s'agit d'une zone à risque concernant les inondations. La chronologie des événements de l'été 2021 à Cortil-Noirmont y est présentée, accompagnée des actions entreprises depuis lors.

Le chapitre 4 présente dans un premier temps le modèle hydrologique utilisé et ensuite analyse les données de pluie et débit de l'événement, ainsi que d'événements antérieurs, afin de produire les hydrogrammes correspondant le plus fidèlement aux événements étudiés.

Le chapitre 5 présente la modélisation hydraulique réalisée sur deux domaines.

Et finalement le chapitre 6 modélise et analyse les aménagements proposés consistant en l'ajout de zones d'expansion de crues. Deux zones différentes ainsi que leur combinaison sont présentées.

Chapitre 2

Etat de l'art

2.1 Modèles hydrologiques

Un modèle hydrologique est un outil numérique de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Un bassin versant est une surface dans laquelle l'ensemble des eaux qui y tombent converge vers un même point de sortie appelé exutoire. Un modèle hydrologique transforme des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant donné (précipitations, température,...) en une série de débits [43].

La représentation du cheminement de l'eau de pluie à l'exutoire se fait en deux parties :

- La production : Répartition de la pluie brute en pluie nette et en une partie infiltrée.
- Le transfert : Répartition de l'eau participant au débit du bassin versant dans le temps.

Il existe presque autant de modèles que d'hydrologues [2], chacun avec ses spécificités et son domaine d'application. Il est tout de même possible de les classer selon différentes caractéristiques. Une liste non-exhaustive de classification est présentée ici :

- En fonction des variables et paramètres :
 - Modèles déterministes : ces modèles reposent sur des propriétés purement mathématiques, généralement géométriques sans tenir compte du phénomène physique.
 - Modèles stochastiques : ces modèles font appel à des modèles probabilistes et découlent de l'analyse statistique des données [23].

- En fonction des relations utilisées :
 - Modèles empiriques : ces modèles se basent sur des relations mathématiques directes entre les variables d'entrée et de sortie du bassin sans faire intervenir les processus impliqués dans la relation pluie-débit. Le bassin est considéré comme une "boîte noire".
 - Modèles physiques : ces modèles représentent et expliquent le fonctionnement du système étudié grâce aux lois physiques régissant les processus.
 - Modèles conceptuels : le bassin est considéré comme un assemblage de réservoirs interconnectés où les niveaux varient dans le temps. Ces modèles utilisent des relations empiriques pour décrire les relations entre les réservoirs.
- En fonction de la répartition de l'espace : modèles globaux, distribués ou semi-distribués. La différence principale entre ces trois types de modèles est l'unité spatiale de base dans les équations qui est alors respectivement le bassin versant comme un ensemble, chacun des points du bassin versant ou un ensemble de sous-unités homogènes.
- En fonction de l'évolution temporelle : modèles cinématiques (descriptifs) ou dynamiques (explicatifs).

Il est à noter qu'il existe des relations entre ces différents modèles : un modèle est généralement constitué de combinaisons de plusieurs modèles ou du moins de modules associés à différentes caractéristiques.

Les modèles caractérisés par leur répartition dans l'espace (figure 2.1) vont être détaillés ci-après comprenant notamment leur plage d'application et des exemples de modèles couramment utilisés.

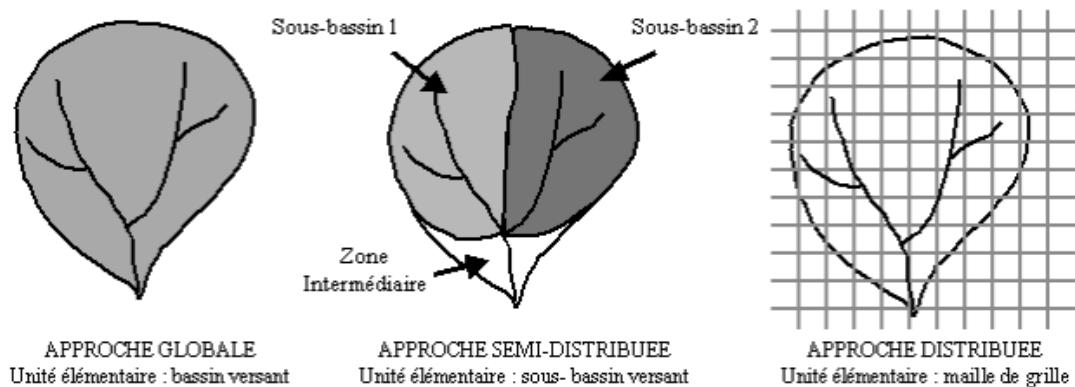


FIGURE 2.1 : Différentes répartitions de l'espace [27].

- Modèles globaux : Le bassin est considéré de manière globale, comme un ensemble. C'est le moins coûteux des trois modèles.

S'il s'agit d'un modèle empirique global, bien qu'efficace pour prévoir les débits à l'exutoire [4], il ne permet pas d'analyser le fonctionnement interne d'un bassin.

Un modèle conceptuel global permet quant à lui de simuler toutes les composantes du cycle de l'eau (tel que l'évapotranspiration, la recharge et contributions des nappes et le stockage hydrique, voir figure 2.2) et synthétiser l'information climatohydrologique disponible. Ce modèle ne permet cependant pas de tenir compte de l'hétérogénéité possible du bassin et les paramètres utilisés sont conceptuels, n'ont pas de réelle signification physique résultant, par exemple, en l'impossibilité d'estimer l'impact d'un aménagement.

Ce modèle à la vision très généralisée est souvent utilisé pour les grands bassins versants pouvant aller jusqu'à l'échelle continentale voir même mondiale pour certains modèles.

Un modèle conceptuel global courant est le GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) qui possède quatre paramètres à optimiser : la capacité du réservoir de production, le coefficient d'échanges souterrains, la capacité à un jour du réservoir de routage et le temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 [20]

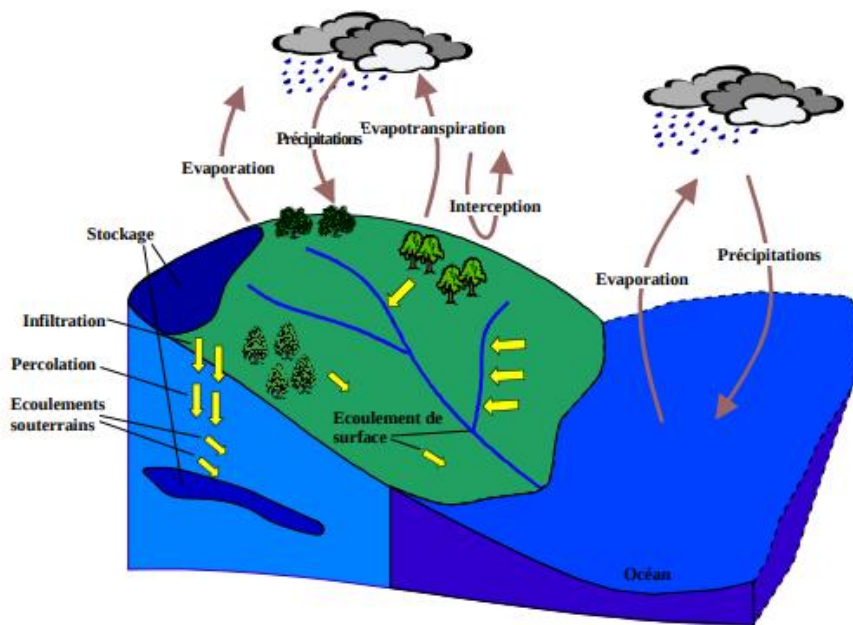


FIGURE 2.2 : Composantes du cycle de l'eau[12].

- Modèles semi-distribués : Le bassin est considéré comme un ensemble de sous-unités homogènes liées les unes aux autres. Ces sous-unités peuvent être établies sur base de critères hydrologiques (sous-bassin versant) ou de critères topographiques (bandes d'altitude). Cela permet de représenter la structure interne du bassin mais pas de l'expliquer. En effet, si le modèle est conceptuel, il reste à réservoirs (chaque sous-unité est un assemblage de réservoirs) et les paramètres restent sans sens physique.

Un modèle conceptuel semi-distribué est le modèle CEQUEAU qui permet de simuler la quantité et la qualité de l'eau en rivière au pas de temps 1, 2, 4, 6, 8,12 heures ou journalier [33].

Un modèle à base physique semi-distribué est le modèle TOPMODEL dont certains de ses paramètres tels que la pente topographique et la surface amont drainée sont distribués tandis que d'autres comme les propriétés hydrauliques des sols et les précipitations sont considérés globalement [6]. C'est un modèle non linéaire qui permet de simuler les réponses lentes et rapides sur un bassin versant et qui prend en compte deux composantes d'écoulement : l'écoulement en nappe souterraine et l'écoulement superficiel par saturation du sol [23].
- Modèles distribués : L'unité spatiale de base dans les équations est chacun des points obtenus via un maillage du bassin versant. Cela permet de prendre en compte les variations internes du bassin versant telles que la topographie, la végétation et l'occupation des terres. Cela permet notamment de tester l'impact de changement dans le bassin.

Ce type de modèle aussi intéressant qu'il soit apporte avec lui son lot de contraintes ; le modèle est complexe et nécessite une certaine quantité de données afin de pouvoir être utilisé correctement.

Un autre modèle distribué, qui va être utilisé dans ce travail et détaillé dans la section 4.1, est MERCEDES inclus dans le logiciel ATHYS.

Le choix du modèle, et par extension les hypothèses et simplifications associées, réside dans l'objectif visé par l'étude ainsi que dans la disponibilité des données. Une façon de voir le choix est la suivante [38] : si le but est de simuler l'évolution d'une variable de sortie (par exemple le débit à l'exutoire) pour effectuer des prévisions ou reconstituer des chroniques synthétiques, un modèle global est suffisant. Par contre, s'il faut simuler l'évolution des débits en différents endroits du bassin versant ou prévoir la distribution spatiale de variables, une approche distribuée sera nécessaire bien qu'elle soit plus lourde.

Dans le cas de ce travail, il s'agit d'un bassin versant rural dont l'occupation des terres est fluctuante. La possibilité d'intégrer l'hétérogénéité de l'espace et la variabilité spatiale des facteurs dans le modèle apporte un avantage non négligeable. Ceci peut être illustré par un exemple présenté par Bouvier et al [7] où ils comparent

les hydrogrammes pour une pluie localisée sur la partie basse du bassin dans un premier cas, et sur la partie haute dans le second, et calculés soit grâce à MERCEDES soit avec un modèle global.

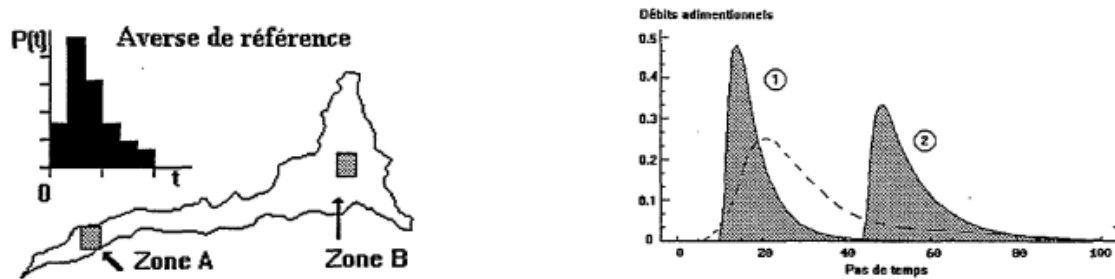


FIGURE 2.3 : Hydrogrammes dus à des pluies localisées [7].

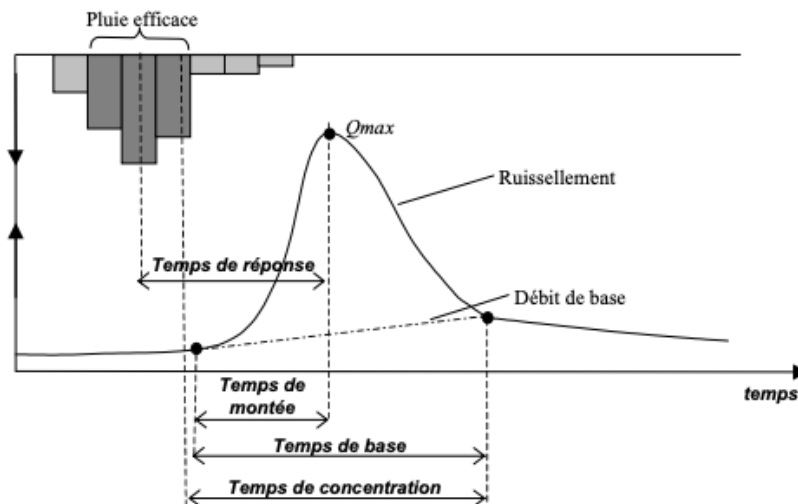


FIGURE 2.4 : Durées caractéristiques¹relatives à un hydrogramme de crue [22].

¹Définitions issues de Roche[37] :

Temps de montée (t_m) : Durée écoulée entre le début de l'arrivée à l'exutoire du « ruissellement » et le maximum de l'hydrogramme.

Temps de base (t_b) : Durée du ruissellement direct, c'est-à-dire la longueur sur l'abscisse des temps de la base de l'hydrogramme de ruissellement.

Temps de réponse (t_p) : L'intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie efficace de la pointe de l'hydrogramme.

Temps de concentration (t_c) : Durée que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin hydrauliquement la plus éloignée de l'exutoire pour parvenir à celui-ci.

Comme visible à la figure 2.3, MERCEDES produit deux hydrogrammes distincts : lorsque la localisation de la pluie est plus éloignée de l'exutoire (cas 2), le débit de pointe diminue et le temps de montée, le temps de base et le temps de réponse (voir figure 2.4) augmentent.

Le modèle global, représenté en pointillés, ne fait pas de différences entre les hydrogrammes résultant en une seule évaluation moyenne dans les deux cas. Cela renforce le choix d'un modèle distribué pour la modélisation de crue.

Chapitre 3

Contexte du village de Cortil-Noirmont

Le village de Cortil-Noirmont se situe dans la commune de Chastre dans le Brabant wallon en Belgique. Il est traversé par une rivière, l'Orne, qui prend sa source au Nord de la ville de Gembloux et se jette dans la Thyle à Court-Saint-Etienne[44]. L'Orne accueille successivement différents ruisseaux lors de son passage dans le village : la Joncquière, l'Ardenelle et l'Ernage comme illustré à la figure 3.1.

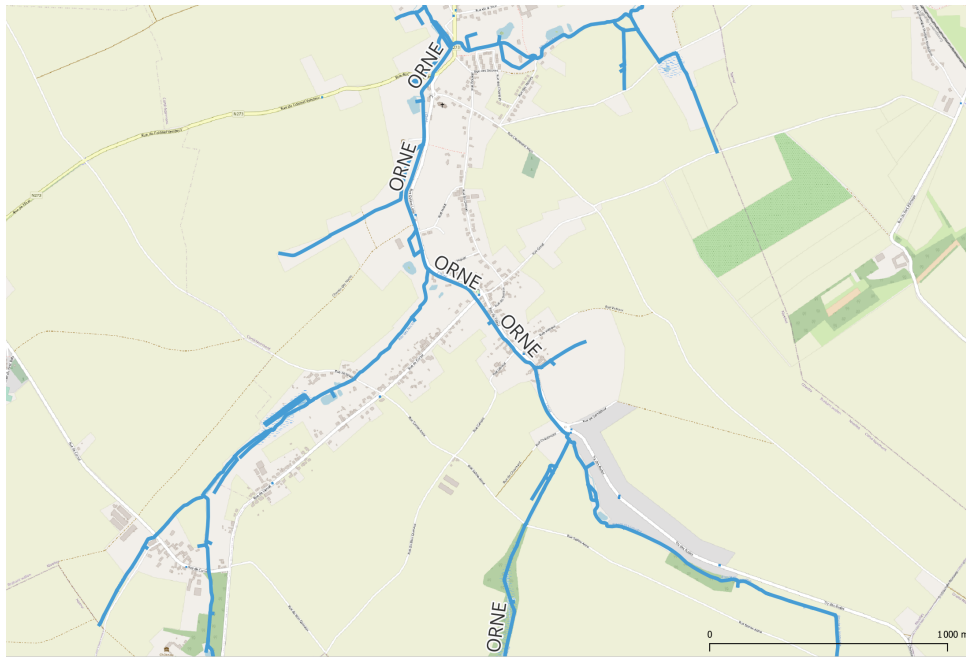


FIGURE 3.1 : Rivière et ruisseaux traversants Cortil-Noirmont.

Il est à noter que la commune de Chastre possède un territoire principalement agricole (plus de 80%) et très peu d'éléments naturels pour limiter le ruissellement [19]. Alors que la taille moyenne d'une surface agricole en Belgique est de 30 à 35 hectares, en Brabant wallon celle-ci est de 62 hectares, aggravant encore les problèmes de ruissellement [16].

Avant 2019, Cortil-Noirmont avait déjà été soumis à une trentaine d'inondations recensées par la province du Brabant Wallon, voir annexe A. Ces inondations répétées ont notamment eu lieu en 2006, 2010, 2011 et 2012[5].

A l'époque, un dispositif de rétention d'eau en amont du village consistant en des ballots de paille à placer entre des poutres au niveau d'un pont pouvait être mis en place lors d'afflux trop importants. En juin 2012, celui-ci n'a pas pu être placé car l'eau était déjà trop haute lorsque les ouvriers communaux sont intervenus.

Il s'agissait alors de la quatrième inondation en six ans et l'eau était montée jusqu'à 80 cm de haut le long des façades dans les rues du Tilleul et Octave Lotin [34].

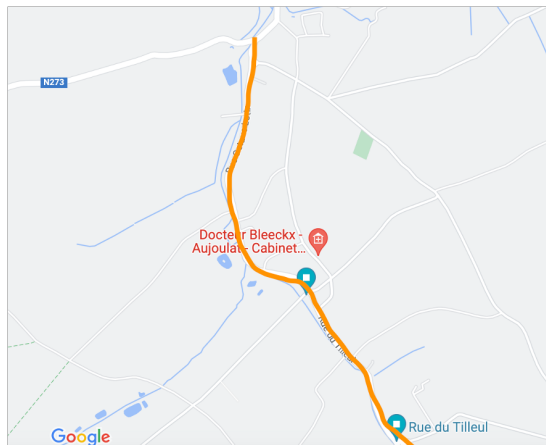


FIGURE 3.2 : Rue du Tilleul et Rue Octave Lotin [15].



FIGURE 3.3 : Rue du Tilleul 34 lors d'inondations en juin 2012.

Dès 2010 un dossier poussé par les habitants a été introduit afin de remplacer le dispositif bricolé par une installation permanente et robuste[16].

3.1 Zone d'expansion de crue (ZEC)

C'est en 2019 que des aménagements sont finalement réalisés à Cortil-Noirmont par la Province du Brabant wallon. Inaugurée en mai, une zone d'expansion de crue (ZEC) s'ajoute aux quinze autres du réseau géré par la Province dans la lutte contre les inondations.

Il s'agit d'une zone dont la fonction est de stocker de manière temporaire la pluie lors d'un évènement pluvieux, pour ensuite la restituer lentement à débit régulé vers un exutoire comme l'Orne dans ce cas-ci [32].

Elle est située au lieu-dit Ferme de Chautmont, à l'intersection entre la rue Try des Rudes et la rue Chautmont, en aval de la confluence avec la Joncquière (figure 3.4).

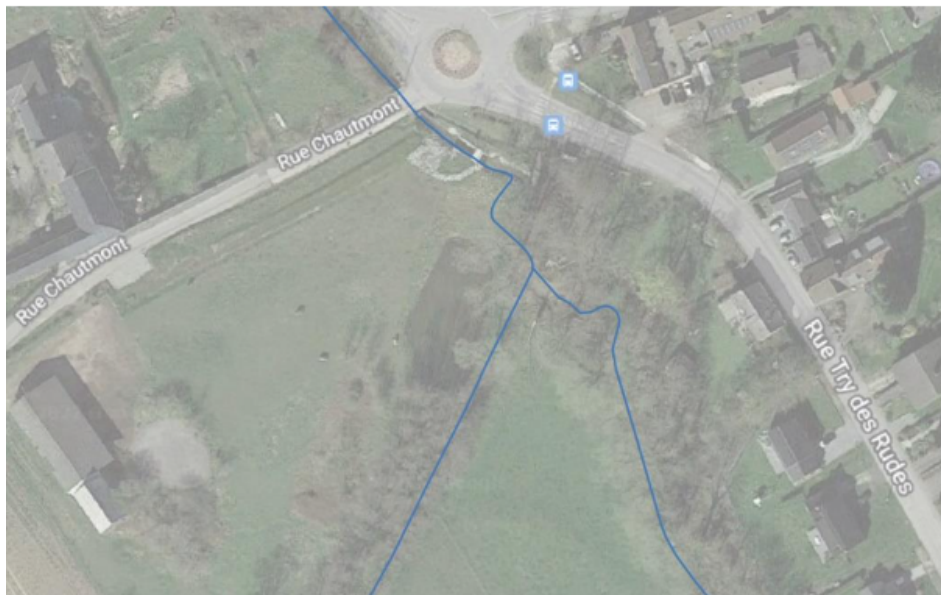


FIGURE 3.4 : Localisation de la zone d'expansion de crue (ZEC).

Cette ZEC a été créée en tirant parti du relief du site afin de bétonner un minimum. Elle est façonnée à l'aide d'une digue de 80m de longueur et de 2,5m de hauteur (figure 3.5) pour une capacité totale de stockage de $10900 m^3$ en inondant la prairie attenante prévue à cet effet [13].

Une vanne manuelle au pieds du pertuis en béton ainsi qu'un déversoir de sécurité (figures 3.6, 3.7 et 3.8) ont été installés afin de respectivement réguler le débit en aval et permettre à de l'eau excédentaire de rejoindre l'Orne sans endommager l'ouvrage et la digue en cas de trop plein d'eau. Le vanne ne sera à priori jamais entièrement fermée pour ne pas créer une vague et ne pas remplir trop vite le volume disponible [26][13]. La zone permet de lutter contre des pics de crue jusqu'à une période de retour de 20 ans (durée moyenne au cours de laquelle, statistiquement un évènement d'une même intensité se reproduit).

Une marre (visible en arrière-plan de la figure 3.5) a été créée et des haies vives ont été plantées augmentant alors la biodiversité du site.



FIGURE 3.5 : Construction de la digue avec la prairie en arrière-plan[5].



FIGURE 3.6 : Pertuis en béton côté aval.
Photo prise en 2023.



FIGURE 3.7 : Pertuis en béton côté amont avec la vanne[35].



FIGURE 3.8 : Déversoir de sécurité de la ZEC en 2019[5].

3.2 Inondations de l'été 2021 à Cortil-Noirmont.

Les faits relatés dans cette section sont issus de différents articles du site "L'actu des Chastrais : www.jhabiteacastre.be"[24] que l'on ne citera qu'une fois par facilité. Lorsque des informations proviennent d'une autre source, cela sera précisé.

Le soir du 2 juin 2021, plus de 30 litres au mètre carré tombent sur la commune de Chastre. Des coulées de boues sortent des champs très vite saturés, rendant notamment la rue Corsal impraticable quelques dizaines de minutes après le début de l'orage. Dans cette rue, au croisement avec la rue du Tilleul, l'eau monte à hauteur de genou. Plus de 12 heures après les premières précipitations, la rue du Tilleul et la rue Octave Lotin sont encore sous eau.



(a) Rue du Tilleul, le soir de l'épisode du 2 juin[24].



(b) Rue du Tilleul, le lendemain de l'épisode du 2 juin[24].

FIGURE 3.9 : Rue du Tilleul.



(a) Place du Cortil au lendemain d'une inondation[24].



(b) Vue d'un champ au lendemain d'une inondation.

FIGURE 3.10 : Etat des routes au lendemain d'une inondation[24].

Cet événement est le premier d'une longue série ; en juin 2021, ce n'est pas moins de 7 épisodes pluvieux intenses qui se succèdent sur Chastre. Notamment le 29 juin où près de 25 litres au mètre carré sont relevés à la gare de de Chastre. Le mois de juin totalise 156,6 litres par mètre carré, la moyenne pour un mois de

juin à Chastre étant de 79,2 litres par mètre carré.



FIGURE 3.11 : Rue inondée par les pluies du 29 juin[24].

Le 3 juillet, les routes sont à nouveau inondées dans les villages de la commune suite à d'importantes pluies en fin d'après-midi. Et ce n'est pas fini pour les sinistrés, d'autres précipitations sont encore prévues par l'IRM (l'Institut Royal Météorologique de Belgique) avec notamment 10mm prévus le 4 juillet.

Le 13 juillet, l'IRM place la province du Brabant wallon en alerte orange en prévision des pluies du jeudi 15 juillet, des cumuls entre 5 et 60mm sont attendus de mercredi 20h à jeudi 20h. A Chastre, l'intensité des précipitations est croissante depuis le mercredi matin. Le centre de crise du Brabant wallon émet une alerte et il est demandé aux habitants dans les zones à risque de prendre toutes les précautions nécessaires/possibles.

Le 15 juillet, plus de 60 litres par mètre carré tombent encore. Vers 7h du matin, la pluie commence à augmenter en intensité. En 2h, c'est plus de 25 litres supplémentaire qui s'abattent. A nouveau, les rue du Tilleul et Octave Lotin sont sous eau. Le plan d'urgence communal et du Brabant wallon sont activés. Quelques maisons sont évacuées par les pompiers à l'aide de barques, les habitants s'entraident pour limiter les dégâts dans les maisons. Finalement, personne n'est blessé lors de cette journée exceptionnelle et le 16 juillet au matin, le passage d'eau

boueuse est encore visible sur les routes mais l'Orne a regagné son lit.

Les inondations des 14, 15 et 16 juillet 2021 sont reconnues comme calamité naturelle publique par le Gouvernement. Chastre fait partie des plus de 200 communes de la région pour lesquelles les critères fixés dans le cadre du Fonds des Calamités sont rencontrés. Sous certaines conditions, les habitants ont donc pu introduire une demande pour une indemnisation financière de la Wallonie.

Au cours de cette suite d'épisodes de juin et juillet 2021, la ZEC a pu réguler certains événements mais sa capacité maximale a été atteinte pour d'autres. Cela dès le début de la série comme le 3 juin où face à plus de 50 litres au mètre carré, la ZEC était impuissante. Elle a rempli son rôle mais la surverse a fini par légèrement céder.

Il n'est pas étonnant que la ZEC ait parfois manqué à son devoir face à des pluies moins intenses. En effet, il est à noter que, de manière générale, pour un même apport d'eau, des résultats différents peuvent être obtenus et inversement il est possible d'obtenir des résultats similaires pour des apports différents. L'état initial du bassin, caractérisé par les périodes de pluie ou sécheresse antérieures, influence la réponse.[2]. Dans ces cas-ci, elle n'avait pas forcément eu le temps de se vider de l'épisode précédent et il est normalement rare d'avoir des orages consécutifs[16].

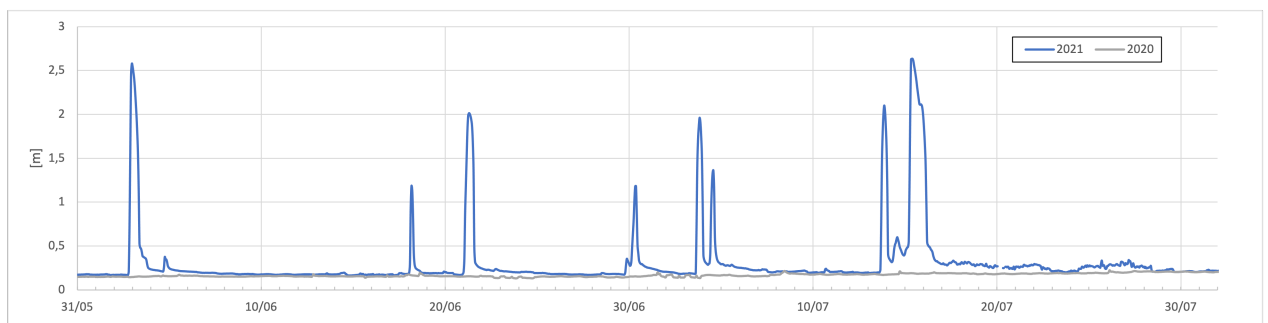


FIGURE 3.12 : Evolution de la hauteur de l'eau à la sonde de la ZEC - 31 mai au 1 août 2021. En gris clair les hauteurs d'eau de l'année précédente pour la même période.

Avec le cumul des différents épisodes, des dégâts ont été causés au niveau de la surverse et de la berge qui se situe en face de celle-ci (figure3.14).



FIGURE 3.13 : Etat général de la ZEC au lendemain d'une inondation [24].



FIGURE 3.14 : Etat de la surverse et de la berge en face au lendemain d'une inondation[24].



FIGURE 3.15 : Etat à l'amont de la vanne au lendemain d'une inondation[24].



FIGURE 3.16 : Aval de la confluence entre l'Orne et la Jonquièrre au lendemain d'une inondation [24].

En février 2022, des travaux ont été effectués afin de renforcer la surverse et la

berge (figures 3.17 et 3.18) mais la capacité de la zone n'a pas pu être augmentée en raison de la morphologie et de la topologie du terrain.



(a) Surverse après travaux effectués en 2022.



(b) Berge en face de la surverse.

FIGURE 3.17 : La surverse et la berge en face après travaux effectués en 2022.



FIGURE 3.18 : Le haut de la surverse après travaux effectués en 2022.

A l'été 2021, la commune a mis en place un groupe de travail et présenté, au conseil communal du 22 février 2022, un plan de lutte contre les inondations qui détaille vingt actions à entreprendre. Le présent travail peut être associé à l'action à prendre" 4 : Etude et création de ZEC : Orne : Phase 2.

Une autre action de la commune consiste à encourager, à l'aide d'une prime, les habitants à réaliser des aménagements chez eux pour ralentir l'intrusion des eaux dans leur bâtiment.

Chapitre 4

Modélisation hydrologique

Avant de passer à la modélisation proprement dite, nous allons développer ses aspects théoriques dans ce chapitre.

4.1 ATHYS

ATelier HYdrologique Spatialisé (ATHYS), développé par l'IRD (l'Institut de Recherche pour le Développement), est un outil informatique réunissant plusieurs modèles hydrologiques associés à des traitements de données hydro-climatiques et géographiques. Les applications prévues de ce logiciel sont notamment la gestion de la ressource en eau, la prévision des événements extrêmes (comme les crues), les études d'impacts à modification anthropiques ou climatiques [3].

Athys est constitué de quatre modules :

- MERCEDES (Maillage Élémentaire Régulier Carré pour l'Etude Des Ecoulements Superficiels) : plate-forme de modélisation spacialisée.
- VISHYR (VISualisation de Données HYdRologiques) : traitement des données hydro-climatiques stationnelles.
- VICAIR (VISualisation de CARtes et d'Information Raster) : Visualisation et traitement des données géographiques spatialisées.
- SPATIAL : plate-forme d'interpolation spatiale.

4.1.1 MERCEDES

Bien que trois modules (VICAIR, VISHYR et MERCEDES) seront utilisés pour la modélisation hydrologique, le module clé de cette dernière est MERCEDES. Illustré à la figure 4.1, le principe est le suivant : pour chaque pas de temps et chaque

maille donnée, MERCEDES applique un modèle de transformation pluie-débit avant d'additionner les résultats sur chacune des mailles pour obtenir la réponse hydrologique.

Comme indiqué dans son nom, il se base sur la discrétisation spatiale du bassin en mailles carrées régulières afin de tenir compte de la variabilité dans l'espace des facteurs déterminants.

Concernant le bassin, il peut être de différentes tailles et morphologies : bassins urbains de quelques hectares à quelques dizaines de kilomètres carrés, petits bassins montagneux de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres carrés ou moyens et grands bassins, de plus de quelques milliers de kilomètres carrés. Quant aux données nécessaires, elles peuvent être de nature géographique telle que les sols, le relief et la géologie, ou de nature hydro-climatique comme les pluies, les débits ou les températures[21].

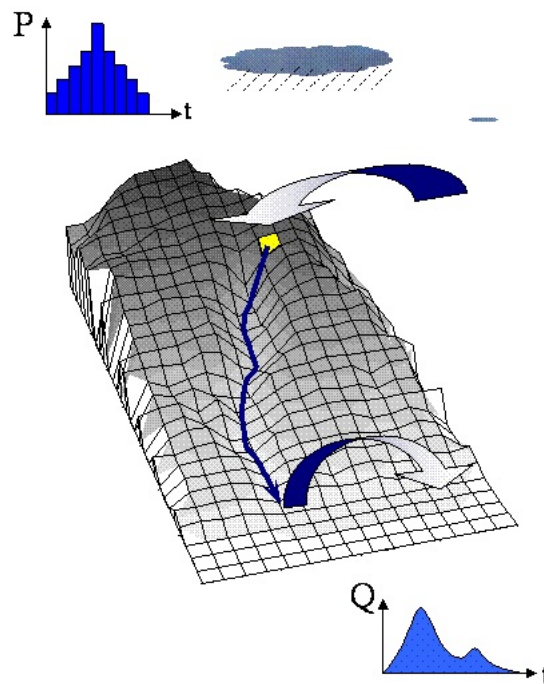


FIGURE 4.1 : Principe du module MERCEDES[21].

La transformation pluie-débit de MERCEDES est appliquée en cinq étapes (figure4.2) :

1. Discrétisation à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT)¹ du bassin en mailles carrées régulières.

¹Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une représentation de l'altitude du sol d'une

2. Calcul de la pluie brute tombée pour chaque maille en interpolant les données pluviométriques observées. Cela se fait généralement par la méthode des polygones de Thiessen.
3. Transformation de la pluie brute en pluie nette après soustraction des pertes à l'écoulement.
4. Transfert de la contribution de chacune des mailles à l'exutoire. L'hydrogramme élémentaire à l'exutoire de la contribution de la maille considérée est calculé à partir de la pluie nette sur la maille considérée. La forme et le décalage dans le temps de l'hydrogramme est fonction de la position de la maille sur le bassin.
5. Obtention de l'hydrogramme de crue complet à l'exutoire du bassin versant par addition de l'ensemble des contributions élémentaires de chacune des mailles.

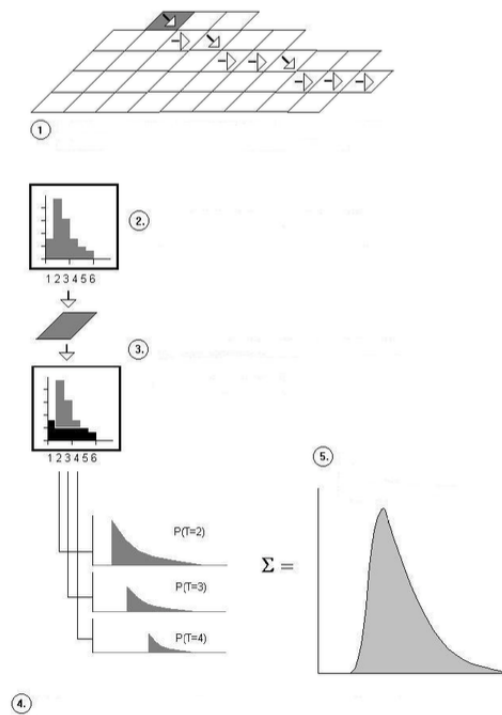


FIGURE 4.2 : Schéma de fonctionnement général du modèle hydrologique MERCEDES [28].

zone déterminée et exclut tous les éléments situés à la surface du sol (bâtiments, ponts, végétation, véhicules, etc.).[41]

Le module MERCEDES propose plusieurs fonctions de productions (Green et Ampt, Horton, TopModel, Réservoirs, SCS, Althair) et deux fonctions de transfert (mailles indépendantes ou mailles interactives).

À présent, la théorie des fonctions utilisées à la section 4.2 va être détaillée, les explications sont reprises sur le site d'ATHYS [21].

Fonction de production : SCS

Développé par le Soil Conservation Service (SCS), le modèle de production relie le cumul de la pluie efficace P_e [L] au cumul de la pluie brute P_b [L] :

$$P_e = \frac{(P_b - I_a)^2}{(P_b - I_a) + S} \quad (4.1)$$

où I_a [L] : Pertes initiales avant tout ruissellement (interception par la végétation, accumulation dans les dépressions, recharge en humidité (sans débit)[45].

S [L] : Capacité maximale de rétention en eau du sol (déficit en eau au début de l'épisode).

I_a et S sont généralement liés tel quel $I_a = 0,2S$ et S peut également être exprimé grâce au Curve Number (CN), coefficient d'aptitude au ruissellement : $S = \frac{25400}{CN} - 254$.

Le coefficient de ruissellement instantané :

$$C(t) = \frac{\delta P_e}{\delta P_b} = \left(\frac{P_b - 0,2S}{P_b + 0,8S} \right) \left(2 - \frac{P_b - 0,2S}{P_b + 0,8S} \right) \quad (4.2)$$

Il est possible d'adapter le modèle de base avec un réservoir sol décrivant l'évolution du stock hydrique en continu tel que présenté à la figure 4.3. Le réservoir se remplit par infiltration et se vide par évapotranspiration, recharge de la nappe et écoulement hypodermique.

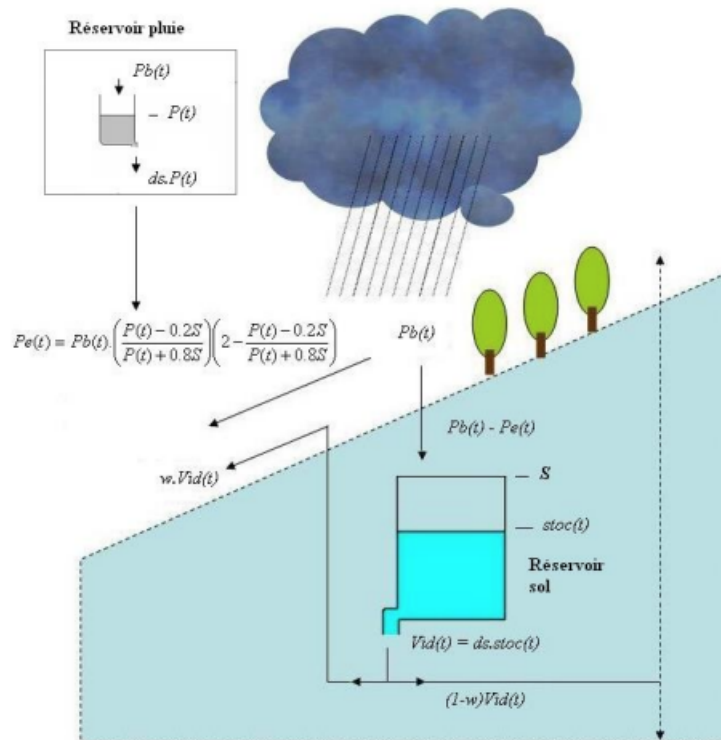


FIGURE 4.3 : Schéma du modèle SCS avec vidange[8].

Cet ajout permet de passer d'un seul à quatre paramètres d'ajustement :

S [mm] : Capacité maximale du réservoir sol qui dépend de caractéristiques du sol telles que la profondeur, l'hétérogénéité, la porosité, la conductivité hydraulique. S peut soit être tiré d'abaques sur base du type de couverture du sol et des conditions hydrologiques (voir annexe C), soit être produit à partir de la profondeur du sol par la porosité moyenne sur un profil vertical.

I_a/S [/] : Proportion des pertes initiales par rapport à la capacité maximale du réservoir sol, généralement 0,2.

ω [/] : Fraction de la vidange qui participe au ruissellement, sous forme d'exfiltration. C'est l'écoulement retardé qui provient de la vidange des profils supérieurs des sols, et doit être calé sur des décrues observées.

ds ou $1/C_{vid}$ [$\frac{1}{\text{jour}}$] : Coefficient de vidange.

Fonction de transfert : Lag & Route - simple

Le modèle associe un opérateur de stockage (Lag) et un opérateur de translation (Route). Dans ce mode de mailles indépendantes, c'est l'intégralité de l'hydrogramme élémentaire de chaque maille qui est transféré à l'exutoire, ne tenant donc ni compte des pertes possibles ni des apports des mailles voisines (figure 4.4).

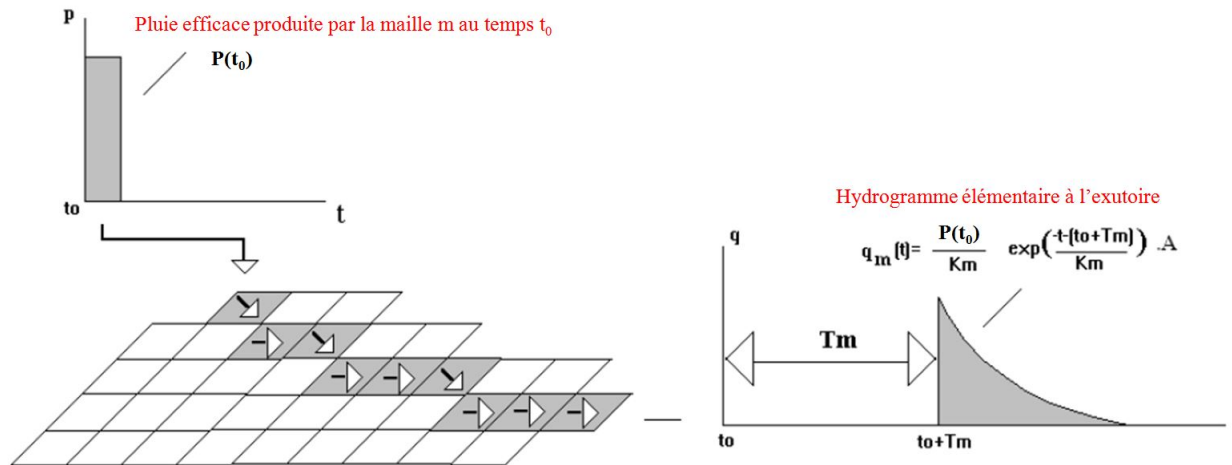


FIGURE 4.4 : Représentation de la fonction de Transfert [21].

Le temps de propagation à l'exutoire d'une maille m dépend de la longueur (l_k) et la vitesse (V_k) de chaque maille k se trouvant sur sa route :

$$T_m = \sum_{m \rightarrow \text{exutoire}} \frac{l_k}{V_k} \quad (4.3)$$

Concernant la vitesse de propagation :

Soit elle est considérée constante ($V_m = V_0$) et le temps d'amortissement T_m est proportionnel au temps de propagation : $K_m = K_0 T_m$.

Soit elle est proportionnelle à une puissance de la pente (I_k) et à une puissance de la superficie drainée par la maille : (S_k) $V_m = V_0 I_k^\alpha S_k^\beta$.

Le temps de diffusion K_m est alors une fonction croissante du temps de transfert : $K_m(t) = K_0 T_m + K_1$.

4.2 Etablissement du modèle

La théorie expliquée dans la section précédente va être appliquée au cas de ce travail.

Il est à noter que la plupart des représentations présentées dans cette section et les suivantes sont issues de QGIS. QGIS est un *Système d'information Géographique* (SIG), il s'agit d'un outil cartographique qui permet de visualiser des données, créer des cartes, éditer, convertir, exporter et même analyser des données. Il est également possible de lui ajouter des extensions, ce qui en fait un logiciel très complet[30].

Dans cette section, les données de débits et pluviométriques sont issues du site *L'hydrométrie en Wallonie*[42].

Veillez noter que toutes les échelles colorimétriques sont exprimées en mètre.

4.2.1 Bassin versant

A partir du modèle numérique de terrain MNT [41] et en utilisant le module VICAIR d'ATHYS, il est possible d'obtenir un fichier des directions d'écoulement qui permet à son tour d'obtenir un fichier de réseau d'écoulement et finalement un fichier de bassin versant.

Le bassin versant de l'Orne, prenant pour exutoire la station de mesure L7520 se situant à Blanmont [X :169285, Y :145098] (marqué par le point rouge sur la figure 4.5), possède une superficie de 20,15 km^2 .

Ce point a été choisi car il s'agit du limnimètre le plus proche de Cortil-Noirmont et qui fournira les mesures de débit utilisées dans le modèle hydrologique. La topographie présentée à la figure 4.6 permet de se faire une idée de comment l'eau va ruisseler sur le territoire.

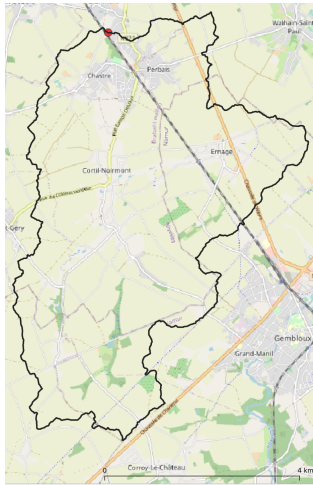


FIGURE 4.5 : Bassin versant de l'Orne à Blanmont.

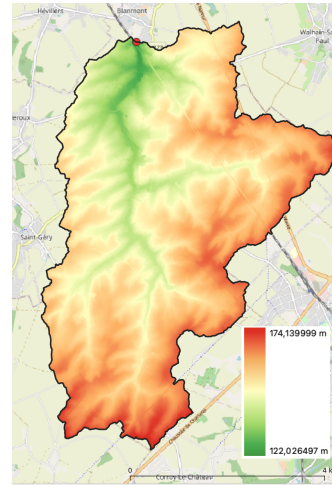


FIGURE 4.6 : Topographie du bassin versant de Blanmont.

Ensuite il est possible de calculer les polygones de Thiessen ou de Voronoï qui seront utilisés pour répartir la pluie brute dans les différentes mailles du modèle. Chaque polygone de Thiessen définit une zone d'influence autour de son point d'échantillonnage, de telle sorte que n'importe quelle localisation à l'intérieur du polygone est plus proche de ce point que de tout autre point d'échantillonnage [36]. Les points utilisés sont dans ce cas, des pluviomètres qui fourniront les précipitations utilisées dans le modèle, ceux-ci seront détaillés par après.

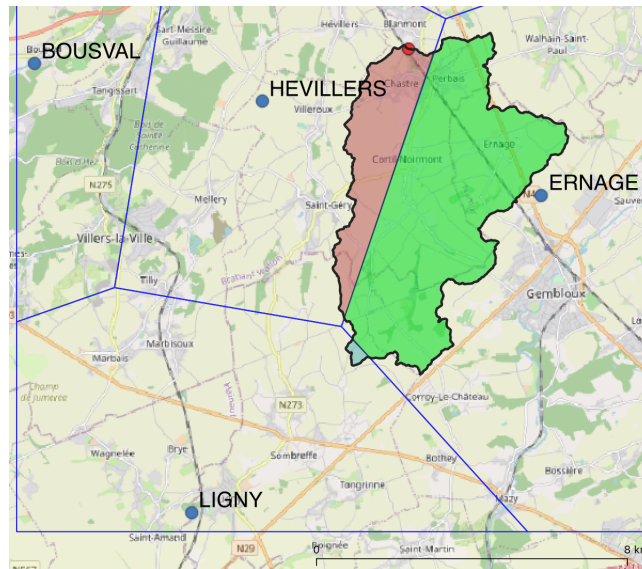


FIGURE 4.7 : Polygones de Voronoï pour le bassin versant de Blanmont.

4.2.2 Données de débit

La station L7520 sur l'Orne a été mise en service le 17/05/2011 et les débits horaires sont disponibles jusqu'au 17/07/2021. Les valeurs de débit caractéristiques sont reprises dans le tableau 4.1.

Sur la figure 4.8 représentant la série temporelle de débit à la station, il apparaît clairement que les crues de l'été 2021 ont été exceptionnelles au vu de leurs pics démarqués et rapprochés. Un débit record de $7,139m^3/s$ a été enregistré le 15 juillet.

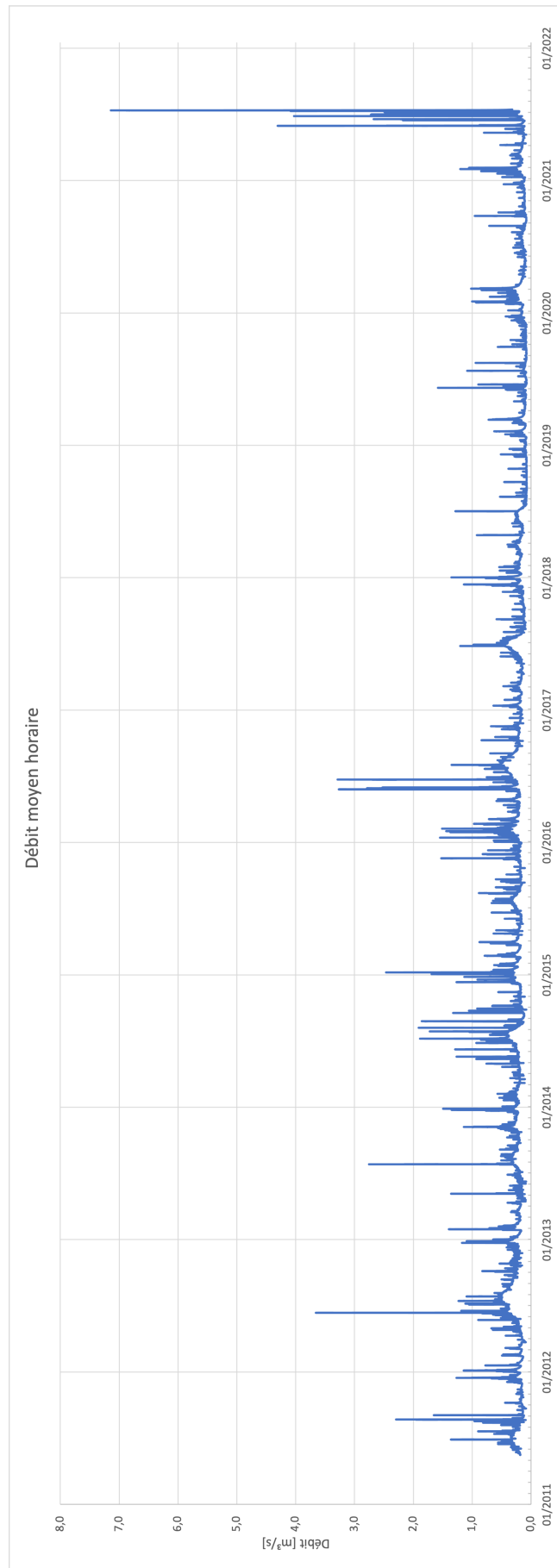


FIGURE 4.8 : Débit moyen horaire de la station L7520 depuis sa mise en service.

Débits caractéristiques	Valeurs (m^3/s)
Minimum des débits horaires	0,071
Maximum des débits horaires	7,139
Moyenne des moyennes annuelles (module)	0,229
Moyenne des médianes (P50) annuelles	0,190
Moyenne des percentiles 5 (P5) annuels	0,127
Moyenne des percentiles 95 (P95) annuels	0,409

TABLE 4.1 : Débits caractéristiques de la station L7520.

En ignorant les crues de l'été 2021, les 10 pires épisodes de crue de la station sont repris dans le tableau 4.2 et repérés à la figure 4.9.

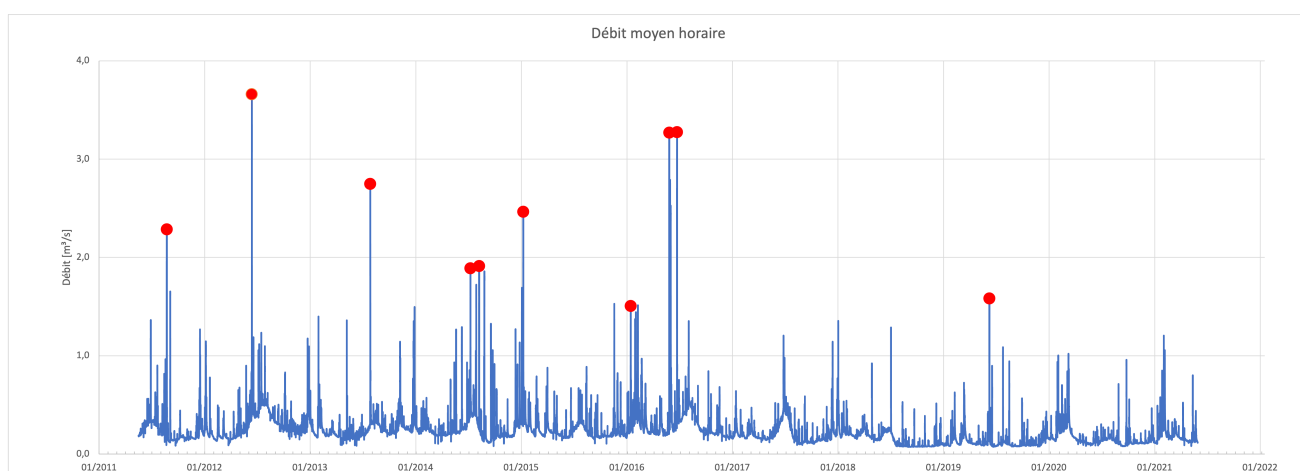


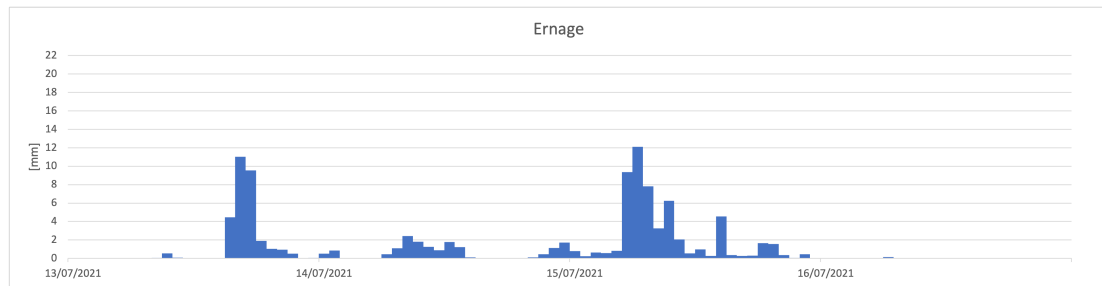
FIGURE 4.9 : 10 pires épisodes de la station L7520 en excluant les crues de 2021.

Date	Débit (m^2/S)
12/06/2012 - 14/06/2012	3,658
23/06/2016 - 26/06/2016	3,289
27/05/2016 - 10/06/2016	3,267
27/07/2013 - 29/07/2013	2,747
08/01/2015 - 12/01/2015	2,464
22/08/2011 - 25/08/2011	2,284
08/08/2014 - 13/08/2014	1,191
09/07/2014 - 12/04/2014	1,888
25/08/2014 - 31/08/2014	1,857
10/06/2019 - 12/06/2019	1,582

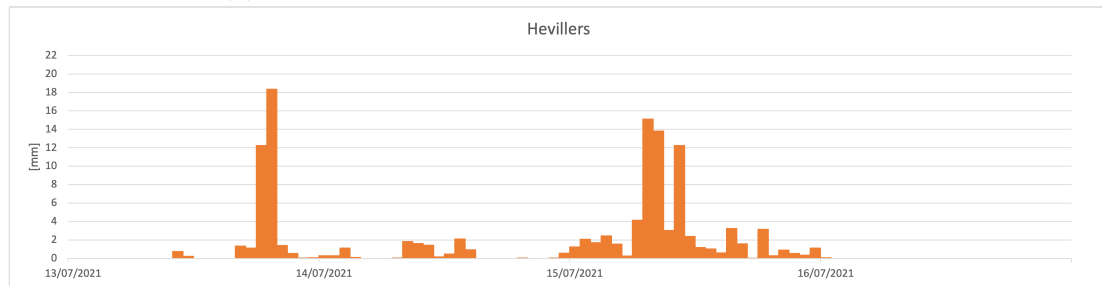
TABLE 4.2 : 10 pires épisodes de crue de la station L7520.

4.2.3 Données de pluie

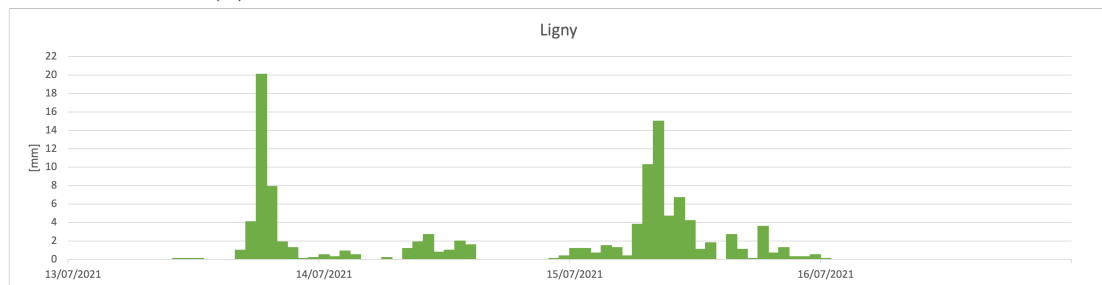
Après analyse des polygones de Voronoï à la figure 4.7, il apparaît que les trois stations partageant le bassin versant se situent à Ernage [X :172697, Y :141325], Hevillers [X :165524, Y :143755] et Ligny [X :163707, Y :133164] couvrant respectivement 75,95%, 23,39% et 0,66% de celui-ci.



(a) Précipitations à Ernage du 12 au 17 juillet 2021.



(b) Précipitations à Hevillers du 12 au 17 juillet 2021.



(c) Précipitations à Ligny du 12 au 17 juillet 2021.

FIGURE 4.10 : Précipitations aux trois stations pluviométriques couvrant le bassin versant du 12 au 17 juillet 2021.

Les graphes présentés à la figure 4.10 ont la même allure générale ce qui est logique compte tenu de leur proximité géographique. Cependant, les quantités captées par chacun des pluviomètres varient, les graphes étant à la même échelle cela est bien visible. Par exemple, le 13 juillet Ligny (figure 4.10c) a réceptionné

presque le double d'eau d'Ernage (figure 4.10a).

4.2.4 Construction du modèle hydrologique

Les données de pluies et de débits observés doivent être transformées dans un format accessible par MERCEDES. Cela se fait aisément à l'aide du module VI-SHYR : un fichier .txt contenant les pluies et débits et un fichier d'entête .csv avec les informations des stations (numéro, nom, coordonnées et type -pluviomètre ou limnimètre-) sont transformés en un fichier "63".

Il ne reste alors plus qu'à introduire le bassin versant, les pluies et débits (fichier "63") et les paramètres du modèle avant de lancer MERCEDES.

A la figure 4.11 se trouve le résultat du modèle (l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant, ici Blanmont) pour les pluies du 12 au 17 juillet (figure 4.10) et les paramètres (4.4), dont la signification est rappelée, sont les suivants :

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 S : 200[mm] & \text{Capacité de stockage du sol} \\
 \frac{I_a}{S} : 0,1[/] & \text{Perte initiale avant tout ruissellement} \\
 \omega : 0,2[/] & \text{Fraction de la vidange qui participe au ruissellement} \\
 \frac{1}{C_{vid}} : 1 \left[\frac{1}{\text{jour}} \right] & \text{Coefficient de vidange} \\
 V_0 : 1 \left[\frac{m}{s} \right] & \text{Vitesse initiale de l'eau} \\
 \alpha : 0 \left[\frac{1}{\text{jour}} \right] & \text{Coefficient lié à la vitesse de propagation de l'écoulement} \\
 K_0 : 0[/] & \text{Coefficient lié au temps de diffusion} \\
 K_1 : 0,7[min] & \text{Coefficient lié au temps de diffusion}
 \end{array} \right. \quad (4.4)$$

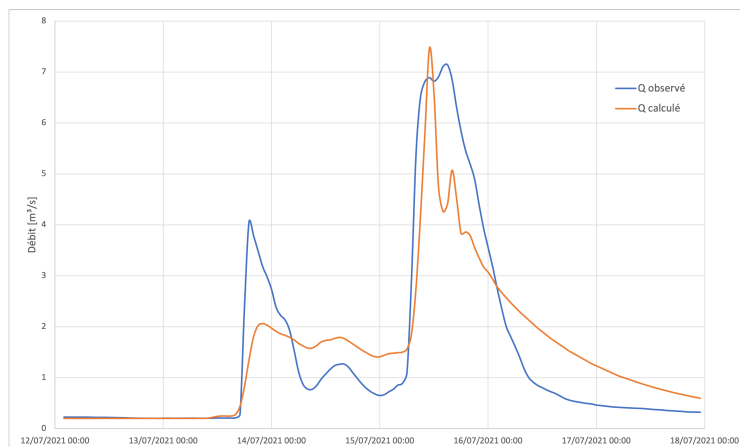


FIGURE 4.11 : Résultat du modèle - 12 au 17 juillet 2021.

Après l'obtention de ce premier résultat, il est alors possible d'optimiser les paramètres à l'aide d'une fonction intégrée dans MERCEDES. Le critère d'optimisation utilisé est le critère NASH basé sur l'erreur quadratique moyenne :

$$1 - \frac{\sum_i (X_i^2 - Y_i^2)}{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (4.5)$$

Dans ce travail, il a été choisi d'optimiser les paramètres S et V_0 . Ce qui donne alors, après avoir également adapté le coefficient de vidange manuellement, le résultat à la figure 4.12 avec les paramètres (4.6) suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} S : 182[mm] \\ \frac{I_a}{S} : 0,2[/] \\ \omega : 0,2[/] \\ \frac{1}{C_{vid}} : 1 \left[\frac{1}{jour} \right] \\ V_0 : 1.4 \left[\frac{m}{s} \right] \\ \alpha : 0 \left[\frac{1}{jour} \right] \\ K_0 : 0[/] \\ K_1 : 0,7[min] \end{array} \right. \quad (4.6)$$

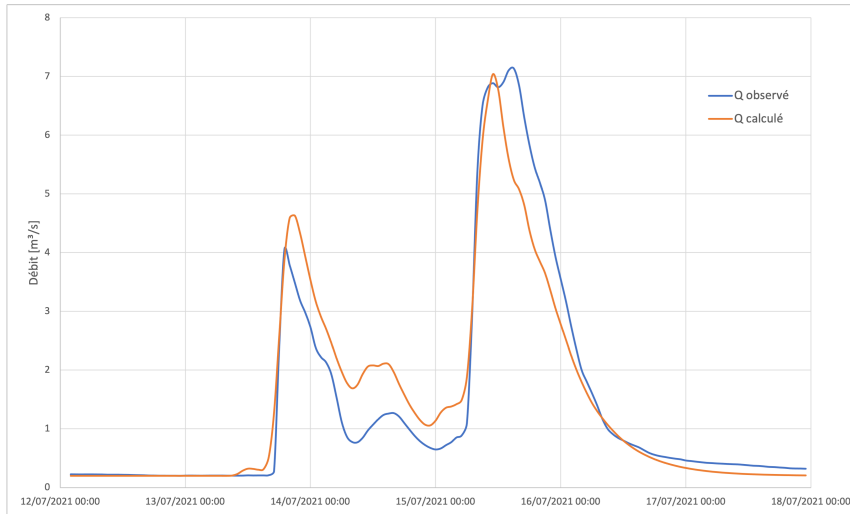


FIGURE 4.12 : Résultat du modèle après optimisation - 12 au 17 juillet 2021.

Ce résultat coïncide bien mieux avec les débits observés que celui présenté à la figure 4.11.

Calage du modèle

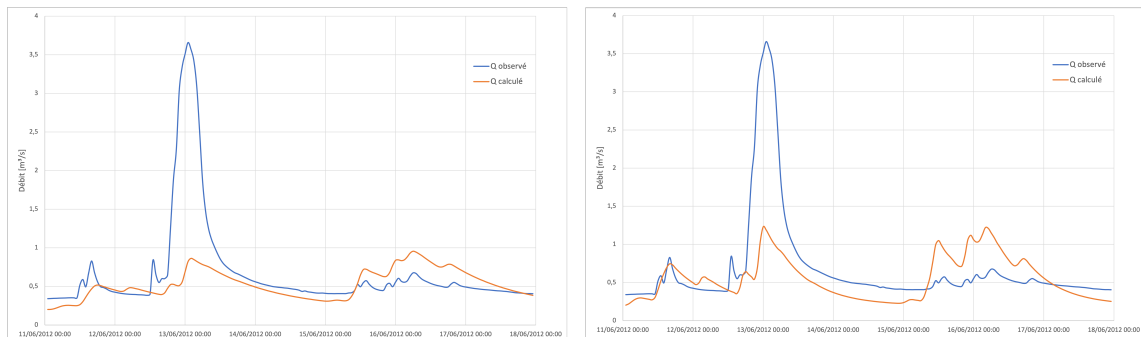
L'événement du 15 juillet étant exceptionnel (débit de $7,139 \text{ m}^3/\text{s}$ atteint), ce n'est pas sur lui que le modèle hydrologique du bassin va être calé.

Le pire événement précédent 2021 (présenté dans le tableau 4.2), en 2012, dont le débit atteint à peine 51% de celui du 15 juillet, a été sélectionné.

Il faut alors noter que Ligny est la seule des trois stations décrites dans la sous-section 4.2.3 pour laquelle il y a un accès aux données hors de l'été 2021. La suite du calage se fera donc uniquement avec ce pluviomètre.

Après optimisation, le modèle avec les paramètres 4.7 suivant est obtenu :

$$\left\{ \begin{array}{l} S : 202[mm] \\ \frac{I_a}{S} : 0,2[/] \\ \omega : 0,2[/] \\ \frac{1}{C_{vid}} : 1 \left[\frac{1}{\text{jour}} \right] \\ V_0 : 4 \left[\frac{m}{s} \right] \\ \alpha : 0 \left[\frac{1}{\text{jour}} \right] \\ K_0 : 0[/] \\ K_1 : 0,7[min] \end{array} \right. \quad (4.7)$$



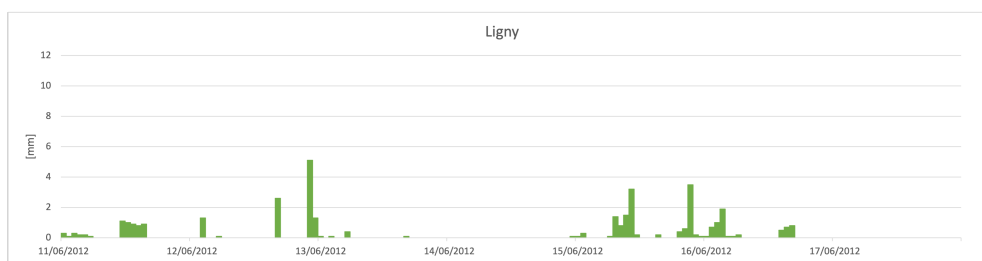
(a) Résultat du modèle sans optimisation - 11 au 17 juin 2012. (b) Résultat du modèle après optimisation - 11 au 17 juin 2012.

FIGURE 4.13 : Résultat du modèle pour l'épisode du 11 au 17 juin 2012.

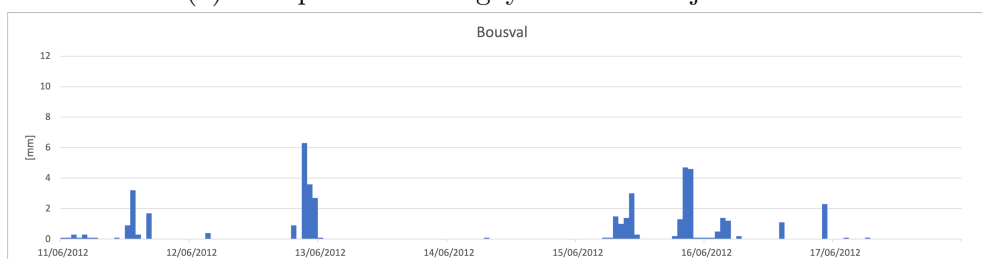
Il se passe dans ce cas-ci quelque chose qui n'est à priori pas logique. Comme visible à la figure 4.7, le pic de cet événement n'est pas reproduit par le modèle. Cependant, il suffit d'observer la figure 4.15 présentant les précipitations de cette station et des deux autres stations non loin (voir 4.14) pour mieux comprendre.



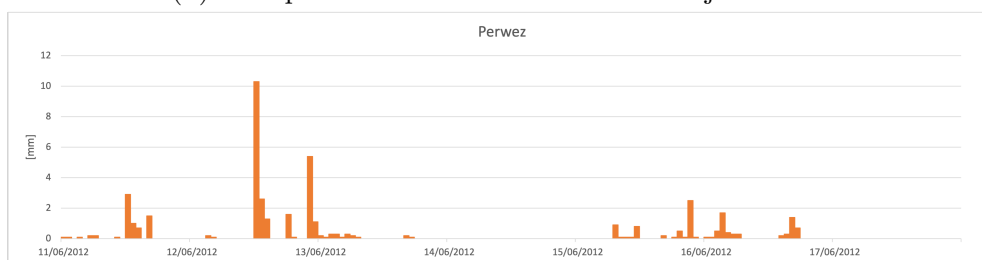
FIGURE 4.14 : Localisation des pluviomètres par rapport au bassin versant.



(a) Précipitations à Ligny du 11 au 17 juin 2012.



(b) Précipitations à Bousval du 11 au 17 juin 2012.



(c) Précipitations à Perwez du 11 au 17 juin 2012.

FIGURE 4.15 : Précipitations de trois stations pluviométriques du 11 au 17 juin 2012.

Au sein même du graphique pour Ligny (figure 4.15a), on voit que le premier pic du 13 juin n'est proportionnellement pas beaucoup plus grand que le pic du 15 au 17 juin qui lui semble avoir été mieux calculé par le modèle. Le pic du 13 juin n'est pas été ressenti longtemps ni fortement par le pluviomètre de Ligny contrairement à Bousval qui l'a ressenti un peu plus longtemps et Perwez un peu plus intensément. Avec une combinaison des trois pluviomètres, le résultat serait peut-être plus réaliste bien que les intensités des pics restent relativement faibles.

Un autre épisode va alors être préféré à cette solution. Il s'agit du deuxième pire épisode, lui aussi référencé dans le tableau 4.2, s'étant déroulé en 2016 du 23 au 26 juin.

Seul le résultat après optimisation est présenté à la figure 4.16, accompagné de ses paramètres (4.8) :

$$\left\{ \begin{array}{l} S : 201 [mm] \\ \frac{I_a}{S} : 0,2 [/] \\ \omega : 0,2 [/] \\ \frac{1}{C_{vid}} : 1 \left[\frac{1}{jour} \right] \\ V_0 : 4 \left[\frac{m}{s} \right] \\ \alpha : 0 \left[\frac{1}{jour} \right] \\ K_0 : 0 [/] \\ K_1 : 0,7 [min] \end{array} \right. \quad (4.8)$$

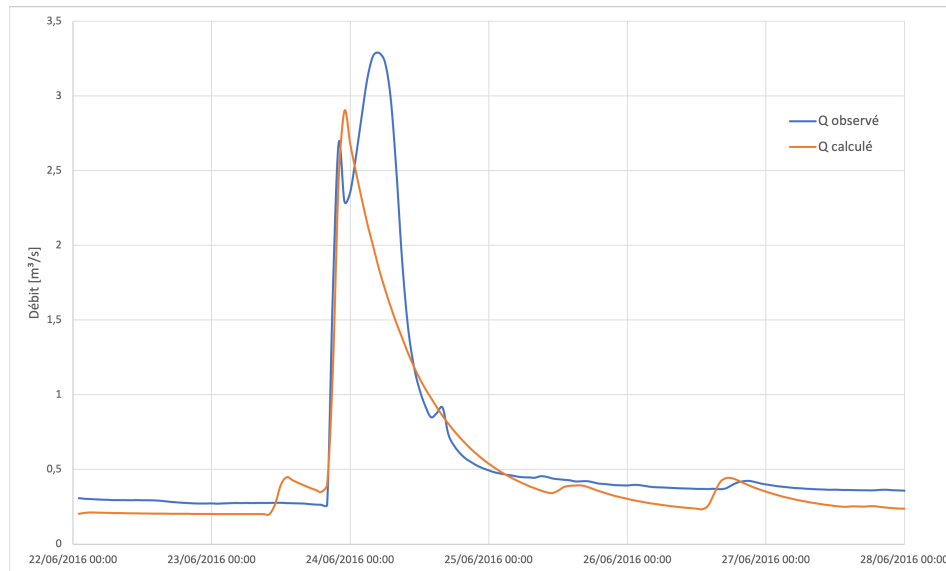
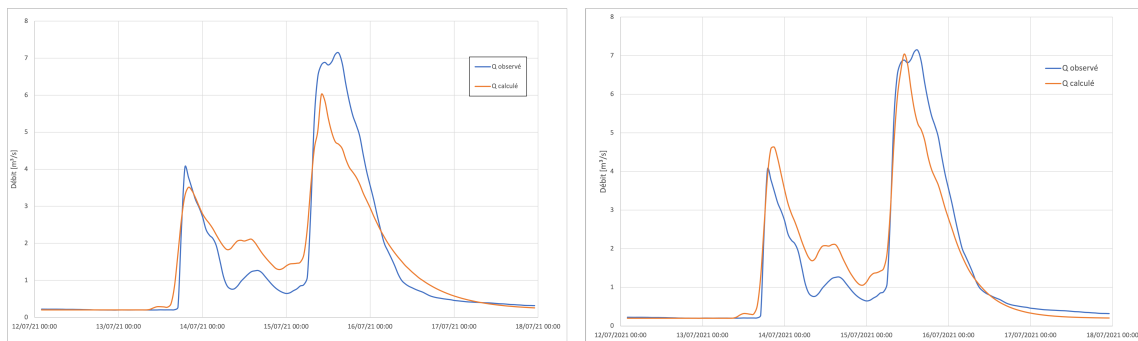


FIGURE 4.16 : Résultat du modèle après optimisation - 23 au 23 juin 2016.

Les paramètres sont proches des paramètres typiques pour des couvertures de sol et des situations hydrologiques similaires, notamment la capacité de stockage dont les plages sont reprises en annexe C.

4.3 Calcul des hydrogrammes

La calibration étant terminée, elle peut être validée sur l'événement exceptionnel du 15 juillet 2021. Les paramètres (4.8) sont ceux définis précédemment, il n'y a plus d'optimisation. Les résultats sont visibles à la figure 4.17a.



(a) Résultat du modèle calibré sur base de l'événement en 2016 - 12 au 17 juillet 2021.

(b) Résultat du modèle calibré sur l'épisode même - 12 au 17 juillet 2021.

FIGURE 4.17 : Comparaison des résultats obtenus pour différents calibrages - 12 au 17 juillet 2021.

Le modèle établi représentant suffisamment bien le fonctionnement du bassin, il peut être appliqué aux points réels de départ de l'étude. Ceux-ci peuvent être visualisés avec leurs bassins versant à la figure 4.18.

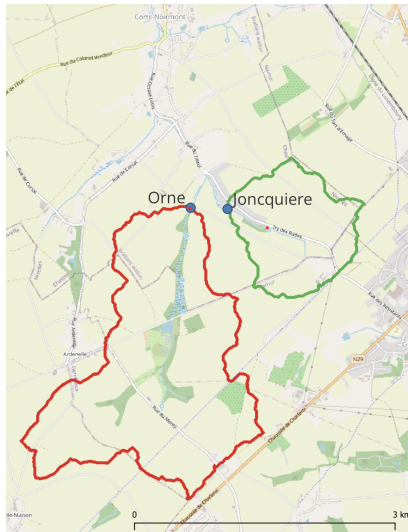


FIGURE 4.18 : Bassin versant de l'Orne et la Jonquière aux points de départ de l'étude.



FIGURE 4.19 : Situation des bassins versants aux points de départ de l'étude par rapport au bassin versant à Blanmont.

Toujours avec les mêmes paramètres (4.8), les hydrogrammes obtenus, se trouvant aux figures 4.20 et 4.21, sont ceux à introduire dans le modèle hydraulique afin de simuler la crue de l'été 2021.

Les résultats paraissent à première vue faibles mais la taille des bassins versant par rapport à celui calculé à Blanmont (voir figure 4.19) ainsi que leur position, fort en amont, peuvent expliquer cette différence.

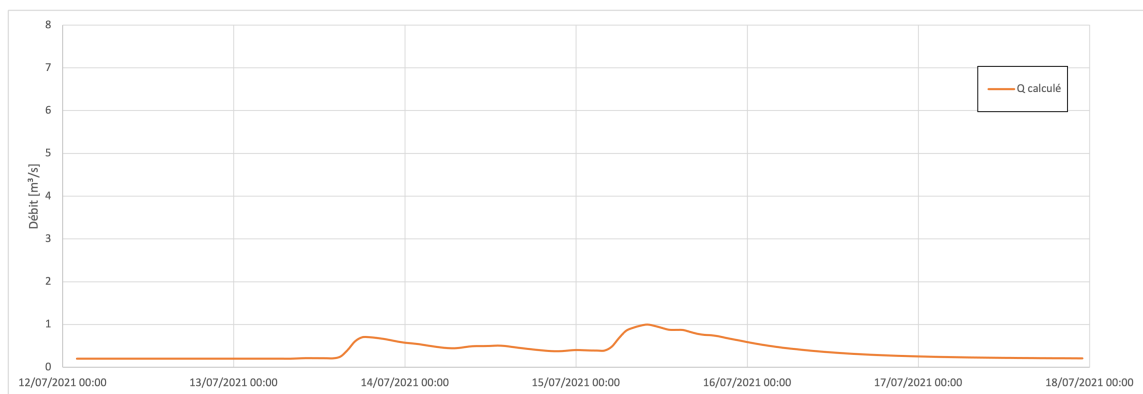


FIGURE 4.20 : Résultat du modèle calibré sur base de l'événement en 2016 pour le point de départ sur l'Orne - 12 au 17 juillet 2021.

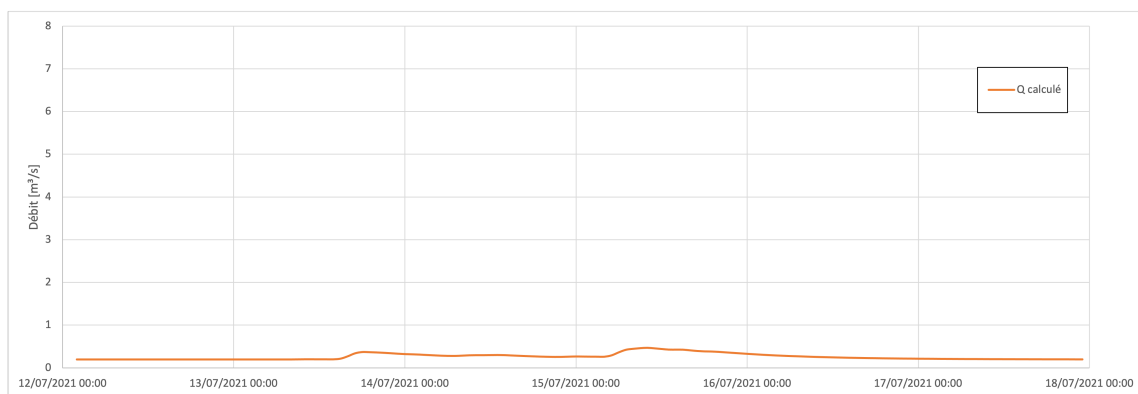


FIGURE 4.21 : Résultat du modèle calibré sur base de l'événement en 2016 pour le point de départ sur la Joncquière - 12 au 17 juillet 2021.

Chapitre 5

Modélisation hydraulique

La modélisation hydraulique consiste à analyser comment l'eau se déplace, ralentit, avance ou déborde [25].

5.1 HydroFlow

La modélisation hydraulique se fera grâce à "HydroFlow", un programme développé et continuellement amélioré par Prof. Soares-Frazão de l'UCLouvain et son équipe. Il s'agit d'un programme en C++ pour résoudre des équations d'eau peu profonde avec des volumes finis.

Les explications qui suivent se basent sur le "Wiki" du Git¹ où le programme HydroFlow est repertorié.

La méthode des volumes finis est une méthode numérique pour laquelle le domaine est divisé en éléments. Le maillage peut être structuré ou non mais dans le cas où il ne l'est pas et est composé de triangles, tous les éléments ont deux ou trois éléments voisins en fonction de s'ils se trouvent sur la frontière ou pas. A chaque itération, les variables pour chaque élément sont mises à jour de la manière qui suit :

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Omega_i} \sum_{j=1}^{nb} T_j^{-1} F_j^*(\bar{U}_j) L_j + S_i \Delta t \quad (5.1)$$

Où U : vecteur des variables

n : exposant temporel

i : indice spatial

Δt : pas de temps

Ω_i : aire de l'élément i

¹Git est un logiciel de gestion de versions décentralisé.

nb : nombre d'éléments dans le domaine
 T : matrice de rotation
 F_j^* : flux à la frontière de l'élément
 L_j : longueur de la frontière j
 S : termes sources

Dans le cas d'HydroFlow, un solveur HLLC résout les équations de Saint-Venant (5.2) pour déterminer les flux [31].

Les hypothèses suivantes permettent d'arriver aux équations de Saint-Venant [14] :

- Le fluide est incompressible, ρ ne varie pas.
- La pente du lit est assez faible, de sorte que $h = z_w - z_b$, la hauteur d'eau est toujours mesurable.
- Les lignes de courant sont parallèles, impliquant une distribution de pression hydrostatique et permettant de calculer la vitesse telle que : $V = Q/A$, où Q est le débit et A l'aire de la section.
- Les pertes de charges sont calculées en faisant usage de la formule de Manning, en considérant un écoulement uniforme.

$$\begin{cases} \frac{\delta A}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = 0 \\ \frac{\delta Q}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = gA(S_0 - S_f) + gI_2 \end{cases} \quad (5.2)$$

où A : aire de la section

Q : débit

g : accélération gravitationnelle

S_0 : pente de fond

S_f : pente de la ligne de charge

$I_1 = A \frac{h}{2}$ pour un canal rectangulaire

$I_2 = 0$ pour un canal de largeur constante

5.1.1 Fonctionnement du programme

Comme mentionné, le code qui résout les équations explicitées juste avant est écrit dans le langage C++. Pour l'utilisateur, cette partie du programme peut être considérée comme une "boîte noire", il ne devra pas interagir avec celle-ci.

En effet, pour lancer la simulation, une interface python a été implémentée pour faciliter l'utilisation.

A présent, les fonctions du code utilisées dans ce travail vont être expliquées :

- Création d'une instance de maillage à partir d'un fichier .msh (créé avec GMSH) :
`mesh = hydroflow.mesh(mesh_path)`
- Assignation des hauteurs des noeuds du maillage à partir d'un fichier .tif afin de représenter la topographie (le modèle numérique de terrain dans ce cas-ci) :
`mesh.set_nodes_elevation_from_tif("MNT_init.tif")`
- Création du modèle basé sur le maillage introduit :
`model = hydroflow.Model(mesh)`
- Condition sur les régions : le coefficient de frottement (Manning) :
`model.set_friction_coefficient ("domain" ,0.03)`
- Etablissement des conditions frontières :
 - Ecoulement libre de l'eau :
`model.set_transmissive_boundaries("Contour")`
 - Débit constant ($m^3/s/m$) :
`model.set_boundary_water_discharge("Q_in_orne",-0,127/2,531)`
 A noter que la valeur est négative lorsque le débit imposé rentre dans le domaine et positif lorsqu'il sort.
 - Hydrogramme sous forme .txt :
`model.set_boundary_hydrogram ("Q_in_orne" ,"opti2016_orne21.txt")`
- Paramètres globaux tels que le nom, la durée de la simulation (en secondes) :
`model.set_name("Cortil-Noirmont")`
`model.set_ending_time(40000)`
- Pas de temps auquel la résolution des équations est enregistrée
`model.set_pic(pic_array = np.arange(0,5000,1000).tolist())`
- Transformation des informations données en un fichier texte pour le code en C++ et lancement de la simulation :
`model.export()`
`model.solve(isParallel=True)`
- Relancer la simulation à partir d'une simulation précédente :
`model.resume_simulation("pic_33000_00.txt",isParallel=True)`

Pour chaque pas de temps, un fichier .txt est produit contenant pour chaque noeud : coordonnées (X et Y), hauteur du noeud (z_b), hauteur d'eau (h), débits dans les directions x et y (q_x et q_y).

Il est alors possible visualiser l'évolution de la simulation avec différentes fonctions plot qui ne seront pas détaillées ici. Dans le cas de ce travail, le logiciel QGIS sera utilisé pour faire la visualisation.

5.2 Choix du domaine étudié

Avant de pouvoir lancer la première simulation, le domaine sur lequel celle-ci sera appliquée doit être choisi. Pour la présente étude, il était évident qu'il devait comprendre la ZEC afin que son influence sur les crues puisse être étudiée.

Le domaine a été choisi en consultant la *Cartographie des zones inondées - juillet 2021* [39]. Pour rappel, l'objectif est de reproduire les inondations s'étant produites à cette période pour ensuite proposer des solutions afin de prévenir des événements similaires futurs. Il couvre principalement les rues du Tilleul et Octave Lottin qui suivent l'Orne à travers Cortil-Noirmont et s'arrête juste avant la confluence avec le Rau de l'Ernage. Sur la figure 5.1, le domaine est délimité en rouge, la localisation de la ZEC est marquée d'un point et les aires vertes représentent les zones inondées en juillet 2021.

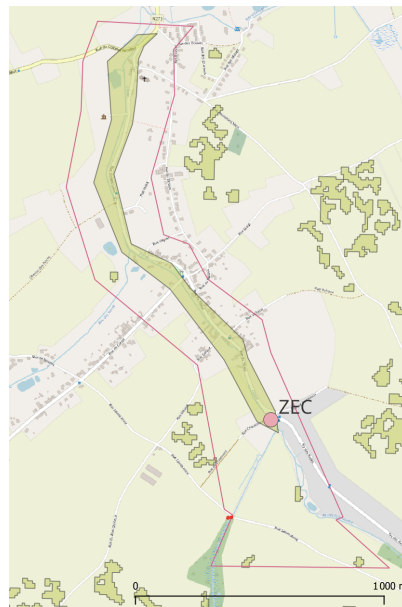


FIGURE 5.1 : Domaine sélectionné pour l'étude.

5.3 Ajout de la zone d'expansion de crue dans le modèle numérique de terrain (MNT)

Le MNT, à partir duquel la hauteur de chacun des noeuds est assignée est *Relief de la Wallonie - Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2013-2014*. Il se base sur des données issues d'acquisitions Lidar effectuées entre 2012 et 2014 [41]. La ZEC inaugurée en 2019 n'y est pas représentée .

Etant l'un des points clés de cette étude, si elle n'était pas intégrée au MNT, elle ne pourrait pas être prise en compte dans la simulation. Celle-ci a donc été modélisée sur base d'un plan "as-built" fourni par la Province. Pour ce faire, plus de 250 points (X,Y,Z)(voir annexe B) ont été placés et ensuite interpolés de part et d'autre de l'Orne (côté rue et côté prairie). Il suffit alors de fusionner les interpolations obtenues au MNT existant afin de remplacer les valeurs par celles souhaitées.

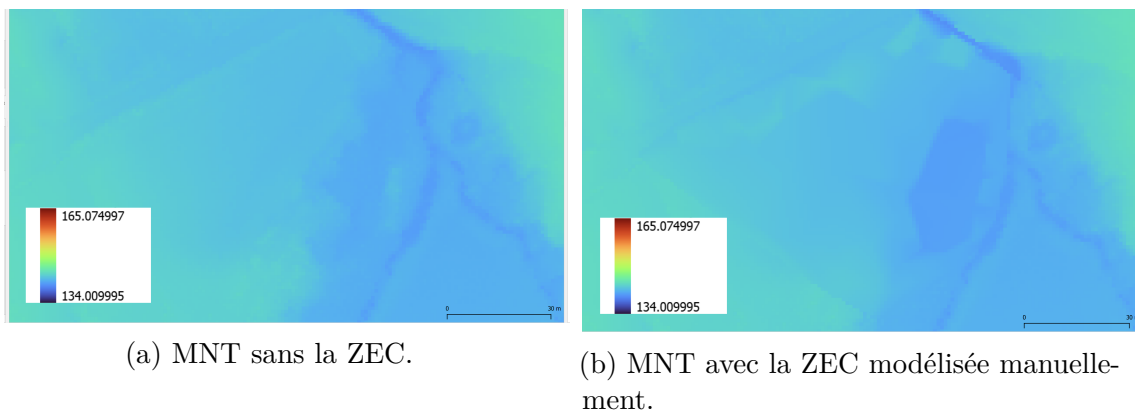


FIGURE 5.2 : Comparaison entre le MNT avec et sans ZEC, zoomée sur la zone.

La comparaison du MNT avant et après ajout de la ZEC peut être visualisée à la figure 5.2. Ayant été créée manuellement et avec un nombre limité de points, quelques problèmes notamment au niveau de l'intersection avec la rivière sont à mentionner.

C'est pour cette raison qu'un MNT créé à partir de données acquises en 2021-2022, *Relief de la Wallonie - Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2021-2022[40]*, et découvert après la modélisation manuelle ci-dessus, sera utilisé dans le reste du travail. Une comparaison entre les deux est présentée à la figure 5.3 où il est possible de voir que la modélisation manuelle était assez bonne mais reste moins précise.

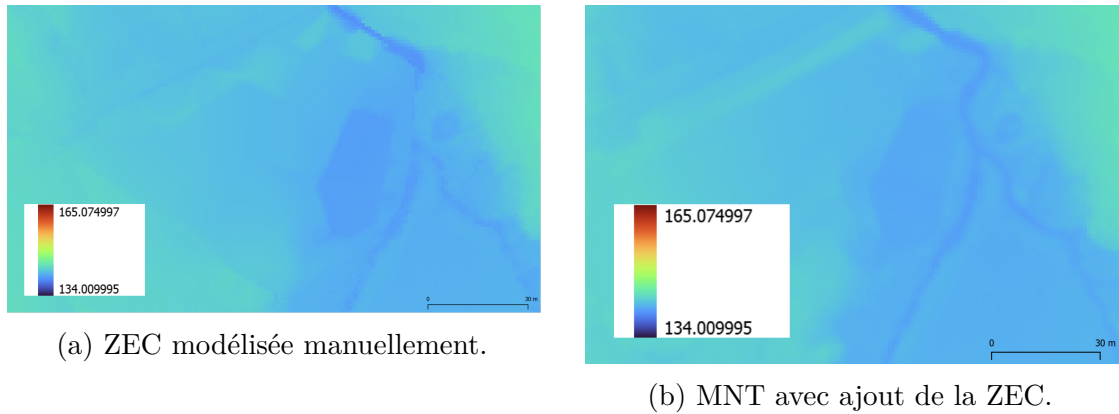


FIGURE 5.3 : Comparaison entre la ZEC modélisée manuellement et dans le MNT 2021-2022[40].

5.4 Situation initiale : remplissage de la rivière

Une fois le domaine établi, le maillage de ce dernier créé, et la zone d'expansion de crue représentée, la première simulation peut être lancée. Il s'agit d'une simulation avec un petit débit afin de remplir la rivière. En effet, les rivières sont rarement à sec, encore moins dans le contexte de l'été 2021 où les épisodes de pluie se sont enchaînés.

Pour remplir la rivière, le débit caractéristique P5 (présenté dans le tableau 4.1) valant $0,127 \text{ m}^3/\text{s}$ a été choisi.

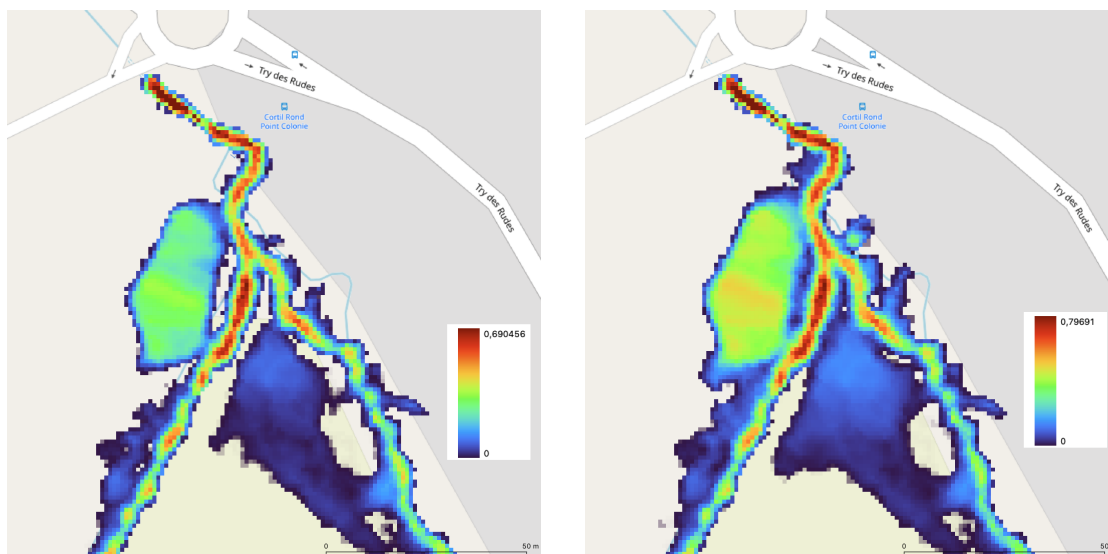
Au terme de cette première simulation, des résultats plutôt étonnants sont obtenus, comme visibles à figure 5.4. L'eau déborde de la rivière et atteint des hauteurs dépassant le mètre, ce qui est improbable au vu du débit introduit.



FIGURE 5.4 : Résultat de simulation après 80 000 secondes.

5.4.1 Correction du MNT : ponts

Après analyse des résultats à différents pas de temps, un premier constat est fait. L'eau ne semble pas couler sous les ponts et doit déborder avant de pouvoir continuer sa route. L'eau, arrivée au pont à la sortie de la ZEC après un peu moins de 3000 secondes (voir figure 5.5a), n'avait toujours pas atteint l'autre côté du pont après 3500 secondes (voir figure 5.5). Elle a finalement débordé par la route comme visible à la figure 5.4.



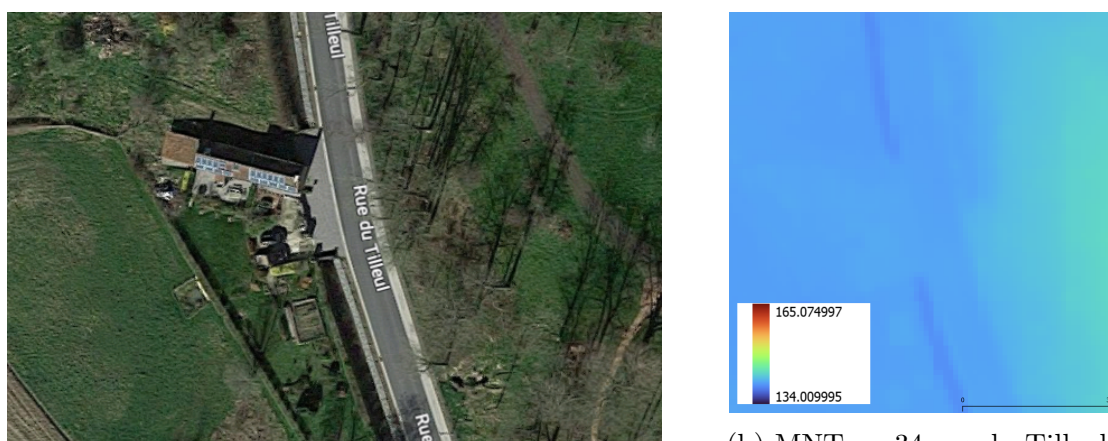
(a) Résultat de simulation après 3000 secondes.

(b) Résultat de simulation après 3500 secondes, zoom sur le pont à la sortie de la ZEC.

FIGURE 5.5 : Zoom du résultat de simulation à la sortie de la ZEC.

Les ponts semblent donc représentés dans le modèle numérique de terrain alors qu'ils ne devraient pas l'être.

A la figure 5.6, cela est confirmé avec un exemple pour le numéro 34 de la rue du Tilleul possédant un accès à l'habitation par-dessus l'Orne. A cet endroit, le lit de la rivière, représenté en bleu foncé sur le MNT, est interrompu.



(a) Vue aérienne du 34 rue du Tilleul.

(b) MNT au 34 rue du Tilleul.

FIGURE 5.6 : Zoom au 34 rue du Tilleul.

Pour pallier à ce problème, chacun des ponts a été "effacé" du MNT manuel-
 lement moyennant une interpolation linéaire entre une section de rivière avant et
 une section de rivière après le pont effacé. Ce principe est illustré à la figure 5.7
 pour le pont à la sortie de la ZEC.

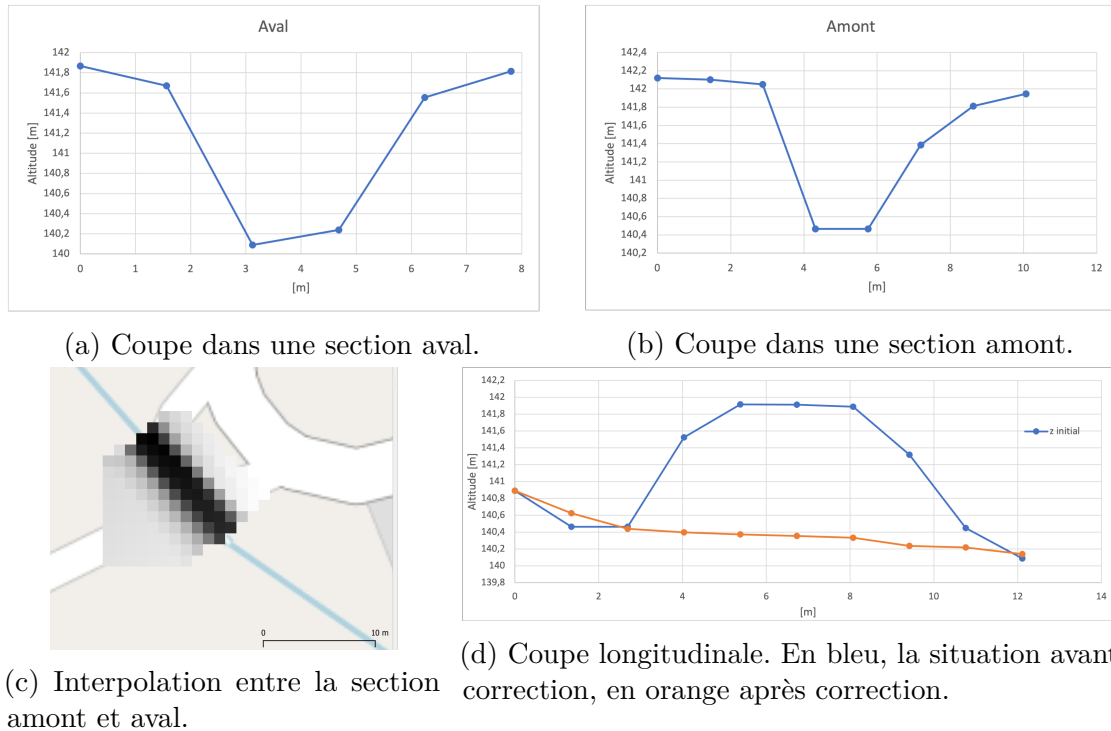


FIGURE 5.7 : Exemple de correction d'un pont : pont après la ZEC.

Après correction de tous les ponts, plusieurs simulations ont été effectuées,
 chacune permettant de corriger les nouveaux problèmes du MNT se révélant au fur
 et à mesure.

Après un nombre important de simulations, et malgré un raffinement du maillage
 jusqu'à des mailles de 1m au niveau du lit mineur (initialement 10m), force a été
 de constater que l'eau sortait toujours de son lit malgré le débit très faible (pour
 rappel, $0,127 \text{ m}^3/s$).

Sur la figure 5.8, une ultime simulation est présentée.

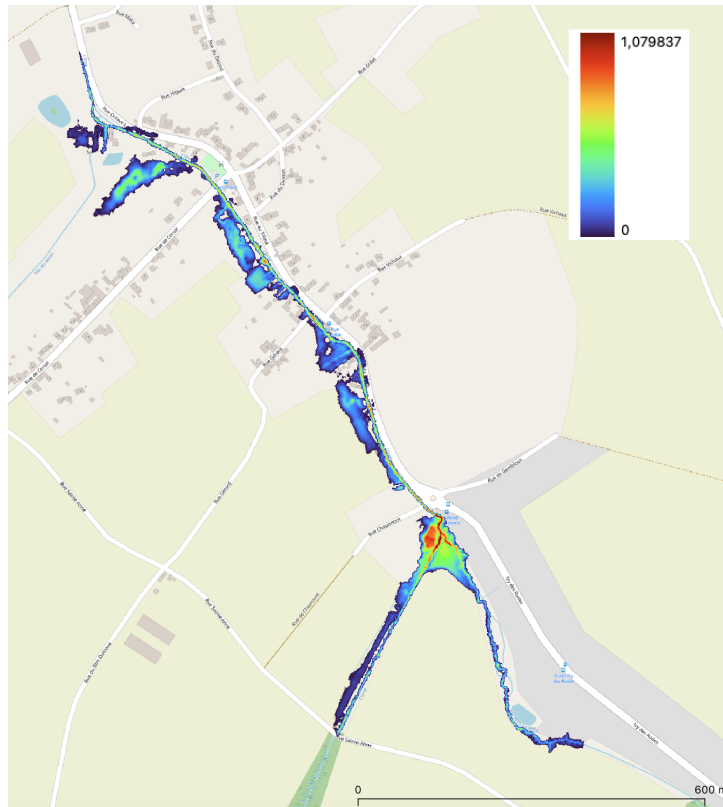


FIGURE 5.8 : Résultat de simulation après 19 000 secondes.

Dans les conditions présentes, il est difficilement envisageable obtenir une simulation d'inondation représentative de la réalité.

Une amélioration de la qualité des simulations est possible mais demanderait un long travail de relevé topographique précis du lit de la rivière pour corriger celui-ci dans le MNT.

Toutefois le résultat montre que le MNT semble plus fiable en amont de la ZEC, endroit sans habitations, par rapport à la zone bâtie.

L'étude sera donc poursuivie en se focalisant sur la ZEC et sa partie amont. L'objectif à présent sera de simuler le remplissage et débordement de la ZEC pour ensuite étudier le gain de temps relatif lors de l'ajout d'une ou plusieurs autres ZEC en amont de la première.

5.5 Simulation sur un nouveau domaine

Le nouveau domaine d'étude est présenté à la figure 5.9. Les points de départ de la simulation ont été reculés afin d'englober une plus grande partie en amont de la ZEC et déjà correspondre au domaine nécessaire pour l'étude de l'ajout de ZEC. La frontière aval reste la même que celle précédemment établie, ceci afin d'éviter que le profil M2, généré à cet endroit en raison de la condition frontière transmissive, ne puisse avoir une influence sur la partie étudiée.

Le maillage en aval de la ZEC est défini plus grossièrement, les résultats dans cette partie n'étant pas pertinents pour la suite de l'étude.



FIGURE 5.9 : Nouveau domaine de simulation.

5.5.1 Situation initiale : remplissage de la rivière

Après correction du pont de la rue Sainte Anne après lequel commençait précédemment le domaine sur l'Orne et correction du canal de la ZEC (le pertuis en béton était également représenté dans le MNT), la simulation de remplissage a pu être lancée.

Les résultats sont visibles à la figure 5.11 et le résultat de simulation à 33 000 secondes (figure 5.10) sera utilisé comme situation initiale pour les simulations suivantes, l'état stationnaire étant atteint. En effet, il est observable que le niveau

d'eau ne change pas entre 33 000 et 39 000 secondes.

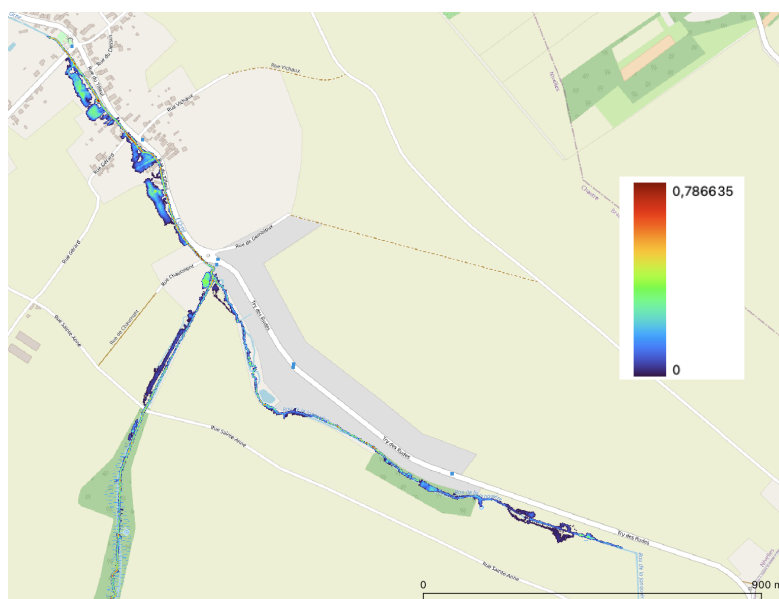


FIGURE 5.10 : Résultat de simulation après 33 000 secondes.

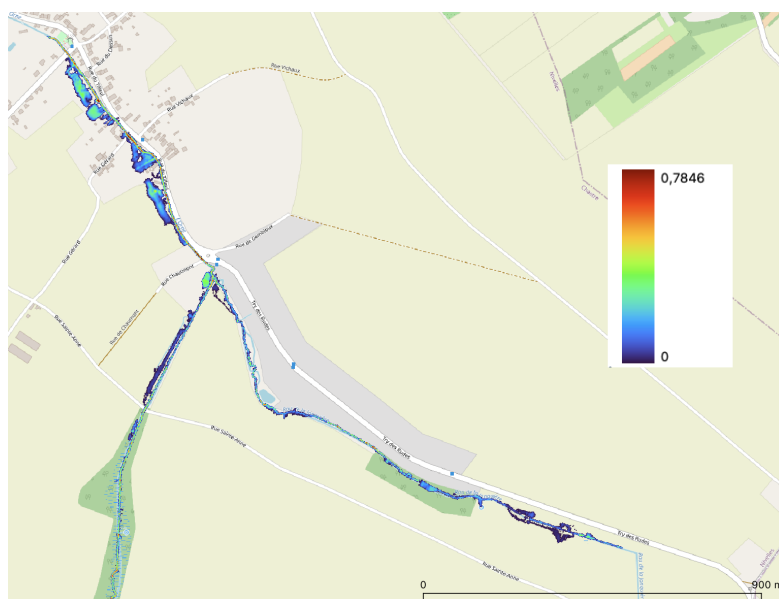


FIGURE 5.11 : Résultat de simulation après 39 000 secondes.

Comme annoncé précédemment, les résultats après la zone d'expansion de crue ne sont toujours pas corrects mais cela n'est pas important car l'intérêt principal se



FIGURE 5.12 : Zoom sur la d'intérêt de la simulation à 33 000 secondes.

porte sur la zone telle que présentée à la figure 5.12. Dans cette zone, les résultats ne sont pas parfaits mais peuvent être considérés comment représentatifs.

Chapitre 6

Aménagements

Ce chapitre présente deux aménagements supplémentaires modélisés sur la rivière ayant pour but d'améliorer l'efficacité des aménagements existants, et donc de mieux prévenir Cortil-Noirmont des inondations.

L'impact de l'ajout de ces deux aménagements supplémentaires est évalué par rapport à la situation existante.

6.1 ZEC existante

Le premier aménagement à analyser est celui de la ZEC déjà existante. La simulation de cette zone sera prise comme référence pour évaluer l'efficacité des aménagements proposés ensuite.

Comme expliqué dans le chapitre 3, la vanne de la ZEC n'est en théorie jamais entièrement fermée. Par soucis de simplification, l'hypothèse qu'elle peut l'être est faite ici. En effet, pour permettre la montée de l'eau dans le ZEC, un mur a été placé virtuellement dans le canal. Pour ce faire, la même méthode que pour la modélisation de la ZEC et les corrections du MNT est utilisée : des points (X,Y,Z) sont placés, ensuite interpolés et finalement fusionnés au MNT existant.

La hauteur du mur se situe à la cote 145, bien qu'en réalité le pertuis se situe aux alentours de la cote 142,3. Ceci pour s'assurer que l'eau monte dans la ZEC et s'évacue par le déversoir de sécurité une fois la capacité atteinte et non en passant par dessus le mur comme ça a été le cas lors de la première simulation de cet aménagement.

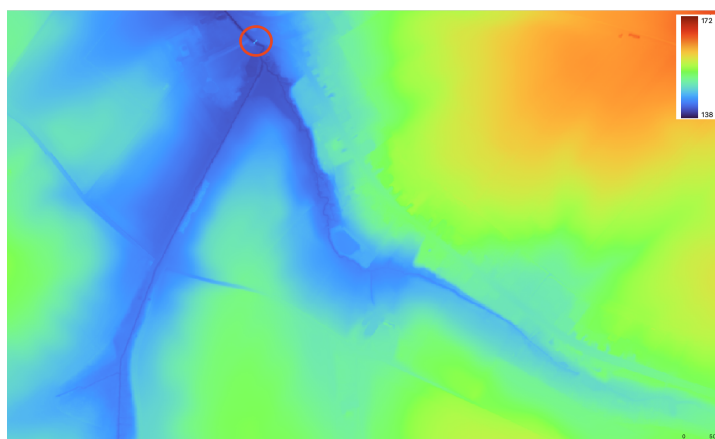
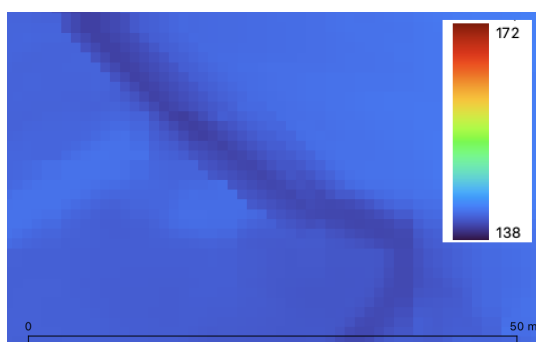
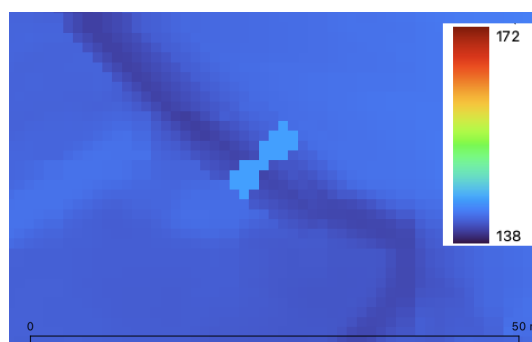


FIGURE 6.1 : Localisation de l'aménagement dans la zone d'étude.

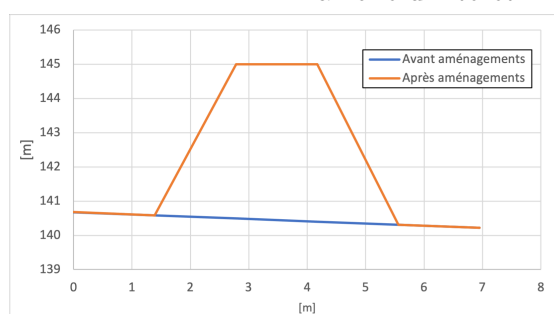
A la figure 6.2, l'aménagement est représenté sur le MNT avec une coupe longitudinale montrant la différence de cote dans celui-ci avant et après l'aménagement.



(a) MNT avant aménagement, zoomé sur la zone d'intérêt.



(b) MNT après aménagement, zoomé sur la zone d'intérêt.

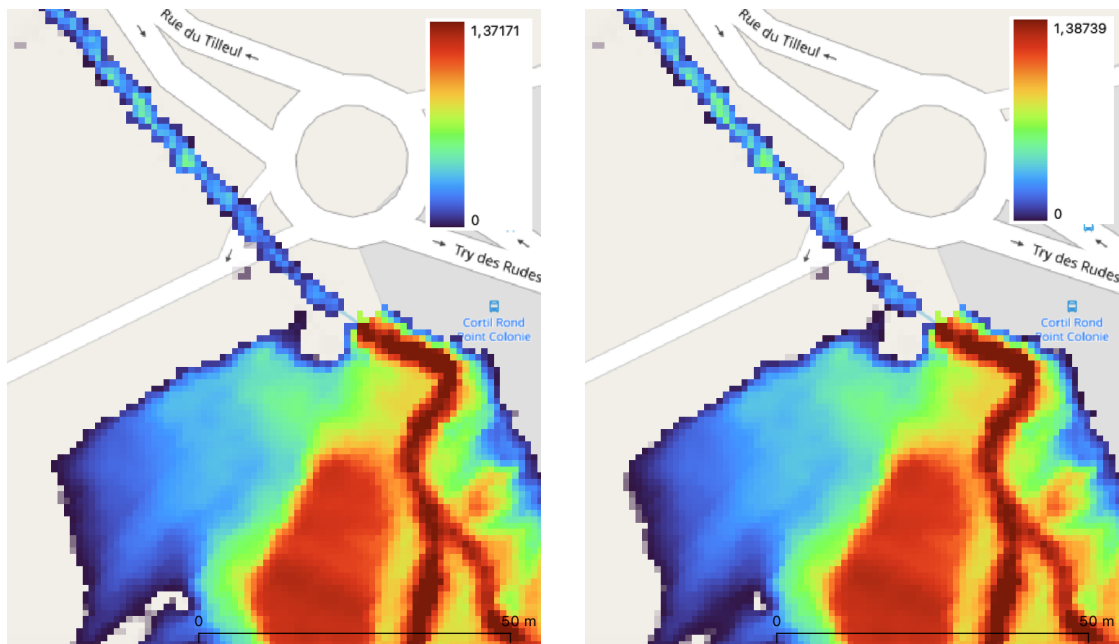


(c) Coupe longitudinale.

FIGURE 6.2 : Modélisation de l'aménagement de la ZEC existante : fermeture de la vanne.

La simulation est lancée jusqu'à ce que la ZEC déborde, signifiant que sa capacité a été atteinte. La figure 6.3 montre que la zone déborde entre 25 000 et 26 000 secondes.

C'est à ce pas de temps que l'état de la ZEC existante sera relevé lors des simulations des autres aménagements afin d'évaluer leur efficacité.



(a) Résultat de simulation après 25 000 secondes.

(b) Résultat de simulation après 26 000 secondes.

FIGURE 6.3 : Débordement de la ZEC lorsque la ZEC est fermée.

6.2 ZEC sur la Joncquièrre

Le deuxième aménagement modélisé se base sur une pré-étude réalisée par la province du Brabant wallon [10] et consiste en l'ajout d'une ZEC sur la Joncquièrre en amont de la Rue Try des Rudes, à hauteur du numéro 60, dans une prairie de part et d'autre de la rivière.

Pour modéliser celle-ci, une digue avec déversoir à la cote 151,5m est créée de la même manière que pour l'aménagement précédent, par interpolation de points et fusion au MNT.

La ZEC déjà existante est en position fermée afin que l'impact de la ZEC proposée puisse être évalué suivant le pas de temps auquel la première débordera.

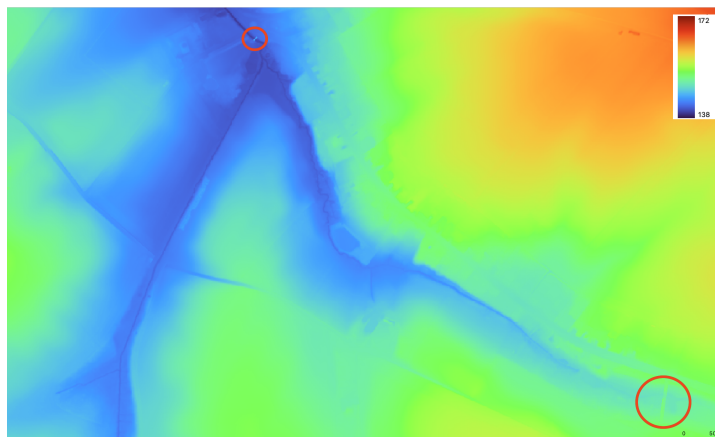
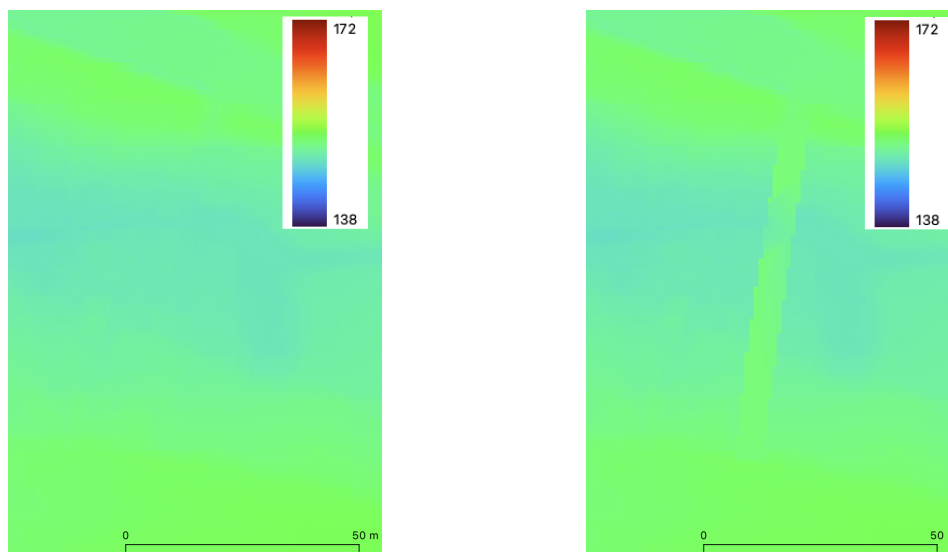


FIGURE 6.4 : Localisation des aménagements dans la zone d'étude.

A la figure 6.5, l'aménagement est représenté sur le MNT avec une coupe longitudinale montrant la différence de cote dans celui-ci avant et après l'aménagement.



(a) MNT avant aménagement, zoomé sur la zone d'intérêt.

(b) MNT après aménagement, zoomé sur la zone d'intérêt.

FIGURE 6.5 : Modélisation de l'aménagement de la ZEC ajoutée en amont de la rue Try des Rudes.

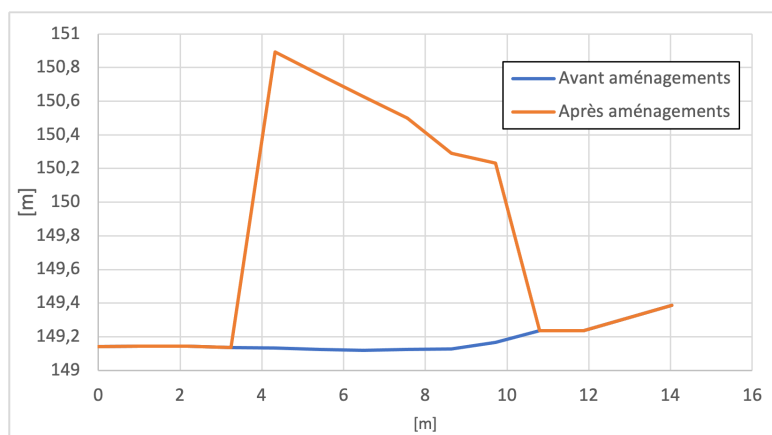


FIGURE 6.6 : Coupe longitudinale de l'aménagement.

26 000 secondes après le lancement de la simulation, la ZEC existante n'a pas encore débordé (figure 6.12), indiquant que la ZEC ajoutée a bel et bien un impact positif.

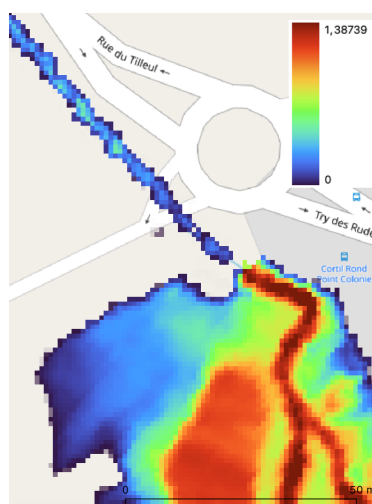
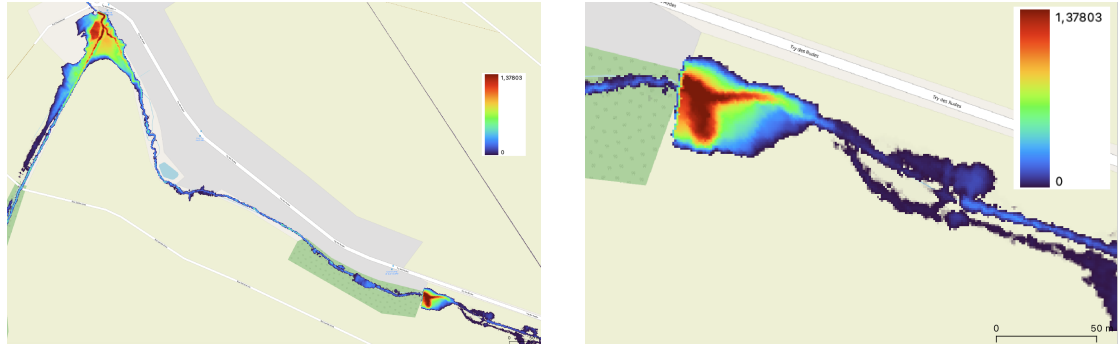


FIGURE 6.7 : Résultat de simulation après 26 000 secondes avec ajout d'une ZEC sur la Joncquière.

La ZEC existante déborde entre 30 000 et 31 000 secondes, soit plus d'une heure vingt plus tard qu'avant l'ajout de la seconde ZEC.

L'état de la ZEC ajoutée au moment où la ZEC existante déborde est présenté à la figure 6.8 et montre que le déversoir de celle-ci aurait pu être placé un peu plus haut, pour que plus d'eau soit retenue.

En observant la figure 6.6, le haut du déversoir ne se situe pas exactement à la cote 151,1m mais un peu plus bas, ce qui peut expliquer pourquoi il reste de la place avant que l'eau n'atteigne le bord de la route.



(a) État de la zone étudiée lorsque la ZEC existante déborde.

(b) Zoom sur l'état de la ZEC ajoutée.

FIGURE 6.8 : Etat de la ZEC ajoutée lorsque la ZEC existante déborde.

6.3 ZEC sur l'Orne

Le troisième aménagement modélisé, se base sur la même pré-étude [10] que l'aménagement précédent. Il s'agit également de l'ajout d'une ZEC mais cette fois sur l'Orne. La zone se trouve en amont de la Rue Sainte-Anne, dans une zone boisée de part et d'autre de la rivière.

La même méthode qu'évoquée précédemment est utilisée pour modéliser une digue avec déversoir à la cote 144m. La ZEC existante est toujours en position fermée, pour les mêmes raisons que précédemment.

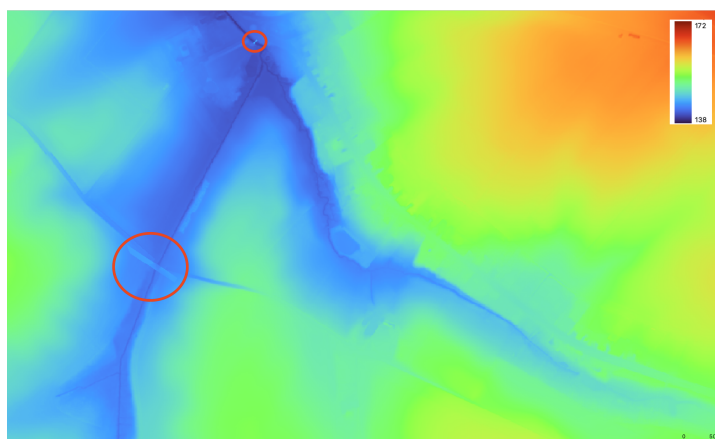
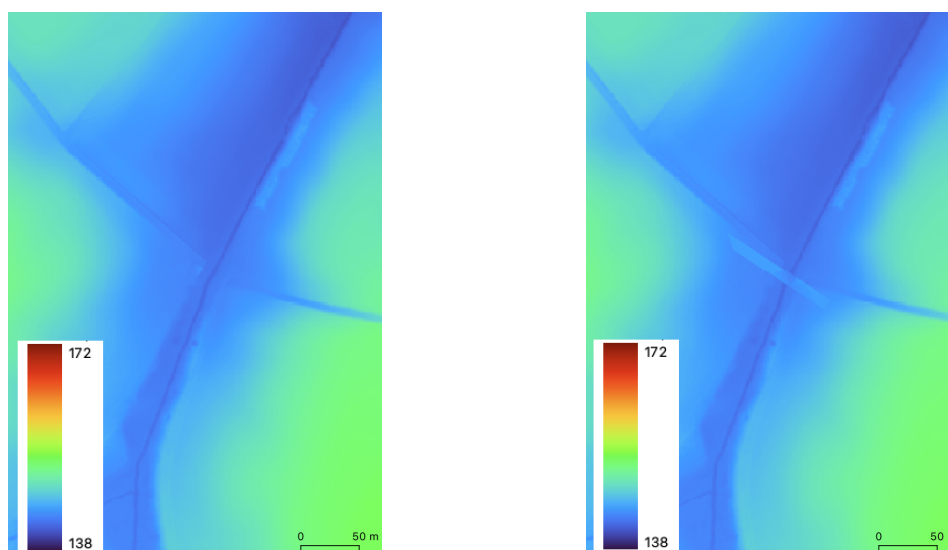


FIGURE 6.9 : Localisation de aménagements dans la zone d'étude.

A la figure 6.10, l'aménagement est représenté sur le MNT avec une coupe longitudinale montrant la différence de cote dans celui-ci avant et après l'aménagement.



(a) MNT avant aménagement, zoomé sur la zone d'intérêt.

(b) MNT après aménagement, zoomé sur la zone d'intérêt.

FIGURE 6.10 : Modélisation de l'aménagement de la ZEC ajoutée en amont de la rue Sainte-Anne.

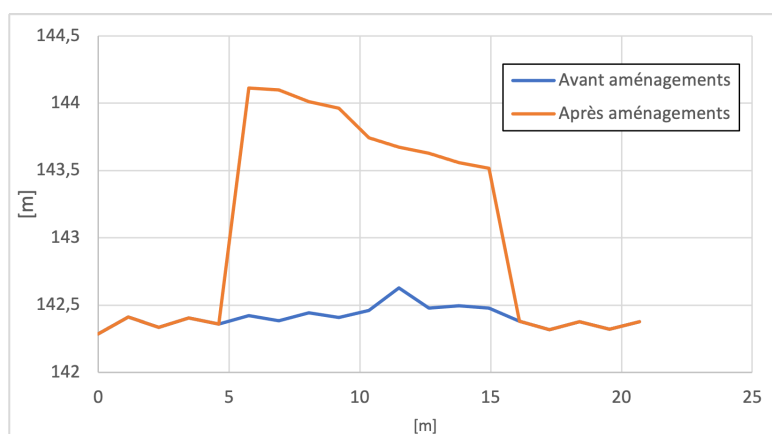


FIGURE 6.11 : Coupe longitudinale de l'aménagement.

26 000 secondes après le lancement de la simulation, la ZEC existante n'a pas encore débordé (figure 6.12), indiquant que cette ZEC ajoutée a elle aussi un impact positif.

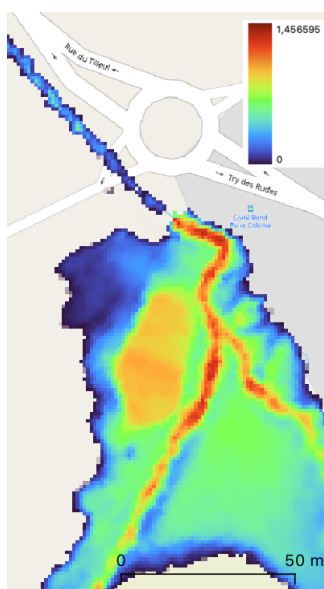


FIGURE 6.12 : Etat de la ZEC existante après 26 000 secondes de simulation avec ajout d'une ZEC sur l'Orne.

Après 40 000 secondes, ni la ZEC existante, ni la ZEC ajoutée sur l'Orne n'ont encore débordé, démontrant l'efficacité de l'ajout de cette seconde ZEC.

6.4 Combinaison des aménagements

Les aménagements proposés aux sections 6.2 et 6.3 sont mis en place en même temps afin d'évaluer leur impact combiné. La ZEC existante est encore une fois en position fermée.

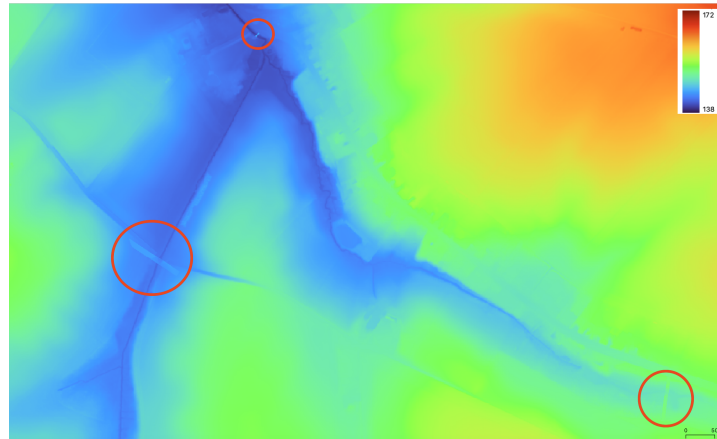


FIGURE 6.13 : Localisation des aménagements dans la zone d'étude.

Après 26 000 secondes de simulation, la ZEC existante n'a pas encore débordé 6.14, ce qui est logique étant une combinaison des deux situations précédentes qui n'avaient déjà pas, individuellement, débordé à ce pas de temps.

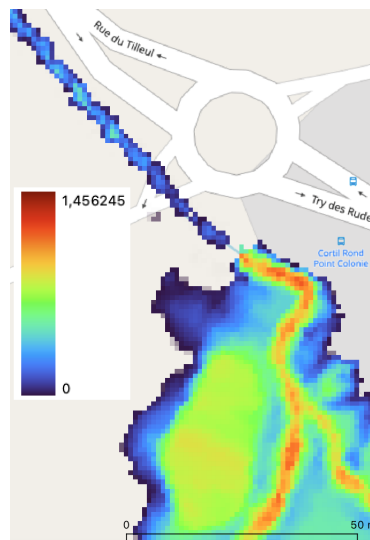


FIGURE 6.14 : Etat de la ZEC existante après 26 000 secondes de simulation avec ajout d'une ZEC sur la Jonquière et d'une ZEC sur l'Orne.

A la fin de la simulation, soit après 40 000 secondes, la ZEC, visible à la figure 6.15, n'a toujours pas débordé.

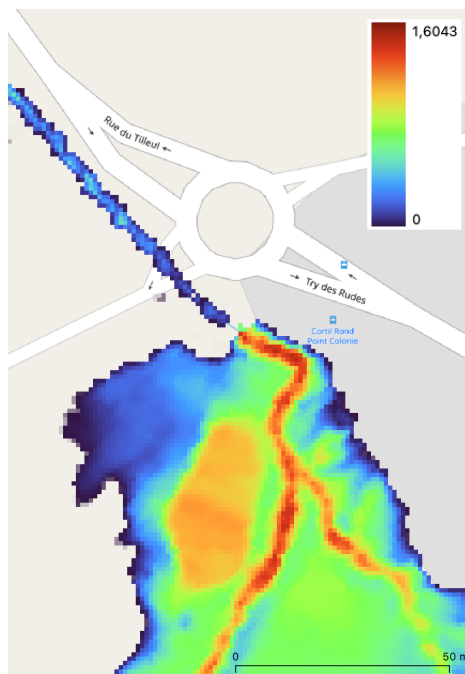


FIGURE 6.15 : Etat de la ZEC existante après 40 000 secondes de simulation avec ajout d'une ZEC sur la Joncquière et d'une ZEC sur l'Orne.

Il pourrait être intéressant de lancer une simulation de plus longue durée pour voir à quel moment la ZEC existante déborde pour la combinaison des 2 ajouts proposés.

Chapitre 7

Conclusion

Au terme de ce travail de recherche, analyse et modélisation, il est temps de dresser le bilan et de tirer les conclusions quant aux résultats obtenus.

Dans un premier temps, nous avons explicité ce qu'était un modèle hydrologique, comment différencier les différents types de modèles, et quel modèle appliquer dans quelle situation.

Le contexte hydrologique du village étudié, Cortil-Noirmont, a ensuite été détaillé afin de mettre en avant les raisons qui ont poussé à la réalisation de la présente étude. Les événements d'inondations, analysés plus tard, ont été décrits chronologiquement et les actions déjà entreprises explicitées.

Dans un troisième temps, la modélisation hydrologique a été effectuée et analysée afin de déterminer les hydrogrammes correspondants le plus fidèlement aux événements étudiés. Dans ce chapitre, les données antérieures aux événements ont également été présentées et utilisées pour calibrer le modèle.

Après cela, la modélisation hydraulique a été réalisée sur un premier domaine qui s'est avéré inutilisable car générant des résultats incohérents, malgré plusieurs tentatives de corrections des données. Un second domaine a dès lors été défini, couvrant une zone dont la définition spatiale semblait plus fiable, et qui a fourni des résultats exploitables.

Finalement, des aménagements ont été proposés, modélisés et analysés comparativement à la situation existante afin d'évaluer leur impact positif dans la lutte contre les crues.

La première proposition consiste en l'ajout d'une ZEC sur la Joncquièrre. La

simulation liée à cette dernière montre que le débordement de la ZEC existante est décalé de 5000 secondes soit un peu plus d'une heure 20 minutes.

La deuxième proposition concerne elle aussi l'ajout d'une ZEC mais cette fois sur l'Orne. La simulation liée à cette dernière retarde le temps de débordement de la ZEC existante de plus de 14 000 secondes, le temps exact n'ayant pas été déterminé à ce stade.

La combinaison des deux propositions sus-mentionnées est à son tour simulée permettant de faire la synthèse des aménagements proposés.

7.1 Perspectives

Le travail réalisé offre des résultats utilisables mais qui pourraient être précisés de différentes manières.

D'une part, le modèle numérique de terrain pourrait être corrigé à l'aide de relevés topographiques pris directement sur place. Cela permettrait de modéliser les inondations mêmes et d'évaluer plus précisément l'impact des aménagements proposés.

D'autre part, la modélisation de la vanne de la ZEC serait intéressante à intégrer. En effet, pouvoir évacuer un certain débit contrôlé même lors du remplissage de la zone d'expansion a un impact non seulement sur le niveau au sein même de la ZEC mais également à l'aval de celle-ci.

Le présent travail s'est concentré sur une étude d'inondation par débordement et propose des solutions consistant à ajouter des ouvrages sur le cours d'eau. Mais, lors d'inondations, surtout dans un contexte fortement agricole comme à Cortil-Noirmont, le ruissellement peut être tout aussi impactant. Cette direction serait alors intéressante à étudier pour proposer des solutions afin d'également gérer l'eau dès son contact avec le sol, avant qu'elle n'arrive au cours d'eau [32]. Ce sont en effet ces solutions combinant gestion du ruissellement et du débordement qui peuvent être les plus efficaces. Pour ce faire, un autre logiciel devrait être utilisé car jusqu'à présent HydroFlow n'intègre pas la modélisation du ruissellement.

Bibliographie

- [1] *2021 : une année humide et des précipitations extrêmes*. <https://www.meteo.be/fr/infos/actualite/2021-une-annee-humide-et-des-precipitations-extremes>. [En ligne], Accédé : 2023-08-10.
- [2] B. AMBROISE. « La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : processus, facteurs, modèles ». In : (1999).
- [3] *Athys-Acceuil*. <http://www.athys-soft.org/>. [En ligne], Consulté le 25-06-2023.
- [4] J. BAUDEZ et al. « Modélisation hydrologique et hétérogénéité spatiale des bassins ». In : *Vers une comparaison de l'approche globale et de l'approche distribuée. Étude Gest. Sols* 6 (1999), p. 165-184.
- [5] A. BAUWENS. « INAUGURATION D'UNE NOUVELLE Z.E.C. À CHASTRE ». In : *Plateforme provinciale de gestion des risques d'inondation : Actualités* (2019). URL : https://www.brabantwallon.be/inondations/pages/inner_actu.php?id=5.
- [6] K. J. BEVEN et M. J. KIRKBY. « A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant ». In : *Hydrological Sciences Bulletin* 24.1 (1979), p. 43-69. DOI : 10.1080/02626667909491834. URL : <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>.
- [7] C. BOUVIER, R. DOMINGUEZ et G. FUENTES. « 30. MERCEDES : un modèle hydrologique d'analyse et de prévision de crues en milieu hétérogène ». In : *Journées de l'hydraulique* 23.1 (1994), p. 257-260.
- [8] C. BOUVIER et al. « Modélisation pluie-débit distribuée avec le logiciel ATHYS. Application au Gardon à Anduze. Manuel de formation ». In : 93 pages (2020).
- [9] BRABANT WALLON. *Synthèse de la problématique des inondations à l'échelle de l'unité de gestion : UG DG01R-5 Bassin de l'Orne amont*. <https://www.brabantwallon.be/inondations/>. [En ligne]. 2019.

- [10] S. de CARTOGRAPHIE ET D'HYDROLOGIE. « Pré-étude des potentialités de rétention sur le bassin versant de l'Orne (amont) ». In : *Le Brabant wallon* (sept. 2021).
- [11] Y. CONVERS. « Traitements de MNT avec QGIS : extraction, découpage, assemblage, rééchantillonnage ». In : *Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie* (Février 2013).
- [12] COURSGÉOLOGIE.COM. *Cycle et bilan hydrologique*. <https://coursgeologie.com/cycle-et-bilan-hydrologique-290/>. [En ligne], Consulté le 19-04-2023.
- [13] J.-P. DE VOGELAERE. « Une zone inondable de 10.900 m3 à Chastre ». In : *Le Soir* (2019). URL : <https://www.lesoir.be/222766/article/2019-05-07/une-zone-inondable-de-10900-m3-chastre>.
- [14] N. DELPIERRE, S. SOARES FRAZAO et H. RATTEZ. « Modélisation numérique de l'écoulement à travers et sur une digue ». In : () .
- [15] L. DUMONCEAU. « Inondations : On nettoie à Bornival et Cortil-Noirmont ». In : *L'Avenir* (2012). URL : <https://www.lavenir.net/regions/brabantwallon/chastre/2012/06/14/inondations-on-nettoie-a-bornival-et-cortil-noirmont-3WISA04M3ZAHXGBXUVM DTH2CFU/>.
- [16] G. FITCH BORIBON. « Inondations à Chastre : "On investit 3 millions d'euros par an, mais c'est un budget qui ne bouge pas" explique Marc Bastin, député provincial du Brabant Wallon ». In : *RTBF.be* (2021). URL : <https://www.rtf.be/article/inondations-a-chastre-on-investit-3-millions-deuros-par-an-mais-cest-un-budget-qui-ne-bouge-pas-explique-marc-bastin-depute-provincial-du-brabant-wallon-10828459>.
- [17] *Goutte froide*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Goutte_froide. [En ligne], Accédé : 2023-08-9.
- [18] *Inondations catastrophiques en Allemagne et Belgique*. <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/inondations-catastrophiques-en-allemande-et-belgique>. [En ligne], Accédé : 2023-08-10.
- [19] *Inondations et coulées de boue*. <https://www.chastre.be/ma-commune/vos-services-administratifs/environnement/eau-rivieres-1/inondations-et-coules-de-boue?fbclid=IwAR16Rvp5RQr8Je3R3zW87vVWvZJcvEbcphIFyzAjnsqTfn7IbvL78Eish4>. [En ligne], Accédé : 2023-08-11.
- [20] INRAE - HYDROLOGY TEAM. *Fonctionnement du modèle GR4J*. [En ligne], Consulté le 07-07-2023. 2018. URL : https://webgr.inrae.fr/modeles/journalier-gr4j-2/fonctionnement_gr4j/.

- [21] *Introduction à MERCEDES*. http://www.athys-soft.org/introduction-mercedes?fbclid=IwAR2TQ-GAuxM-51kLQ1_5xLEYUSfunMABfJus8Zr1iSiAm9F7fPrXIJ51FZg [En ligne], Accédé : 2023-08-12.
- [22] P. JAVELLE. « Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale ». Doctorat Mécanique de milieux géophysiques et environnement, Institut national polytechnique de Grenoble, 2001, p. 268. URL : <https://hal.inrae.fr/tel-02579661>.
- [23] F. KESSASRA. *Cours Modélisation en hydrologie et hydrogéologie*. https://www.academia.edu/39002750/Cours_modlisation_hydrogol. [En ligne], Consulté le 07-07-2023. 2017.
- [24] *L'Actu des Chastroids*. <https://www.jhabiteachastre.be/?s=inondation>. [En ligne], Accédé : 2023-08-7.
- [25] *L'HYDROLOGIE, L'HYDRAULIQUE ET L'HYDROGÉOLOGIE LA MODÉLISATION ET LA PRÉVISION DU COMPORTEMENT DES COURS D'EAU ET DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS*. <https://www.eaucea.fr/hydrologie/>. [En ligne], Accédé : 2023-08-9.
- [26] G. LAMBERT. « Une ZIT capable de retenir quatre bassins olympiques à Chastre ». In : *DH* (2019). URL : <https://www.dhnet.be/regions/brabant/2019/05/08/une-zit-capable-de-retenir-quatre-bassins-olympiques-a-chastre-WPRU65DDCNBOHIIGWHXBNXAECA/>.
- [27] R. LAMBLIN. « Impact de la spatialisation sur les performances des modèles hydrologiques de prévision ». In : *Master hydrologie, hydrochimie, sols et environnement Spécialité hydrologie, Université Paul Sabatier, France* (2009).
- [28] A. LEQUIEN. « Analyse et évaluation des crues extrêmes par modélisation hydrologique spatialisée ». In : *Cas du bassin du Vidourle (Extreme event estimation and analysis by use of a distributed hydrological tool. Case of the Vidourle basin)*. Mémoire de DEA, Hydrosociences Montpellier, Montpellier, France (2003).
- [29] *LES INONDATIONS CATASTROPHIQUES DE JUILLET 2021*. <https://www.meteobelgique.be/article/nouvelles/la-suite/2449-les-inondations-catastrophiques-de-juillet-2021>. [En ligne], Accédé : 2023-08-9.
- [30] *Manuel d'utilisation de QGIS*. https://docs.qgis.org/3.28/fr/docs/user_manual/index.html?fbclid=IwAR0U2CXnif7qGNmfCeSxrlP7WH294WFrpiI87mEtYVLOJ5 [En ligne], Accédé : 2023-08-10.
- [31] R. MEURICE et S. SOARES-FRAZÃO. « A 2D HLL-based weakly coupled model for transient flows on mobile beds ». In : *Journal of Hydroinformatics* 22.5 (2020), p. 1351-1369.

- [32] MICHAËL. « Le bassin d'orage de Cortil en travaux suite aux inondations ». In : *L'actu des Chastroids* (2022). URL : <https://www.jhabiteachastre.be/2022/02/21/le-bassin-dorage-de-cortil-en-travaux-suite-aux-inondations/>.
- [33] G. MORIN et P. PAQUET. « Modèle hydrologique CEQUEAU. » In : (2007).
- [34] Y. NATELHOFF. « “Une vision apocalyptique” ». In : *DH* (2012). URL : <https://www.dhnet.be/regions/brabant/2012/06/14/une-vision-apocalyptique-QLGK3KRZ55D7NGQS5EISLBJMQE/>.
- [35] P.B. « Cortil-Noirmont : une ZEC contre les inondations ». In : *L'Avenir* (2019). URL : <https://www.lavenir.net/regions/brabantwallon/chastre/2019/05/08/cortil-noirmont-une-zec-contre-les-inondations-6VACPUMMOBAX3AGVQVZS7CV7PI/>.
- [36] *polygones de Thiessen*. https://support.esri.com/fr-fr/gis-dictionary/thiessen-polygons?fbclid=IwAR2k0bvW6T22W36hjsvcli2Ig6YRB1sBGe_r5-6tmVWg0Vt2sy0gPIyRb7I. [En ligne], Accédé : 2023-08-13.
- [37] M. ROCHE. « Hydrologie de surface, Gauthier-Villars éditeur ». In : *Paris*, 431p (1963).
- [38] P.-A. ROCHE, J. MIQUEL et E. GAUME. *Hydrologie quantitative : Processus, modèles et aide à la décision*. Jan. 2012. ISBN : 978-2-8178-0105-6. DOI : 10.1007/978-2-8178-0106-3.
- [39] SPW. *Géoportail de la Wallonie : Cartes et données : Cartographie des zones inondées - juillet 2021*. <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/5fa27752-74a6-4cf5-bfb9-d0d5d7e9d35c.html>.
- [40] SPW. *Géoportail de la Wallonie : Cartes et données : Relief de la Wallonie - Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2021-2022*. <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/fe13bc84-e371-46ca-9632-8ad4139f1ee5.html>.
- [41] SPW. *Géoportail de la Wallonie : Cartes et données : Relief de la Wallonie - Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2013-2014*. <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/6029e738-f828-438b-b10a-85e67f77af92.html>.
- [42] SPW. *L'hydrométrie en Wallonie : Observations*. <https://hydrometrie.wallonie.be/home.html>.
- [43] WIKIPÉDIA. *Modèle hydrologique — Wikipédia, l'encyclopédie libre*. [En ligne], Consulté le 25-06-2023. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_hydrologique#cite_note-2.

- [44] WIKIPÉDIA. *Orne (Belgique)* — *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. [En ligne], Consulté le 25-06-2023. 2022. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Orne_\(Belgique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Orne_(Belgique)).
- [45] Y. ZECH. *Hydrologie des bassins versant - Deuxième partie*. 2022.

Annexe A

Synthèse de la problématique des inondations : bassin de l'Orne amont

Cartographie réalisée dans le cadre du projet de gestion des inondations en Brabant wallon. Synthèse de la problématique des inondations à l'échelle de l'unité de gestion : UG DG01R-5 Bassin de l'Orne amont. [9]


Synthèse de la problématique des inondations à l'échelle de l'unité de gestion

UG DG01R-5 - Bassin de l'Orne amont -

Réseau hydrographique
Catégories (niveau de gestion)

- CENN 1ère catégorie (SPW-DGO3)
- CENN 2ème catégorie (Provinces)
- CENN 3ème catégorie (Communes)
- Voie navigable (SPW-DGO2)

Relevés d'inondation (rayon de 250m)



Sites étudiés par la cellule GISER

- SIGISER (03/2019)

Stations de mesures
Stations limnimétriques (gestionnaire, statut)

- SPW-DGO2-SETHY, active
- SPW-DGO3-AQUALIM, active
- SPW-DGO3-AQUALIM, inactive
- Province du Brabant wallon, active

Stations météorologiques
(source)

- SPW-DGO2-SETHY
- IRM (stations synoptiques)
- PAMSEB

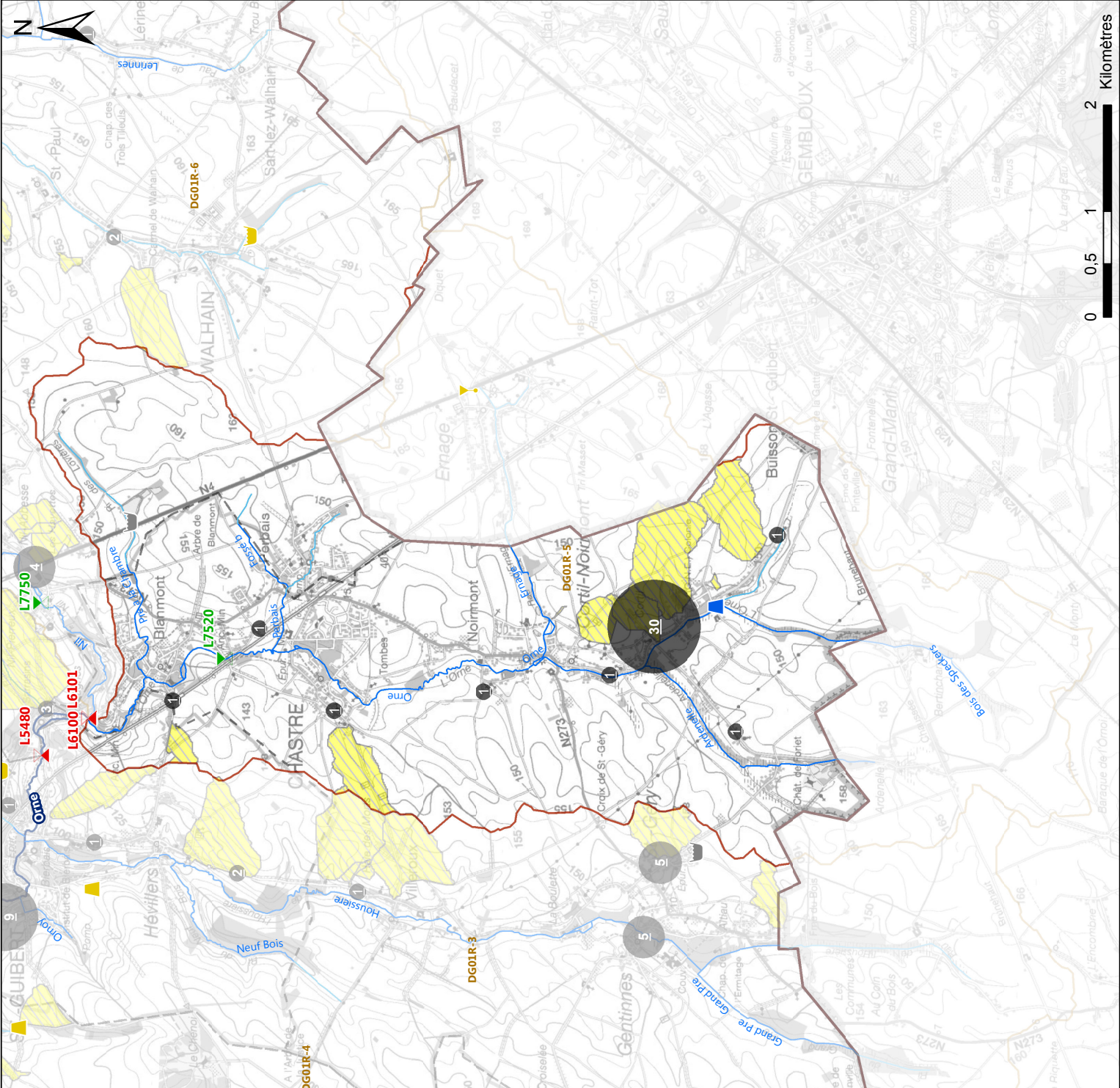
Ouvrages de lutte contre les inondations

Types

- Inconnu
- Bassin artificiel ouvert
- Bassin souterrain
- Ouvrage de lutte contre l'érosion
- Zone d'immersion temporaire
- En projet

Gestionnaires

- Autre institution/inconnu
- Administration communale
- Intercommunale
- Administration provinciale
- Administration régionale



Annexe B

Données de modélisation de la ZEC

Les données reprises dans les tableaux B.1 et B.2 ont été choisies sur base du plan présenté à la figure B.1.

TABLE B.1 : Données côté rue.

X	Y	Z	Tag
169794	140445	139.937	Bord riviere rue
169795	140445	140.93	Bord riviere rue
169794	140448	140.097	Bord riviere rue
169795.5	140448.5	141.238	Bord riviere rue
169793	140450.5	140.091	Bord riviere rue
169794.5	140451	141.331	Bord riviere rue
169792	140451	139.924	Bord riviere rue
169789	140455	142.139	Bord riviere rue
169786	140453	140.112	Bord riviere rue
169785	140457	142.414	Bord riviere rue
169783	140456	142.283	Bord riviere rue
169782.5	140456	142.295	Bord riviere rue
169776	140460	142.311	Bord riviere rue
169775.5	140459.8	139.939	Bord riviere rue
169772.5	140462	139.98	Bord riviere rue
169769	140465	141.831	Bord riviere rue
169788.4	140455.9	142.502	cote rue
169783.1	140458.8	142.319	cote rue
169782.8	140459.1	142.328	cote rue
169782.2	140459.3	142.283	cote rue
169776.5	140461.6	142.136	cote rue
169773.8	140463.1	141.89	cote rue
169770.8	140465.5	141.994	cote rue
169769.5	140465.3	141.949	cote rue
169766.5	140467.2	141.958	cote rue
169768.6	140468.6	141.977	cote rue
169765.7	140467.3	141.89	cote rue
169775.3	140460.5	140.494	Bord riviere rue
169784.1	140454.6	139.983	Bord riviere rue

TABLE B.2 : Données côté prairie.

X	Y	Z	Tag
169758	140450	141.813	Contour interieur
169741	140441	141.772	Contour interieur
169728	140434	142.086	Contour interieur
169716	140428	142.224	Contour interieur
169711	140424	142.279	Contour interieur
169719	140425	142.175	interieur
169730	140423	142.042	interieur
169743	140419	141.763	interieur
169753	140435	141.678	interieur
169764	140440	141.589	interieur
169753	140417	141.73	interieur
169754	140415	141.46	interieur
169708	140412	142.64	interieur
169717	140405	142.55	interieur
169725	140400	142.28	interieur
169733	140400	142.08	interieur
169741	140398	142.13	interieur
169745	140397	142.26	interieur
169747	140397	142.22	interieur
169749	140399	142.05	interieur
169751	140398	142.06	interieur
169757	140399	141.45	interieur
169754	140403	141.79	interieur
169759	140406	141.44	interieur
169758	140410	141.347	interieur
169740	140384	142.66	interieur
169741	140390	142.57	interieur
169743	140390	142.58	interieur
169746	140387	142.61	interieur
169752	140385	142.37	interieur
169753	140389	142.27	interieur
169756	140387	141.82	interieur
169757	140385	141.75	interieur
169751	140378	142.1	interieur
169753	140376	141.42	interieur
169758	140392	141.38	interieur
169783	140402	141.034	interieur

X	Y	Z	Tag
169777	140392	140.994	Contour interieur
169786	140405	140.816	Contour interieur
169787	140408	140.741	Contour interieur
169788	140418	141.059	Contour interieur
169789	140422	140.992	Contour interieur
169786	140427	140.964	Contour interieur
169785	140434	140.869	Contour interieur
169785	140438	141.027	Contour interieur
169787	140441	141.108	Contour interieur
169790	140444	141.003	Contour interieur
169790	140447	141.104	Contour interieur
169786	140449	141.26	Contour interieur
169789	140447	141.081	Contour interieur
169781	140451	141.561	Contour interieur
169780	140450	141.47	Contour interieur
169778	140448	141.57	Contour interieur
169777	140447	141.47	Contour interieur
169773	140448	141.53	Contour interieur
169768	140449	141.544	Contour interieur
169767	140450	141.67	Contour interieur
169762	140453	141.81	Contour interieur
169782	140398	140.634	Contour interieur lac
169780	140399	140.706	Contour interieur lac
169779	140399	141.143	Contour interieur lac
169778	140400	140.591	Contour interieur lac
169776	140399	140.576	Contour interieur lac
169771	140396	140.588	Contour interieur lac
169766	140397	140.432	Contour interieur lac
169765	140402	140.468	Contour interieur lac
169766	140418	140.341	Contour interieur lac
169769	140426	140.363	Contour interieur lac
169772	140433	140.492	Contour interieur lac
169775	140433	140.41	Contour interieur lac
169779	140432	140.376	Contour interieur lac
169780	140431	140.33	interieur
169783	140428	140.478	Contour interieur lac
169783	140423	140.52	Contour interieur lac
169782	140417	140.54	Contour interieur lac
169779	140402	140.634	Contour interieur lac

X	Y	Z	Tag
169783	140400	140.646	Contour interieur lac
169780	140409	140.586	Contour interieur lac
169780	140399	141.199	Contour exterieur lac
169777	140398	141.051	Contour exterieur lac
169772	140395	141.083	Contour exterieur lac
169765	140397	140.848	Contour exterieur lac
169763	140402	141.384	Contour exterieur lac
169762	140406	141.327	Contour exterieur lac
169760.5	140410	141.299	Contour exterieur lac
169762	140411	140.547	Contour exterieur lac
169763	140413	140.504	Contour exterieur lac
169761	140414	141.22	Contour exterieur lac
169764	140418	141.243	Contour exterieur lac
169768	140429	141.43	Contour exterieur lac
169772	140435	141.204	Contour exterieur lac
169776	140435	140.957	Contour exterieur lac
169779	140433.5	140.909	Contour exterieur lac
169784	140426	141.033	Contour exterieur lac
169784	140423	141.064	Contour exterieur lac
169783	140416	141.185	Contour exterieur lac
169782	140411	141.158	Contour exterieur lac
169781	140402	141.211	Contour exterieur lac
169782.5	140401	140.984	Contour exterieur lac
169710	140426	142.48	interieur
169709.5	140426	142.454	Contour interieur
169717	140430	142.599	Contour interieur talus
169726.5	140435	142.661	Contour interieur talus
169742	140444	142.665	Contour interieur talus
169759	140453	142.545	Contour interieur talus
169761	140454	142.54	Contour interieur talus
169759	140457	142.54	Contour interieur talus
169757	140455.5	142.57	Contour interieur talus
169755.5	140454	142.416	Contour interieur talus
169737	140444	142.624	Contour interieur talus
169725	140438	142.534	Contour interieur talus
169714.5	140432	142.643	Contour interieur talus
169709	140429	142.465	Contour interieur talus
169715	140434	142.269	Contour exterieur talus
169723	140438	142.16	Contour exterieur talus

X	Y	Z	Tag
169738	140446	142	Contour exterieur talus
169753	140454	141.933	Contour exterieur talus
169756	140456.5	141.9	Contour exterieur talus
169758	140459	141.92	Contour exterieur talus
169766	140465	139.472	Bord riviere ZEC
169771.5	140460	140.056	Bord riviere ZEC
169775	140457	142.135	Bord riviere ZEC
169783	140452	139.999	Bord riviere ZEC
169787	140451	139.925	Bord riviere ZEC
169792	140449	140.05	Bord riviere ZEC
169763	140465.7	141.845	Contour externe
169762.1	140465.2	141.795	Contour externe
169754.7	140461.4	141.743	Contour externe
169743.1	140455.3	141.731	Contour externe
169728.8	140447.6	141.69	Contour externe
169714.8	140441.3	141.865	Contour externe
169707.2	140437.9	142.024	Contour externe
169697.3	140433.1	142.235	Contour externe
169695.5	140431.4	142.292	Contour externe
169690.7	140427.8	142.529	Contour externe
169685.8	140424.2	142.774	Contour externe
169685.9	140423.9	142.733	Au dessus talus
169687.8	140421	143.011	Au dessus talus
169691.9	140423.1	142.862	Au dessus talus
169697.2	140426.6	142.547	Au dessus talus
169695.8	140430.7	142.298	Au dessus talus
169695.8	140431	142.355	Au dessus talus
169696.3	140430.6	142.636	Au dessus talus
169690.8	140427.1	142.531	Au dessus talus
169697.8	140426.6	142.617	Au dessus talus
169698.1	140427.1	142.754	Au dessus talus
169697.9	140430.3	142.696	Au dessus talus
169700.1	140428.2	142.676	Au dessus talus
169703.8	140430.4	142.563	Au dessus talus
169707.9	140432.3	142.425	Au dessus talus
169721.4	140438.9	142.186	Au dessus talus
169738.2	140447.2	141.965	Au dessus talus
169751.8	140454.8	141.92	Au dessus talus
169701.4	140434.6	142.083	Au dessus talus

X	Y	Z	Tag
169702.1	140434	142.474	Au dessus talus
169702.7	140432.5	142.544	Au dessus talus
169709.6	140435.9	142.369	Au dessus talus
169708.7	140437.4	142.249	Au dessus talus
169708.8	140438.1	141.958	Au dessus talus
169712.3	140439.4	141.762	Au dessus talus
169713.2	140438.8	142.122	Au dessus talus
169716	140440.2	142.211	Au dessus talus
169715.4	140440.7	141.732	Au dessus talus
169724.2	140443	142.03	Au dessus talus
169728.9	140445.2	142.08	Au dessus talus
169729.1	140446.3	142.027	Au dessus talus
169729.1	140447	141.595	Au dessus talus
169743.3	140455.1	141.56	Au dessus talus
169744.6	140454.7	141.93	Au dessus talus
169754.4	140459.9	141.976	Au dessus talus
169754.7	140460.7	141.664	Au dessus talus
169759.1	140461.4	141.876	Au dessus talus
169759	140462.9	141.918	Au dessus talus
169759	140463.2	141.618	Au dessus talus
169759.3	140463.6	141.69	Au dessus talus
169767.7	140457.8	141.96	Interieur bord riviere
169770.4	140453.3	142	Interieur bord riviere
169773.1	140456.2	142.41	Interieur bord riviere
169772.5	140450.5	142.34	Interieur bord riviere
169776.9	140449.4	142.39	Interieur bord riviere
169765.3	140461	142.17	Interieur bord riviere
169763.1	140456.8	142.43	Interieur bord riviere
169762.2	140454.4	142.36	Interieur bord riviere
169761.8	140460	142.53	Interieur bord riviere
169773.4	140458.1	142.32	Bord riviere ZEC
169771	140455.2	141.96	Interieur bord riviere
169763.8	140458.8	142.47	Interieur bord riviere
169764.4	140460.4	142.31	Interieur bord riviere
169765	140460.1	142.01	Interieur bord riviere
169761.3	140461	141.85	Interieur bord riviere
169762.7	140463	141.98	Interieur bord riviere
169761.9	140463	141.406	Interieur bord riviere

X	Y	Z	Tag
169763.6	140462.3	142.45	Interieur bord riviere
169764.6	140460.9	142.33	Interieur bord riviere
169764.1	140462.9	142.2	Interieur bord riviere
169771.7	140454.7	142.38	Interieur bord riviere
169778	140454.9	142.273	Interieur bord riviere
169759.6	140458	142.62	Interieur bord riviere
169758.9	140458.8	141.98	Interieur bord riviere
169761.3	140463.6	141.767	Au dessus talus
169773.2	140458.4	140.113	Bord riviere ZEC
169765	140451.6	141.68	contour interieur
169771.7	140450.7	142.38	Interieur bord riviere
169769.8	140456.2	141.84	Interieur bord riviere
169770.8	140454.9	142.06	Interieur bord riviere
169769.6	140451.6	142	Interieur bord riviere
169769.5	140450.7	142.06	Interieur bord riviere
169769.4	140450.4	142.04	Interieur bord riviere
169771.8	140449.4	141.78	Interieur bord riviere
169769	140450.2	141.82	Interieur bord riviere
169768.5	140450.5	141.84	Interieur bord riviere
169767.1	140451	141.84	Interieur bord riviere
169765.5	140451.9	141.603	Interieur bord riviere
169765.1	140451.9	141.74	Interieur bord riviere
169763.1	140453.4	141.8	Interieur bord riviere
169763.7	140453.7	141.561	Interieur bord riviere
169762.79	140453.57	141.92	Interieur bord riviere
169762.8	140454.6	141.9	Interieur bord riviere
169762.6	140455.4	142.34	Interieur bord riviere
169763.4	140456	142.12	Interieur bord riviere
169764	140458.2	142.02	Interieur bord riviere
169764.7	140460.3	141.94	Interieur bord riviere
169761.3	140455.2	142.49	Interieur bord riviere
169759.4	140457.4	142.5	Interieur bord riviere

Annexe C

Capacité de stockage et Curve Number.

Capacité de stockage (S) et Curve Number typiques en fonction du type de couverture et des conditions hydrologiques [45].

Fonction de production SCS

Capacité de stockage du sol : nombre CN

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{S}{25.4}}$$

Couverture		Nombre CN par type hydrologique de sol			
Type de couverture	Conditions hydrologiques	A	B	C	D
Pâtures, prairies	Mauvaises	68	79	86	89
	Moyennes	49	69	79	84
	Bonnes	39	61	74	80
Prairies	—	30	58	71	78
Bois et prairies	Mauvaises	57	73	82	86
	Moyennes	43	65	76	82
	Bonnes	32	58	72	79
Bois et forêts	Mauvaises	45	66	77	83
	Moyennes	36	60	73	79
	Bonnes	30	55	70	77
Fermes et dépendances	—	59	74	82	86

https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf

Couverture		Nombre CN par type hydrologique de sol			
		A	B	C	D
Espaces ouverts (parc, etc.)	Espaces verts < 50 %	68	79	86	89
	Espaces verts 50 ... 75 %	49	69	79	84
	Espaces verts > 75 %	39	61	74	80
Surfaces imperméables	Parkings, toitures	98	98	98	98
Rues et routes	Asphaltées	98	98	98	98
	Asphaltées avec fossés ouverts	83	89	92	93
	Graviers	76	85	89	91
	Chemins non revêtus	72	82	87	89
Quartiers centraux	Commerces et affaires (85 % imperméable)	89	92	94	95
	Industries (72 % imperméable)	81	88	91	93
Quartiers résidentiels	Parcelles < 500 m ² (65 % imperméable)	77	85	90	92
	Parcelles de 500 à 1000 m ² (38 % imperméable)	61	75	83	87
	Parcelles de 1000 à 1350 m ² (30 % imperméable)	57	72	81	86
	Parcelles de 2000 m ² (25 % imperméable)	54	70	80	85
	Parcelles de 4000 m ² (20 % imperméable)	51	68	79	84
	Parcelles de 8000 m ² (12 % imperméable)	46	65	77	82

Fonction de production SCS

Capacité de stockage du sol S (mm)

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Couverture		Capacité de stockage (mm) par type hydrologique de sol			
Type de couverture	Conditions hydrologiques	A	B	C	D
Pâtures, prairies	Mauvaises	120	68	41	31
	Moyennes	264	114	68	48
	Bonnes	397	162	89	64
Prairies	—	593	184	104	72
Bois et prairies	Mauvaises	192	94	56	41
	Moyennes	337	137	80	56
	Bonnes	540	184	99	68
Bois et forêts	Mauvaises	310	131	76	52
	Moyennes	452	169	94	68
	Bonnes	593	208	109	76
Fermes et dépendances	—	177	89	56	41

Couverture		Capacité de stockage (mm) par type hydrologique de sol			
		A	B	C	D
Espaces ouverts (parc, etc.)	Espaces verts < 50 %	120	68	41	31
	Espaces verts 50 ... 75 %	264	114	68	48
	Espaces verts > 75 %	397	162	89	64
Surfaces imperméables	Parkings, toitures	5	5	5	5
Rues et routes	Asphaltées	5	5	5	5
	Asphaltées avec fossés ouverts	52	31	22	19
	Graviers	80	45	31	25
	Chemins non revêtus	99	56	38	31
Quartiers centraux	Commerces et affaires (85 % imperméable)	31	22	16	13
	Industries (72 % imperméable)	60	35	25	19
Quartiers résidentiels	Parcelles < 500 m ² (65 % imperméable)	76	45	28	22
	Parcelles de 500 à 1000 m ² (38 % imperméable)	162	85	52	38
	Parcelles de 1000 à 1350 m ² (30 % imperméable)	192	99	60	41
	Parcelles de 2000 m ² (25 % imperméable)	216	109	64	45
	Parcelles de 4000 m ² (20 % imperméable)	244	120	68	48
	Parcelles de 8000 m ² (12 % imperméable)	298	137	76	56

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl