

École polytechnique de Louvain

Etude d'inondations dans la commune de Theux

Auteur : **Louis Van Averbeké**

Promotrice : **Sandra Soares Frazao**

Lecteurs : **Charles Bielders, Didier Bousmar, Charles Ryckmans**

Année académique 2022–2023

Master [120] : ingénieur civil des constructions

REMERCIEMENTS

Avant d'aborder le cœur de ce travail, j'aimerais exprimer ma sincère gratitude envers toutes les personnes qui ont joué un rôle dans la réalisation de ce travail.

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement Sandra Soares Frazao, ma promotrice de mémoire, pour son suivi régulier tout au long de cette année. Son encouragement constant ainsi que ses suggestions ont grandement enrichi mon travail et l'ont rendu bien plus plaisant que je ne l'aurais imaginé. Son précieux soutien lors de ma décision de reporter la session de remise de juin à août a également été d'une grande importance.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance particulière envers Nathan Delpierre, doctorant en hydraulique à l'EPL, dont l'aide a été déterminante lors de l'utilisation du code de calcul « Hydroflow ». Sa disponibilité et son soutien m'ont permis de surmonter rapidement des obstacles et erreurs, m'évitant ainsi de perdre un temps précieux.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers Yves Zech, ancien professeur d'hydraulique à l'EPL, qui s'est montré disponible pour m'aider dans l'utilisation du logiciel ATHYS.

Je n'oublie pas de remercier Jean Leroy et Jean-Philippe Boutet, deux habitants de Theux, qui ont initié le sujet de ce mémoire. Sans leur initiative, ce travail n'aurait jamais vu le jour. Leur enthousiasme et leur implication m'ont profondément motivé. Leur intérêt pour mon travail a renforcé mon engagement envers ce sujet, et j'espère sincèrement avoir apporté une contribution significative.

Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui m'ont aidé dans la relecture et la correction de mon mémoire. Je tiens à exprimer ma gratitude envers mon papa pour le temps qu'il a consacré à cette tâche. J'ai également utilisé des moyens technologiques pour faciliter la correction de mon travail, tels que l'intelligence artificielle « ChatGPT » et l'outil de correction orthographique « Reverso ».

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mes lecteurs (Charles Biolders, Didier Bousmar, Charles Ryckmans et Sandra Soares Frazao) pour le temps consacré à la lecture de ce travail qui me tient à cœur et que j'espère ne pas avoir rendu trop long.

Enfin, je tiens à adresser un immense merci à toutes les personnes qui ont contribué à faire de mes cinq belles années d'études à l'EPL une expérience enrichissante et remplie de beaux moments. Ma famille mérite une mention spéciale pour l'immense soutien qu'elle m'a apporté. Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers mes amis et les nouvelles rencontres qui ont enrichi mon parcours. Pour conclure, je suis reconnaissant envers tous les membres du pôle GC, qui ont contribué à rendre ces deux dernières années inoubliables.

RÉSUMÉ

L'eau, élément essentiel à la vie, peut subitement se transformer en un ennemi dans des circonstances particulières. Celles-ci peuvent être parfois à l'origine des phénomènes d'inondations pouvant concerner tous les coins du monde. La récurrence et l'ampleur croissante de ces événements suscitent des préoccupations grandissantes, en partie en raison du changement climatique. Un exemple marquant de cette réalité est survenu du 13 au 17 juillet 2021 en Belgique, où les inondations ont causé l'une des plus grandes catastrophes naturelles du pays. Les habitants de Theux ont été particulièrement touchés lorsque la Hoëgne, le cours d'eau qui traverse la ville, est sortie de son lit. Ce traumatisme a renforcé le désir au sein de la population de prendre des mesures afin d'éviter que de tels événements ne se reproduisent à l'avenir.

Le présent travail de fin d'études vise à modéliser numériquement les inondations survenues dans la commune de Theux, dans le but ultime de proposer des solutions d'aménagement pour lutter contre ce phénomène. Pour ce faire, le code de calcul « Hydroflow » a été utilisé pour simuler l'écoulement au sein de la ville en réponse aux précipitations de juillet 2021. Ce programme résout les équations bidimensionnelles de Saint-Venant en utilisant la méthode des volumes finis sur un maillage non structuré. Afin de reproduire le débit dans la Hoëgne lors de cet événement à l'entrée de Theux, le modèle hydrologique distribué « SCS-LR », disponible dans le logiciel ATHYS, a été utilisé.

Ce travail a mis en évidence que le modèle hydrologique « SCS-LR » et le code de calcul « Hydroflow » ont permis de reproduire de manière plutôt fidèle l'écoulement et les inondations à Theux de juillet 2021, ceci malgré quelques petites imprécisions dans les données. En utilisant ces modèles, des solutions d'aménagement ont été envisagées grâce à l'étude d'autres événements pluvieux moins exceptionnels que celui de juillet 2021. La proposition d'une zone d'expansion de crues semble réalisable dans le futur et permettrait de lutter contre des pluies importantes, bien qu'elle nécessite une étude plus approfondie avant sa mise en œuvre concrète. Il est important de noter que cette solution ne préviendrait pas les inondations d'une ampleur similaire à celles de juillet 2021, mais qu'elle permettrait tout de même de réduire considérablement les hauteurs d'eau dans la ville.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
1.1	CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE À THEUX	4
1.1.1	<i>Localisation</i>	4
1.1.2	<i>Topographie et géologie</i>	6
1.1.3	<i>Hydrographie et Climat</i>	8
1.2	COMMENT ÉTUDIER DES INONDATIONS ?	10
2	ÉTAT DE L'ART	13
2.1	LES MODÈLES HYDROLOGIQUES	13
2.1.1	<i>Les modèles « boîte noire »</i>	14
2.1.2	<i>Les modèles « à réservoirs » conceptuels ou empiriques</i>	15
2.1.3	<i>Les modèles fondés sur la physique</i>	17
2.2	LES MODÈLES HYDRAULIQUES	18
2.2.1	<i>Les modèles conceptuels</i>	19
2.2.2	<i>Les modèles mécanistes</i>	19
2.3	LES MESURES DE PROTECTION	25
2.3.1	<i>Les mesures « structurelles »</i>	26
3	OUTILS ET MÉTHODES	30
3.1	DONNÉES DISPONIBLES	31
3.1.1	<i>Modèle numérique de terrain (MNT)</i>	31
3.1.2	<i>Types de sols et couverture des sols</i>	32
3.1.3	<i>Données pluviométriques</i>	33
3.1.4	<i>Données limnimétriques</i>	34
3.1.5	<i>Zones inondées et hauteurs d'eau de juillet 2021</i>	35
3.2	CHOIX DE LA LIMITE AMONT DE LA ZONE MODÉLISÉE	37
3.3	MODÉLISATION HYDROLOGIQUE AVEC ATHYS	39
3.3.1	<i>Calcul et discrétisation du bassin versant</i>	42
3.3.2	<i>Extension des données pluviométriques sur chaque maille</i>	44
3.3.3	<i>Fonction de production : SCS</i>	47
3.3.4	<i>Fonction de transfert : Lag&Route</i>	52
3.3.5	<i>Application du modèle hydrologique</i>	54
3.4	MODÉLISATION HYDRAULIQUE AVEC HYDROFLOW	56
3.4.1	<i>Equations de Saint-Venant 2D</i>	57
3.4.2	<i>Schéma numérique</i>	58
3.4.3	<i>Zone modélisée</i>	70
3.4.4	<i>Discrétisation du maillage</i>	73
3.4.5	<i>Conditions aux limites</i>	76
3.4.6	<i>Zone de fiabilité des résultats en aval</i>	77
3.4.7	<i>Application du modèle hydraulique</i>	80

TABLE DES MATIÈRES

4	CALAGES DES MODÈLES	83
4.1	CALAGE DU MODÈLE HYDROLOGIQUE	83
4.1.1	<i>Influence des paramètres et analyse des hydrogrammes</i>	86
4.1.2	<i>Validation des paramètres</i>	87
4.2	CALAGE DU MODÈLE HYDRAULIQUE	92
4.2.1	<i>Etude de sensibilité du coefficient de Manning</i>	96
4.3	CONCLUSION SUR L'UTILISATION DES MODÈLES	97
5	MESURES DE PROTECTION	98
5.1	DÉBIT DE DÉBORDEMENT	98
5.1.1	<i>Témoignages</i>	99
5.1.2	<i>Evènement de juin 2018</i>	102
5.2	BASSIN DE STOCKAGE DANS THEUX	108
5.3	ZONE D'EXPANSION DE CRUES EN AMONT DE THEUX	114
5.4	APPLICATION À D'AUTRES PLUIES	118
5.5	CONCLUSIONS SUR LES MESURES DE PROTECTION	124
6	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	128

INTRODUCTION

1 Introduction

L'eau, précieuse ressource essentielle à la vie sur Terre, joue également un rôle fondamental dans notre quotidien en permettant de multiples activités, de l'agriculture aux transports en passant par les loisirs. Elle possède son propre cycle permettant de se renouveler à l'infini. Cependant, pour en tirer pleinement parti, une gestion éclairée de cette ressource s'avère indispensable. Sans quoi, elle peut entraîner des problèmes majeurs, notamment les redoutables phénomènes d'inondations, entraînant parfois des dégâts matériels et humains considérables. Tel qu'illustré sur la Figure 1 et la Figure 2, les inondations sont de plus en plus fréquentes à l'échelle mondiale, amplifiées par des facteurs tels que le changement climatique et l'urbanisation croissante.

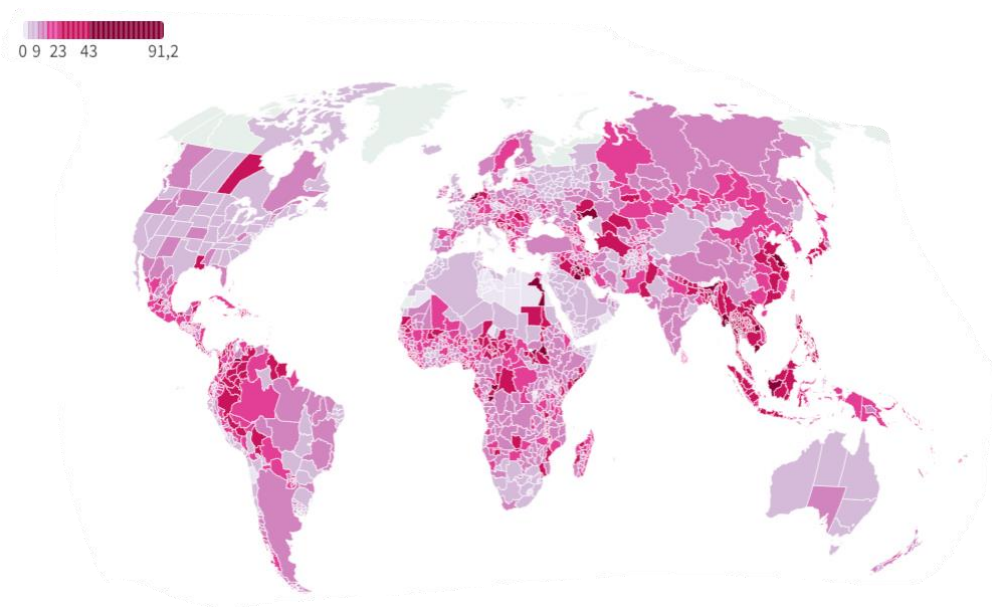


Figure 1 : Population exposée à un risque d'inondation (en %).
Tirée du journal « WorldBank » (Rentschler et al., 2020).

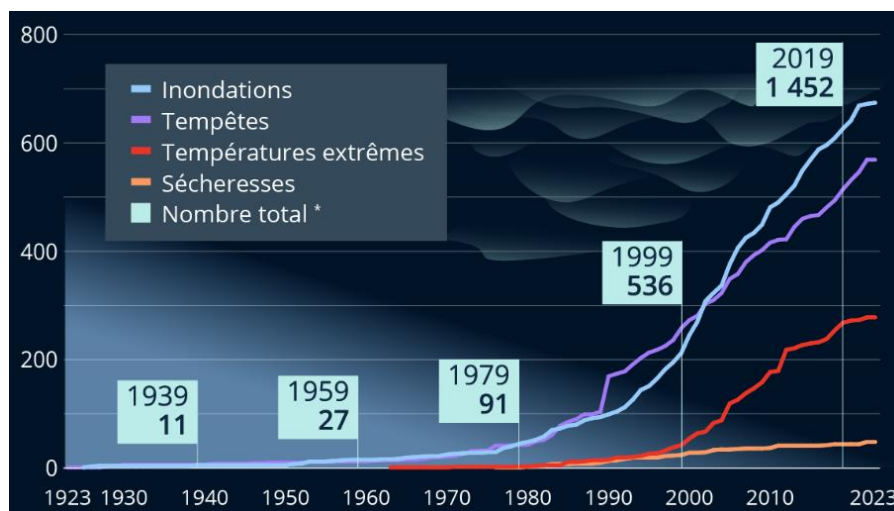


Figure 2 : Nombre de catastrophes naturelles en Europe depuis 1923 par type.
Tirée du journal « Statista » (Villiers, 2023).

INTRODUCTION

Malheureusement, la Belgique n'échappe pas à ce fléau, comme en témoignent les crues d'une ampleur sans précédent qui ont touché la Wallonie en juillet 2021. Ces événements catastrophiques, survenus en une semaine, ont causé la perte tragique de 39 vies humaines, sinistré plus de 100 000 personnes et engendré des dégâts matériels évalués à 2,8 milliards d'euros (Elio Di Rupo Ministre-Président, 2022). Les communes de la province de Liège, notamment Chaudfontaine, Theux, Liège, Trooz, Verviers, Spa et Pepinster ont été particulièrement touchées tel qu'illustré sur la Figure 3.

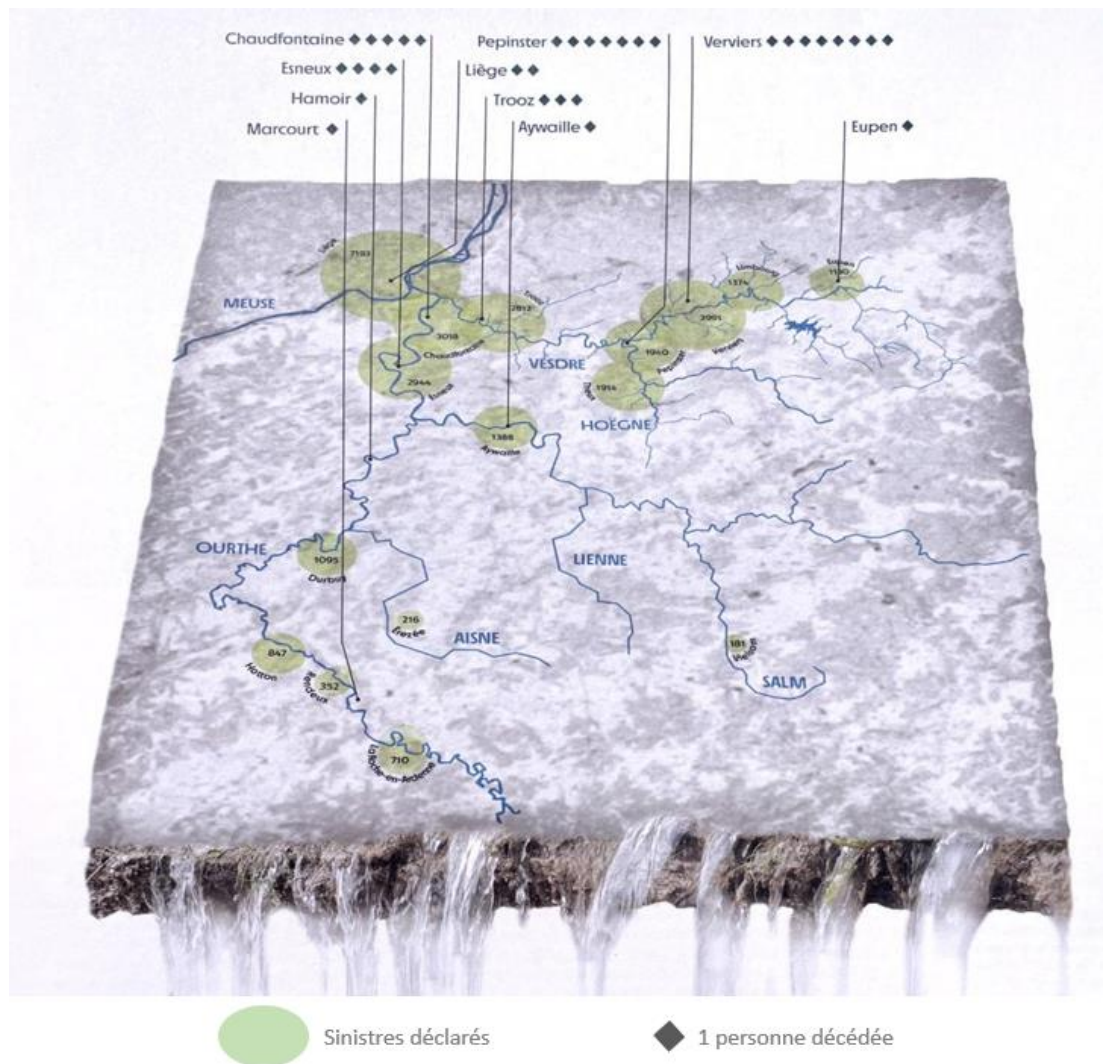


Figure 3 : Décès et sinistres dans plusieurs communes de la vallée de la Vesdre.
Tirée du livre « Mémoires vives » (Brabant, 2021).

Le matin du 13 juillet 2021, des précipitations torrentielles se sont abattues sur la Wallonie, provoquant une quantité d'eau gigantesque qui a dépassé largement les normales saisonnières. Les pluies étaient particulièrement intenses sur le plateau des Hautes-Fagnes, où le pluviomètre de Jalhay a enregistré 291 mm de précipitations, comme le montre les données sur la Figure 4, soit l'équivalent de trois mois de précipitations habituelles (Brabant, 2021). Le sol, déjà saturé par des précipitations antérieures, s'est retrouvé dans l'incapacité de retenir cette surabondance d'eau, qui a rapidement afflué vers les fonds de vallées, entraînant ainsi la sortie de nombreux cours d'eau de leur lit.

INTRODUCTION

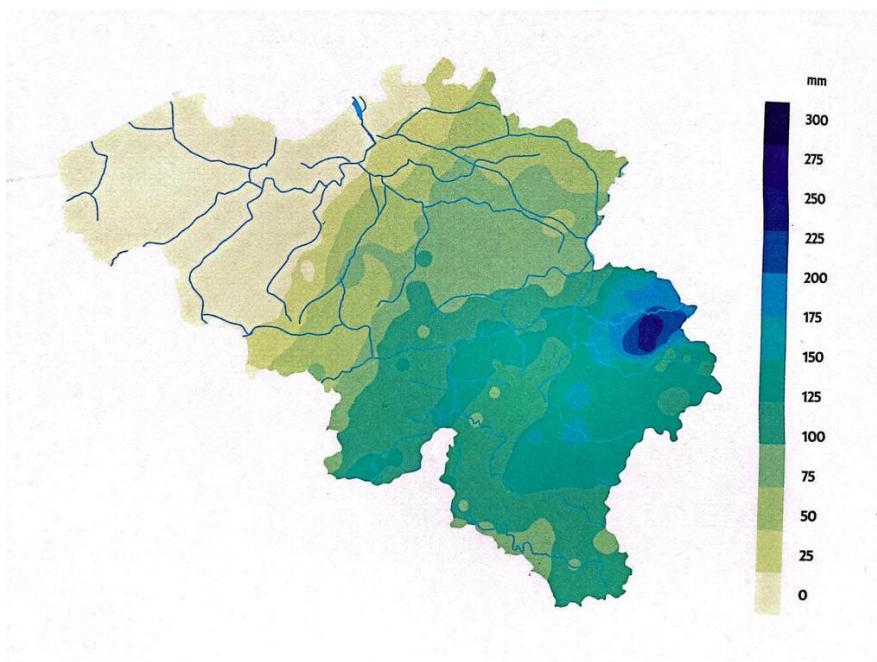


Figure 4 : Total des précipitations entre le 13 et le 16 juillet 2021.
Tirée du livre « Mémoires vives » (Brabant, 2021).

À Theux, la rivière Hoëgne, traversant le cœur de la ville, a débordé le 14 juillet, transformant les rues en véritables torrents pouvant atteindre jusqu'à 5 m de hauteur par endroits, tel qu'illustré sur la Figure 5. Cette montée des eaux rapide et violente a entraîné des dégâts considérables dans la ville, inondant habitations et bâtiments, détruisant berges, voiries et canalisations. Les habitants de Theux ont subi d'énormes pertes matérielles et certains ont tragiquement perdu des êtres chers. Profondément marqués par cet événement, ils aspirent à éviter que de telles inondations ne se reproduisent à l'avenir.



Figure 5 : Crue de la Hoëgne dans le centre de Theux.
Photo prise par Benjamin Kampouris le 15 juillet 2021, tirée de Météo Belgique (Vilmos, 2021).

INTRODUCTION

Dans cette optique, Jean Leroy et Jean-Philippe Boutet, deux habitants de Theux, ont proposé d'entreprendre une étude des inondations dans leur commune comme sujet de travail de mémoire. Le présent travail s'inscrit donc dans ce cadre, visant à répondre à des questions importantes : Comment modéliser des crues à Theux ? Et comment diminuer les risques liés aux inondations dans cette région ? À l'aide de modèles mathématiques, ce mémoire cherche à modéliser numériquement les inondations et à proposer des solutions pour protéger la commune contre les risques de crues futures.

Le 19 novembre 2022, une visite à Theux a été organisée dans le but de rencontrer Jean Leroy et Jean-Philippe Boutet, et surtout de recueillir leur témoignage sur l'inondation de juillet 2021, en se basant sur les dégâts encore visibles sur place. Cette visite nous a permis de mieux comprendre les enjeux liés aux inondations, d'identifier les points critiques de la ville et de faire des observations sur les hauteurs d'eau atteintes lors de cet événement tragique.

Avant de tenter de répondre à ces questions, il est essentiel de bien comprendre le contexte géographique, géologique et hydrologique de Theux. Une introduction est donc présentée pour mettre en lumière les caractéristiques spécifiques de la région et leur impact sur les phénomènes d'inondation. Par la suite, la démarche générale classique de l'étude des inondations est expliquée, permettant de déterminer quels phénomènes doivent être représentés et, par conséquent, quels types de modèles seront nécessaires.

1.1 Contexte géographique, géologique et hydrologique à Theux

Dans cette section concernant le contexte géographique et hydrologique de Theux, nous présenterons d'abord sa localisation, puis nous examinerons son relief particulier ainsi que ses caractéristiques géologiques. Il est important de noter que tous ces éléments jouent un rôle essentiel dans les phénomènes d'inondations dans la région. Ensuite, nous aborderons les aspects liés à l'eau, notamment le réseau hydrographique et le climat, qui continuent à influencer de manière significative les risques d'inondations dans la commune.

1.1.1 Localisation

Theux est une commune située en Belgique, dans le nord-est de la Région wallonne, plus précisément dans la province de Liège, comme illustré sur la Figure 6 et la Figure 7. Son emplacement géographique joue un rôle essentiel dans les phénomènes d'inondations auxquels elle peut être confrontée. Avec une population d'environ 12 000 habitants, Theux est répartie sur une faible superficie, ce qui lui confère une densité de 144 hab./km^2 . Cette concentration démographique peut avoir un impact sur la vulnérabilité de la commune face aux risques d'inondations.

INTRODUCTION



Figure 6 : Localisation de la commune de Theux (point rouge) au sein de la province de Liège en Belgique.

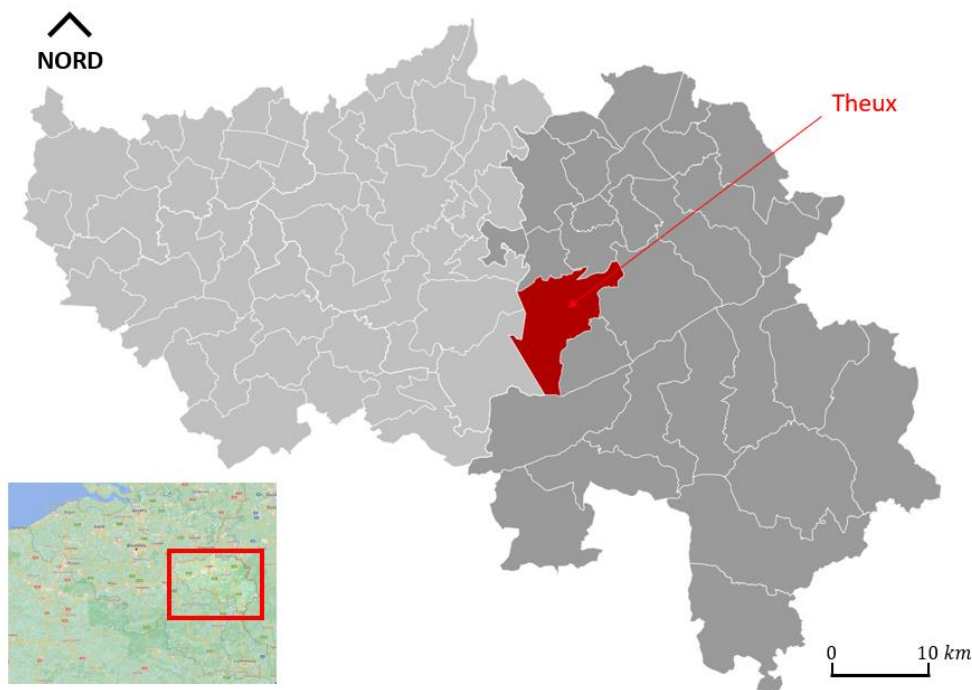


Figure 7 : Localisation de la commune de Theux au sein de l'arrondissement de Verviers (en gris foncé) et de la province de Liège (en gris).
Tirée de Wikipédia¹.

¹ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Theux> consulté le 21 juillet 2021.

INTRODUCTION

1.1.2 Topographie et géologie

La ville de Theux est située à environ 220 m d'altitude, entre le plateau de Herve et le plateau des Hautes Fagnes. Cette commune est logée dans une vallée, comme illustré sur la carte topographique de la Figure 8. En raison de sa proximité avec le plateau des Hautes Fagnes, les pentes sont assez raides, comme illustré sur le profil en long du cours d'eau Hoëgne qui traverse Theux sur la Figure 9. Cette configuration génère des vitesses d'écoulement élevées, rendant l'eau particulièrement puissante et destructrice lorsqu'elle traverse la ville.

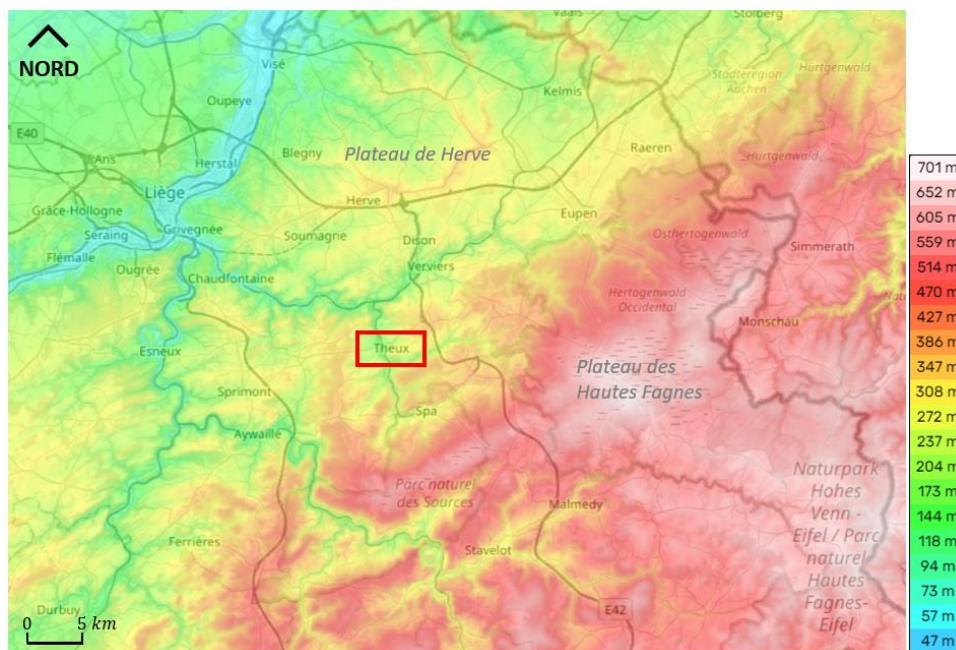


Figure 8 : Carte de la topographie à Theux et ses alentours.
Tirée du site « Topographic-map »².

² <https://fr-be.topographic-map.com/map-vt6/Li%C3%A8ge/?center=50.53578%2C5.72204&zoom=10>
consulté le 21 juillet 2023.

INTRODUCTION

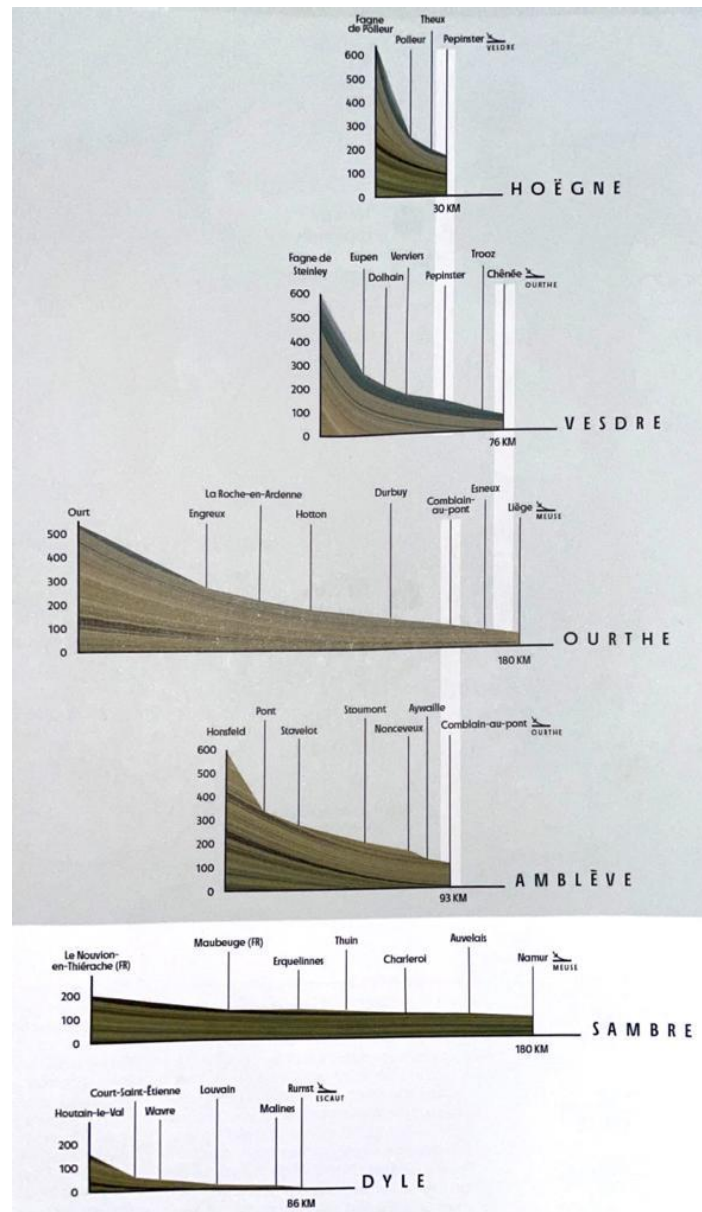


Figure 9 : Profil en long de plusieurs cours d'eau du bassin versant de la Vesdre (en fond gris) et profil en long de la Sambre et la Dyle (en fond blanc).

Tirée du livre « Mémoires vives » (Brabant, 2021).

Les habitations à Theux sont principalement concentrées le long de la vallée de la Hoëgne, tandis que les versants sont couverts principalement de forêts et de prairies. Cette ville se trouve au cœur d'un phénomène géologique rare, car elle est située dans une fenêtre géologique. Cette particularité résulte d'une déchirure dans le sol qui expose les couches du sol plus anciennes à la surface (Cirkwi, s.d.). Par conséquent, la géologie locale est plutôt complexe, car le bassin versant de la Hoëgne est composé de sols de natures géologiques variées, tels que des schistes et des ardoises, entre autres. La couverture de sol et cette diversité géologique influe sur l'infiltration et le ruissellement de l'eau dans la région. Lors d'événements pluvieux intenses, cette variabilité géologique peut avoir un impact significatif sur la réponse hydrologique du bassin versant et contribuer aux risques d'inondations.

INTRODUCTION

1.1.3 Hydrographie et Climat

La ville de Theux est traversée par la rivière Hoëgne, qui fait partie du bassin versant de la Vesdre. La confluence entre la Vesdre et la Hoëgne se situe un peu plus en aval de Theux, à Pépinster. D'autres rivières, telles que le Wayai, le Rau de Pré L'Evêque, le Rau de Wayot et le Rau du Fond de Wisselet, se jettent également dans la Hoëgne à différents endroits de la commune, comme illustré sur les cartes hydrographiques de la Figure 10 et de la Figure 11.

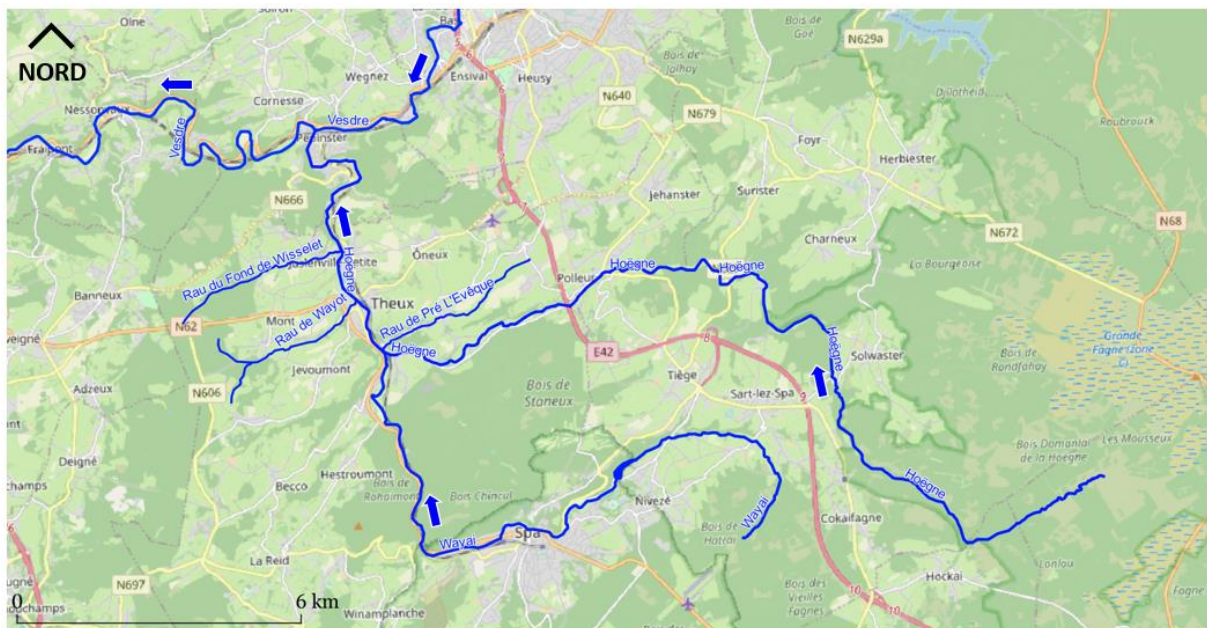


Figure 10 : Réseau hydrographique principal à Theux et en amont. Le sens de l'écoulement est donné par les flèches bleues.

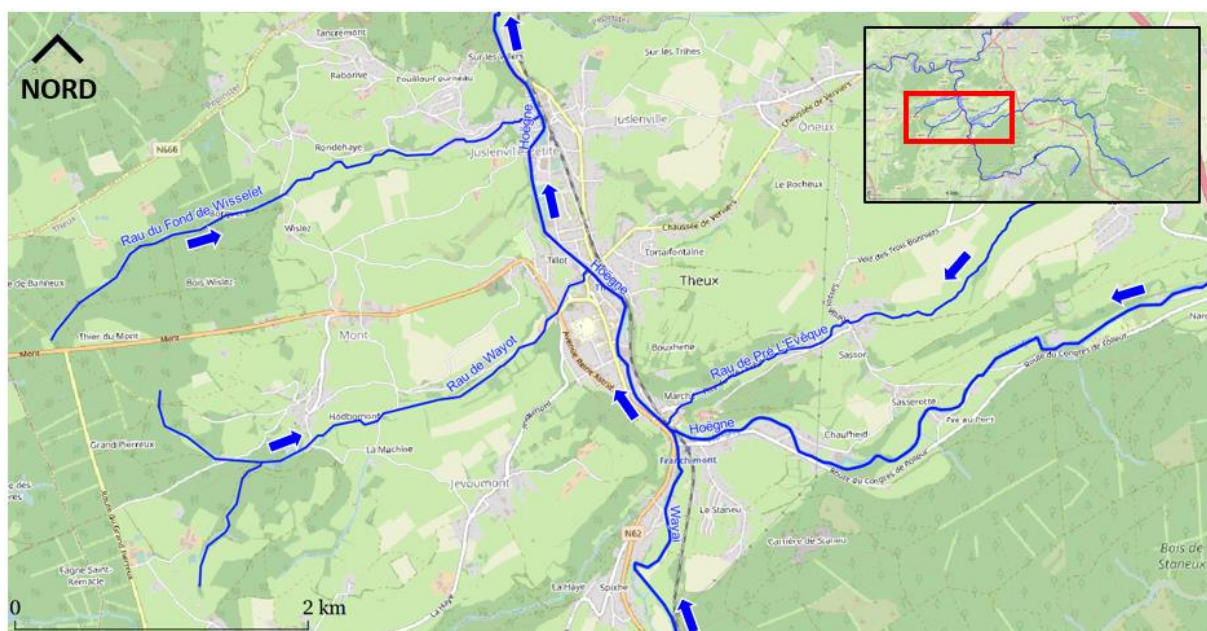


Figure 11 : Réseau hydrographique dans le centre de Theux. Le sens de l'écoulement est donné par les flèches bleues.

INTRODUCTION

En ce qui concerne les précipitations à Theux, les moyennes mensuelles varient entre 60 *mm* et 110 *mm*, comme illustré sur le diagramme de pluies présenté à la Figure 12. La Hoëgne, quant à elle, connaît des variations de débit tout au long de l'année. En période d'étiage, c'est-à-dire lors des périodes où les débits sont les plus faibles de l'année, le débit de la rivière est d'environ 0,26 m^3/s . En revanche, lors des crues habituelles, la moyenne des dix plus grands débits annuels est d'environ 15,45 m^3/s (Brabant, 2021). Cependant, il arrive parfois que le débit augmente considérablement, entraînant une hausse significative du niveau de la Hoëgne sans toutefois provoquer de débordement. À titre d'exemple, avant juillet 2021, le record enregistré remontait à juin 2018, avec un débit compris entre 80 et 90 m^3/s depuis le début des mesures de débit par le SPW en 2002.

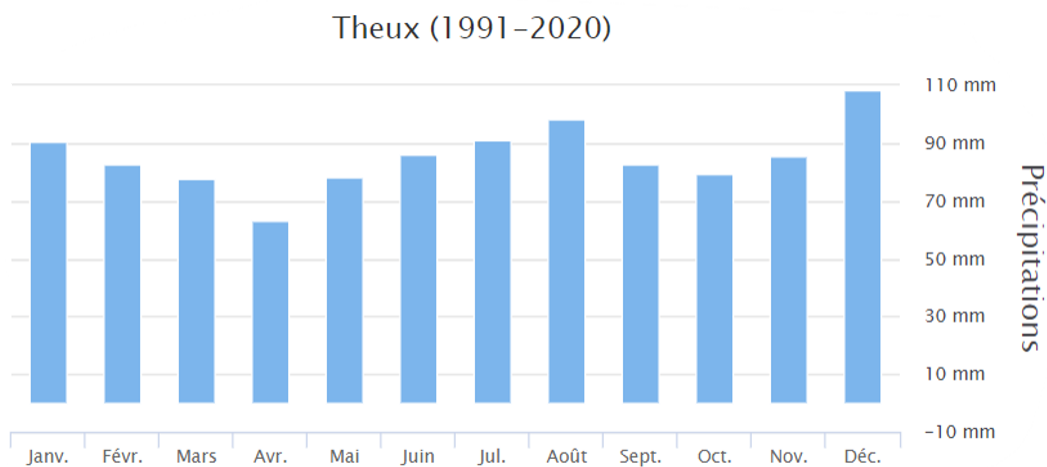


Figure 12 : Précipitations moyennes à Theux pour chaque mois entre 1991 et 2020.
Tirée du site de l'IRM³.

Pour rappel, lors de l'événement exceptionnel de juillet 2021, le pluviomètre de Jalhay, sur le plateau des Hautes Fagnes, a enregistré 291 *mm* de précipitations du 13 au 16 juillet 2021, soit plus de trois fois la moyenne attendue pour ce mois. Le débit maximal de la Hoëgne a été estimé à environ 300 m^3/s , dépassant largement les valeurs habituelles. Selon l'étude réalisée par le bureau de Stucky, cette crue de juillet 2021 à Theux est associée à une période de retour de dix mille ans (Brabant, 2021). Ce qui signifie qu'en moyenne, une crue de cette ampleur se produirait une fois toutes les dix mille années.

Après avoir exposé le contexte géographique, géologique et hydrologique de Theux, la partie suivante traite de manière générale la méthodologie utilisée pour étudier les inondations.

³ <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/climat-dans-votre-commune> consulté le 25 mai 2023.

INTRODUCTION

1.2 Comment étudier des inondations ?

Dans cette partie, est abordée la méthodologie classique employée pour étudier les inondations dans une zone donnée. Les différentes étapes et les outils couramment utilisés pour analyser, modéliser et évaluer les risques d'inondations sont présentés.

Principe du modèle hydraulique

Pour étudier les inondations, il est nécessaire de créer un modèle hydraulique qui représente au mieux la réalité de l'écoulement de l'eau dans un domaine. Et, qui permet ensuite de tester l'efficacité des aménagements pour lutter contre les inondations. Ce modèle hydraulique nécessite d'injecter de l'eau en entrée, un débit qui peut varier dans le temps, par exemple. Puis, il produit en sortie l'étendue, la hauteur et les vitesses de l'eau dans la zone modélisée pour ce débit donné. Un schéma qui illustre le principe d'un modèle hydraulique est présenté à la Figure 13. Le débit à injecter dans le domaine dépend de l'évènement pluvieux étudié et il peut être déterminé à l'aide d'un limnimètre par exemple. En effet, ce dernier, est un instrument qui mesure la profondeur dans un cours d'eau ponctuellement et régulièrement, puis il la transforme en un débit à l'aide d'une relation débit-hauteur, appelée également courbe de tarage.

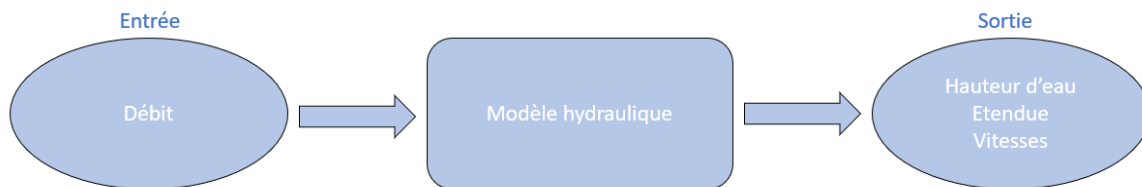


Figure 13 : Schéma du principe d'un modèle hydraulique.

Principe du modèle hydrologique

En réalité, les limnimètres sont très peu répandus, ce qui rend l'estimation du débit difficile étant donné la variation de celui-ci le long du cours d'eau, due en partie aux affluents qui augmentent le débit en apportant de l'eau. En outre, lors de crues importantes, les limnimètres sont souvent inefficaces car ils cessent de fonctionner et ne fournissent que des résultats insuffisants. C'est pourquoi l'utilisation d'un modèle hydrologique est souvent nécessaire pour étudier les inondations. En effet, ce modèle permet de reproduire le débit à un endroit donné pour l'évènement pluvieux étudié. Un schéma qui illustre le principe d'un modèle hydrologique est présenté à la Figure 14. L'idée est alors de choisir ce point comme étant le point amont de la zone modélisée. Cet endroit est défini comme l'exutoire d'un bassin versant (BV) qui lui est associé et qui représente toute la surface telle que si une goutte d'eau tombe dans cette zone, finit par passer par ce point à un moment donné. Le modèle hydrologique calcule le débit à l'exutoire d'un bassin versant à partir des données pluies mesurées par des pluviomètres, qui sont plus courantes et fiables que les mesures de débit.

INTRODUCTION

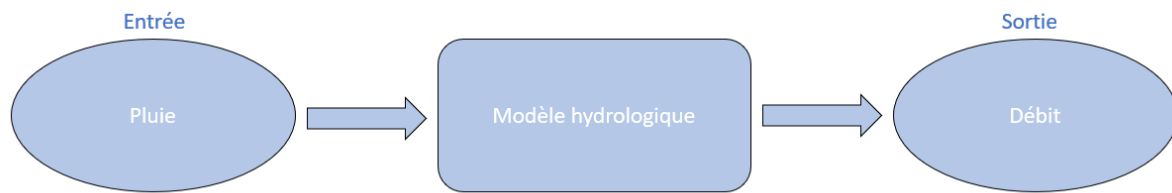


Figure 14 : Schéma du principe d'un modèle hydrologique.

Combinaison du modèle hydrologique et hydraulique

En général, pour étudier les inondations, on commence par construire un modèle hydrologique, puis un modèle hydraulique en utilisant le débit obtenu en sortie du modèle hydrologique comme entrée dans le modèle hydraulique. L'approche semble simple et unique mais là où les études diffèrent c'est dans le choix du modèle hydrologique et du modèle hydraulique utilisés. En effet, il existe un très grand nombre de modèles différents, surtout en hydrologie, dont l'efficacité dépend des objectifs de l'étude et des données disponibles. Les modèles ne sont que des représentations simplifiées de la réalité, qui est bien plus complexe. Il est donc important de choisir le modèle le plus simple qui permet d'atteindre la précision voulue par l'utilisateur. Il est également essentiel de prendre en compte les hypothèses qui sous-tendent chaque modèle et de s'assurer que celles du modèle choisi sont applicables dans le cas étudié (Deraedt et al., 2014).

Une fois que le modèle hydrologique et le modèle hydraulique ont été choisis, ils peuvent être utilisés de manière systémique l'un à la suite de l'autre, comme représenté sur le schéma de la Figure 15. En effet, le modèle hydrologique peut produire en sortie le débit en amont de la zone modélisée par le modèle hydraulique. Les modèles se différencient par les équations qu'ils résolvent et par les paramètres qu'ils définissent. La valeur de ces derniers est un élément clé de l'étude puisque les paramètres doivent être choisis de manière à ce que les modèles reproduisent au mieux la réalité. Cette procédure s'appelle le calage et pour se faire, il est nécessaire d'avoir des données de ce qu'il s'est passé en réalité pour les comparer avec les résultats obtenus grâce aux modèles. Les données sur lesquelles le calage peut se baser sont par exemple le débit mesuré à un limnimètre, l'étendue de la zone inondée où les hauteurs d'eau mesurées ponctuellement. Ces dernières peuvent être obtenues sur le terrain en examinant les traces laissées par les inondations, en interrogeant les habitants pour recueillir des informations sur les hauteurs d'eau atteintes, ou en utilisant les résultats des études antérieures.

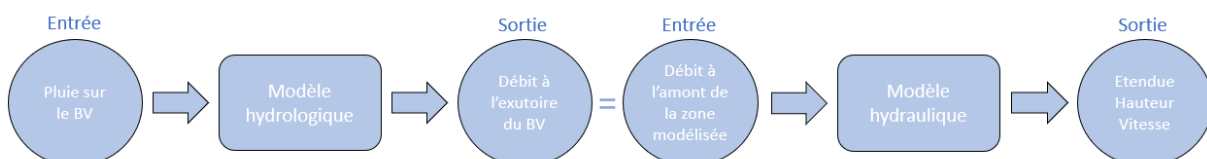


Figure 15 : Schéma du principe général pour étudier les inondations.

INTRODUCTION

Comme évoqué précédemment, il existe une diversité considérable de modèles hydrologiques et hydrauliques, chacun présentant ses propres avantages et inconvénients. Certains sont plus précis mais nécessitent davantage d'informations et de temps de calcul, tandis que d'autres sont moins précis mais donnent des résultats acceptables dans des délais plus raisonnables avec moins de données en entrée. Les sections 2.1 et 2.2 présentent une classification de différents modèles hydrologiques et hydrauliques, respectivement, dans le but de comprendre quels types de modèles semblent être plus pertinents à utiliser en fonction de l'étude réalisée.

Utilisation des modèles

Enfin, le modèle hydrologique et le modèle hydraulique étant calibrés pour représenter fidèlement la réalité, il est possible de les utiliser pour tester des solutions visant à lutter contre les inondations. Les propositions d'aménagement peuvent être intégrées dans le modèle hydraulique afin d'évaluer leur impact sur l'étendue et la hauteur de l'eau. Cette méthode permet de déterminer les aménagements les plus efficaces pour réduire les risques liés aux inondations en cas de pluies similaires à celles étudiées. Différents types d'aménagements sont possibles, chacun ayant des fonctions, des coûts et des objectifs différents. La section 2.3 aborde diverses mesures et aménagements qui peuvent être mis en place pour lutter efficacement contre les inondations de manière générale.

2 État de l'art

Dans ce chapitre intitulé « État de l'art », une classification des divers modèles hydrologiques et hydrauliques est présentée en se basant sur certaines études ayant utilisé certains de ces modèles dans des domaines similaires. Cette approche permet d'inscrire le présent travail dans le contexte des recherches déjà réalisées et de découvrir différents types de modèles, afin de choisir les plus pertinents dans le cadre de notre étude à Theux. En conclusion de ce chapitre, est également présenté un inventaire de quelques mesures de protection permettant d'atténuer les inondations.

2.1 Les modèles hydrologiques

Il est important de choisir un modèle hydrologique adapté à l'étude réalisée, pour cela il est intéressant de connaître les différents types de modèles qu'il existe et leurs spécificités. C'est pourquoi, dans cette partie, est proposée une classification des différents types de modèles hydrologiques. Il a été choisi de suivre une partie du travail et la classification proposée par Charles Perrin dans sa thèse : « Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative » en 2000 (Perrin, 2000). Un grand nombre de passages intéressants ont été repris et reformulés dans cette partie.

Habituellement, un modèle hydrologique est constitué de deux fonctions distinctes : la « production » et le « transfert ». La première fonction permet de faire un bilan de l'eau sur une zone spécifique du bassin versant, pour déterminer quelle proportion de l'eau s'infiltre dans le sol, s'évapore ou ruisselle pour finalement participer à l'écoulement. La seconde fonction décrit comment la quantité d'eau qui ruisselle se propage dans le temps. Selon le modèle hydrologique utilisé, ces deux fonctions peuvent être décrites de différentes manières.

Il existe de nombreux modèles hydrologiques différents car il existe une multitude de manières de représenter la réponse d'un bassin versant lors de précipitations. Mais aussi, la complexité d'un bassin versant rend la solution miracle peut-être introuvable. De plus, le débit dans la rivière est constitué de quatre parties différentes qui ne sont pas toujours évidente à déterminer : l'apport direct d'eau par la pluie sur la surface de la rivière, le ruissellement durant la pluie, le débit dans le sol avec un court délai, appelé écoulement hypodermique et l'écoulement de la nappe qui est une grande partie du débit lors des périodes sèches formant le débit de base.

Pour ces différentes raisons, il est difficile de parvenir à une classification unique des modèles hydrologiques. Néanmoins, il existe quelques facteurs principaux qui permettent de les différencier :

- La discrétisation spatiale du bassin versant peut être globale, semi-distribuée ou distribuée comme illustré sur les schémas de la Figure 16. La représentation globale considère que le bassin versant est une seule entité, tandis qu'un modèle distribué discrétise le bassin versant un grand nombre de mailles sur lesquelles les variables sont calculées. Une représentation semi-distribuée divise quant à elle le bassin versant en sous-bassins plus petits.
- Les relations utilisées pour caractériser la transformation de la pluie en débit peuvent être empiriques, conceptuelles ou théoriques.

ÉTAT DE L'ART

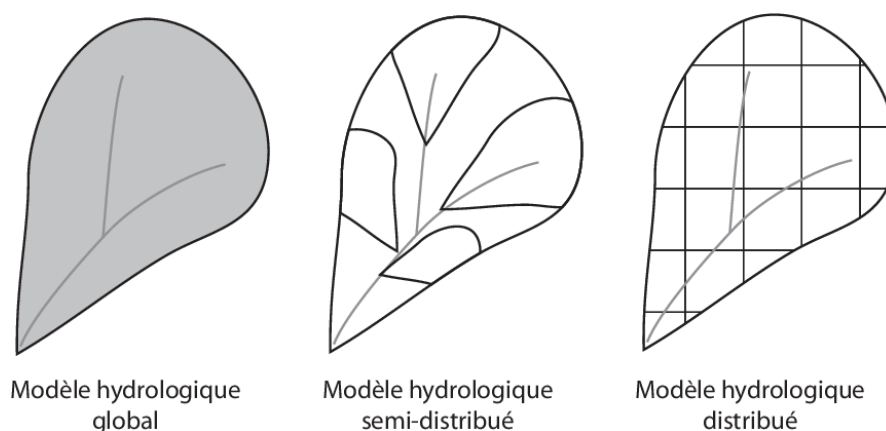


Figure 16 : Représentation spatiale des modèles hydrologiques.
Tirée de la thèse de Julien Lerat (Lerat, 2009).

Il existe également d'autres éléments qui pourraient être utilisés pour les différencier. C'est à partir de ces caractéristiques que les classifications sont proposées. Charles Perrin (2000) propose de les classer en trois catégories : les modèles « boîte noire », les modèles « à réservoirs » (conceptuels ou empiriques) et les modèles fondés sur la physique. Les spécificités de ces trois types de modèles sont détaillées dans les trois sections suivantes.

2.1.1 Les modèles « boîte noire »

Les modèles dits « boîte noire » utilisent des équations empiriques sur un système global pour établir une relation entre les pluies et le débit à l'exutoire du bassin versant. Ce type de modèle utilise uniquement des données en entrée et en sortie du bassin versant, sans considérer ses caractéristiques physiques. Le principe est de faire varier les paramètres de la relation pour obtenir une bonne corrélation entre les résultats obtenus en sortie et les données disponibles de pluies et de débits. Ces modèles ont l'avantage d'être faciles à mettre en œuvre puisqu'ils ne demandent que très peu de paramètres et il n'est pas nécessaire de connaître le fonctionnement du bassin versant. Par contre, pour espérer avoir des résultats acceptables, il faut disposer de données de bonne qualité afin de calibrer le modèle. De plus, un modèle calibré et validé pour un certain bassin versant ne sera fiable uniquement que pour ce dernier et seulement pour des événements pluvieux similaires à ceux utilisés pour le calage. Ce type de modèle ne donne pas des résultats satisfaisants lorsque les hétérogénéités au sein du bassin versant sont non négligeables (Deraedt et al., 2014).

Méthode rationnelle

Un exemple de modèle « boîte noire » est la méthode rationnelle. Celle-ci permet d'estimer le débit de pointe à l'exutoire d'un bassin versant de manière très simple en utilisant l'expression suivante :

$$Q_p = \frac{C i A}{360} \quad (1)$$

ÉTAT DE L'ART

où Q_p est le débit de pointe en m^3/s , C est le coefficient de ruissellement qui dépend de la couverture du sol, i est l'intensité de la pluie pour une durée égale au temps de concentration⁴ du bassin versant exprimée en mm/h et A est la superficie du bassin versant exprimée en hectares (Ministère de l'Environnement, s.d.).

Cette relation repose sur plusieurs hypothèses plutôt fortes comme l'utilisation d'une pluie d'intensité uniforme et d'un coefficient de ruissellement indépendant de l'apport d'eau dans le temps. C'est pourquoi la méthode est acceptable uniquement pour de petits bassins versants homogènes dont la superficie est inférieure à $10 km^2$, voire exceptionnellement jusqu'à $100 km^2$ (Areas, 2013). De plus, cette méthode estime de manière plus efficace le débit de pointe sur des surfaces très imperméables, telles qu'en zones urbaines. Il est également important de noter que la fonction de transfert est linéaire de manière à simplifier la réalité (Ministère de l'Environnement, s.d.).

En général, elle est plutôt utilisée pour valider des résultats obtenus avec d'autres méthodes ou pour dimensionner des petits ouvrages de stockage ou un système de drainage urbain (Ministère de l'Environnement, s.d.).

En conclusion, les modèles « boîte noire » permettent d'estimer de manière plus ou moins grossière le débit à l'exutoire d'un bassin versant en raison des hypothèses assez fortes sur lesquelles ils sont basés. Cependant, dans certains cas, quelques-uns de ces modèles peuvent être utilisés de manière plus fiable, souvent dans le but de valider des résultats. Dans le cas de bassins versants plus complexes, des méthodes plus sophistiquées, comme celles de la catégorie présentée ci-dessous, doivent être utilisées.

2.1.2 Les modèles « à réservoirs » conceptuels ou empiriques

Les modèles classés dans cette catégorie se différencient des modèles de type « boîte noire » en subdivisant le processus de transformation de la pluie en débit en sous-processus traités globalement. Ces modèles sont souvent schématiquement constitués de réservoirs interconnectés virtuels qui transforment la pluie en débit et qui représentent les sous-bassins du bassin versant qui se remplissent et se vident au fil du temps. Cette représentation permet au système de conserver en mémoire les conditions passées. Cependant, les paramètres utilisés pour lier les réservoirs entre eux ne sont pas associés à une signification physique. Ils ne peuvent donc pas être mesurés, ce qui rend une calibration du modèle nécessaire. Dans la plupart des cas, ces modèles sont globaux mais ils peuvent également être semi-distribués voire distribués. Ces types de modèles sont décomposés en deux fonctions comme discuté précédemment : une fonction de « production » et une fonction de « transfert ».

⁴ Le temps de concentration est le temps nécessaire pour que l'ensemble du bassin versant participe au débit à l'exutoire.

ÉTAT DE L'ART

Il existe un très grand nombre de modèles de ce type. Cependant, dans cette section, nous reprendrons deux études différentes qui utilisent deux modèles hydrologiques couramment utilisés. En premier lieu, le modèle GR3J, présenté par Edijatno et al. (1999), est analysé à travers une étude. Le nom du modèle provient de « GR », signifiant Génie Rural, « 3 » représentant le nombre de paramètres, et « J » indiquant que le pas de temps est journalier (Vegas Galdos, 2006). Ensuite, une autre étude utilisant le modèle « Soil Conservation Service & Lag Route » (SCS-LR) est également analysée (Lequien, 2003). Dans ce qui suit, les deux études sont résumées et quelques conclusions pertinentes sont reprises afin de comparer l'utilisation de chacun de ces deux modèles en fonction des situations.

Application du modèle GR3J

Le travail de fin d'études analysé est celui de Fernando Vegas Galdos s'intitulant « Application d'un modèle hydrologique global à un bassin versant de haute montagne tropicale » (Vegas Galdos, 2006). L'objectif de ce travail est d'utiliser des modèles globaux afin de caractériser les relations pluies-débits sur les parties non-englacées de la Cordillère Blanche au Pérou. Pour ce faire, F. Vegas Galdos utilise notamment le modèle empirique « à réservoirs », GR3J dans le but de reconstituer les débits à partir de données de précipitations et de températures.

Ce modèle utilise deux réservoirs, le réservoir « sol » et le réservoir « eau-gravitaire » qui permettent de représenter les processus de rétention et de libération d'eau à partir de relation de vidange quadratique. De plus, une relation d'hydrogramme unitaire est utilisée pour appliquer la transformation de pluie en débit avec un certain décalage entre la pluie et le débit obtenu. Une partie du débit contribue directement à l'écoulement, puis, grâce au réservoir « eau-gravitaire », une partie participe à l'écoulement retardé. Les trois paramètres sont la capacité du réservoir « eau-gravitaire », le temps de base de l'hydrogramme unitaire et le coefficient de réaction qui simule les apports et les pertes en eau (Perrin, 2000).

F. Vegas Galdos a réussi globalement à reproduire de manière satisfaisante les débits à partir du modèle GR3J, bien que les résultats présentent plusieurs imprécisions. Cependant, il a permis de mettre en évidence que le modèle rencontre des difficultés à modéliser l'écoulement en saison humide car le modèle est très simplifié. Il est également ressorti qu'étant donné que le modèle GR3J est empirique, les paramètres n'ont pas de réel sens physique et, par conséquent il est nécessaire d'avoir un ensemble de données fiables suffisant pour caler le modèle sans quoi, il est très difficile de valider les paramètres trouvés.

Application du modèle SCS-LR

Le travail d'Alexandra Lequien, intitulé « Analyse et évaluation des crues extrêmes par modélisation hydrologique spatialisée. Cas du bassin versant du Vidourle », utilise le modèle SCS-LR pour caractériser l'écoulement sur le bassin versant du Vidourle soumis à des crues éclair (Lequien, 2003). Le modèle utilisé est un modèle « à réservoirs » conceptuel distribué permettant de prendre en compte l'hétérogénéité du bassin versant.

ÉTAT DE L'ART

Le modèle SCS-LR est issu de la combinaison de la fonction de production « SCS » et de la fonction de transfert « Lag&Route », utilisant au total cinq paramètres. La fonction de production est basée sur l'utilisation de deux réservoirs : le réservoir « sol » et le réservoir « pluie », permettant de simuler l'effet de la rétention de l'eau et du décalage entre la pluie et l'eau qui ruisselle. La fonction de transfert fait le lien entre la pluie qui participe à l'écoulement et le débit à l'exutoire. Plus de détails concernant ce modèle sont donnés aux sections 3.3.3 et 3.3.4.

L'étude menée par A. Lequien a mis en évidence que la majorité des événements pluvieux étudiés ont pu être correctement caractérisés en termes de débit en utilisant le modèle SCS-LR. Une des conclusions importantes est que les trois paramètres liés à la vidange des réservoirs et à la décrue semblent être peu sensibles à l'évènement pluvieux. Cependant, le paramètre lié au réservoir du sol est similaire pour des événements importants et pour des événements exceptionnels, tandis que le paramètre de vitesse d'écoulement augmente pour des événements exceptionnels. En revanche, entre un épisode pluvieux classique et un épisode plus important, c'est le contraire : le paramètre lié au réservoir du sol varie et la vitesse d'écoulement reste stable. Dès lors, le travail souligne que le paramètre lié au réservoir du sol ainsi que celui lié à la vitesse d'écoulement sont sensibles. Ils sont propres au bassin sur lequel le calage est fait et spécifiques à l'évènement pluvieux. Par conséquent, ils ne peuvent pas être appliqués à d'autres bassins proches sans procéder à un calage, ni au même bassin avec un évènement pluvieux très différent de celui utilisé pour le calage.

A nouveau, la qualité du calage du modèle dépend de la qualité des données disponibles pour l'étude.

En somme, les modèles « à réservoirs », conceptuels ou empiriques, présentent leurs avantages et leurs limites, et leur sélection dépend des objectifs de la modélisation hydrologique ainsi que des données disponibles. Ils requièrent également un processus de calibrage, mais se montrent plus flexibles et reflètent mieux la réalité que les modèles « boîte noire », grâce au nombre souvent plus important de paramètres et à la modélisation en réservoirs virtuels. Cependant, ils nécessitent plus de données pour être correctement utilisés.

2.1.3 Les modèles fondés sur la physique

Les modèles de simulation hydrologique fondés sur la physique se distinguent des modèles précédents par leur volonté d'expliquer le comportement hydrologique à partir de principes physiques. Ils reposent sur des équations mathématiques complexes issues des domaines de la physique, comme les équations de Saint-Venant pour les écoulements en rivière, ou celles de Boussinesq et Richards pour les écoulements dans les sols saturés ou non. De plus, ils prennent en compte la variation spatiale du bassin par une discrétisation fine à travers des mailles où les lois de la physique s'appliquent. Ainsi, ils sont capables de simuler simultanément des variables hydrologiques autres que le débit, telles que le niveau des nappes et l'évaporation.

ÉTAT DE L'ART

Mais encore, les paramètres de ces modèles sont dotés d'une signification physique et peuvent être mesurés sur le terrain, contrairement aux modèles précédents qui se concentrent uniquement sur la représentation du comportement hydrologique final à l'exutoire.

Toutefois, les modèles hydrologiques basés sur la physique présentent des limites pratiques. Leur complexité physique entraîne une dépendance à l'égard de nombreux paramètres, compliquant leur évaluation à l'échelle des mailles. Par conséquent, la calibration de ces modèles devient un processus aléatoire, avec un risque que les valeurs des paramètres à l'échelle des mailles ne correspondent plus à la réalité physique du terrain, ce qui diminue leur avantage. De plus, la validation de ces modèles est souvent entravée par le manque de données internes autres que les débits. En raison de leurs exigences en termes de temps de calcul et de données, ces modèles sont généralement utilisés dans un contexte de recherche plutôt que pour des applications pratiques.

Pour conclure, cette classification offre une perspective claire des avantages et des inconvénients de chaque type de modèle présenté. En reprenant les conclusions pertinentes de quelques études ayant appliqué certains de ces modèles, il a été possible de mettre en évidence les particularités de chacun. Cela se révèle essentiel pour sélectionner le modèle hydrologique approprié dans le contexte de notre étude sur les inondations à Theux.

2.2 Les modèles hydrauliques

Comme discuté précédemment, l'étude des inondations nécessite l'utilisation d'un modèle hydraulique appliqué à une zone définie. Le débit en amont de cette zone peut être calculé à l'aide d'un modèle hydrologique appartenant à l'un des types présentés précédemment. Le modèle hydraulique permet de décrire l'écoulement de l'eau dans une zone délimitée. À l'aide d'une série d'équations, il calcule les hauteurs d'eau, les vitesses d'écoulement et les surfaces inondées en tout point et à tout moment dans la zone étudiée. Il décrit la propagation de l'eau lorsqu'un cours d'eau est soumis à un débit qui peut évoluer au fil du temps, fournissant ainsi une représentation simplifiée de l'écoulement dans la zone modélisée. Les modèles hydrauliques peuvent être utilisés à différentes échelles, allant de l'évaluation de l'écoulement dans une simple conduite à la modélisation d'un bassin versant.

Il existe plusieurs modèles hydrauliques qui dépendent des équations utilisées pour décrire le phénomène. Deux grands types de modèles se distinguent : les modèles conceptuels et les modèles mécanistes⁵. Le premier type de modèle est constitué de compartiments connectés échangeant des flux. Dans la section 2.2.1, l'une des méthodes conceptuelles les plus utilisées est décrite, il s'agit de la méthode des cellules. Le deuxième type est basé sur les lois de conservation de la physique ainsi que sur quelques lois empiriques.

⁵ <https://www.youtube.com/watch?v=J3qpkAtwu5M> consulté le 18 mai 2023.

ÉTAT DE L'ART

Parmi les modèles mécanistes, trois principaux types se démarquent. Le premier et le plus complet est le modèle en trois dimensions, basé sur les équations de Navier-Stokes. Les deux autres modèles résultent d'une simplification des équations de Navier-Stokes et sont les équations de Saint-Venant en deux dimensions ou à une seule dimension. Une variante existe également, combinant les équations de Saint-Venant à une dimension avec celles à deux dimensions. Chacun de ces quatre modèles possède ses avantages et ses limites, les rendant plus appropriés à certains cas qu'à d'autres. Chacun de ces quatre modèles est passé en revue dans la section 2.2.2, qui traite des modèles mécanistes.

2.2.1 Les modèles conceptuels

Il existe plusieurs modèles conceptuels et l'une des plus connues est la méthode des cellules, présentée dans cette section. La description de cette méthode est tirée du cours « Analysis and mitigation of floods » donné par Sandra Soares Frazao (Soares Frazao, Analysis and mitigation of floods, s.d.).

Méthode des cellules

Cette méthode permet d'étudier la distribution de l'eau dans des zones inondées en la traitant comme si elle était contenue dans des compartiments qui se remplissent et se vident. Dans cette approche, il est supposé que les vitesses d'écoulement à l'intérieur de ces compartiments sont très limitées, ce qui permet de négliger l'inertie et donc de ne pas tenir compte des effets dynamiques. Cette simplification est généralement valable car les écoulements sont plus rapides dans le lit mineur des cours d'eau et plus lents dans les plaines inondables. La propagation de l'eau d'une cellule à l'autre est principalement guidée par les pertes dues au frottement. Le débit entre deux cellules dépend alors des niveaux d'eau dans ces compartiments en utilisant des relations de type déversoir.

Cependant, cette méthode est moins adaptée au cas de la ville de Theux. En effet, comme expliqué dans l'introduction, cette commune est située dans une vallée très encaissée, ce qui se traduit par de grandes pentes et, par conséquent, de grandes vitesses d'écoulement. Par conséquent, négliger les vitesses dans les zones planes constitue une hypothèse trop simplificatrice, car en réalité, cette hypothèse est loin de refléter la situation réelle, en particulier lors d'inondations d'une ampleur similaire à celles de juillet 2021.

2.2.2 Les modèles mécanistes

Cette section s'inspire de plusieurs travaux, notamment du mémoire de Charles Ryckmans (Ryckmans, 2021), des notes du cours « Numerical simulation of transient flow » donné par Sandra Soares Frazao (Soares Frazao, Finite-volume resolution of the Saint-Venant shallow-water equations, s.d.) et de la thèse de Pierre Archambeau (Archambeau, 2006).

ÉTAT DE L'ART

Les modèles mécanistes reposent sur les lois de conservation de la physique, telles que la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Le modèle le plus général est construit à partir des équations de Navier-Stokes. Ces équations permettent de décrire le mouvement des fluides newtoniens incompressibles. Elles s'appliquent aux fluides pour lesquels la contrainte de cisaillement à l'intérieur du fluide est directement proportionnelle au taux de déformation. Autrement dit, ils sont tels que leur viscosité reste constante indépendamment du taux de déformation. Pour les liquides incompressibles, comme l'eau, l'équation de conservation de l'énergie décrit le transport de la température, aspect non pris en compte par les équations de Navier-Stokes (Archambeau, 2006). Par conséquent, étant donné que l'eau est un fluide newtonien incompressible, elle obéit à ces équations.

Les équations de Saint-Venant bidimensionnelles, également appelées équations en eau peu profonde, sont une simplification des équations de Navier-Stokes obtenue en intégrant ces dernières sur la hauteur de l'écoulement. Ces équations simplifiées décrivent les écoulements transitoires à surface libre en moyennant les variables sur la hauteur de l'écoulement. Elles peuvent être encore simplifiées pour traiter des écoulements unidimensionnels.

Equations de Navier-Stokes

La première équation de Navier-Stokes est obtenue en exprimant la conservation de la masse sur un volume de contrôle infinitésimal. L'équation de continuité ainsi obtenue est la suivante :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

où u , v et w sont les composantes du vecteur vitesse, $\vec{V}(x,y,z)$ dans les directions x , y et z respectivement et $\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right)$ est l'opérateur différentiel.

Les trois autres équations sont obtenues en exprimant la conservation de la quantité de mouvement dans les trois directions du volume infinitésimal, en tenant compte de la force de gravité et des contraintes agissant sur le volume. Les contraintes sont exprimées selon le modèle du liquide parfait visqueux. Les trois équations de conservation de la quantité de mouvement sont les suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial y} v + \frac{\partial u}{\partial z} w = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} u + \frac{\partial v}{\partial y} v + \frac{\partial v}{\partial z} w = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial x} u + \frac{\partial w}{\partial y} v + \frac{\partial w}{\partial z} w = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

où p est la pression hydrostatique, ν la viscosité cinématique et g l'accélération de la gravité.

ÉTAT DE L'ART

Ce système de quatre équations est valable uniquement pour des écoulements laminaires. Pour qu'il reste valide en cas d'écoulements turbulents, bien plus courants en pratique, il est nécessaire d'ajouter des termes relatifs à la turbulence. Plusieurs modèles existent pour décrire ces termes de turbulence, comme le modèle de Boussinesq qui utilise la moyenne de Reynolds pour exprimer chaque variable comme une composante moyennée dans le temps et une fluctuation de cette grandeur. En incorporant ces termes turbulents aux équations, nous obtenons les équations générales de Navier-Stokes.

Ces équations sont très complexes et décrivent la vitesse dans les trois directions. Elles sont donc généralement utilisées pour des écoulements transitoires très localisés sur de courtes distances, comme illustré dans la Figure 17. Résoudre ces équations demande un temps de calcul important et de nombreux paramètres. Pour les écoulements où la vitesse verticale a moins d'importance et lorsque l'échelle spatiale est plus grande, comme dans l'étude des inondations par exemple, ces équations peuvent être simplifiées à une ou deux dimensions, donnant lieu aux équations de Saint-Venant.



Figure 17 : Écoulement tourbillonnaire où les vitesses sont importantes dans les trois directions.
Tirée du site « Hugo Rossignol »⁶.

Equations de Saint-Venant 2D ou équations « en eau peu profonde »

Les équations de Saint-Venant sont une version simplifiée des équations de Navier-Stokes en deux dimensions en travaillant avec les grandeurs physiques moyennées sur la profondeur de l'écoulement. Elles sont également appelées les équations « en eau peu profonde ». Ces équations reposent sur plusieurs hypothèses :

- La vitesse verticale est négligée, ce qui implique que les filets fluides sont parallèles et que la pression est hydrostatique sur une section de l'écoulement.
- Les pertes de charge causées par la friction sur le lit sont considérées comme équivalentes à celles rencontrées dans des conditions d'écoulement uniforme. Cela permet l'utilisation d'une formule de type Manning pour exprimer la pente de friction, notée S_f .
- La pente de fond, notée S_0 , est faible, permettant d'exprimer la profondeur d'eau, notée h , comme la différence verticale entre le niveau de l'eau et le fond du lit.

⁶ <https://osteo.bzh/biokinergie/vortex-eau-petit/> consulté le 19 mai 2023.

ÉTAT DE L'ART

Pour obtenir l'équation de continuité de Saint-Venant, il suffit d'intégrer celle de Navier-Stokes (2) sur la profondeur de l'eau. L'équation de continuité de Saint-Venant, écrite sous forme conservative, c'est-à-dire en termes de variables conservées, est la suivante :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(q_y)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

où $q_x = Uh$ et $q_y = Vh$, avec U et V étant les moyennes des vitesses longitudinales et transversales respectivement.

Les deux équations de quantité de mouvement dans les deux directions horizontales de Saint-Venant sont obtenues de la même manière en intégrant les équations de Navier-Stokes (3) sur la profondeur. Les équations de quantité de mouvement, écrites sous forme conservative, sont les suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\partial(q_x)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = gh(S_{0,x} - S_{f,x}) \\ \frac{\partial(q_y)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) = gh(S_{0,y} - S_{f,y}) \end{cases} \quad (5)$$

où S_0 est la pente de fond et S_f est la pente de la ligne de charge.

Il est possible d'exprimer ces trois équations sous forme vectorielle de la manière suivante :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (6)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{pmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} q_x \\ \frac{q_x^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \\ \frac{q_x q_y}{h} \end{pmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} q_y \\ \frac{q_x q_y}{h} \\ \frac{q_y^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \end{pmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{0,x} - S_{f,x}) \\ gh(S_{0,y} - S_{f,y}) \end{pmatrix}$$

Les équations de Saint-Venant bidimensionnelles présentées ci-dessus sont particulièrement adaptées pour l'étude des écoulements où les vitesses horizontales prédominent par rapport aux vitesses verticales. Cela est particulièrement le cas lors d'analyses relatives aux inondations, où l'eau se propage dans les deux directions horizontales des plaines inondables, tel qu'illustré sur la Figure 18. Si le problème étudié présente une distribution de vitesse principalement dans la direction longitudinale, ces équations peuvent même être davantage simplifiées pour obtenir les équations de Saint-Venant unidimensionnelles, permettant ainsi de réduire encore la complexité et le temps de calcul.

ÉTAT DE L'ART



Figure 18 : Inondations en Malaisie (2022) où l'eau s'écoule dans les deux directions horizontales.
Tirée d'un article de « Futura » (Futura-sciences).

Une étude menée par Pierre Archambeau *et al.*, intitulée « Modélisation numérique et gestion du risque d'inondation en milieu urbain sur la base de modèles topographiques à haute résolution », utilise le modèle numérique « WOLF2D », qui résout les équations de Saint-Venant 2D. Ce modèle a été développé à l'Université de Liège dans le but de produire une carte d'aléa d'inondation (Archambeau *et al.*, s.d.). Le modèle a été appliqué à la rivière Vesdre ainsi qu'à l'Eau d'Heure. Cette étude met en évidence les capacités de caractérisation offertes par de tels modèles numériques. Le modèle dépend uniquement d'un seul paramètre, le coefficient de frottement, ce qui facilite le calibrage du modèle à partir des données disponibles pour un événement spécifique. Les résultats obtenus dans cette étude en appliquant le modèle à une crue de 1998 dans la Vesdre et à une crue de 2002 dans l'Eau d'Heure montrent que le modèle numérique utilisé reproduit fidèlement la réalité. Les résultats de cette étude sont très satisfaisants et démontrent que les équations de Saint-Venant 2D résolues numériquement sont hautement adaptées à l'étude des inondations, à condition que les données topographiques soient suffisamment précises.

Equations de Saint-Venant 1D

Il est possible de simplifier davantage les équations en ne considérant que la direction longitudinale de l'écoulement. Dans ce cas, les équations sous forme conservative deviennent les suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = gA(S_0 - S_f) + gI_2 \end{cases} \quad (7)$$

où A est l'aire de la section mouillée, Q est le débit, $I_1 = \int_0^h (h - \eta)b(\eta)d\eta$ est le moment statique de la section et $I_2 = \int_0^h (h - \eta)\frac{\partial b}{\partial x}d\eta$ est le terme qui prend en compte les forces de pression dues au changement de largeur de la section. La définition des variables η , b et h est donnée à la Figure 19.

ÉTAT DE L'ART

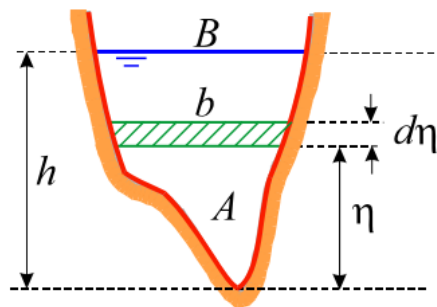


Figure 19 : Schéma qui définit les variables liées au calcul de I_1 et I_2 .

Tirée du cours « Numerical simulation of transient flow » (Soares Frazao, Numerical simulation of transient flow, s.d.).

Ces équations, qui décrivent l'écoulement uniquement dans la direction longitudinale, sont particulièrement adaptées lors de l'étude des débits d'un cours d'eau, comme illustré sur la Figure 20 par exemple.



Figure 20 : Écoulement d'un cours d'eau principalement dans une seule direction.

Tirée d'un article de la RTBF (RTBF, 2020).

Couplage 1D/2D

Le couplage 1D/2D est un type de modèle qui combine les avantages des modèles unidimensionnels en termes de rapidité de calcul et des modèles bidimensionnels en termes de précision de distribution des vitesses dans le plan horizontal pour le calcul des inondations. Comme illustré dans la Figure 21, l'idée sous-jacente est d'utiliser les équations de Saint-Venant unidimensionnelles pour représenter l'écoulement principal dans le cours d'eau, où le déplacement se fait principalement dans la direction longitudinale. Dans les plaines d'inondation, les équations de Saint-Venant bidimensionnelles sont employées, car l'eau peut se propager dans les deux directions horizontales. Ainsi, ce couplage permet de réduire le temps de calcul dans la partie du lit mineur du cours d'eau tout en préservant une précision élevée dans les zones inondées.

ÉTAT DE L'ART

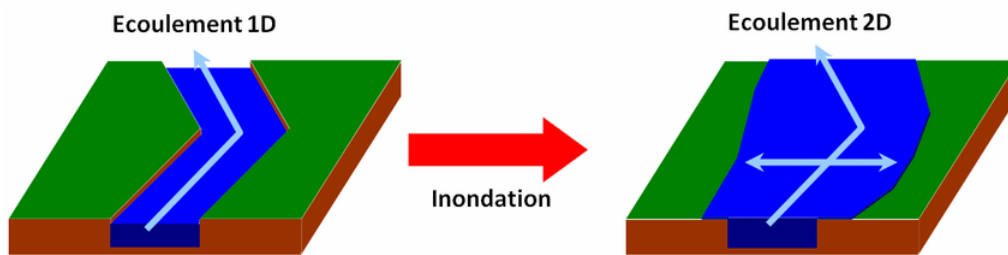


Figure 21 : Schéma qui illustre le principe du couplage 1D/2D.
Tirée du site « ResearchGate » (Biancamaria, 2009).

En conclusion de cette section sur les modèles hydrauliques, il est essentiel de retenir que ces modèles peuvent être élaborés à partir de différents systèmes d'équations, comme ceux qui ont été présentés précédemment. Le choix des équations à résoudre dépendra de la nature spécifique du problème à étudier et à représenter. Il est important de noter que les équations des modèles mécanistes n'ont généralement pas de solutions analytiques, nécessitant ainsi l'utilisation de schémas numériques pour leur résolution. Cette question sera abordée plus en détail dans la section 3.4.2.

Une fois que le modèle hydrologique et le modèle hydraulique ont été choisis et calibrés, il est possible d'intégrer des aménagements visant à atténuer les risques liés aux inondations dans le modèle. La section suivante présente plusieurs mesures de protection qui offrent un aperçu de différentes options disponibles pour atténuer les impacts des inondations.

2.3 Les mesures de protection

Cette partie explore différentes méthodes pour lutter contre les inondations. Il existe de nombreuses manières possibles de les classer, et pour cela, nous nous sommes inspirés du travail de Helga-Jane Scarwell et Richard Laganier intitulé « Risque d'inondation et aménagement durable des territoires » (Scarwell & Laganier, 2004).

Pour discuter des types de mesures de protection envisageables, il est essentiel de revenir à la définition du risque. En général, le risque découle de la multiplication de l'aléa et de la vulnérabilité. Agir sur l'aléa implique de chercher à réduire le phénomène d'inondation. Cette approche nécessite l'emploi de mesures dites « structurelles » qui ont pour objectif de diminuer les inondations. Ces mesures visent à favoriser l'infiltration et le stockage dans les versants. En revanche, agir sur la vulnérabilité signifie promouvoir la prévention et une gestion globale des inondations, en mettant l'accent sur la capacité d'adaptation de la société et en engageant différents acteurs pour minimiser les conséquences des inondations sur les populations et les territoires. Cette approche repose davantage sur des mesures « non structurelles ». Ces deux approches sont complémentaires et nécessitent d'être combinées pour réduire efficacement le risque d'inondation. La section suivante détaille les divers types de mesures « structurelles ». Nous n'approfondirons pas les mesures « non structurelles » car elles sont moins pertinentes dans le cadre de ce travail, étant donné qu'il n'est pas possible de les modéliser.

ÉTAT DE L'ART

2.3.1 Les mesures « structurelles »

En général, les mesures « structurelles » consistent en des interventions de génie civil sur le bassin versant, le lit ou les berges du cours d'eau afin de modifier l'écoulement. Les principales mesures de ce type incluent les barrages, les digues et les bassins de rétention.

Auparavant, ces mesures étaient souvent entreprises de manière intuitive en raison des connaissances limitées sur les phénomènes d'inondations. Souvent, il s'agissait de gestion locale, utilisant des mesures telles que les digues, l'entretien des berges et des modifications du lit du cours d'eau, sans considération pour l'écosystème naturel. Cependant, cette manière de fonctionner a souvent posé des problèmes car elle engendrait des conséquences perverses et ne supprimait parfois pas le problème initial. Par exemple, des interventions sur les cours d'eau visant à élargir leur largeur ou à augmenter leur profondeur peuvent augmenter le débit et favoriser les débordements en aval. À l'inverse, réduire la section d'écoulement entraîne une diminution du débit et donc des débordements en amont. C'est pourquoi désormais, la stratégie adoptée tend davantage à harmoniser les actions le long du cours d'eau, en adoptant une approche globale du bassin versant pour éviter les conséquences indésirables en aval ou en amont.

Lors des crues, d'importants volumes d'eau doivent se déplacer de l'amont vers l'aval. Cette réalité doit être prise en compte, car il est impossible de faire disparaître ces volumes d'eau. L'idée consiste à gérer ces volumes d'eau à l'échelle du bassin versant en aménageant des zones inondables. L'objectif est d'éviter que l'ensemble du volume de la crue ne s'écoule simultanément. Cette approche a été développée à travers la méthode « inondabilité » (Gilard, 1998). Cette méthode soutient que pour lutter contre les inondations, il est nécessaire d'inonder mais de manière judicieuse. Dans cette perspective, l'idée est donc de permettre le développement de zones d'expansion de crues en amont des villes, plutôt que de privilégier des mesures locales telles que l'installation de digues. Ces actions, proposées par cette stratégie, sont moins coûteuses, plus efficaces et ont un impact plus global.

Cette section présente les mesures qualifiées de « classiques » ainsi que les mesures dénommées « compensatoires ». Quelle que soit l'approche adoptée, ces actions peuvent être entreprises soit au niveau du bassin versant, là où l'écoulement prend forme, soit au niveau de la rivière où l'eau converge et s'évacue.

Les mesures classiques

Chaque mesure dite « classique » peut être appliquée à différentes échelles : celle du bassin versant, du cours d'eau ou de manière ponctuelle.

a) *Aménagements sur le bassin versant*

- Le **schéma de drainage** vise à réduire le ruissellement en facilitant l'infiltration de l'eau dans le sol.
- Les **bassins de rétention** sont utilisés pour contrôler le débit de l'eau.

L'objectif est de maîtriser le ruissellement jusqu'au cours d'eau ou aux zones inondables tout en limitant l'érosion.

ÉTAT DE L'ART

b) *Aménagements le long du cours d'eau*

- Les **travaux de correction** et de **régularisation des cours d'eau**, tels que l'élargissement, le dragage, la modification du tracé, l'enrochement, les épis et les seuils, visent à réduire la hauteur de l'eau pour favoriser l'écoulement.
- Les **digues** et les **levées** augmentent la hauteur des berges pour accroître la capacité du cours d'eau à évacuer l'eau, réduisant ainsi les surfaces inondées.

L'objectif principal de ces mesures est d'améliorer la capacité d'évacuation des eaux pendant les crues et de restreindre les zones inondées. Cela présente l'avantage de réduire les dommages causés par les inondations localement. Cependant, il faut noter que ces aménagements ont des inconvénients. En effet, ils entraînent l'isolement de la rivière par rapport aux plaines alluviales, ce qui peut avoir des effets néfastes sur l'écosystème. De plus, la réduction de l'alimentation des nappes phréatiques et une augmentation de l'érosion sont également des conséquences potentielles de ces mesures. Par ailleurs, il est important de noter que les vitesses d'écoulement augmentent, ce qui peut entraîner une plus grande destructivité pour les zones urbaines en aval.

c) *Aménagements ponctuels*

- Les **barrages** sont des ouvrages polyvalents qui régularisent le débit, fournissent de l'eau potable, servent au tourisme, à la production d'hydroélectricité et à la navigation.

L'objectif est de retenir ou dévier l'eau afin de réduire l'étendue des zones inondées, la durée des pics de crue et la fréquence. Cependant, ces barrages peuvent entraîner des problèmes pour la biodiversité en perturbant la reproduction de certaines espèces. De plus, ce type d'aménagement requiert des investissements importants en termes de travaux, de coûts financiers et d'espace nécessaire.

Les mesures compensatoires

L'objectif général des mesures compensatoires est de créer des protections tout en permettant l'évacuation des eaux de ruissellement à travers des approches plus « douces ». Cette nécessité découle en grande partie de l'urbanisation croissante des villes, qui rend les surfaces de plus en plus imperméables, entraînant des problèmes avec les systèmes d'évacuation des eaux pluviales. Cette imperméabilité des surfaces urbaines conduit à l'augmentation des volumes d'eau à évacuer lors de crues, ce qui génère des chemins artificiels d'écoulement accéléré. De plus, la question de l'évacuation des eaux pluviales polluées par leur passage dans les zones urbaines aggrave encore la situation. Pour faire face à ces défis, des mesures dites « compensatoires » peuvent être mises en place pour stocker les eaux pluviales. Ces mesures peuvent être mises en œuvre aussi bien en milieu urbain que rural.

a) *En milieu urbain*

L'objectif est de repenser l'assainissement en mettant en place un système de gestion des eaux pluviales et en trouvant un moyen pour stocker les eaux et les traiter. Pour ce faire, les déversoirs d'orage, les bassins de stockage à ciel ouvert ou enterrés sont des ouvrages très efficaces.

ÉTAT DE L'ART

Ils permettent de réduire le débit à l'amont en donnant aux surfaces de ruissellement un rôle régulateur fondé sur la rétention et l'infiltration des eaux. Il existe plusieurs techniques dont voici quelques-unes :

- Les **chaussées à structure réservoir** stockent temporairement l'eau sous la voirie grâce à un revêtement poreux ou à des drains.
- Les **chaussées poreuses pavées ou enrobées** favorisent une meilleure infiltration de l'eau par rapport aux chaussées pavées traditionnelles
- Les **toitures terrasses** retiennent une petite quantité d'eau sur les toits, retardant ainsi l'écoulement de ce volume d'eau.
- Les **puits d'infiltration** guident les eaux de ruissellement vers les couches perméables du sol.

b) *En milieu rural*

En milieu rural, la stratégie diffère, car il est nécessaire d'adapter les mesures aux cultures et au territoire. Voici quelques mesures envisageables pour ralentir le ruissellement en modifiant le paysage rural :

- La **restauration des mares** crée des zones tampons qui ralentissent l'écoulement.
- La **plantation des haies** réduit le ruissellement et permet l'infiltration d'une partie de l'eau (7m³ d'eau par mètre linéaire).
- La **création de bandes enherbées** diminue l'érosion due au ruissellement.
- Le **rétablissement de prairies de versant** évite la formation de ravines causées par le ruissellement.
- Le **creusement et entretien des fossés** stockent une partie de l'eau le long des routes et en travers des axes d'écoulement.
- Le **ralentissement du flot par des obstacles** tels que des diguettes ou des fascines de branchage.
- Le **reboisement** permet une évapotranspiration significative de l'eau.
- La **protection des sols** encourage l'infiltration en évitant les sols nus et en labourant en travers de la pente, par exemple.

En résumé, pour atténuer l'impact des inondations, il est crucial de mettre en œuvre à la fois des mesures "structurelles" et "non structurelles". L'une des méthodes les plus efficaces pour réduire le risque d'inondation consiste à atténuer l'intensité de la crue en ralentissant le débit, ce qui implique le stockage de volumes d'eau qui seront libérés ultérieurement. Cette approche implique un laminage de la crue dans le but de réduire à la fois le pic du débit et les hauteurs d'eau pendant la crue, et cela peut être réalisé au moyen de mesures classiques ou de mesures compensatoires.

ÉTAT DE L'ART

Après avoir posé le contexte à Theux, avoir fait l'inventaire des types de modèles hydrologiques et hydrauliques qu'il existe et avoir discuté de quelques mesures de protection qui peuvent être mises en place, le sujet principal du travail qui n'est autre que l'étude des inondations à Theux peut commencer.

Pour ce faire, le fil rouge que ce travail va suivre est le suivant.

Le chapitre suivant, intitulé « Outils et Méthodes », traite, comme son nom l'indique, des outils nécessaires à cette étude ainsi que des méthodes employées. Au début de ce chapitre, les données qui ont été rassemblées sont présentées. Ensuite, les modèles hydrologiques et hydrauliques sélectionnés pour cette étude sont décrits et appliqués.

Par la suite, le chapitre « Calage des modèles » explique la méthode et les données utilisées pour ajuster les modèles de manière à les rendre le plus fidèles possible à la réalité. Dans ce chapitre,

Pour suivre, le chapitre « Mesures de protection » s'attaque à l'estimation de la capacité en débit de la rivière Hoëgne qui traverse Theux. Puis, deux principales stratégies d'aménagement pour faire face aux inondations sont présentées, dont l'une est modélisée. L'efficacité de ces approches est évaluée en fonction de divers épisodes pluvieux. Enfin, deux projets concrets envisagés par la commune pour lutter contre les inondations sont succinctement exposés.

Enfin, l'étude se clôture par une conclusion qui récapitule les éléments essentiels de ce travail et suggère des pistes pour une éventuelle extension de l'étude.

3 Outils et méthodes

Pour modéliser les inondations survenues à Theux en juillet 2021, plusieurs données, outils et logiciels ont été mobilisés. Le choix de modéliser ces inondations découle du fait que c'est suite à cet événement que le sujet de ce mémoire a émergé. De plus, il n'y a pas eu d'autres inondations suffisamment récentes et documentées à Theux pour obtenir des données fiables et adéquates. La modélisation de ces inondations permet d'aborder un phénomène relativement extrême et rare dans la région.

Pour commencer, l'utilisation de QGIS (Système d'Information Géographique Libre et Open Source) s'est avérée très utile tout au long de ce travail. QGIS est un logiciel SIG libre, c'est-à-dire un système d'information géographique. Il permet de représenter, visualiser et éditer des données géospatiales.⁷ Une grande partie des figures de ce travail sont issues de ce logiciel, ce qui permet d'illustrer la zone étudiée et les résultats obtenus.

Ensuite, il a fallu se procurer diverses données pour alimenter et calibrer nos modèles. Ces données incluent notamment un modèle numérique de terrain (MNT) d'une certaine précision qui décrit la topographie de la zone étudiée. De plus, des données de précipitations sont nécessaires, disponibles aux endroits équipés de pluviomètres, ainsi que des données de débit provenant de limnimètres positionnés dans certains cours d'eau. Sans oublier des données de hauteurs d'eau et d'étendue des inondations lors des événements de juillet 2021. L'état des données disponibles est détaillé dans la section 3.1.

Avant d'utiliser le modèle hydrologique, il est nécessaire de déterminer la limite amont de la zone modélisée par le modèle hydraulique. Cet endroit définit par conséquent un bassin versant pour lequel il est l'exutoire. C'est sur ce bassin versant que le modèle hydrologique sera appliqué dans l'objectif de déterminer le débit à la limite amont de la zone modélisée. Le choix de ce point est crucial car il déterminera la surface du bassin versant étudié ainsi que l'endroit où le débit sera calculé. Ce choix de la limite amont est discuté dans la section 3.2.

Ensuite, à partir des données disponibles et de l'exutoire fixé, le modèle hydrologique peut être construit, et c'est le logiciel ATHYS (ATelier HYdrologique Spatialisé) développé par l'Institut de Recherche pour le Développement qui a été choisi. Il permet d'utiliser plusieurs modèles hydrologiques différents, de réaliser une interpolation spatiale et de traiter des données géographiques et hydro-climatiques⁸. Une description plus détaillée de ce logiciel et du modèle utilisé ainsi que la justification de ce choix est fournie dans la section 3.3.

Enfin, pour construire le modèle hydraulique, un code de calcul nommé « Hydroflow » a été utilisé. Ce code a été créé à l'origine par S. Soares Frazao lors de sa thèse de doctorat, auquel d'autres ont contribué par la suite : Sylvie (2011), Catherine (2011), Robin Meurice (2020), Pierre-Yves Gousenbourger (2022), Nathan Delpierre (2022) et Charles Ryckmans (2022).

⁷ <https://www.qgis.org/fr/site/index.html#> consulté le 6 mai 2023.

⁸ <http://www.athys-soft.org/> consulté le 8 mai 2023.

OUTILS ET MÉTHODES

Une description plus détaillée des fonctionnalités de ce code de calcul et la justification de son utilisation sont fournies dans la section 3.4.

3.1 Données disponibles

Pour élaborer nos modèles hydrologiques et hydrauliques, l'obtention de données est essentielle pour calibrer les modèles et effectuer des comparaisons avec nos résultats. Le modèle numérique de terrain ainsi que les données pluviométriques, limnimétriques, des sols et l'étendue des inondations de juillet 2021, exposés dans cette section, proviennent des données fournies par le Service Public de Wallonie (SPW)⁹.

3.1.1 Modèle numérique de terrain (MNT)

L'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la zone étudiée s'avère essentielle dans l'étude hydrologique et hydraulique. Ce MNT est crucial pour déterminer les pentes, ce qui facilite l'identification de l'étendue du bassin versant pour l'exutoire sélectionné. De plus, il joue un rôle crucial dans la détermination des directions principales de l'écoulement. Dans le contexte de l'étude hydraulique, il devient un outil incontournable pour évaluer les hauteurs de chaque cellule du maillage.

La Figure 22 présente le MNT utilisé dans le cadre de cette étude. Sa dimension a été choisie pour englober tout le bassin ainsi que les pluviomètres pertinents, tout en évitant d'être excessivement grand afin de ne pas surcharger la mémoire. La discrétisation du MNT en cellules, où l'altitude est constante pour chaque cellule, permet une gestion plus efficace de la mémoire. Dans cette étude, la taille des cellules a été fixée à 20 mètres de côté. Cette approche offre un compromis entre économie de mémoire, temps de calcul et préservation de la précision.

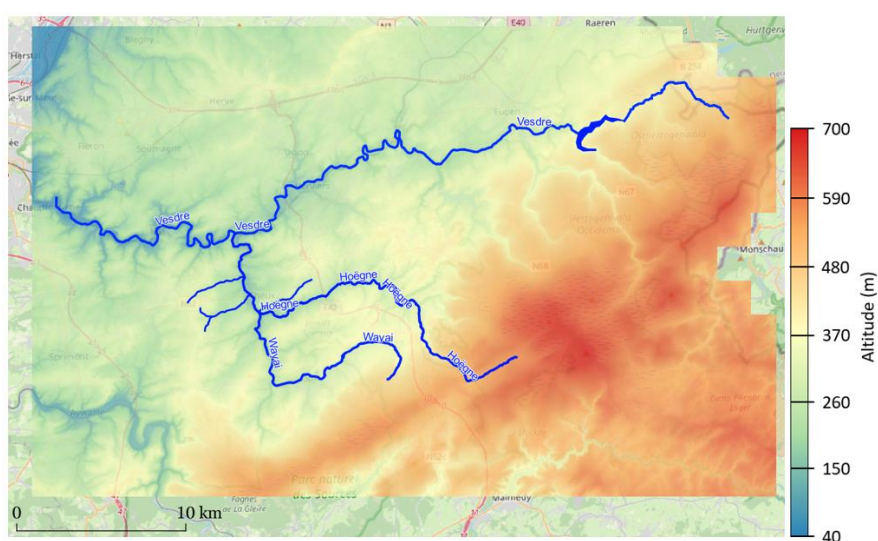


Figure 22 : Modèle numérique de terrain raffiné avec des cellules de 20 mètres pour le bassin versant de la Vesdre.

⁹ <https://spw.wallonie.be/> consulté le 29 octobre 2022.

OUTILS ET MÉTHODES

3.1.2 Types de sols et couverture des sols

Les données relatives aux types et à la couverture des sols ne sont pas strictement nécessaires, mais elles s'avèrent utiles lors du processus de calibrage du modèle hydrologique. En effet, le modèle hydrologique implique différents paramètres, dont certains peuvent être liés aux propriétés du sol, selon les modèles utilisés. Ces données peuvent jouer un rôle dans la validation des paramètres déterminés par le logiciel.

Types de sols

Sur la Figure 23 est représenté une carte tirée du SPW donnant les différents types de sols principaux de la zone étudiée. Dans la légende se trouvent uniquement les types de sol les plus représentés dans la zone étudiée. La carte avec la légende complète se trouve à l'annexe A.

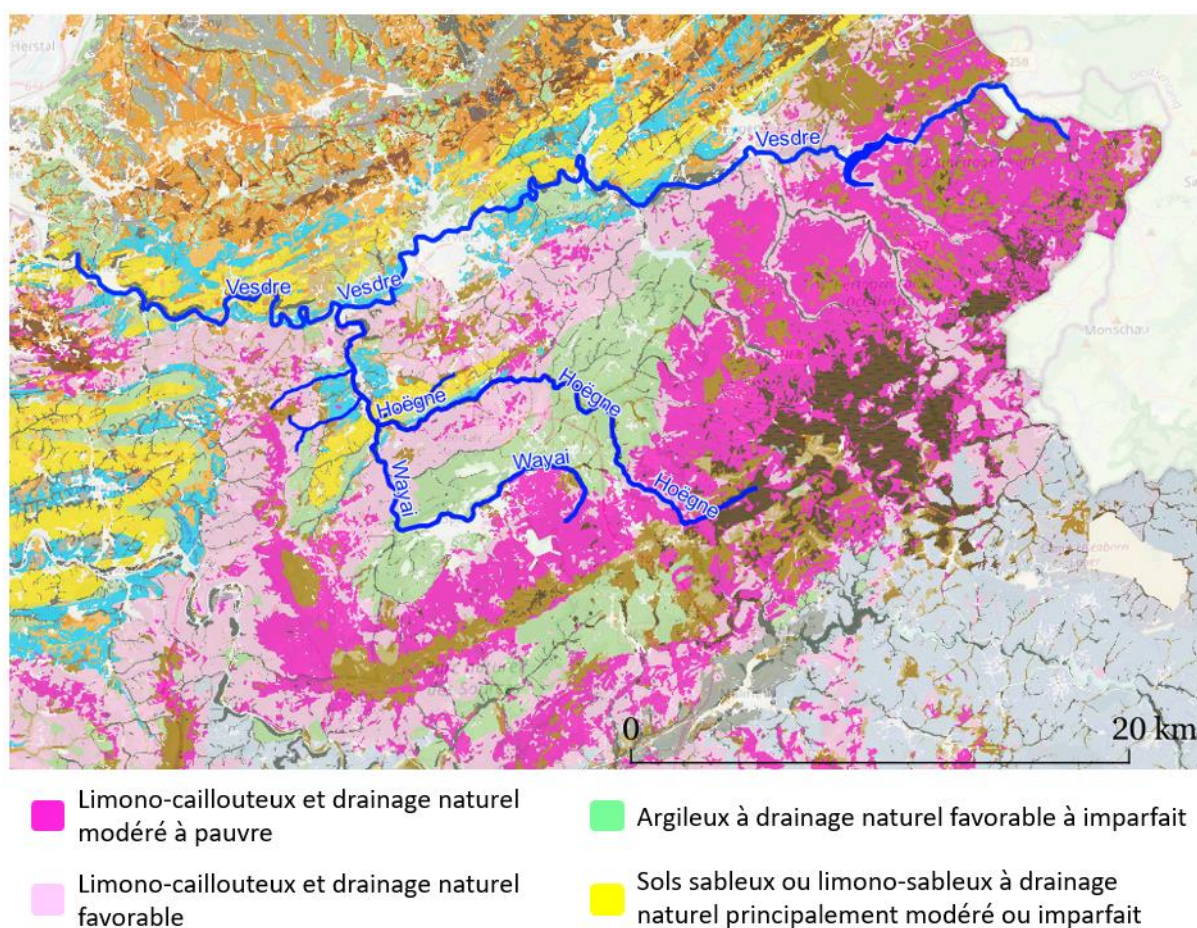


Figure 23 : Carte des types de sols dans le bassin de la Vesdre.

OUTILS ET MÉTHODES

Occupations du sol

Une carte illustrant les diverses occupations du sol est présentée dans la Figure 24. Cette carte offre une visualisation des types de sols présents dans la zone d'étude. Cette caractéristique exerce une influence sur les processus d'infiltration dans le sol ainsi que sur la vitesse d'écoulement des eaux de ruissellement. La légende de la carte inclut uniquement les types d'occupation du sol les plus prédominants dans la zone étudiée. La carte avec la légende complète se trouve à l'annexe B.

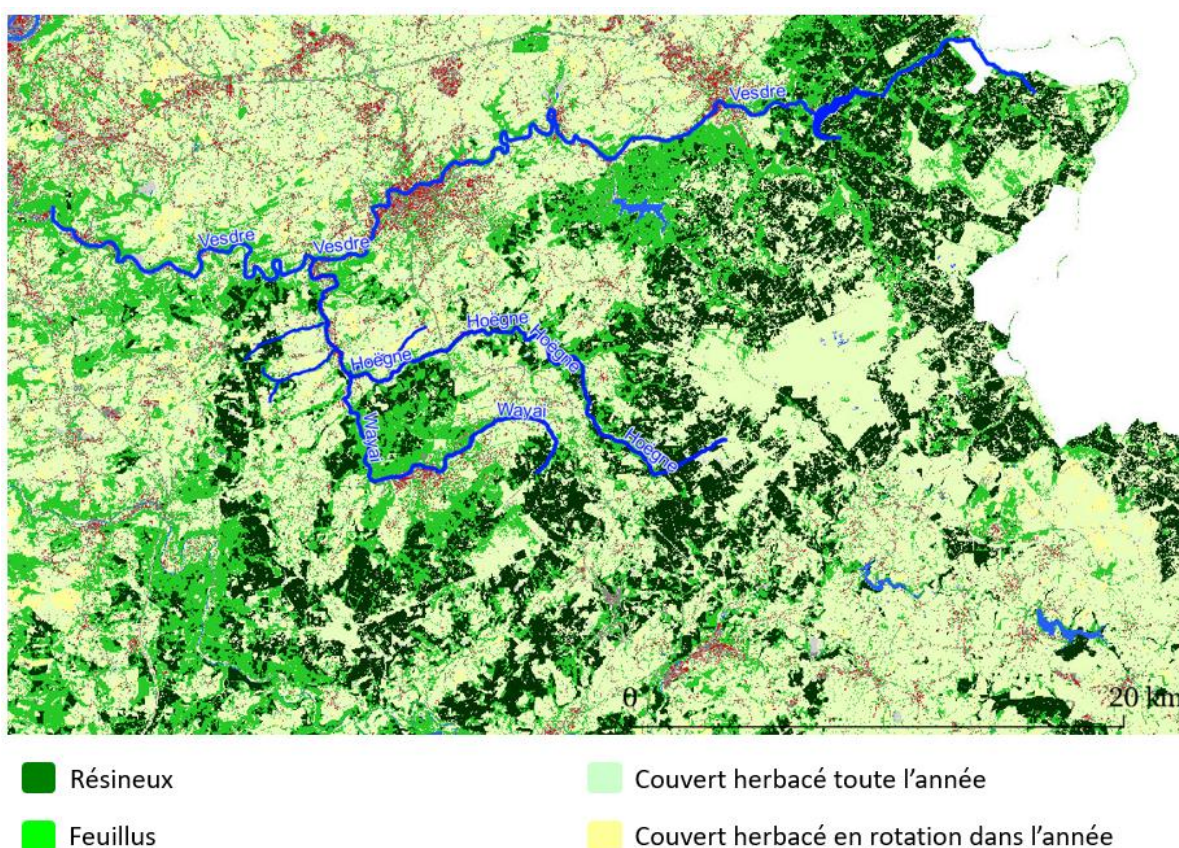


Figure 24 : Carte des occupations du sol dans le bassin de la Vesdre.

3.1.3 Données pluviométriques

L'utilisation d'un modèle hydrologique requiert des données d'entrée, dont les données de précipitations constituent l'élément essentiel. Sans informations sur les quantités de précipitations pendant la période d'étude, la construction de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant correspondant devient impossible.

Dans un premier temps, il est nécessaire de répertorier et de localiser tous les pluviomètres se trouvant à proximité de la zone d'étude. En effet, ces pluviomètres fourniront des mesures sur la quantité d'eau tombée sur une période de temps spécifique à l'emplacement où l'instrument est positionné.

OUTILS ET MÉTHODES

Le Service Public de Wallonie (SPW) permet notamment de localiser tous les pluviomètres de la région wallonne. La Figure 25 présente la position des pluviomètres environnants la zone d'étude, indiquée en mauve.

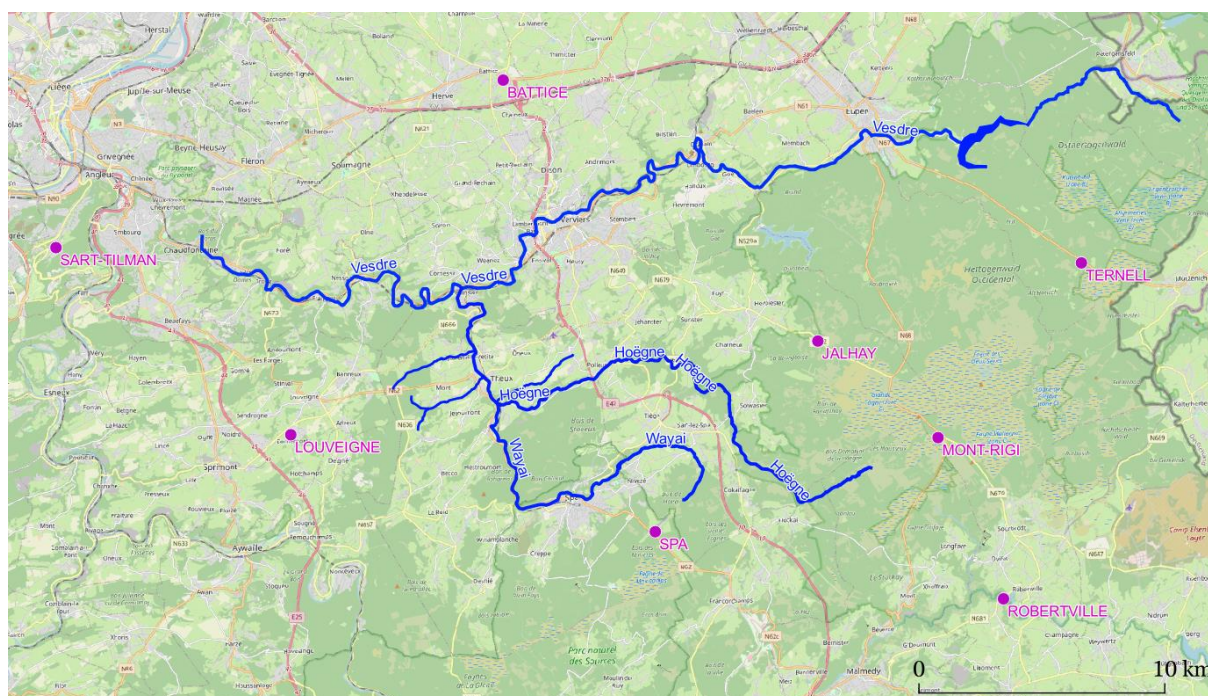


Figure 25 : Localisation des pluviomètres proche de Theux en mauve.

Ces pluviomètres fournissent des informations locales sur les volumes d'eau tombés, mais il est indispensable de pouvoir interpoler ces données à n'importe quel point du bassin versant étudié. Pour atteindre cet objectif, la section 3.3.2 discutera de la méthode d'interpolation de ces données.

3.1.4 Données limnimétriques

Les données de débits mesurées par des limnimètres ne sont pas indispensables à l'application du modèle hydrologique. Cependant, elles s'avèrent très utiles pour le calibrage du modèle, car elles peuvent être utilisées comme moyen de comparaison avec l'hydrogramme calculé par le modèle, à condition que l'exutoire soit défini à l'endroit du limnimètre. Ces instruments de mesure sont moins répandus que les pluviomètres, car ils sont plus complexes à utiliser, moins fiables et sont installés dans des cours d'eau. Pour rappel, ils mesurent la hauteur d'eau localement et, par le biais d'une relation hauteur-débit, fournissent une mesure du débit à cet endroit. La Figure 26 illustre en rouge les emplacements des limnimètres dans les cours d'eau de la zone de travail, à savoir la Hoëgne et le Wayai. Cependant, il est important de noter que le limnimètre de la Hoëgne à Theux est défectueux et ne fournit pas de mesure, ce qui le rend inutile pour cette étude.

OUTILS ET MÉTHODES

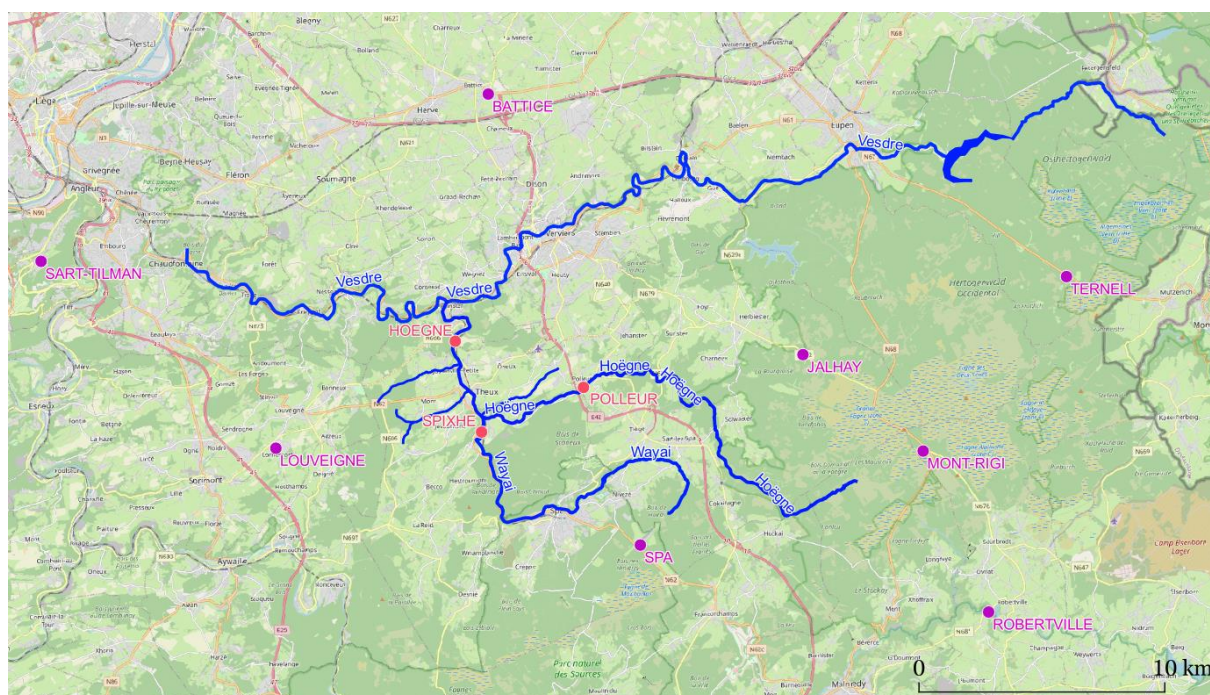


Figure 26 : Localisation des limnimètres dans la Hoëgne et dans le Wayai en rouge.

3.1.5 Zones inondées et hauteurs d'eau de juillet 2021

Afin de calibrer les modèles, il est impératif de se baser sur des informations observées lors des événements étudiés. Cette approche offre une base de comparaison pour évaluer les résultats produits par les modèles. Le modèle hydraulique génère, à partir d'un débit d'entrée, des résultats tels que l'étendue des inondations, les hauteurs d'eau et les vitesses atteintes. Par conséquent, il est essentiel d'avoir de telles données spécifiques aux inondations de juillet 2021 pour effectuer une comparaison adéquate avec les résultats du modèle. Cependant, les mesures de vitesses sont souvent difficiles à obtenir à grande échelle et ne sont pas disponibles dans ce contexte. En revanche, le Service Public de Wallonie (SPW) a établi une carte illustrant l'étendue des zones inondées en juillet 2021 ainsi qu'une carte indiquant les hauteurs d'eau.

Cartographie des zones inondées en juillet 2021

La cartographie des zones inondées en juillet 2021 a été construite en combinant diverses sources de données et méthodes, notamment la digitalisation à partir de photographies, des enquêtes communales, des interpolations et d'autres traitements. Bien que cette carte ne puisse fournir une représentation parfaitement exacte de la situation, elle est suffisamment fiable pour servir de référence permettant le calibrage des modèles. Cette carte est illustrée sur la Figure 27.

OUTILS ET MÉTHODES

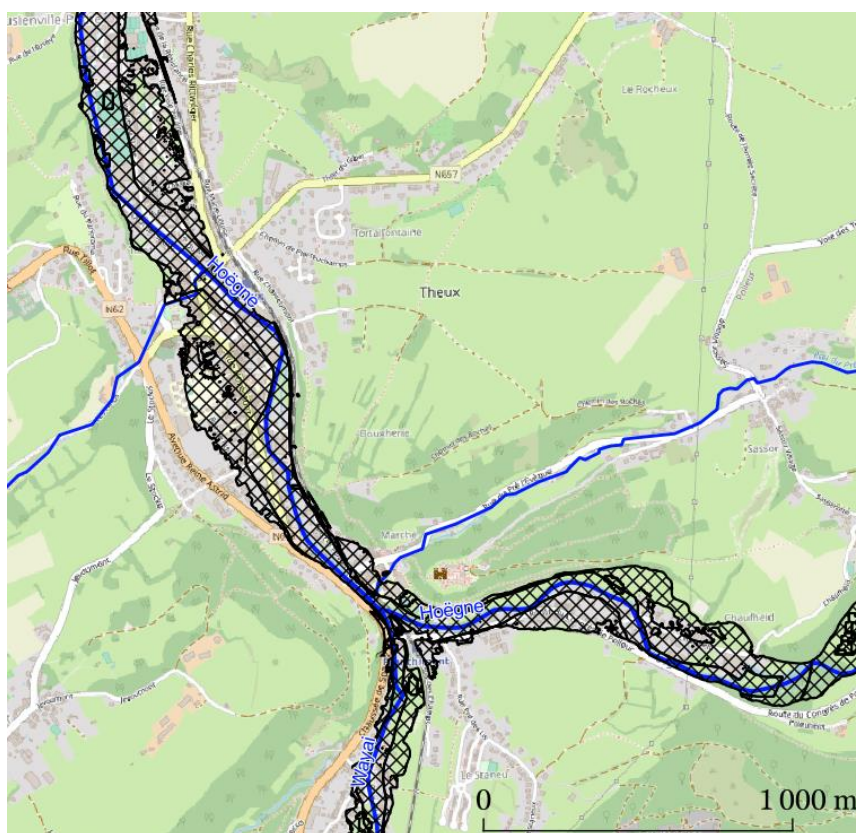


Figure 27 : Cartographie des zones inondées en juillet 2021 représentées en quadrillage.

Hauteurs d'eau atteintes en juillet 2021

La carte des hauteurs d'eau modélise la topographie du plan d'eau lors des inondations de juillet 2021, fournissant ainsi des informations sur les hauteurs d'eau atteintes. La construction de cette carte repose sur des données ponctuelles relatives aux hauteurs d'eau collectées lors d'une enquête menée par le SPW. Pour interpoler ces données, la méthode de « l'Inverse Distance Weighting » (IDW), qui consiste à attribuer un poids inversement proportionnel à la distance, a été adoptée. Cependant, il est important de noter que cette carte présente des incertitudes et des imprécisions. Par conséquent, une certaine prudence est nécessaire lors de la comparaison avec les résultats produits par les modèles. Néanmoins, étant donné que cette source de données est la plus fiable disponible, elle servira de référence pour le calibrage des modèles. Cette carte est présentée sur la Figure 28.

OUTILS ET MÉTHODES

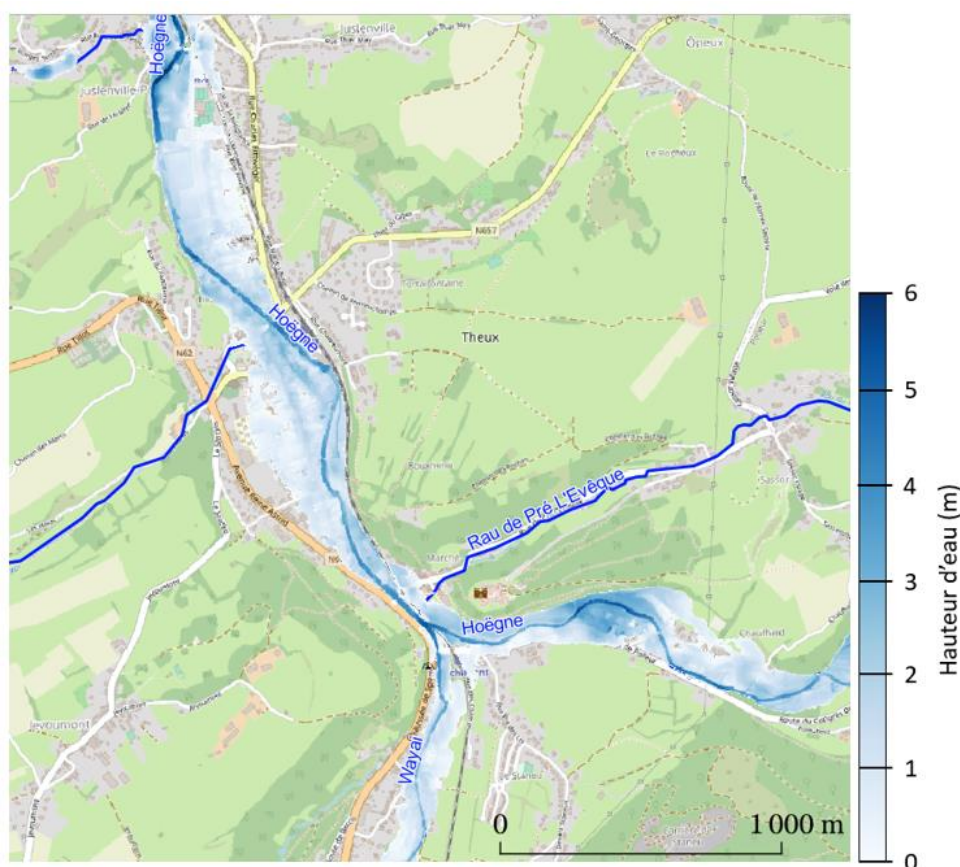


Figure 28 : Cartographie des hauteurs d'eau en juillet 2021 (IDW).

3.2 Choix de la limite amont de la zone modélisée

Avant d'utiliser un modèle hydrologique, il est essentiel de choisir un point d'exutoire, qui déterminera son propre bassin versant sur lequel le modèle hydrologique sera appliqué. Le point d'exutoire est l'endroit où le modèle hydrologique produit le débit en sortie. Ce débit obtenu servira ensuite d'entrée au modèle hydraulique, étant la condition appliquée à la limite amont de la zone modélisée. Par conséquent, le choix de l'emplacement de l'exutoire est crucial, car il est déterminé par la limite amont du modèle hydraulique.

Étant donné que l'objectif du modèle hydraulique est d'étudier les inondations dans la commune de Theux, la zone d'étude s'étendra dans la ville elle-même. Par conséquent, il est logique de positionner la limite amont de la zone modélisée en amont de Theux.

Il reste à décider où en amont placer cette limite amont. Il faut faire un compromis entre une limite à l'entrée de Theux et une limite plus en amont. Dans la première solution, cela permet de réduire la zone étudiée par le modèle hydraulique et donc de rendre négligeable le volume d'eau qui ruisselle latéralement au cours d'eau depuis les côtés de la zone étudiée. Cependant, qui dit réduire la zone étudiée, dit réduction de la zone pour laquelle les résultats sont obtenus.

OUTILS ET MÉTHODES

La deuxième option permet de travailler sur une plus grande zone pour le modèle hydraulique et donc d'obtenir des résultats sur une plus grande surface. Cependant, en agrandissant cette zone, les débits latéraux deviennent non négligeables et injecter uniquement le débit obtenu par le modèle hydrologique en entrée à la limite amont du modèle hydraulique ne devient plus suffisamment représentatif de la réalité. De plus, le temps de calcul peut rapidement augmenter.

Pour cette étude, il a été décidé de se concentrer sur le centre de Theux, la zone la plus touchée. Dès lors, la limite amont et donc l'exutoire du modèle hydrologique ont été fixés juste à la confluence entre le Wayai et la Hoëgne, comme illustré sur la Figure 29, légèrement en amont du centre de Theux, afin d'avoir la contribution des bassins versants de ces deux cours d'eau au débit total. De cette manière la zone d'étude est limitée, permettant de négliger l'apport latéral de l'eau dans la Hoëgne.

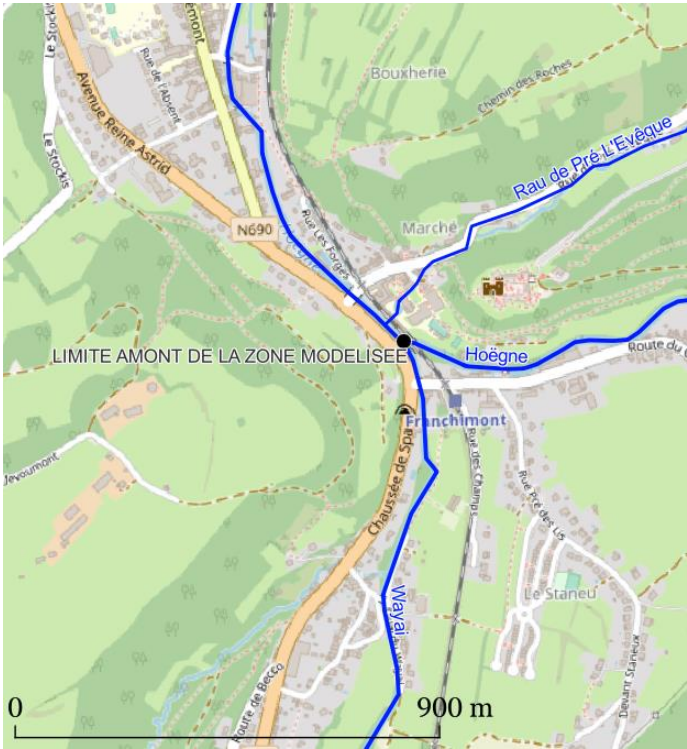


Figure 29 : La limite amont du modèle hydraulique est fixée à la confluence entre le Wayai et la Hoëgne en noir

Afin de connaître l'importance de chacun des deux cours d'eau au débit, il a même été décidé de choisir, comme illustré sur la Figure 30, deux exutoires différents : un dans la Hoëgne juste avant la confluence et un dans le Wayai juste avant la confluence. De cette manière, deux bassins versants différents sont définis et la somme de ces derniers forment le bassin versant général obtenu si l'exutoire avait été choisi juste à la confluence. Le modèle hydrologique sera appliqué à chacun des deux exutoires et le débit dans les deux cours d'eau pour chacun des bassins versants sera obtenu. Ensuite, la somme de ces deux contributions constituera le débit total à injecter à la limite amont du modèle hydraulique.

OUTILS ET MÉTHODES

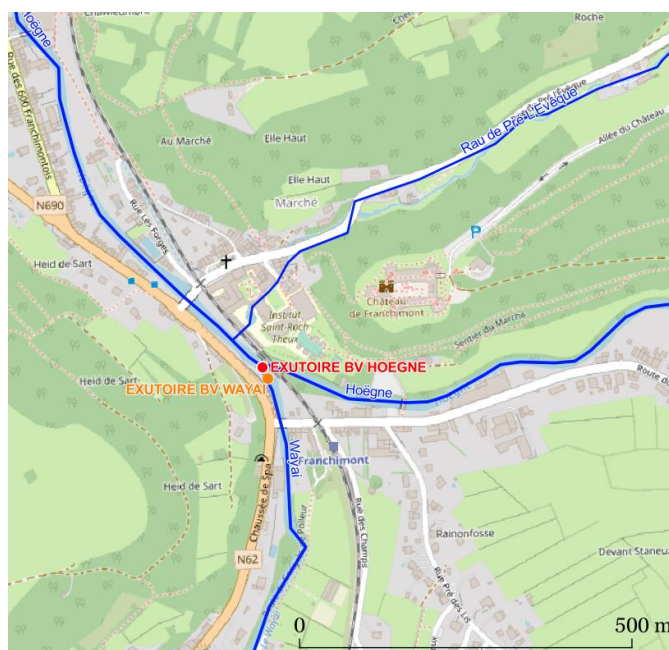


Figure 30 : Les deux exutoires choisis juste avant la confluence.

La suite de la section explique la procédure à suivre pour construire le modèle hydrologique sur un seul des bassins versants afin d'obtenir le débit en sortie. Pour l'autre exutoire, la même procédure est appliquée pour construire le modèle hydrologique sur son bassin versant respectif. Pour obtenir finalement le débit à la confluence des deux cours d'eau, il suffira d'additionner les débits provenant des deux contributions.

3.3 Modélisation hydrologique avec ATHYS

Dans cette section, le logiciel utilisé, ATHYS, pour la modélisation hydrologique est décrit, ainsi que le modèle spécifique choisi parmi les options disponibles dans ce logiciel.

ATHYS est un logiciel de modélisation distribué qui permet d'étudier divers phénomènes tels que la prévision des crues, la gestion de la ressource en eau et l'impact des changements géographiques et climatiques (Salesses, 2022).

Il est composé de 4 modules : MERCEDES, VISHYR, VICAIR et SPATIAL. Ces modules permettent respectivement de modéliser les écoulements superficiels, de traiter des données hydro-climatiques, de traiter des données géographiques et de fournir une plate-forme d'interpolation spatiale. Dans le contexte de ce mémoire, le module MERCEDES (Maillage Élémentaire Régulier Carré pour l'Etude Des Ecoulements Superficiels) est utilisé pour transformer la pluie en débit. Pour cela, il offre une variété de fonctions de production et de transfert. Ces fonctions sont appliquées sur un maillage régulier de mailles carrées dérivé d'un modèle numérique de terrain (MNT), et elles peuvent être appliquées à un événement pluvieux individuel ou à une série d'événements pluvieux.¹⁰

¹⁰ <http://www.athys-soft.org/> consulté le 8 mai 2023.

OUTILS ET MÉTHODES

En résumé, la transformation de la pluie en débit grâce, notamment, au module MERCEDES se décompose en cinq étapes principales (qui seront expliquées plus en détails dans les sections suivantes) illustrées sur la Figure 31 (Lequien, 2003) :

1. **Discrétisation du bassin versant** : le bassin versant est subdivisé en mailles carrées de dimensions égales, à partir des données du modèle numérique de terrain (MNT).
2. **Interpolation des données pluviométriques** : les données mesurées aux pluviomètres sont interpolées pour estimer la quantité de pluie brute sur chaque maille.
3. **Application de la fonction de production** : une fonction de production est appliquée à chaque maille pour calculer la quantité de pluie nette en soustrayant le volume d'eau qui ne contribue pas à l'écoulement.
4. **Application de la fonction de transfert** : une fonction de transfert est utilisée pour calculer l'hydrogramme élémentaire à l'exutoire, résultant de la pluie nette pour chaque maille. La forme et le décalage de la contribution de chaque maille varient en fonction de sa position.
5. **Obtention de l'hydrogramme total** : l'hydrogramme total au point d'exutoire du bassin versant est obtenu en combinant les hydrogrammes élémentaires de chaque maille.

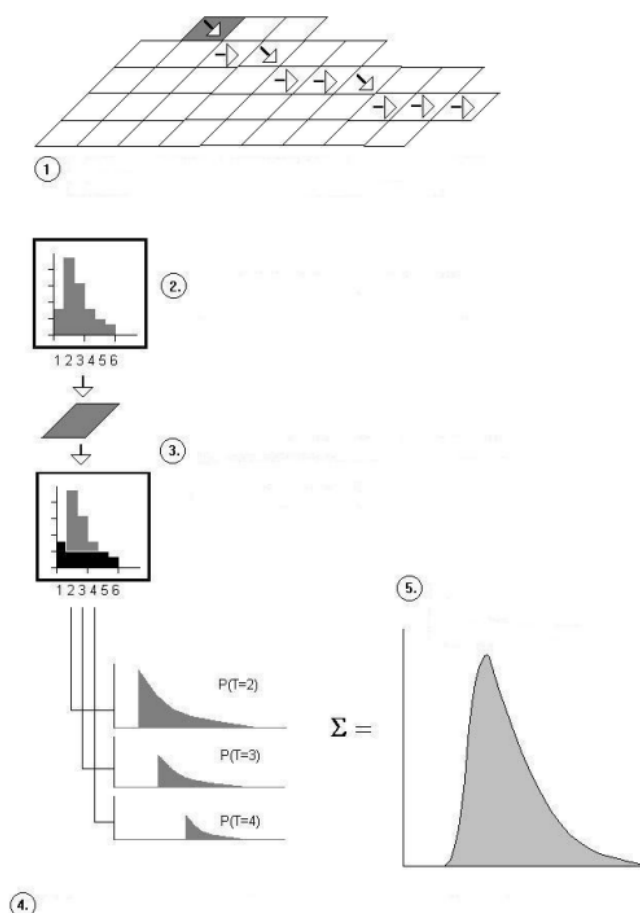


Figure 31 : Schéma général du fonctionnement du module MERCEDES.
Tiré du travail de A. Lequien (Lequien, 2003).

OUTILS ET MÉTHODES

Avant d'utiliser le module MERCEDES, la première étape consiste à utiliser les modules VISHYR et VICAIR pour traiter les données de précipitations et de topographie. Cela permet de déterminer le bassin versant ainsi qu'un fichier de direction de drainage indiquant les principales directions d'écoulement. Bien que le fonctionnement détaillé de VISHYR et VICAIR ne soit pas explicitement présenté, les résultats obtenus sont utilisés pour discuter du calcul du bassin versant discrétisé à la section 3.3.1.

Ensuite, malgré l'existence de données de pluie mesurées localement aux pluviomètres, celles-ci ne sont pas suffisantes pour alimenter le modèle hydrologique. Il est donc essentiel d'étendre ces données sur tout le bassin versant. La deuxième étape consiste à réaliser une interpolation des données de pluie des pluviomètres pour estimer la quantité de pluie sur chaque maille du bassin versant. Pour ce faire, différentes méthodes d'interpolation sont disponibles dans le logiciel ATHYS, discutées en détail à la section 3.3.2.

Une fois que toutes les étapes préliminaires sont en place, le module MERCEDES est prêt à appliquer le modèle hydrologique en tant que tel en utilisant la fonction de production à la troisième étape, suivie de la fonction de transfert à la quatrième étape. Lors de l'exécution de ces fonctions, les paramètres choisis jouent un rôle crucial dans les résultats obtenus.

Le logiciel ATHYS offre diverses fonctions de production telles que Réservoir, Green-Ampt, Smith-Parlange, Top-Model, SCS, etc. La fonction de production permet de quantifier la proportion d'eau provenant des précipitations qui s'écoule et contribue au débit à l'exutoire. De même, ATHYS propose différentes fonctions de transfert comme Lag&Route, Onde cinématique, Darcy, etc. La fonction de transfert décrit le mouvement de l'eau d'une maille à une autre dans le bassin versant.

Dans cette étude, la combinaison de la fonction SCS (ou NRCS) avec la fonction Lag&Route est utilisée. La fonction SCS est spécifiquement adaptée aux bassins versants de taille réduite (inférieure à 1000 km²). Sa flexibilité lui permet de s'adapter à divers types de crues (HydroSciences Montpellier, 2020), y compris les crues rapides et intenses (Salesses, 2022). Cette combinaison a été choisie pour sa simplicité et sa représentation conceptuelle des phénomènes hydrologiques (Salesses, 2022). Ce modèle, appelé SCS-LR, a été brièvement introduit dans l'état de l'art par l'étude de A. Lequien (Lequien, 2003). Il a démontré son efficacité dans la modélisation de crues majeures, ce qui en fait un choix fréquent pour des études similaires (Salesses, 2022) (Boulay, 2011) (HydroSciences Montpellier, 2020).

Les sections 3.3.3 et 3.3.4 fournissent des détails sur les fonctions de production et de transfert du logiciel MERCEDES utilisées respectivement à la troisième et quatrième étape pour la modélisation hydrologique.

Dans la section 3.3.5 est illustré un exemple d'hydrogramme obtenu en sortie du modèle hydrologique pour un jeu de paramètres choisi dans le cadre d'une étude similaire effectuée à Chaudfontaine.

OUTILS ET MÉTHODES

3.3.1 Calcul et discrétisation du bassin versant

Maintenant que les exutoires sont choisis, les bassins versants respectifs peuvent être déterminés. Pour ce faire, dans un premier temps, ATHYS discrétise le MNT en mailles carrées régulières de la taille souhaitée. Dans notre cas, les pixels ont été choisis avec un côté de 20 mètres, afin de correspondre au raffinement du MNT. Opter pour une taille de maille plus petite n'aurait pas été utile, mais aurait simplement entraîné une perte de temps.

Directions de drainage

Ensuite, pour chaque maille, ATHYS détermine la direction de drainage, c'est-à-dire la direction principale de l'écoulement. Pour ce faire, la direction de drainage pour une maille est orientée vers la maille voisine dont l'altitude est la plus basse (HydroSciences Montpellier, 2020). La Figure 32 illustre le MNT utilisé dans la zone d'étude, où les directions de drainage calculées par ATHYS pour chaque maille sont indiquées à l'aide de flèches. En effectuant un zoom sur une partie de la figure, nous pouvons observer le chemin que l'eau suivra en s'écoulant le long de ces directions.

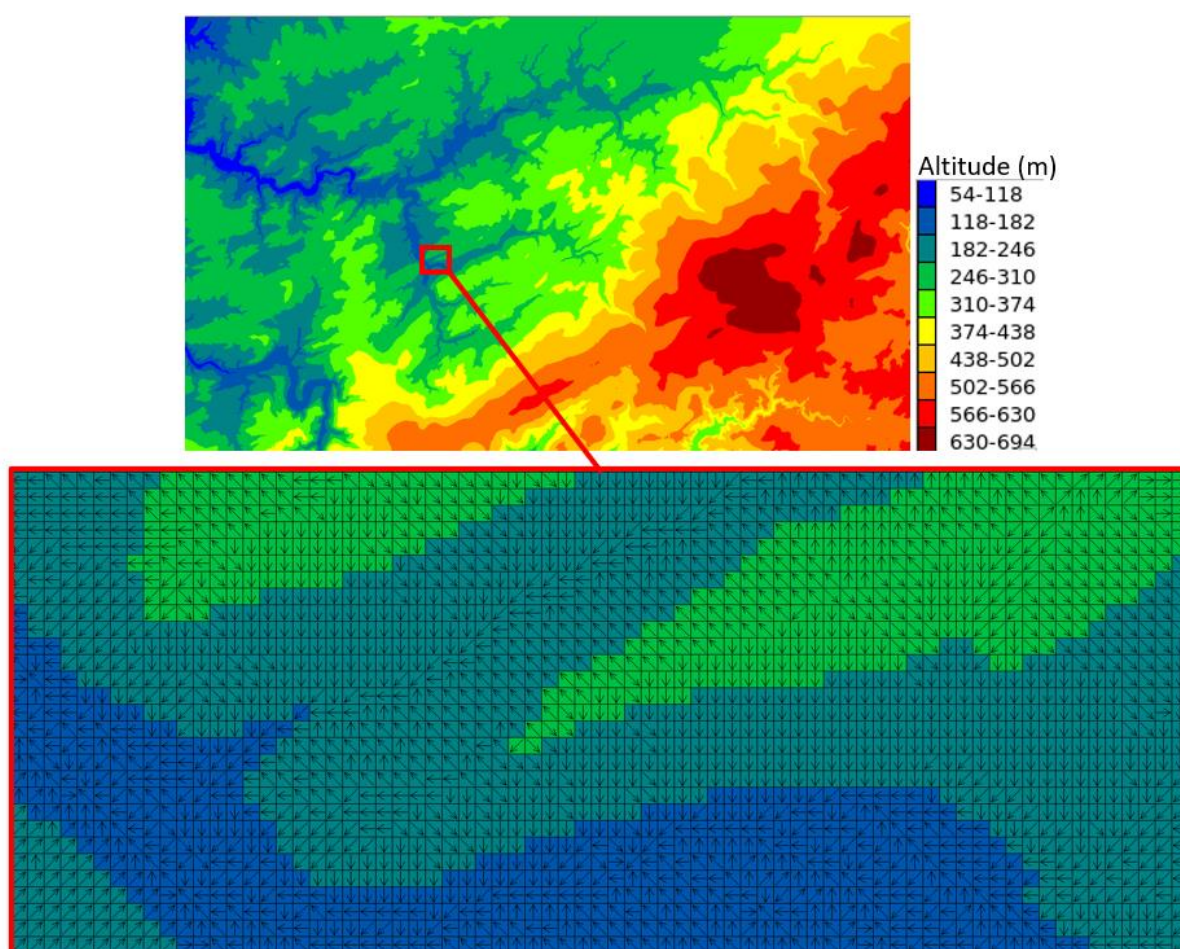


Figure 32 : Le fichier des directions de drainage obtenu à partir du MNT sur ATHYS donne le sens de l'écoulement.

OUTILS ET MÉTHODES

Superficies drainées

À partir de ce fichier qui indique les directions d'écoulement, ATHYS peut générer un fichier de superficies drainées qui représente le réseau hydrographique. Ce fichier attribue à chaque maille le nombre de mailles qui composent son propre bassin versant. En d'autres termes, il indique combien de mailles sont telles que si une goutte d'eau tombe dessus, elle finira par passer par la maille en question. Bien que ce fichier ne soit pas nécessaire pour le modèle hydrologique, il permet de vérifier la pertinence des résultats du calcul des bassins versants. Plus précisément, en utilisant ce fichier et en affichant uniquement les mailles reliées à plus de 10 000 autres mailles, les zones d'accumulation d'eau (c'est-à-dire les cours d'eau) deviennent visibles. En comparant ces zones avec le réseau hydrographique réel, on peut valider partiellement le calcul des directions d'écoulement et donc des bassins versants. Cette comparaison peut être observée sur la Figure 33. Elle permet ainsi de confirmer que le réseau hydrographique réel correspond étroitement à celui calculé par ATHYS.

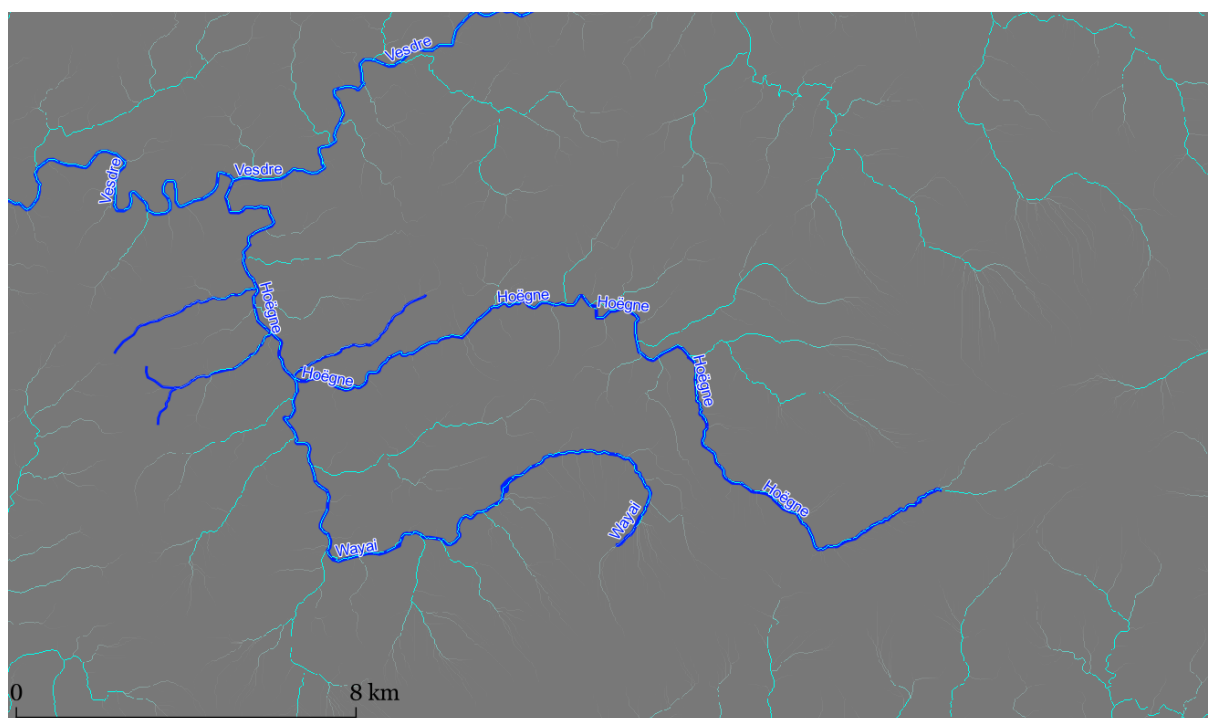


Figure 33 : Comparaison entre le réseau hydrographique réel (en bleu foncé) et celui calculé par ATHYS à partir du fichier des directions de drainage (en turquoise).

Bassins versants

À partir du fichier des directions de drainage, ATHYS peut aisément déterminer le bassin versant pour un exutoire donné. En fournissant les coordonnées de l'exutoire en entrée, ATHYS peut construire le bassin versant en incluant toutes les mailles pour lesquelles le suivi de la direction d'écoulement mène à l'exutoire. En utilisant cette méthode pour les deux exutoires définis précédemment, les bassins versants obtenus sont illustrés sur la Figure 34.

OUTILS ET MÉTHODES

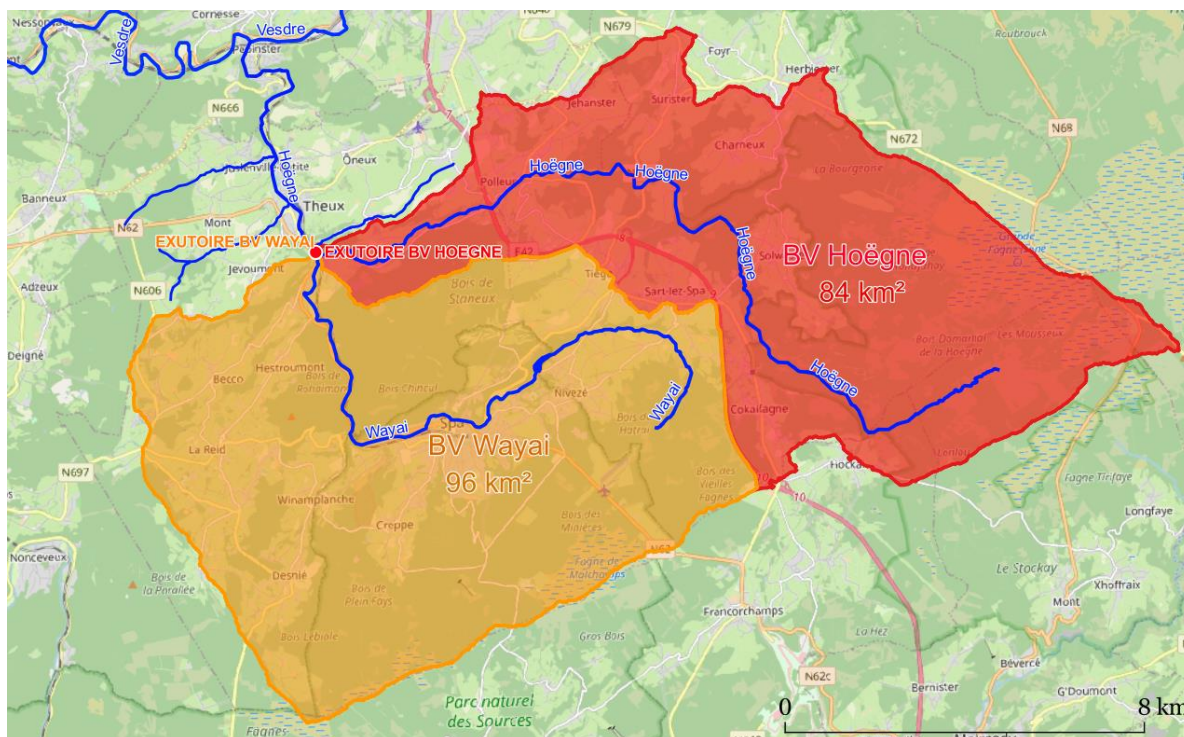


Figure 34 : Bassins versants de la Hoëgne (en rouge) et du Wayai (en orange).

Le bassin versant de la Hoëgne s'étend sur une superficie de 84 km^2 , tandis que celui du Wayai couvre une superficie de 96 km^2 . Il est d'ailleurs intéressant de constater qu'ils ont à peu près la même taille. Ainsi, à la confluence, le débit provenant de la Hoëgne devrait être du même ordre de grandeur que celui provenant du Wayai, à condition que les précipitations dans les deux bassins versants soient similaires.

3.3.2 Extension des données pluviométriques sur chaque maille

Maintenant que l'exutoire est fixé, un bassin versant est défini sur lequel le modèle hydrologique peut être appliqué. Pour rappel, la deuxième étape consiste à utiliser une méthode permettant d'étendre les données de précipitations ponctuelles disponibles aux emplacements des pluviomètres à l'échelle de l'ensemble du bassin versant. Plusieurs méthodes peuvent accomplir cette tâche, et ATHYS propose les deux suivantes : la méthode des isohyètes et les polygones de Thiessen.

La méthode des isohyètes

La méthode des isohyètes utilise les données disponibles à chaque pluviomètre et applique la méthode de pondération inverse à la distance pour interpoler des valeurs à des points intermédiaires en tenant compte de la topographie. Cette méthode de pondération permet d'interpoler les valeurs connues afin d'obtenir une estimation pour n'importe quel emplacement.

OUTILS ET MÉTHODES

La précipitation au point i est calculée comme suit :

$$P_i = \frac{\sum_k \frac{P_k}{d_{ik}^\alpha}}{\sum_k \frac{1}{d_{ik}^\alpha}} \quad (8)$$

où P_k est la précipitation au pluviomètre k , d_{ik} est la distance entre le pluviomètre k et le point i et α est un paramètre généralement fixé à 2. En répétant ce calcul pour toutes les mailles, la pluie sur chacune des mailles peut être estimée.

Les polygones de Thiessen

L'idée de l'autre méthode, celle des polygones de Thiessen, consiste à diviser le territoire en zones d'influence pour chaque pluviomètre. Ces zones sont définies de manière à ce que chaque point à l'intérieur d'une zone soit plus proche de la station pluviométrique associée à cette zone qu'à n'importe quelle autre station. Ainsi, chaque maille est considérée comme ayant une quantité de pluie correspondante au pluviomètre le plus proche.

La méthode des polygones de Thiessen représente de manière plus grossière la distribution spatiale que la méthode des isohyets. Cependant, elle est simple en termes de calcul et robuste, contrairement à la méthode des isohyets qui présente le risque d'erreurs dues à des effets de bord (Salesses, 2022). C'est pourquoi, dans le cadre de ce travail, la méthode des polygones de Thiessen a été choisie. La Figure 35 et la Figure 36 illustrent l'application de cette méthode dans la région étudiée.

La Figure 35 permet d'identifier les pluviomètres ayant une influence sur les bassins versants, et qui seront donc nécessaires pour le modèle hydrologique. Dans notre cas, les deux bassins versants sont influencés par la présence de 4 pluviomètres : Louveigne, Spa, Jalhay et Mont-Rigi.

La Figure 36 illustre quel bassin versant est influencé par quel pluviomètre et dans quelle mesure, en indiquant la proportion de superficie influencée par chaque pluviomètre. Examiner ces proportions permet de vérifier en partie la pertinence des hydrogrammes obtenus en sortie du modèle hydrologique.

OUTILS ET MÉTHODES

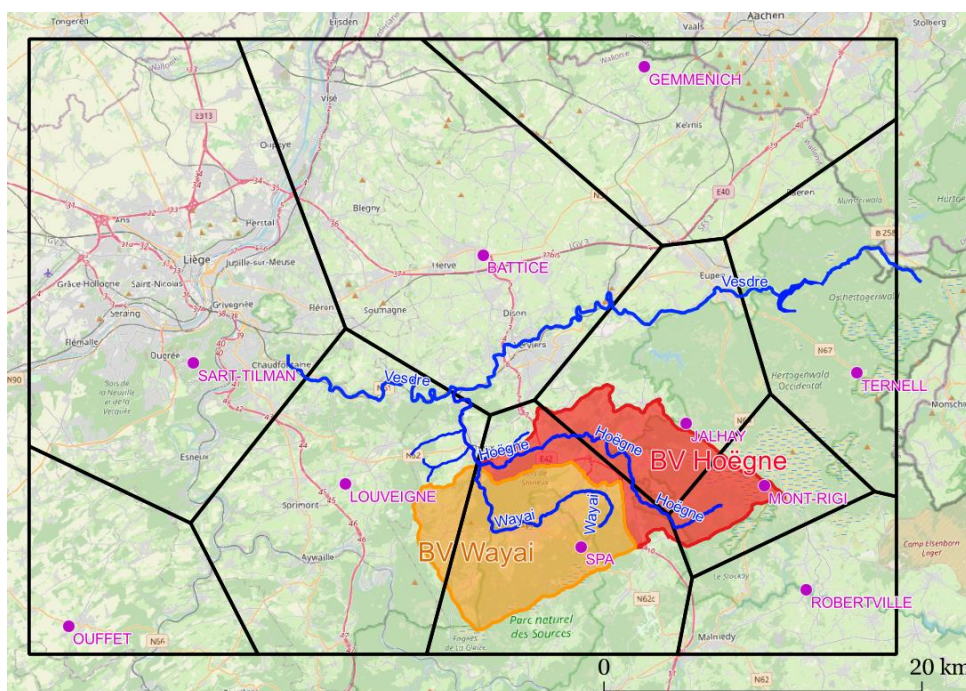


Figure 35 : Méthode des polygones de Thiessen appliquée aux pluviomètres situés proches des bassins versants étudiés. En rouge est illustré le bassin versant (BV) de la Hoëgne et en orange, le bassin versant du Wayai. Les pluviomètres sont représentés en mauve et les zones d'influence calculées par la méthode des polygones de Thiessen sont représentées en noir.

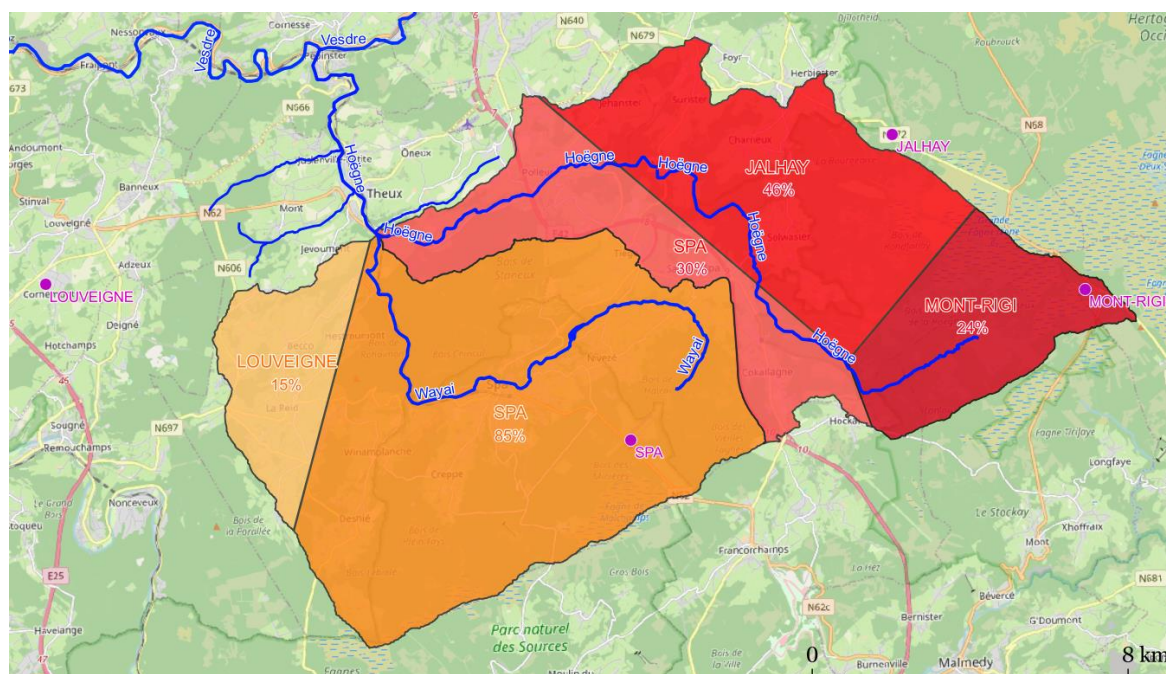


Figure 36 : Zones d'influence sur les deux bassins versants étudiés des stations pluviométriques obtenues par la méthode des polygones de Thiessen. Pour chaque bassin versant, la part sous l'influence de chacun des pluviomètres est donnée.

Une fois que l'interpolation des précipitations brutes sur chaque maille à l'aide de la méthode des polygones de Thiessen est effectuée, la fonction de production est appliquée à chaque maille en utilisant la précipitation brute correspondante.

OUTILS ET MÉTHODES

3.3.3 Fonction de production : SCS

L'explication concernant la fonction de production SCS qui suit a été inspirée du travail de M. Salesses (Salesses, 2022), du travail du groupe HydroSciences Montpellier (HydroSciences Montpellier, 2020) et des slides du cours donné par Yves Zech concernant l'utilisation d'ATHYS (Zech, 2022).

Bilan de masse

La fonction de production SCS est basée sur un bilan de masse appliqué aux cumuls d'eau, illustré sur la Figure 37. Le volume d'eau qui ruisselle directement (la pluie efficace), $\hat{Q}(t)$ est égal au volume des précipitations (la pluie brute), $\hat{P}(t)$ auxquelles est soustrait les pertes initiales avant ruissellement, I_a et les pertes lors de l'écoulement par infiltration, $\hat{F}(t)$:

$$\hat{Q}(t) = \hat{P}(t) - I_a - \hat{F}(t) \quad (9)$$

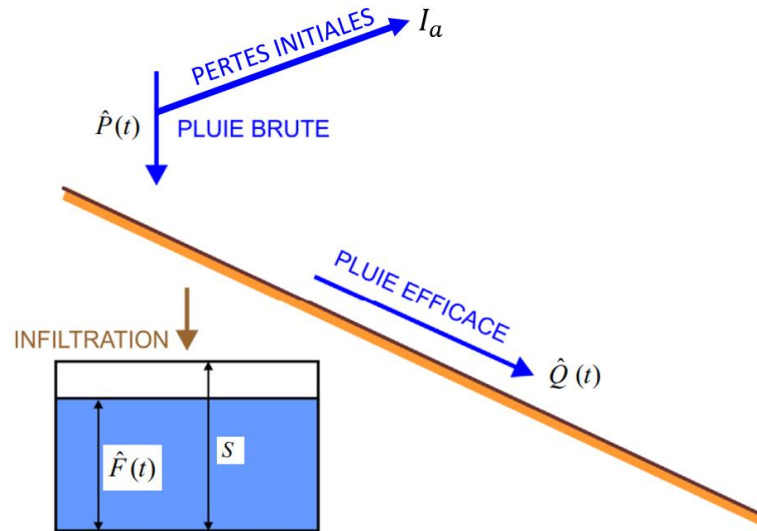


Figure 37 : Bilan de masse appliqué aux cumuls d'eau.

Les pertes initiales, I_a , rassemblent les pertes dues à l'interception par la végétation, l'accumulation dans les dépressions et la recharge en humidité. Les cumuls d'eau sont définis de la manière suivante :

$$\begin{cases} \hat{P}(t) = \sum_{t_0}^t i(t) \Delta t = \sum_{t_0}^t P_b(t) \\ \hat{Q}(t) = \int_{t_0}^t P_e(t) dt \\ \hat{F}(t) = \int_{t_0}^t F(t) dt \end{cases} \quad (10)$$

où $i(t)$ et $P_b(t)$ sont, respectivement, l'intensité de la pluie et la pluie brute à l'instant t , $P_e(t)$ est la pluie efficace à l'instant t et $F(t)$ est l'eau infiltrée à l'instant t .

OUTILS ET MÉTHODES

Les deux hypothèses principales

La fonction SCS repose sur deux hypothèses qui permettent d'exprimer les pertes par infiltration, $\hat{F}(t)$ et les pertes initiales, I_a en fonction de la capacité de stockage souterrain S :

$$\begin{cases} \frac{\hat{F}(t)}{S} = \frac{\hat{Q}(t)}{\hat{P}(t) - I_a} \\ I_a = 0,2 S \end{cases} \quad (11)$$

En utilisant ces hypothèses, en prenant en compte le fait qu'il n'y pas de ruissellement pour une pluie brute inférieure aux pertes initiales et en utilisant l'équation (9) du bilan de masse, l'expression pour le volume qui ruisselle directement, $\hat{Q}(t)$ devient :

$$\begin{cases} \hat{Q}(t) = 0 & \text{si } \hat{P}(t) \leq I_a \\ \hat{Q}(t) = \frac{(\hat{P}(t) - I_a)^2}{\hat{P}(t) - I_a + S} & \text{si } \hat{P}(t) > I_a \end{cases} \quad (12)$$

Coefficient de ruissellement

La fonction SCS utilise un coefficient de ruissellement fonction du temps, noté $C(t)$, qui permet d'inclure le fait que la proportion d'eau qui ruisselle et celle qui s'infiltrate peut varier au cours de l'événement pluvieux. Comme illustré sur la Figure 38, l'idée est d'exprimer la quantité d'eau qui ruisselle à l'instant t , notée $P_e(t)$ en fonction du coefficient de ruissellement, qui tient compte des pertes initiales I_a , et de la pluie brute à l'instant t , notée $P_b(t)$:

$$P_e(t) = C(t) P_b(t) \quad (13)$$

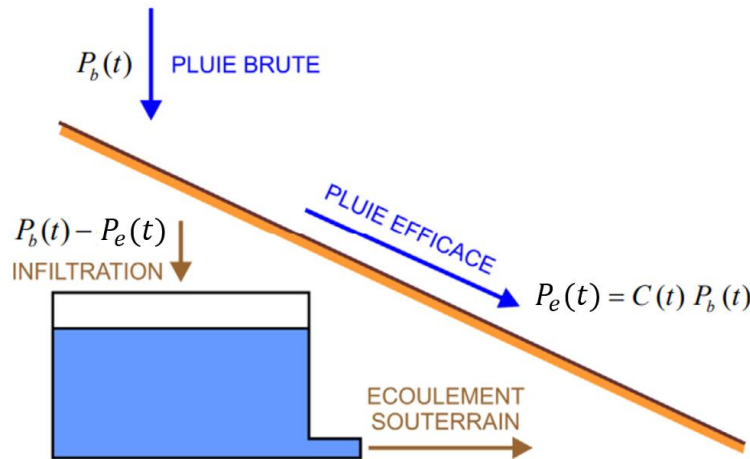


Figure 38 : Séparation entre l'eau qui ruisselle et celle qui s'infiltrate en utilisant le coefficient de ruissellement.

Ce coefficient de ruissellement correspond à la variation du cumul d'eau qui ruisselle en fonction du cumul des pluies brutes :

$$C(t) = \frac{d\hat{Q}}{d\hat{P}} = \frac{\hat{P}(t) - 0,2 S}{\hat{P}(t) + 0,8 S} \left(2 - \frac{\hat{P}(t) - 0,2 S}{\hat{P}(t) + 0,8 S} \right) \quad (14)$$

OUTILS ET MÉTHODES

Dès lors, la pluie efficace est déterminée à partir de la pluie brute et du cumul de pluie de la manière suivante :

$$P_e(t) = P_b(t) \left(\frac{\hat{P}(t) - 0,2 S}{\hat{P}(t) + 0,8 S} \right) \left(2 - \frac{\hat{P}(t) - 0,2 S}{\hat{P}(t) + 0,8 S} \right) \quad (15)$$

De plus, la fonction SCS est basée sur l'utilisation de deux réservoirs qui se vident et se remplissent : un réservoir pluie et un réservoir sol dont la capacité maximale est notée S . Ces réservoirs permettent de simuler, grâce à une vidange sur le cumul de pluie $\hat{P}(t)$, le ressuyage du sol, l'évaporation et l'interception. Ce principe permet aussi d'introduire un écoulement retardé provenant du sol grâce au réservoir sol.

Le réservoir pluie

Pour appliquer le principe de vidange, grâce au réservoir de pluie, le cumul des pluies brutes $\hat{P}(t)$ est remplacé par les pluies cumulées $P(t)$. Comme illustré sur la Figure 39, $P(t)$ correspond à la pluie brute soustrait d'une quantité proportionnelle aux pluies cumulées à chaque instant t . Le coefficient peut alors être exprimé en termes de pluies cumulées de la manière suivante :

$$C(t) = \frac{P(t) - 0,2 S}{P(t) + 0,8 S} \left(2 - \frac{P(t) - 0,2 S}{P(t) + 0,8 S} \right) \quad (16)$$

Le niveau $P(t)$ dans le réservoir peut alors être calculé à partir de l'équation différentielle suivante exprimant la conservation de la masse au sein du réservoir :

$$\begin{cases} \frac{dP(t)}{dt} = P_b(t) - ds P(t) \\ P(0) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

où $ds.P(t)$ est la quantité vidangée du réservoir à l'instant t .

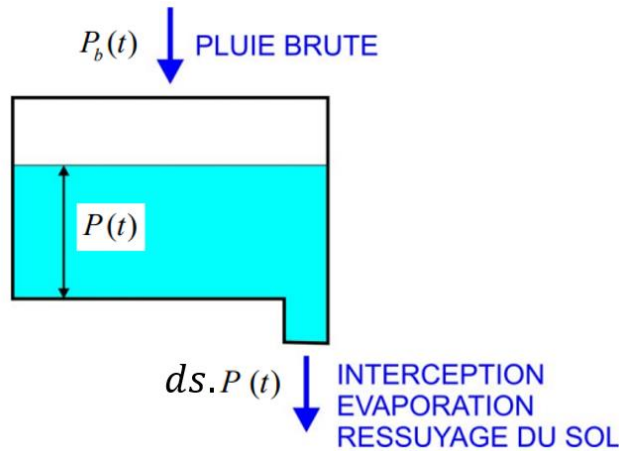


Figure 39 : Le réservoir pluie est alimenté par la pluie brute $P_b(t)$ et se vide d'une quantité $ds P(t)$.

OUTILS ET MÉTHODES

Le réservoir sol

Avec le réservoir sol, l'idée est de simuler un écoulement souterrain retardé, dont la quantité dépend du volume d'eau stocké dans le sol. Comme illustré sur la Figure 40, de la même manière que pour le réservoir de pluie, le niveau d'eau dans le réservoir de sol, noté $stoc(t)$, est déterminé par la quantité d'eau qui s'infiltre dans le sol, diminuée d'une vidange proportionnelle au niveau d'eau dans le réservoir. Le coefficient de vidange du réservoir sol, noté ds , est choisi de manière identique à celui du réservoir de pluie, dans un souci de cohérence et pour éviter d'introduire un trop grand nombre de paramètres.

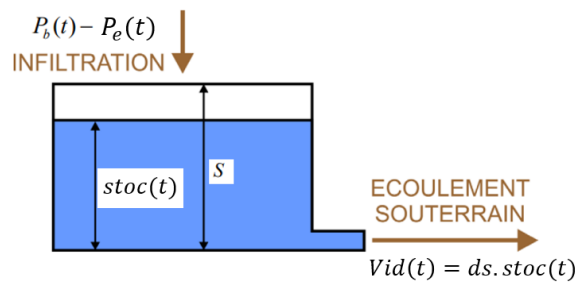


Figure 40 : Le réservoir sol est alimenté par l'eau qui s'infiltre et se vide d'une quantité $Vid(t)$.

Le niveau $stoc(t)$ dans le réservoir peut alors être calculé à partir de l'équation différentielle suivante exprimant la conservation de la masse au sein du réservoir :

$$\begin{cases} \frac{dstoc(t)}{dt} = P_b(t) - P_e(t) - ds \, stoc(t) \\ stoc(0) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

Ensuite, comme illustré sur la Figure 41, la fonction SCS permet de tenir compte de l'écoulement hypodermique. Pour ce faire, le facteur de reprise de vidange, ω est utilisé. Ce facteur détermine la proportion de l'écoulement souterrain qui contribue à l'écoulement retardé : $\omega \, Vid(t)$. L'autre proportion s'infiltre dans le sol pour rejoindre la nappe et ne participe donc pas à l'écoulement de surface : $(1 - \omega)Vid(t)$.

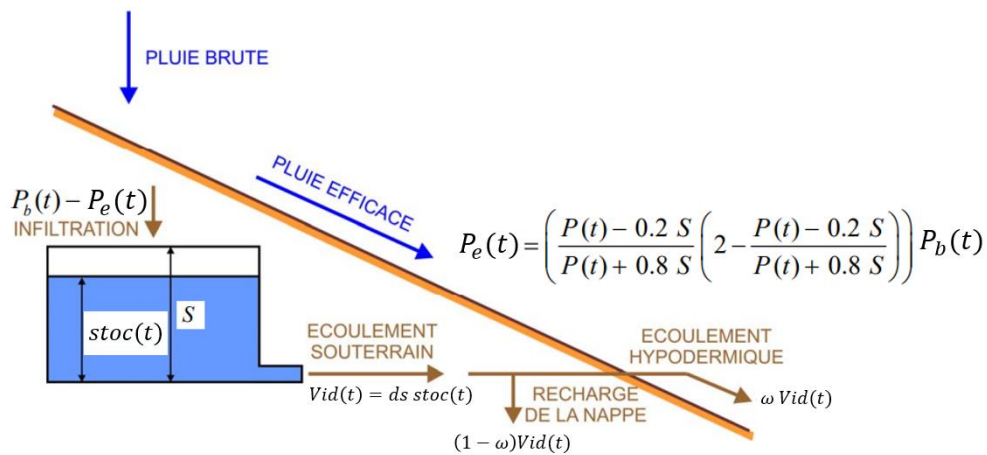


Figure 41 : Une partie de l'écoulement souterrain forme l'écoulement hypodermique et participe au débit à l'exutoire.

OUTILS ET MÉTHODES

En résumé, comme illustré sur la Figure 42, la quantité d'eau qui s'écoule sur une maille au temps t provient de la contribution de la pluie efficace et de l'écoulement hypodermique. Par conséquent, cette quantité peut être obtenue de la manière suivante :

$$Q(t) = P_e(t) + \omega ds stoc(t) \quad (19)$$

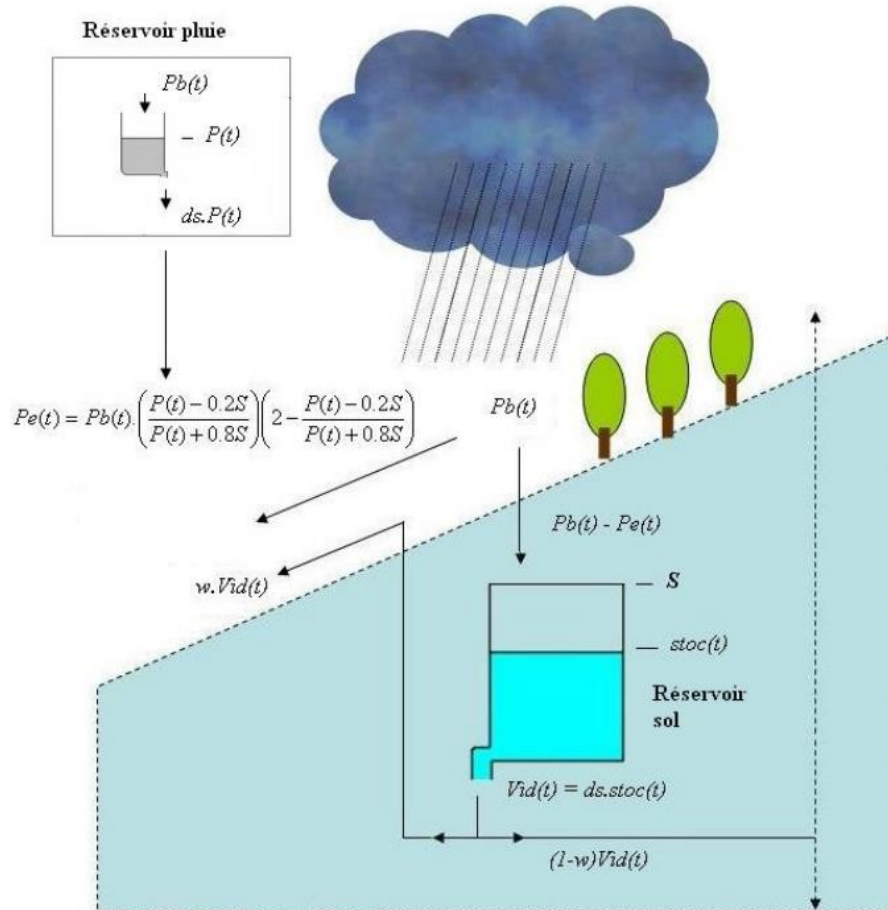


Figure 42 : Schéma résumant la fonction de production SCS de ATHYS.
Tiré du travail de HydroSciences Montpellier (HydroSciences Montpellier, 2020).

Dans la fonction de production, il y a donc 3 paramètres différents sur lesquels l'utilisateur peut jouer :

- S : la capacité maximale du réservoir sol exprimé en mm .
- ds : le facteur de vidange des réservoirs exprimé en j^{-1} .
- ω : le facteur de reprise de vidange adimensionnel.

Il est important de souligner que, en ce qui concerne les pointes de crue, le paramètre ayant le plus grand impact sur le modèle est la capacité du réservoir S , comme discuté dans l'état de l'art à travers le travail de A. Lequien (Lequien, 2003). Les autres paramètres présentent une variabilité relativement faible et peuvent être estimés au niveau régional. En général, des valeurs de $ds = 1 j^{-1}$ et $\omega = 0,2$ sont souvent utilisées (HydroSciences Montpellier, 2020).

OUTILS ET MÉTHODES

La capacité du réservoir S peut être estimée dans un premier temps à partir de tableaux qui fournissent des intervalles de valeurs de S en fonction du type de couverture du sol, des conditions hydrologiques et du type hydrologique du sol. Ces tableaux sont disponibles à l'annexe C.

3.3.4 Fonction de transfert : Lag&Route

L'explication concernant la fonction de transfert Lag&Route qui suit a également été inspirée du travail de Martin Salesses (Salesses, 2022), du travail du groupe HydroSciences Montpellier (HydroSciences Montpellier, 2020) et des slides du cours donné par Yves Zech (Zech, 2022).

Une fois qu'ATHYS a appliqué la fonction de production à toutes les mailles, il utilise la fonction de transfert qui permet d'acheminer le volume d'eau produit sur chaque maille jusqu'à l'exutoire. Une fois que l'hydrogramme élémentaire de chaque maille est obtenu, ATHYS les combine afin de construire l'hydrogramme final.

L'hydrogramme élémentaire produit à chaque maille dépend de deux temps différents : le temps de propagation, noté T_m , et le temps de diffusion, noté K_m , entre la maille m et l'exutoire. Le temps de propagation dépend du temps de parcours de l'eau depuis la maille m jusqu'à l'exutoire, il dépend donc des vitesses de l'écoulement. Le temps de diffusion est déterminé en utilisant un réservoir linéaire de capacité K_m .

Le temps de propagation, T_m

Le temps de propagation est calculé à partir de la longueur de chaque maille et de la vitesse sur chacune des mailles jusqu'à l'exutoire, comme suit :

$$T_m = \sum_{m \rightarrow \text{exutoire}} \frac{l_k}{V_k} \quad (20)$$

où l_k est la longueur des k mailles entre la maille m et l'exutoire et V_k est la vitesse d'écoulement sur la maille k .

L'hypothèse souvent utilisée est que la vitesse d'écoulement sur les différentes mailles est constante sur tout le bassin. Cette hypothèse peut être justifiée en supposant que lorsque l'on se déplace de l'amont vers l'aval, la pente diminue, mais cette diminution est compensée par une augmentation du tirant d'eau (Salesses, 2022). L'expression du temps de propagation peut alors être simplifiée en utilisant la vitesse de transfert moyenne dans le bassin, notée V_0 :

$$T_m = \sum_{m \rightarrow \text{exutoire}} \frac{l_k}{V_0} \quad (21)$$

Le temps de diffusion, K_m

Le temps de diffusion, $K_m(t)$, est déterminé à partir du temps de propagation, T_m , et de deux autres paramètres K_0 et K_1 de la manière suivante :

$$K_m(t) = K_0 T_m + K_1 \quad (22)$$

OUTILS ET MÉTHODES

Le paramètre K_1 n'est utilisé que lors de simulation d'un modèle global à une maille. Dans le cas d'un modèle distribué à plusieurs mailles comme le nôtre, il est conseillé d'utiliser $K_1 = 0$, ce qui simplifie l'expression du temps de diffusion :

$$K_m(t) = K_0 T_m \quad (23)$$

Le paramètre K_0 est supposé constant et il est difficilement quantifiable physiquement car il dépend de nombreux paramètres.

Hydrogramme élémentaire

Avec ces hypothèses, comme illustré sur la Figure 43, l'hydrogramme élémentaire obtenu à l'exutoire de la maille m au temps t_0 est exprimé à partir de la pluie produite au temps t_0 sur cette maille et son aire A comme suit :

$$\begin{cases} q_m(t) = 0 & \text{si } t < t_0 + T_m \\ q_m(t) = \frac{P_e(t_0)}{K_m} e^{-\frac{t-(t_0+T_m)}{K_m}} A & \text{si } t \geq t_0 + T_m \end{cases} \quad (24)$$

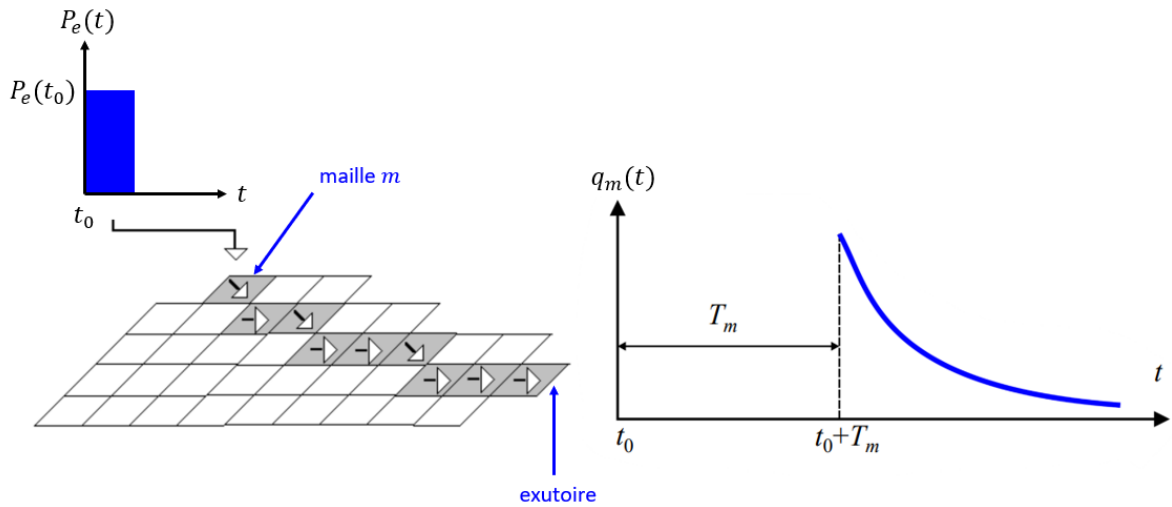


Figure 43 : Schéma de la construction de l'hydrogramme élémentaire au temps t_0 associé à la maille m .
Tiré des slides du cours donné par Yves Zech (Zech, 2022).

Pour obtenir le débit au temps t de l'hydrogramme élémentaire associé à la maille m , il suffit d'intégrer les pluies depuis le début de l'évènement pluvieux jusqu'au temps $t - T_m$ de la manière suivante :

$$Q_m(t) = A \int_{t_0}^{t-T_m} \frac{P_e(\tau)}{K_m} e^{-\frac{t-T_m-\tau}{K_m}} d\tau \quad (25)$$

Enfin, pour obtenir l'hydrogramme total à l'exutoire, il suffit de sommer les contributions de toutes les mailles du bassin versant à chaque pas de temps.

OUTILS ET MÉTHODES

Dans la fonction de transfert Lag&Route, il y a donc 2 paramètres différents sur lesquels l'utilisateur peut jouer :

- V_0 : la vitesse de transfert moyenne sur le bassin versant, exprimée en m/s .
- K_0 : le facteur d'amortissement, adimensionnel.

Il est important de noter que l'influence de V_0 sur la fonction de transfert est plus grande que celle de K_0 . Cela a notamment été mis en évidence dans une étude sur le bassin de Vidourle, comme discuté dans l'état de l'art (Lequien, 2003).

3.3.5 Application du modèle hydrologique

Désormais que le modèle hydrologique utilisé dans ce travail a été présenté, appliquons-le à notre cas d'étude à Theux. Pour ce faire, il faut décider des valeurs pour les trois paramètres de production (S , ds et ω) ainsi que pour les deux paramètres de transfert (V_0 et K_0). Comme discuté précédemment dans la section 3.3.3 et 3.3.4, la variabilité des paramètres ds , ω et K_0 est faible. Par conséquent, pour simplifier et limiter le nombre de paramètres à déterminer, il a été décidé de travailler avec les valeurs conseillées et les plus couramment utilisées pour ces trois paramètres :

$$\begin{cases} ds = 1 \text{ j}^{-1} \\ \omega = 0,2 \\ K_0 = 0,7 \end{cases}$$

La valeur de K_0 a été choisie en se basant sur les résultats de l'étude menée par Alexandra Lequien pour le bassin de Vidourle (Lequien, 2003) ainsi que sur les conclusions de l'étude de Yves Zech à Chaudfontaine. Pour rappel, l'un des objectifs de ce travail est de trouver des solutions pour lutter contre les inondations en se basant sur les événements de juillet 2021. Ainsi, l'accent est mis sur le pic de la crue, et la partie de l'hydrogramme correspondant à la décrue, en partie influencée par le paramètre K_0 , a moins d'importance. Par conséquent, le choix de la valeur de K_0 aura peu d'impact sur la suite des résultats.

Quant aux deux paramètres restants, à savoir S et V_0 , il a été décidé dans un premier temps d'utiliser les valeurs trouvées par Yves Zech lors de son étude à Chaudfontaine pour juillet 2021 :

$$\begin{cases} S = 17 \text{ mm} \\ V_0 = 0,5 \text{ m/s} \end{cases}$$

Puisque cette commune se trouve à proximité de Theux, l'utilisation de ces paramètres semble pertinente dans un premier temps.

Pour rappel, seuls quatre pluviomètres ont une influence sur les deux bassins versants étudiés : Louveigne, Spa, Jalhay et Mont-Rigi.

OUTILS ET MÉTHODES

Afin d'utiliser le modèle hydrologique, les données de précipitations enregistrées par ces pluviomètres lors des inondations de juillet 2021 ont été obtenues sur le site du SPW¹¹. Les hyétogrammes de chacun des quatre pluviomètres sont disponibles à l'annexe D.

La Figure 44 illustre les hydrogrammes obtenus du 13 au 18 juillet 2021 à l'exutoire des deux bassins versants (celui de la Hoëgne en rouge et celui du Wayai en orange), en utilisant les paramètres ci-dessus. Le débit total correspond à l'hydrogramme à la confluence (en bleu) et est le résultat de la somme des contributions des deux bassins versants.

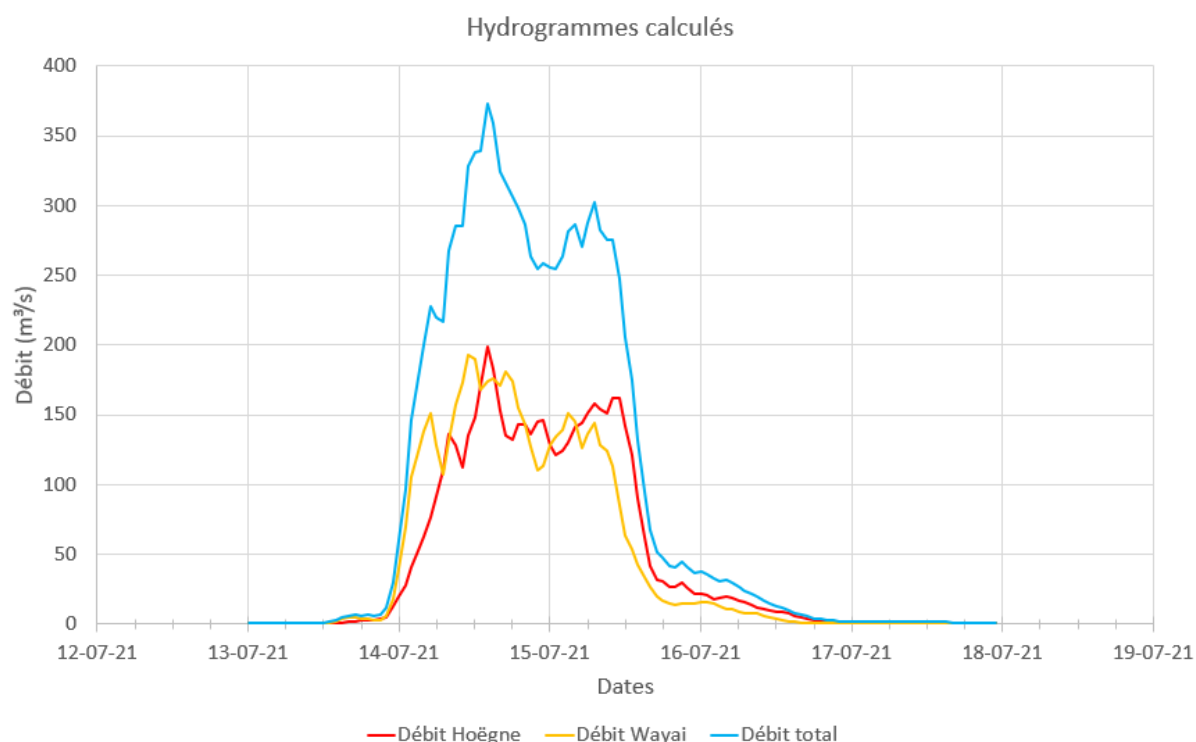


Figure 44 : Hydrogrammes calculés par le modèle hydrologique avec les paramètres $S = 17 \text{ mm}$ et $V_0 = 0,5 \text{ m/s}$.

Analyse des hydrogrammes

L'analyse des hydrogrammes obtenus pour les événements de juillet 2021 à l'exutoire des deux bassins versants permet de tirer plusieurs observations et commentaires pertinents avant de les utiliser dans le modèle hydraulique.

Tout d'abord, il est notable que la contribution de chaque bassin versant en termes de débit est similaire, avec des pics d'environ $200 \text{ m}^3/s$ et des durées de crue similaires. Cette similarité est confirmée en calculant les volumes d'eau écoulés sur chacun des bassins, qui se révèlent pratiquement identiques : environ 20 Mm^3 pour le bassin de la Hoëgne et $19,95 \text{ Mm}^3$ pour celui du Wayai. Cette similarité des volumes d'eau écoulés peut s'expliquer par un équilibre entre la taille du bassin versant du Wayai, plus grand, et une intensité de pluie inférieure notamment à Louveigne.

¹¹ <https://spw.wallonie.be/> consulté le 4 novembre 2022.

OUTILS ET MÉTHODES

Un autre point à noter est que bien que les formes des hydrogrammes des deux bassins versants soient similaires, il existe un décalage temporel. Le pic de débit à l'exutoire du bassin du Wayai précède celui du bassin de la Hoëgne de trois heures. Ce décalage peut être expliqué par la différence de forme des bassins versants. Le bassin du Wayai s'étend à la fois en largeur et en longueur, tandis que celui de la Hoëgne s'étire le long du cours d'eau. Cette différence influence la rapidité à laquelle l'eau provenant des parties éloignées du bassin du Wayai atteint l'exutoire, contribuant ainsi au pic de débit plus tôt que dans le bassin de la Hoëgne.

Par ailleurs, il est important de noter que le pic total de l'hydrogramme combiné atteint $373 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui correspond au débit maximal à la confluence, à l'entrée de Theux. Ce pic survient le 14 juillet à 14 heures, environ 35 heures après le début de l'événement pluvieux. Le débit maximal est une donnée importante lors d'études d'inondations puisque les aménagements pour lutter contre celles-ci sont souvent dimensionnées en termes de débits. La valeur de $373 \text{ m}^3/\text{s}$ semble être plausible puisque le débit dans la Hoëgne à Pepinster, un peu plus en aval de Theux, a été estimé à $400 \text{ m}^3/\text{s}$ par le SPW selon le journal « SudInfo » (SudInfo, 2021).

Enfin, les quatre hyétogrammes des pluviomètres présentent un premier pic d'intensité suivi d'une diminution avant qu'un second pic moins prononcé n'apparaisse quelques heures plus tard. Cette tendance est également observée dans les hydrogrammes.

En résumé, à première vue, l'hydrogramme de débit total semble être adéquat pour être employé en tant qu'entrée dans le modèle hydraulique, dans le but de calculer les niveaux d'eau et l'étendue des inondations dans la ville de Theux résultant des précipitations de juillet 2021.

3.4 Modélisation hydraulique avec Hydroflow

Comme mentionné précédemment, le modèle hydraulique choisi est un code de calcul développé à l'Ecole Polytechnique de Louvain (EPL), appelé « Hydroflow ». Ce programme est conçu pour résoudre les équations bidimensionnelles de Saint-Venant, telles que présentées dans la section 2.2.2 en utilisant la méthode des volumes finis. Cette section présente le modèle hydraulique, explique comment il est appliqué à notre cas d'étude en plusieurs étapes et les choix qui ont été faits.

Pour commencer, nous rappelons les équations bidimensionnelles de Saint-Venant et justifions leur pertinence pour l'étude des inondations dans la section 3.4.1. Ensuite, le schéma numérique des volumes finis implémenté dans "Hydroflow" pour résoudre ces équations est détaillé dans la section 3.4.2.

Ensuite, dans la section 3.4.3, nous discutons du choix de la zone à modéliser, tandis que la section 3.4.4 aborde la question cruciale de la taille des mailles. Nous poursuivons en analysant les conditions aux limites imposées au modèle hydraulique, en justifiant ces choix dans la section 3.4.5. Ces conditions engendrent une zone où les résultats pourraient ne pas refléter la réalité, et la section 3.4.6 estime la région où la fiabilité des résultats pourrait être compromise.

OUTILS ET MÉTHODES

Enfin, la section 3.4.7 se concentre sur l'application concrète du modèle hydraulique. L'hydrogramme total construit grâce au modèle hydrologique est utilisé comme condition limite amont pour le modèle hydraulique.

3.4.1 Equations de Saint-Venant 2D

Pour rappel les équations de Saint-Venant écrites sous forme vectorielles sont les suivantes :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (26)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{pmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} q_x \\ \frac{q_x^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \\ \frac{q_x q_y}{h} \end{pmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} q_y \\ \frac{q_x q_y}{h} \\ \frac{q_y^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \end{pmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{0,x} - S_{f,x}) \\ gh(S_{0,y} - S_{f,y}) \end{pmatrix}$$

où $\mathbf{U}$ est le vecteur des variables conservées, $\mathbf{F}$ et $\mathbf{G}$ sont les vecteurs de flux et $\mathbf{S}$ sont les termes sources.

C'est effectivement un système de trois équations à trois inconnues, à savoir h (la profondeur d'eau), q_x (le débit linéique dans la direction longitudinale de l'écoulement) et q_y (le débit linéique dans la direction transversale). Ces deux dernières inconnues cachent en réalité les vitesses moyennes sur la profondeur, U et V , dans chacune des deux directions.

Utiliser les équations 2D de Saint-Venant apparait comme le choix idéal pour étudier les inondations dans la ville de Theux. En effet, le choix d'un modèle mécaniste plutôt que conceptuel semble évident au vu de la différence de précision et des phénomènes qui peuvent être représentés en utilisant des lois physiques plutôt qu'une méthode type méthode des cellules.

Ensuite, utiliser les équations tridimensionnelles de Navier-Stokes sous leur forme générale ne permet que de représenter des phénomènes locaux avec une bonne précision mais ne s'appliquent pas à des études plus larges telles que celles d'études d'inondations car les temps de calcul seraient bien trop grands et qu'il faudrait une trop grande connaissance du terrain étudié. En utilisant un tel modèle, il faudrait faire beaucoup trop d'hypothèses, tellement que l'avantage d'un tel modèle serait perdu. L'utilisation d'un modèle bidimensionnel en moyennant les grandeurs physiques sur la profondeur d'eau et en négligeant la distribution des vitesses verticales ne réduit pas trop la précision car l'étendue des inondations et les phénomènes liés s'étendent plutôt de manière horizontale que verticale. Dans l'état de l'art, nous avons d'ailleurs montré que les résultats obtenus avec un modèle numérique résolvant les équations bidimensionnelles de Saint-Venant sont très satisfaisants. L'idée ici n'est pas de se concentrer sur des phénomènes locaux mais plutôt de s'intéresser de manière globale à l'étendue et les hauteurs d'eau dans Theux.

Les équations unidimensionnelles de Saint-Venant auraient pu réduire davantage les temps de calcul, mais elles n'auraient pas représenté les phénomènes de débordement et d'écoulement transversal.

OUTILS ET MÉTHODES

Étant donné l'importance de connaître l'étendue des eaux, il était nécessaire de la représenter correctement en utilisant un modèle avec les équations bidimensionnelles de Saint-Venant. Bien qu'un modèle combinant les équations 1D et 2D aurait pu être envisagé, pour éviter de complexifier l'interface entre les deux modèles, il a été décidé de travailler uniquement avec les équations bidimensionnelles de Saint-Venant.

Il est important de noter que ce système d'équations de Saint-Venant présente trois propriétés essentielles pour la représentation de phénomènes tels que les inondations :

- Elles respectent la conservation de la masse, évitant ainsi toute perte d'eau.
- La vitesse de propagation de l'information est finie, permettant une représentation précise de la propagation des ondes.
- Le système d'équations permet des discontinuités dans la solution, ce qui permet la représentation de ressauts hydrauliques et de chocs.

Ces trois propriétés ne sont pas démontrées dans ce travail, mais elles le sont dans le cours intitulé « Numerical simulation of transient flow » dispensé par Sandra Soares Frazao (Soares Frazao, Finite-volume resolution of the Saint-Venant shallow-water equations, s.d.).

3.4.2 Schéma numérique

Comme évoqué précédemment, la résolution de ces équations qui souvent n'ont pas de solution analytique, requiert l'utilisation d'un schéma numérique. Ce schéma doit également garantir le respect des trois propriétés énoncées pour que les solutions obtenues soient conformes à ces caractéristiques. Dans le contexte des inondations, les volumes finis s'avèrent être le choix privilégié, car ce schéma numérique permet de reproduire les propriétés inhérentes aux équations de Saint-Venant. Cette méthode numérique permet la résolution d'équations aux dérivées partielles, telles que les équations de Saint-Venant. Elle s'appuie sur la formulation forte de ces équations et fait appel à des approximations d'intégrales. L'idée centrale des volumes finis réside dans la résolution approximative des équations par une discrétisation de l'écoulement en une multitude de cellules qui couvrent l'ensemble du domaine.

Dans chaque petit volume fini, les variables hydrauliques sont considérées comme constantes à chaque pas de temps. La forme de ces cellules peut varier, et un maillage est qualifié de structuré lorsque ces cellules sont carrées. Cependant, le code de calcul « Hydroflow » utilise un maillage non structuré composé de cellules triangulaires. Pour simplifier l'explication du schéma numérique, nous commencerons par décrire le concept sur un maillage structuré. Néanmoins, l'avantage de la méthode des volumes finis réside dans sa flexibilité pour être adaptée à un maillage non structuré. Cette méthode s'avère également très appropriée pour résoudre des équations basées sur les lois de conservation, en utilisant des calculs de flux aux interfaces entre les volumes finis.

Dans chaque cellule, les inconnues sont la profondeur d'eau (et donc la section mouillée) ainsi que le débit.

OUTILS ET MÉTHODES

L'utilisation d'une valeur constante pour représenter la profondeur d'eau sur toute la cellule crée en quelque sorte des "marches d'escalier" entre les cellules, ce qui peut mettre en évidence des discontinuités dans la solution.

Le schéma numérique de la méthode des éléments finis ne convient pas à la résolution de ces équations pour l'étude des inondations. En effet, lors d'inondations, le régime est transitoire et les écoulements sont rapides, ce qui engendre des transitions entre écoulements supercritiques et subcritiques, entraînant des ressauts hydrauliques et donc des discontinuités dans la solution. Étant donné que la méthode des éléments finis calcule la solution à chaque nœud d'une maille et approxime la solution entre ces nœuds à l'aide de polynômes (souvent des fonctions affines), les discontinuités des écoulements ne peuvent pas être correctement représentées.

Equations des volumes finis en 1D

Par simplicité de représentation, nous allons revenir aux équations de Saint-Venant 1D afin d'expliquer le principe de la résolution en volumes finis. Pour rappel, ces dernières sont les suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = gA(S_0 - S_f) + gI_2 \end{cases} \quad (27)$$

Et sous forme vectorielle :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} = \mathbf{S} \quad (28)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ gA(S_0 - S_f) + gI_2 \end{pmatrix}$$

où $\mathbf{U}$ est le vecteur des variables conservées, $\mathbf{F}$ le vecteur de flux et $\mathbf{S}$ sont les termes sources. L'équation de continuité représente la conservation de la masse à travers la section mouillée A et l'équation de quantité de mouvement est représentée à travers la conservation du débit Q .

Ensuite, nous reviendrons aux équations 2D afin d'étendre le schéma 1D. Le principe de la méthode des volumes finis est illustré sur la Figure 45.

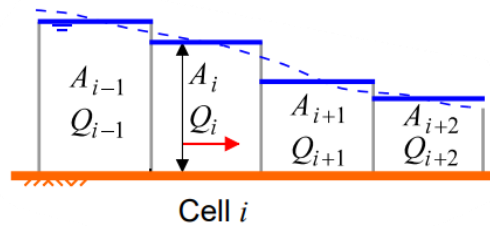


Figure 45 : Schéma du principe des volumes finis en une dimension. Sur chaque cellule i les inconnues A_i et Q_i sont considérées comme constantes à chaque pas de temps.

Tirée du cours de « Numerical simulation of transient flow » donné par Sandra Soares Frazao (Soares Frazao, Finite-volume resolution of the Saint-Venant shallow-water equations, s.d.).

OUTILS ET MÉTHODES

Pour obtenir le schéma numérique des volumes finis à résoudre, il suffit d'intégrer les équations de Saint-Venant sur chaque volume fini de largeur unitaire (illustré sur la Figure 46) de la manière suivante :

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} \right) d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega \quad (29)$$

où $\Omega = \Delta x \Delta y \Delta t$ est un volume espace-temps illustré sur la Figure 46 avec $\Delta y = 1$ puisque nous travaillons en une seule dimension spatiale.

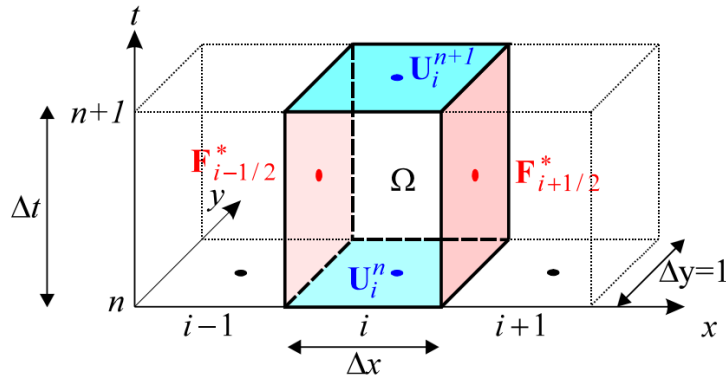


Figure 46 : Représentation des volumes espace-temps sur lesquels les équations de Saint-Venant sont intégrées.
Tirée du cours de « Numerical simulation of transient flow » donné par Sandra Soares Frazao (Soares Frazao, Finite-volume resolution of the Saint-Venant shallow-water equations, s.d.).

Grâce au théorème de la divergence, l'intégrale de volume peut être transformée en une intégrale de surface, c'est-à-dire en flux qui transitent entre des volumes adjacents. Puis, en utilisant le théorème de Leibniz, la dérivée temporelle peut sortir de l'intégrale. Enfin, en appliquant l'intégrale à une maille carrée de largeur unitaire, l'équation vectorielle des volumes finis obtenue qui donne la valeur du vecteur $\mathbf{U}$ au temps $n + 1$ est le suivant :

$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{F}_{i+1/2}^* - \mathbf{F}_{i-1/2}^*) + \mathbf{S}_i^* \Delta t \quad (30)$$

Avec :

- $\mathbf{U}_i^{n+1}$: le vecteur des variables conservées de la cellule i au temps $n + 1$.
- $\mathbf{U}_i^n$: le vecteur des variables conservées de la cellule i au temps n .
- Δt : le pas de temps de la discrétisation temporelle.
- Δx : la taille de la cellule i du maillage choisi lors de la discrétisation spatiale du maillage.
- $\mathbf{F}_{i+1/2}^*$: la valeur moyenne représentative, entre le temps n et $n + 1$, du flux à l'interface entre la cellule i et $i + 1$.
- $\mathbf{F}_{i-1/2}^*$: la valeur moyenne représentative, entre le temps n et $n + 1$, du flux à l'interface entre la cellule $i - 1$ et i .
- $\mathbf{S}_i^*$: la valeur moyenne représentative, entre le temps n et $n + 1$, des termes sources dans la cellule i .

OUTILS ET MÉTHODES

A première vue, le schéma semble facile à exploiter mais le calcul des flux aux interfaces et des termes sources est le point critique de la méthode. Il existe d'ailleurs plusieurs méthodes afin de calculer ces différents termes. De plus, il n'est pas réellement explicite car les termes de flux et les termes sources sont calculés à partir d'un temps intermédiaire.

Calcul des flux

Il existe trois méthodes différentes pour calculer les flux à l'interface entre deux cellules : la méthode de Pavie, la méthode de Roe et la méthode HLL (Harten-Lax-Van Leer). Toutes les trois s'expriment de la même manière, la différence réside dans la façon de calculer les valeurs moyennes à l'interface. Dans ce travail, seul le détail de la méthode HLL est exposé, car elle est celle implémentée dans le code « Hydroflow ». Pour rappel, le vecteur contenant les termes de flux est le suivant :

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q \\ \Sigma \end{pmatrix}$$

où Σ représente le flux de quantité de mouvement.

Le point de départ de la méthode HLL est de s'intéresser à la discontinuité locale à l'interface entre deux cellules voisines, tel qu'illustré sur la Figure 47. Cette situation peut être comparée à une mini-rupture de barrage, où l'information se propage en amont et en aval sur une certaine distance, guidée par les caractéristiques positives et négatives des équations de Saint-Venant. Ces caractéristiques, notées respectivement c^+ et c^- , décrivent la propagation de l'information.

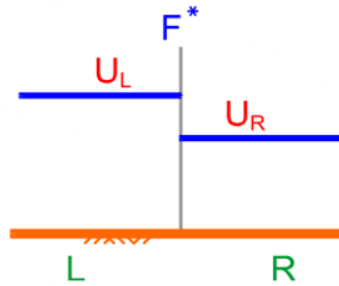


Figure 47 : Discontinuité locale à l'interface entre deux cellules voisines avec les variables hydrauliques valant U_L dans la cellule de gauche et U_R dans la cellule de droite.

Un tel scénario, où deux niveaux constants se trouvent à des hauteurs différentes et où l'évolution de cette discontinuité est recherchée, peut être formulé comme un problème de Riemann. Ce concept est illustré sur la Figure 48, où U_L et U_R représentent les deux niveaux constants de part et d'autre de l'interface, et où U^* correspond à la zone perturbée résultant de la propagation de cette discontinuité initiale en amont et en aval à des vitesses c^- et c^+ . Cette zone perturbée est considérée comme constante, étant donné que le problème est local et que le pas de temps choisi est petit.

OUTILS ET MÉTHODES

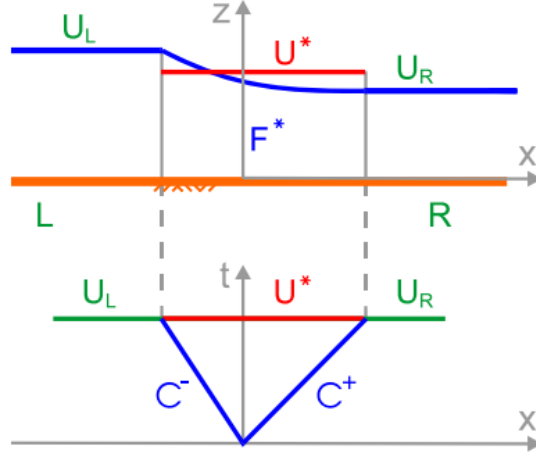


Figure 48 : Schéma du principe de la méthode HLL. Le profil en bleu représente le profil type d'une rupture de barrage et en rouge est la valeur considérée comme constante. Les caractéristiques c^- et c^+ permettent de définir la zone perturbée en rouge. Tirée du cours de « Numerical simulation of transient flow » donné par Sandra Soares Frazao (Soares Frazao, Finite-volume resolution of the Saint-Venant shallow-water equations, s.d.).

Dans la méthode HLL, l'idée est de déterminer l'état moyen de la perturbation, U^* , à partir de l'équation de Rankine-Hugoniot suivante :

$$\Delta F = a \Delta U \quad (31)$$

où $\Delta F = F_L - F_R$, $\Delta U = U_L - U_R$ et a la vitesse de propagation de la discontinuité.

Cette relation permet de lier les états des variables hydrauliques à gauche et à droite d'une discontinuité se propageant à une vitesse a aux valeurs des flux de part et d'autre de cette discontinuité. Cette équation offre une solution faible valable localement au niveau de la discontinuité. Pour obtenir cette relation, il faut intégrer les équations de Saint-Venant sur un volume de contrôle renfermant une discontinuité qui sépare deux états constants se déplaçant à une vitesse a .

L'approche consiste à formuler l'équation de Rankine-Hugoniot en utilisant la matrice jacobienne de l'écoulement, $[A]$, autour de chacune des deux ondes. L'équation à formuler se présente comme suit :

$$\Delta F = [A] \Delta U = \lambda_i \Delta U \quad (32)$$

où $[A] = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ c^2 - V^2 & 2V \end{pmatrix}$ avec c , la vitesse de propagation de l'information.

Ensuite, en isolant la valeur du flux à la discontinuité, l'équation pour calculer les termes de flux à l'interface est obtenue :

$$F^* = \frac{\lambda^+}{\lambda^+ - \lambda^-} F_L - \frac{\lambda^-}{\lambda^+ - \lambda^-} F_R + \frac{\lambda^+ \lambda^-}{\lambda^+ - \lambda^-} (U_R - U_L) \quad (33)$$

où $\lambda^- = \lambda_1 = V - c$ et $\lambda^+ = \lambda_2 = V + c$, sont les vitesses de propagation de l'information le long des deux caractéristiques. Les valeurs moyennes sont prises comme les valeurs extrêmes des caractéristiques, c'est-à-dire, que $\lambda^- = \min(V_L - c_L; V_R - c_R)$ et $\lambda^+ = \max(V_L + c_L; V_R + c_R)$.

OUTILS ET MÉTHODES

Les termes de flux peuvent également être écrits de la manière suivante en utilisant l'expression du nombre de Froude ($Fr = \frac{V}{c}$), dans l'objectif de mettre un aspect intéressant de l'expression en évidence :

$$\mathbf{F}^* = \frac{1 + Fr}{2} \mathbf{F}_L + \frac{1 - Fr}{2} \mathbf{F}_R + \bar{c} \frac{1 - Fr^2}{2} (\mathbf{U}_L - \mathbf{U}_R) \quad (34)$$

Il est intéressant de remarquer dans l'équation écrite sous cette forme que pour des grands nombres de Froude, donc pour des écoulements supercritiques, le calcul des flux donne plus de poids à l'information qui vient de l'amont que celle qui vient de l'aval. Inversement, pour un écoulement à faible nombre de Froude, donc pour un écoulement subcritique, le poids de l'information venant de l'amont est plus réduit.

En fin de compte, les trois méthodes produisent des résultats qui présentent peu de différences entre elles. Des divergences notables apparaissent principalement lors de problèmes impliquant d'importantes discontinuités. Dans le contexte de « Hydroflow », le choix s'est porté sur la méthode HLL pour le calcul des flux, car cette méthode peut être étendue à la dimension 2D en utilisant une astuce présentée ultérieurement dans ce travail.

Calcul des termes sources

Les termes sources se distinguent en deux catégories : les termes sources de frottement, associés à S_f , ainsi que les termes liés à la topographie, exprimés par S_0 et I_2 . Pour rappel, le calcul des termes sources s'effectue selon les expressions suivantes :

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ gA(S_0 - S_f) + gI_2 \end{pmatrix}$$

a) *Terme de frottement - S_f*

Pour calculer les termes associés au frottement, conformément aux hypothèses des équations de Saint-Venant, la formule de Manning est utilisée pour déterminer la pente de la ligne de charge. À cet effet, il est nécessaire d'intégrer la formule de Manning suivante sur la cellule i :

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{R^{\frac{4}{3}}} \quad (35)$$

Avec :

- n : le coefficient de Manning qui décrit la rugosité de la surface sur laquelle à lieu l'écoulement. Un tableau qui donne un ordre de grandeur des valeurs à prendre en fonction de la nature des surfaces est disponible à l'annexe E. Ce coefficient est exprimé en $s/m^{1/3}$.
- V : la vitesse moyenne de l'écoulement exprimée en m/s .
- $R = \frac{A}{P}$: le rayon hydraulique de la section avec A , la section mouillée et P , le périmètre mouillé. Le rayon hydraulique est exprimé en m .

OUTILS ET MÉTHODES

En intégrant cette expression pour discrétiser sur chaque cellule i , nous obtenons l'expression semi-implicite suivante, qui permet de calculer la pente de frottement pour la cellule i , et qui permet ensuite, de déterminer les variables hydrauliques à l'instant $n + 1$:

$$(S_f)_i^* = \frac{n^2 |V_i^{(n+1)}| V_i^{(n+1)}}{(R_i^{(n+1)})^{\frac{4}{3}}} \quad (36)$$

où $V_i^{(n+1)}$ et $R_i^{(n+1)}$ est le résultat de l'équation des volumes finis (30) mais sans prendre en compte les termes sources. Cela constitue une première estimation des variables au temps $n + 1$. La valeur absolue permet de garantir d'avoir le bon signe pour S_f en fonction du signe de la vitesse.

b) Termes liés à la topographie - S_0 et I_2

Pour les termes liés à la topographie, à savoir la pente de fond S_0 et le terme lié au changement de largeur I_2 , on utilise l'expression suivante qui relie les deux. Cette expression, qui peut être démontrée, permet de combiner les effets des deux termes :

$$\frac{\partial I_1}{\partial x} = A \frac{\partial h}{\partial x} + I_2 \quad (37)$$

où $\frac{\partial h}{\partial x}$ représente la pente de fond.

Mais au lieu de travailler avec un niveau réel dans chaque cellule, on va travailler avec un niveau d'eau intermédiaire moyen $\bar{z}$ entre les deux cellules. Et la différence de moment statique entre les deux sections consécutives i et $i + 1$ peut être calculée.

Pour finir, l'expression des termes sources est la suivante :

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ -gAS_f + \frac{\partial I_1}{\partial x} \Big|_{\bar{z}} \end{pmatrix} \quad (38)$$

Conditions aux limites

Dans le contexte de l'utilisation du schéma des volumes finis, un maillage constitué de cellules est établi pour discrétiser l'espace. Ce maillage est entouré par des frontières qui délimitent la zone d'étude. Au sein du modèle numérique, il est nécessaire de définir des conditions aux limites sur ces frontières. Différents types de conditions peuvent être appliqués en fonction des situations spécifiques que l'on souhaite modéliser. L'objectif principal est que ces conditions aux limites soient cohérentes avec la manière dont l'information se propage à travers le domaine.

a) Condition de « mur »

Une des conditions limites qui peut être imposée sur une cellule est la condition de « mur », comme illustré sur la Figure 49. Dans ce cas un débit nul est imposé à l'interface de cette cellule et le flux de quantité de mouvement à l'interface à imposer est déterminé en utilisant l'équation des caractéristiques qui décrivent la propagation de l'information.

OUTILS ET MÉTHODES

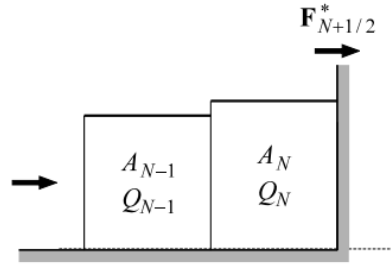


Figure 49 : Schéma de la condition limite de « mur » à la limite aval.

Tirée du cours de « Numerical simulation of transient flow » donné par Sandra Soares Frazao (Soares Frazao, Finite-volume resolution of the Saint-Venant shallow-water equations, s.d.).

Les conditions à imposer à l'interface de la cellule N sont alors les suivantes :

$$\begin{cases} Q_{N+1/2}^* = 0 \\ \Sigma_{N+1/2}^* = \Sigma_N^* + c_N^* Q_N^* \end{cases} \quad (39)$$

Cette condition de « mur » peut également être imposée à l'amont du système en adaptant l'expression pour la cellule amont.

b) Condition de « débit imposé »

La manière d'injecter de l'eau dans le système est d'imposer une condition limite de « débit imposé », comme illustré sur la Figure 50. En général, cela se fait à la limite amont. Dans ce cas, il faut imposer des conditions à l'interface de la première cellule. Dans le cas d'un écoulement supercritique, il faut forcément imposer un débit mais également une hauteur d'eau. Dans le cas d'un écoulement subcritique, c'est-à-dire pour un nombre de Froude inférieur à un ($Fr < 1$), uniquement imposer le débit suffit puisque l'information peut également venir de l'aval en suivant la caractéristique négative. En procédant de la même manière que pour la condition de « mur », les conditions à imposer sur le flux à l'interface de la première cellule, pour un écoulement subcritique ($Fr < 1$ dans la cellule 1), sont les suivantes :

$$\begin{cases} Q_{1/2}^* = Q_{imp} \\ \Sigma_{1/2}^* - \Sigma_1^n = (V_1^n + c_1^n)(Q_{1/2}^* - Q_1^n) \end{cases} \quad (40)$$

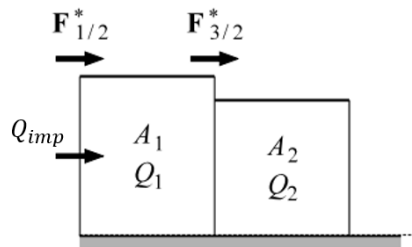


Figure 50 : Schéma de la condition limite de « débit imposé » à la limite amont.

Tirée du cours de « Numerical simulation of transient flow » donné par Sandra Soares Frazao (Soares Frazao, Finite-volume resolution of the Saint-Venant shallow-water equations, s.d.).

OUTILS ET MÉTHODES

c) Condition de « niveau imposé »

Pour un écoulement subcritique, il peut être utile d'imposer un niveau d'eau à l'aval du système car un tel écoulement peut recevoir de l'information venant de l'aval. Cette condition de « niveau imposé » permet d'imposer une profondeur d'eau à l'interface de la dernière cellule, comme illustré sur la Figure 51. Une telle condition est inutile dans le cas d'un écoulement supercritique car il ne peut pas recevoir de l'information de l'aval. Dans ce cas, si une telle condition est tout de même imposée, un ressaut hydraulique se formera. Pour un écoulement subcritique, les conditions à imposer sur les flux à l'interface de la dernière cellule sont les suivantes :

$$\begin{cases} Q_{N+1/2}^* = Q_N^n + (V_N^n - c_N^n)(A(z_{imp}) - A_N^n) \\ \Sigma_{N+1/2}^* = \Sigma_N^n + (V_N^n - c_N^n)^2(A(z_{imp}) - A_N^n) \end{cases} \quad (41)$$

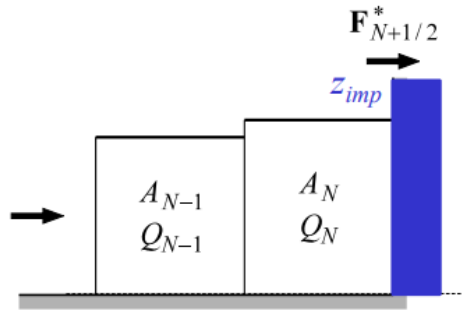


Figure 51 : Schéma de la condition limite de « niveau imposé » à la limite aval.
Tirée du cours de « Numerical simulation of transient flow » donné par Sandra Soares Frazao (Frazao, s.d.).

d) Condition « transmissive »

Dans le cas d'écoulement en régime supercritique, une condition dite « transmissive » peut être imposée. Cette condition permet de simuler le fait que la zone de l'écoulement se poursuit au-delà de la dernière cellule, sans influence depuis l'aval. Ainsi, l'information est transmise uniquement de l'amont vers l'aval. Cette information est considérée comme constante car elle provient d'une région suffisamment éloignée en amont du système. Dans ce cas, les conditions à imposer sur le flux à l'interface de la dernière cellule correspondent à la valeur de la cellule elle-même :

$$\begin{cases} Q_{N+1/2}^* = Q_N^n \\ \Sigma_{N+1/2}^* = \Sigma_N^n \end{cases} \quad (42)$$

Il est essentiel de noter que l'imposition d'une telle condition sur un écoulement en régime subcritique conduira à imposer le passage par la profondeur critique sur la dernière cellule, car ce type d'écoulement nécessite une condition en aval. Par conséquent, les valeurs des variables hydrauliques calculées sur les cellules proches de la dernière cellule seront affectées par cette profondeur d'eau imposée. En conséquence, ces valeurs seront erronées.

OUTILS ET MÉTHODES

Conditions sur le pas de temps

Dans le contexte des volumes finis, il existe une condition connue sous le nom de condition CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) qui impose une contrainte sur le choix du pas de temps. En effet, pour éviter des instabilités, il faut éviter de calculer les variables sur une cellule en utilisant non pas la cellule voisine mais la voisine de la cellule voisine. Pour éviter cela et maintenir la stabilité, il est nécessaire d'adopter des pas de temps relativement petits. La condition à respecter pour chaque cellule du maillage et à chaque instant est formulée comme suit :

$$N_{CFL} = \frac{|V| + c}{\Delta x / \Delta t} \leq 1 \quad (43)$$

L'idée est d'ajuster le pas de temps Δt à chaque itération de calcul de manière à l'optimiser tout en respectant la condition CFL. Cependant, il est impossible de maintenir une condition exacte égale à 1 en permanence, étant donné que les vitesses d'écoulement et de propagation de l'information varient constamment. Par conséquent, il est recommandé d'introduire une marge de sécurité, par exemple en imposant la condition à 0,95. Ainsi, à chaque étape, le pas de temps peut être recalculé en prenant en compte la condition CFL à 0,95 pour chaque cellule du maillage.

Equations des volumes finis en 2D

Jusqu'à présent, nous venons de développer le schéma numérique en volumes finis en une seule dimension à partir des équations de Saint-Venant en 1D. Cependant, pour l'étude des inondations, la décision a été prise de travailler en deux dimensions en utilisant les équations de Saint-Venant en 2D, car cela est plus adapté à la nature du problème. Pour réaliser cela, il est nécessaire d'étendre le schéma numérique des volumes finis en deux dimensions à partir du cas unidimensionnel. Pour ce faire, nous devons repartir des équations de Saint-Venant en 2D sous forme conservative, qui sont les suivantes :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (44)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{pmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} q_x \\ \frac{q_x^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \\ \frac{q_x q_y}{h} \end{pmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} q_y \\ \frac{q_x q_y}{h} \\ \frac{q_y^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \end{pmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{0,x} - S_{f,x}) \\ gh(S_{0,y} - S_{f,y}) \end{pmatrix}$$

En intégrant les équations précédentes sur le volume fini défini à la Figure 52, les équations des volumes finis peuvent être obtenues :

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} \right) d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega \quad (45)$$

Le volume de contrôle sur lequel nous intégrons, représenté à la Figure 52, reste le même que celui que nous avons utilisé précédemment. Cependant, il convient de noter que dans ce cas, la largeur du volume de contrôle n'est plus unitaire, et nous devons également tenir compte d'un terme de flux transversal additionnel $\mathbf{G}$.

OUTILS ET MÉTHODES

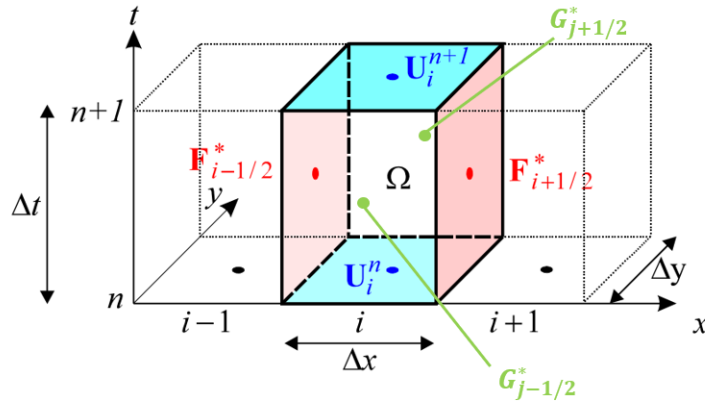


Figure 52 : Représentation du volume espace-temps sur lequel les équations de Saint-venant sont intégrées.
Tirée du cours de « Numerical simulation of transient flow » donné par Sandra Soares Frazao (Frazao, s.d.).

Les hypothèses restent les mêmes que pour le cas 1D, c'est-à-dire que les variables hydrauliques sont considérées comme constantes sur une cellule à chaque pas de temps. A nouveau, le théorème de la divergence permet de transformer l'intégrale de volume en une intégrale de surface. Les équations des volumes finis obtenues sont les suivantes, écrites sous forme vectorielle :

$$U_{i,j}^{n+1} = U_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^* - F_{i-1/2}^*) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (G_{j+1/2}^* - G_{j-1/2}^*) + S_{i,j}^* \Delta t \quad (46)$$

Maillage non structuré

Les équations des volumes finis précédemment exposées ont été dérivées pour un maillage structuré. Cependant, il peut être avantageux d'utiliser des mailles non structurées, telles que des triangles, pour mieux s'adapter à des maillages irréguliers. Pour étendre les équations des volumes finis à un maillage non structuré, il est nécessaire d'intégrer facette par facette sur chaque triangle. Pour simplifier ce processus, comme visualisé sur la Figure 53, un repère local $(x_n; y_t)$ est associé à chaque interface, permettant ainsi de traiter le problème localement en une dimension au niveau de l'interface.

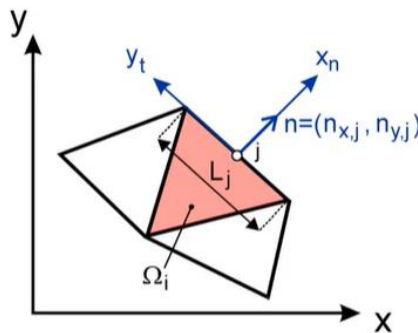


Figure 53 : Schéma des volumes finis avec des mailles triangulaires dotées d'un repère local associé à chaque interface.
Tirée du cours de « Numerical simulation of transient flow » donné par Sandra Soares Frazao (Frazao, s.d.).

OUTILS ET MÉTHODES

Pour ce faire il faut appliquer une matrice de rotation à nos variables hydrauliques pour passer dans le repère local de l'interface :

$$\bar{\mathbf{U}} = \mathbf{T}\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & n_x & n_y \\ 0 & -n_y & n_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h \\ u_n h \\ v_n h \end{pmatrix} \quad (47)$$

où $\bar{\mathbf{U}}$ est le vecteur des variables exprimées dans le repère local de l'interface.

Dans ce repère, le système d'équations à résoudre devient un système pseudo 1D, comme écrit ci-dessous :

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{U}}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\bar{\mathbf{U}})}{\partial x} = \bar{\mathbf{S}} \quad (48)$$

En intégrant ces équations sur le triangle, le système d'équations des volumes finis est obtenu :

$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^n - \frac{\Delta t}{\Omega_i} \sum_{j=1}^3 \mathbf{T}_j^{-1} \mathbf{F}_j^*(\bar{\mathbf{U}}_j) L_j + \mathbf{S}_i \Delta t \quad (49)$$

Avec :

- Ω_i : l'aire de la maille triangulaire i .
- L_j : la longueur de l'interface j .

A nouveau, la complexité réside dans le calcul des termes de flux $\mathbf{F}_j^*$. Pour ce faire, il est possible de généraliser la méthode HLL en 2D comme cela été fait dans le calcul de « Hydroflow ». En procédant de la même manière que précédemment, mais sur le système pseudo 1D, la matrice jacobienne de l'écoulement obtenue est la suivante :

$$[\mathbf{A}] = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -u^2 + c^2 & 2u & 0 \\ -uv & v & u \end{pmatrix} \quad (50)$$

En travaillant en deux dimensions, une nouvelle caractéristique se rajoute. Les caractéristiques des équations sont les valeurs propres de la matrice $[\mathbf{A}]$ dont voici les expressions :

$$\lambda_1 = u - c \qquad \lambda_2 = u \qquad \lambda_3 = u + c$$

La nouvelle caractéristique, λ_2 , a une valeur intermédiaire entre les deux autres. Dès lors, elle n'entre pas en compte dans le calcul des moyennes puisque ce sont les valeurs extrêmes qui sont choisies, comme exprimé dans l'équation des flux suivante :

$$\mathbf{F}^* = \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_1} \mathbf{F}_L - \frac{\lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_1} \mathbf{F}_R + \frac{\lambda_1 \lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_1} (\mathbf{U}_R - \mathbf{U}_L) \quad (51)$$

OUTILS ET MÉTHODES

Cependant, cette caractéristique intermédiaire, appelée « discontinuité de contact », transporte de l'information à une vitesse u dont il faut tenir compte. C'est pourquoi il faut adapter l'expression pour tenir compte de cette nouvelle caractéristique afin d'obtenir des résultats de simulation plus précis et moins diffusifs. Pour prendre en compte cette caractéristique intermédiaire, qui représente le transport de la vitesse transversale v à une vitesse u , une astuce est utilisée. En effet, la direction de cette caractéristique dictera si ce sont plutôt les valeurs de la cellule de gauche ou de droite qui seront utilisées pour le calcul du flux transversal. Par conséquent, le flux de masse, F_1^* , et le flux de quantité de mouvement normal à l'interface, F_2^* , sont calculés comme avant avec la méthode HLL classique de la manière suivante :

$$F_{1,2}^* = \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_1} F_L - \frac{\lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_1} F_R + \frac{\lambda_1 \lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_1} (U_R - U_L) \quad (52)$$

Le flux de quantité de mouvement transversal, F_3^* , est calculé à partir du flux de masse et de la vitesse transversale, soit dans la cellule de gauche, soit dans la cellule de droite, en fonction de la direction de la caractéristique intermédiaire, de la manière suivante :

$$\begin{cases} F_3^* = v_L F_1^* & \text{si } u > 0 \\ F_3^* = v_R F_1^* & \text{si } u < 0 \end{cases} \quad (53)$$

En procédant de cette manière, la discontinuité de contact est prise en compte et les résultats sont plus précis.

En somme, le code de calcul « Hydroflow » résout les équations bidimensionnelles de Saint-Venant sur un maillage non structuré composé de cellules triangulaires. Pour le calcul des flux moyens aux interfaces des cellules, il utilise la méthode HLL.

3.4.3 Zone modélisée

Pour utiliser le modèle hydraulique, il est nécessaire de définir une zone dans laquelle le maillage en volumes finis sera construit. Les résultats relatifs aux hauteurs d'eau et aux vitesses seront alors obtenus pour chaque cellule de ce maillage. Cependant, des compromis doivent être faits. Opter pour un maillage de grande envergure permet d'obtenir des résultats couvrant une vaste zone, mais cela entraîne également des temps de calcul plus longs.

Étant donné que le modèle sera calibré en fonction des données du SPW (Service Public de Wallonie) exposées dans la section 3.1.5, il est impératif que le contour du maillage englobe la zone affectée par les inondations. Une certaine marge de sécurité est maintenue entre le contour du maillage et la zone inondée, comme visualisé sur la Figure 54.

OUTILS ET MÉTHODES

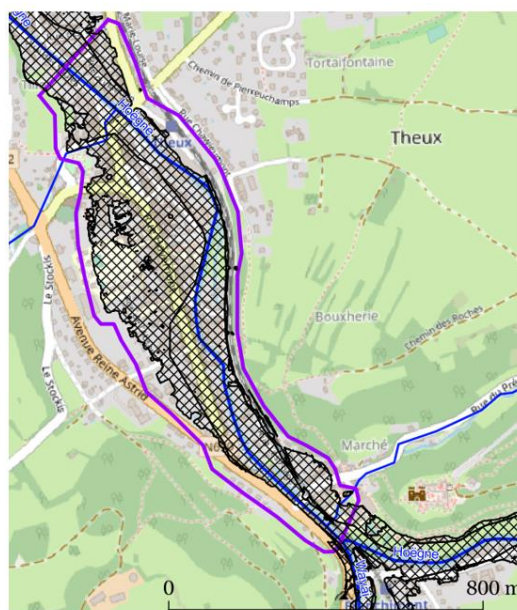


Figure 54 : Le contour du maillage (en mauve) englobe la zone inondée (en quadrillage) avec une marge de sécurité.

Un autre point important à considérer est que l'entrée du maillage est le point où le débit est imposé. Par conséquent, la limite amont du maillage doit être positionnée aux exutoires de nos bassins versants, comme discuté en détail précédemment lors du choix de l'emplacement de cet endroit à la section 3.2. Autrement dit, la limite amont correspond à la confluence entre la Hoëgne et le Wayai, étant donné que c'est à cet endroit que l'hydrogramme total a été élaboré. De plus, il est essentiel que l'entrée dans le maillage soit suffisamment restreinte pour éviter les phénomènes de diffusion, assurant ainsi un bon acheminement de l'eau dans le lit du cours d'eau. La limite amont du maillage est illustrée en vert sur la Figure 55.

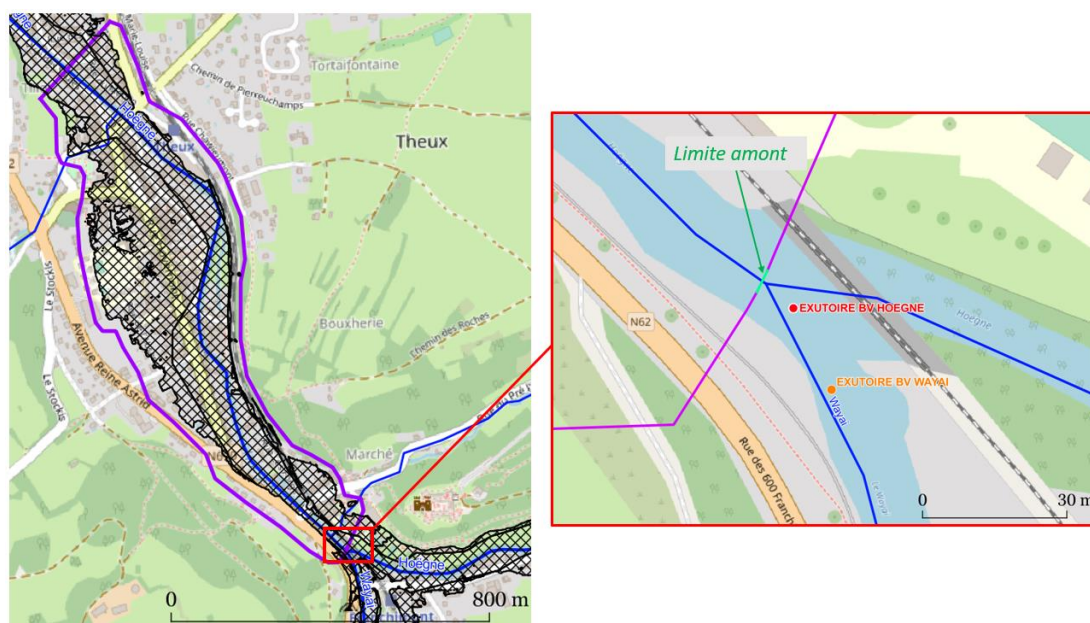


Figure 55 : Contour du maillage et zoom sur la limite amont (en vert) située à la confluence.

OUTILS ET MÉTHODES

En ce qui concerne la limite aval du maillage, la stratégie adoptée vise à englober le centre de Theux, en particulier les zones de la place Pascale Taskin et de la place du Vinave, étant donné qu'elles sont les plus touchées par les inondations. Toutefois, il était nécessaire de définir cette limite de manière à éviter une extension excessive vers l'aval, car cela entraîne des temps de calcul trop importants. Après avoir effectué plusieurs essais, la limite aval du maillage a été positionnée à environ 200 m en aval du pont situé entre la place du Vinave et la place Pascale Taskin, comme illustré sur la Figure 56. Cette décision a été prise pour garantir un équilibre entre une zone modélisée importante et un temps de calcul raisonnable. Par ailleurs, comme présenté sur la Figure 57, ce choix présente également l'avantage que la Hoëgne est étroite et rectiligne à cet endroit, avec une section simple. Cela permet d'utiliser les expressions des axes hydrauliques pour décrire l'écoulement en supposant qu'il soit uniforme.

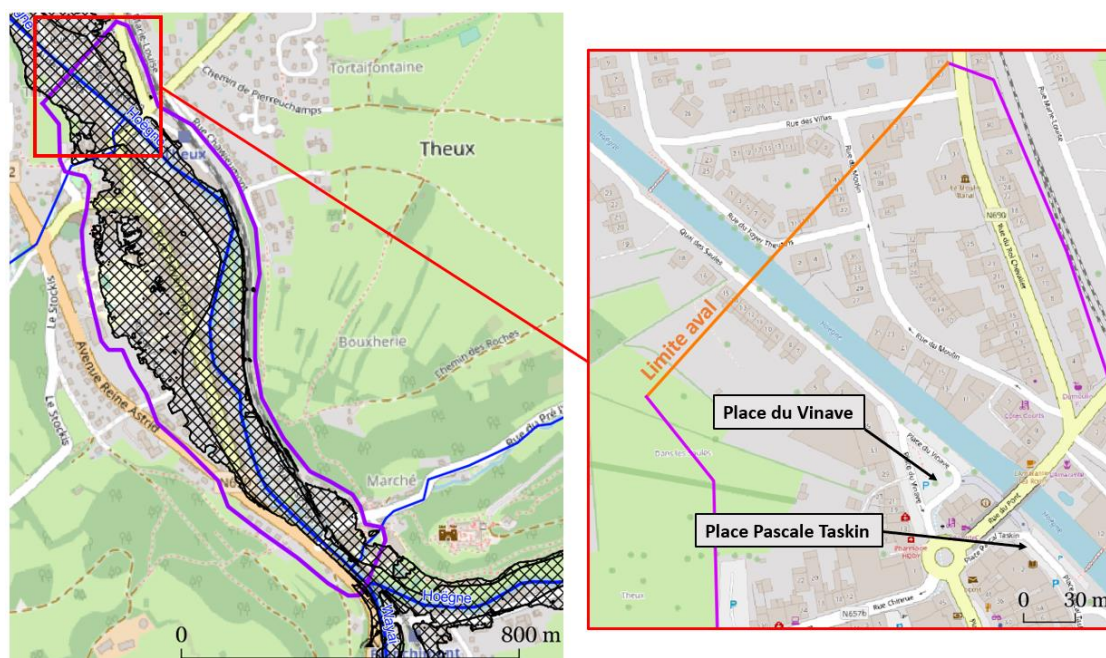


Figure 56 : Contour du maillage et zoom sur la limite aval (en orange) située à 200 m du pont.

OUTILS ET MÉTHODES



Figure 57 : Vue du côté aval de la Hoëgne très rectiligne depuis le pont de séparant les deux places.
Photo prise lors de la visite sur place le 19 novembre 2022.

Ensuite, une fois le contour du maillage défini, il reste à déterminer la taille des cellules du maillage en volumes finis. Une discussion concernant la discrétisation du maillage est abordée dans la section suivante.

3.4.4 Discrétisation du maillage

Dans cette section, nous allons analyser le temps de calcul et la précision des résultats en fonction de la taille des mailles sélectionnées.

Pour ce faire, nous utilisons la zone modélisée décrite précédemment pour lancer plusieurs simulations en variant la taille des mailles pour un coefficient de Manning de $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$. Les simulations sont effectuées en injectant un débit constant de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ dans le maillage pendant une heure, en utilisant des tailles de mailles allant de 2 à 10 m de côté. Les temps de calcul et les nombres de mailles pour chaque simulation sont répertoriés dans le Tableau 1 et sont également présentés graphiquement sur la Figure 58.

Taille des mailles (m)	Nombre de mailles ($\times 10^3$)	Temps de calcul pour 1h (min)
2	226.836	45
2.5	145.297	29
3	100.968	20
4	56.891	12
5	36.482	8
8	14.343	3
10	9.224	2

Tableau 1 : Nombre de mailles (en milliers) et temps de calcul en minutes pour 1 heure de simulation d'un débit constant de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ avec différentes discrétisations du maillage.

OUTILS ET MÉTHODES

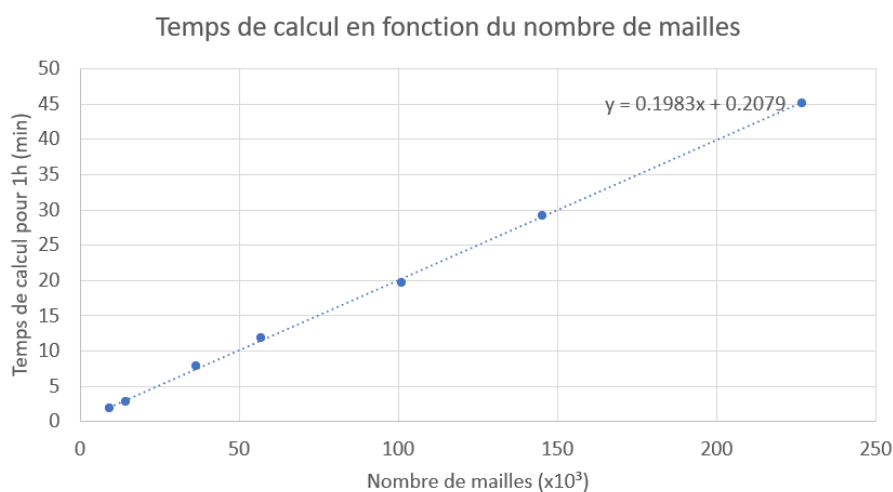


Figure 58 : Graphique du temps de calcul en fonction du nombre de mailles pour une heure de simulation avec un débit permanent de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ et courbe de tendance linéaire.

La Figure 59 présente les résultats des hauteurs et des étendues d'eau obtenus après une heure de simulation. Celle réalisée avec des mailles de 2 m est considérée comme la référence (représentée en bleu), celles avec des mailles dont la taille varie entre 3 et 5 m sont jugées suffisamment précises (indiquées en vert), tandis que les mailles de plus de 5 m sont considérées comme imprécises (affichées en rouge).

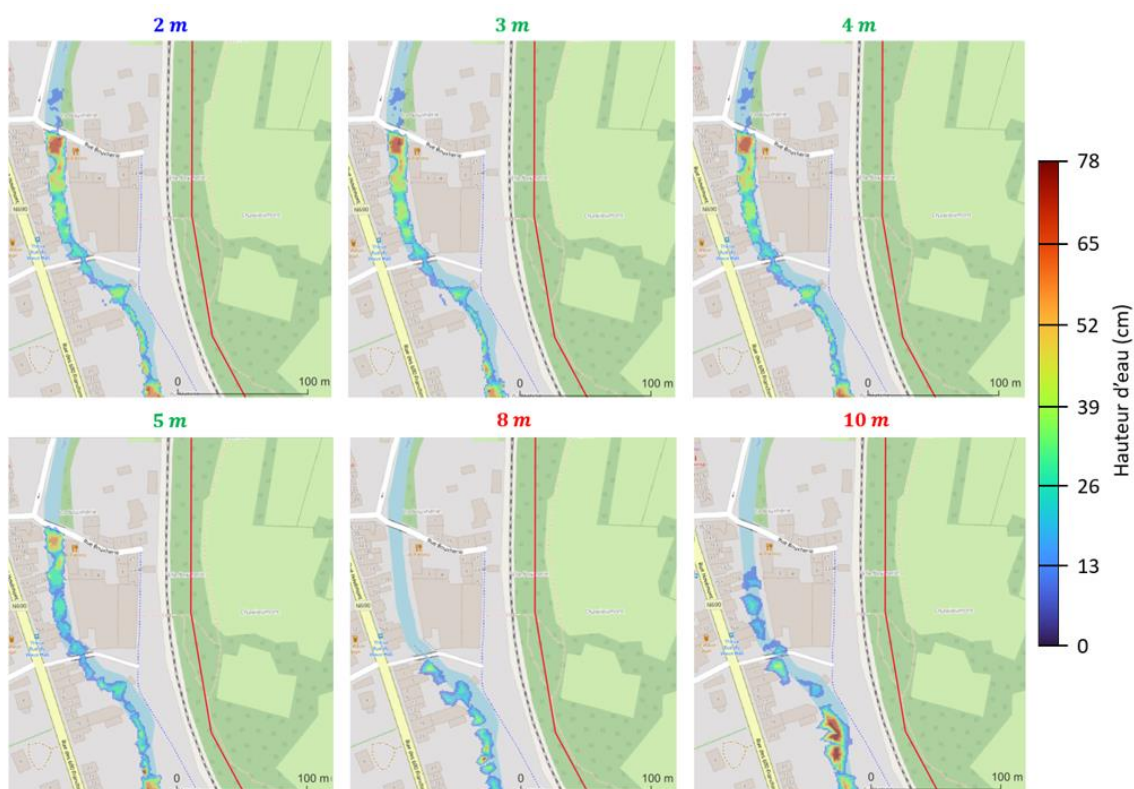


Figure 59 : Zoom sur l'étendue et les hauteurs d'eau après une heure de simulation pour un débit de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ avec différentes tailles de maille (indiquées au-dessus de chaque résultat).

OUTILS ET MÉTHODES

Il est essentiel de noter qu'une véritable étude de convergence nécessiterait l'inclusion de toutes les cellules du maillage. Toutefois, l'approche adoptée ici permet de donner une idée du gain de temps en fonction de la taille du maillage. Par conséquent, il est impossible d'extrapoler le temps requis pour une simulation plus longue, impliquant un plus grand nombre de cellules, à partir du temps de calcul obtenu pour une heure de simulation.

Dans ce contexte, pour déterminer la discrétisation du maillage, une taille de 5 m est retenue. Cette taille offre un équilibre entre précision et temps de calcul, étant suffisamment précise tout en réduisant le temps nécessaire par rapport à des tailles de mailles plus petites. Ainsi, la taille de maille de 5 m est préférée car elle offre un bon compromis entre précision et efficacité.

Un élément clé dans le choix de la discrétisation est de s'assurer que la différence de hauteur entre deux mailles successives ne soit pas excessive. Dans la méthode des volumes finis, toutes les variables à l'intérieur d'une maille sont considérées comme constantes. En conséquence, la surface de l'eau à l'intérieur des mailles est modélisée comme étant horizontale, ce qui peut être comparé à une série de marches d'escalier. La hauteur des marches dépend de la pente du terrain et de la discrétisation du maillage. Si la différence de hauteur dépasse la hauteur d'eau à cet endroit, cela peut induire un effet où l'eau semble se déplacer de marche en marche par petits paquets d'eau, ce qui ne correspond pas à la réalité. Par conséquent, il est important que la différence de hauteur soit inférieure à la hauteur d'eau pour obtenir une représentation plus réaliste du profil d'écoulement. Cet enjeu est illustré sur la Figure 60.

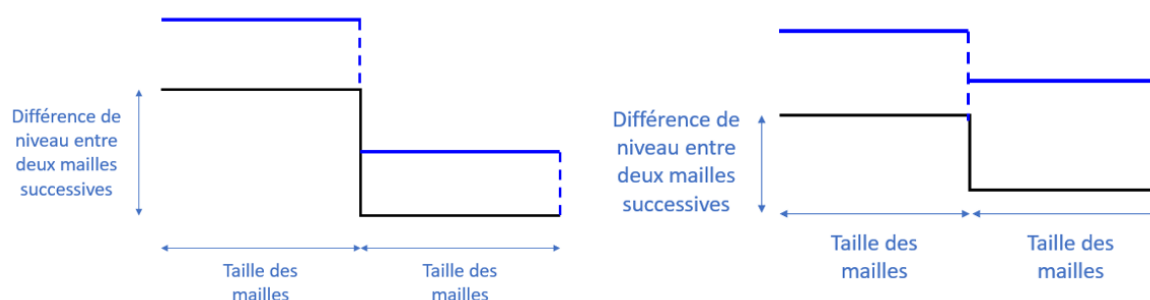


Figure 60 : Impression d'un paquet d'eau qui se déplace de marche en marche pour des mailles trop grandes (à gauche) et profil de l'eau plus réaliste pour des mailles plus petites (à droite).

La pente du lit de la Hoëgne dans la zone modélisée a été obtenue en réalisant un profil en long, et elle est en moyenne de 0,7 %. Lorsque l'on considère des mailles de 5 m de côté, cela implique une différence de hauteur en moyenne d'environ 3,5 cm entre les mailles adjacentes. Cette différence de hauteur relativement faible permet de représenter de manière adéquate les zones où la profondeur de l'eau est supérieure à 3,5 cm, ce qui répond largement aux exigences de précision pour les études d'inondation. Toutefois, il est important de noter que certaines sections du lit de la Hoëgne peuvent présenter une pente locale plus abrupte, entraînant une différence de hauteur plus importante entre les mailles. Cependant, ces variations locales de pente n'entraîneront que de petites erreurs numériques ponctuelles, qui sont tolérables dans le contexte d'une modélisation d'inondations.

OUTILS ET MÉTHODES

Pour toutes ces raisons, le choix judicieux offrant un bon compromis entre temps de calcul et précision des résultats semble être de travailler avec un maillage composé de cellules triangulaires de 5 m de côté. Ainsi, le maillage final est constitué de 36 482 cellules triangulaires.

3.4.5 Conditions aux limites

Maintenant que le maillage est construit, avant de lancer le calcul numérique des volumes finis avec "Hydroflow", il est essentiel de déterminer les conditions aux limites du maillage. Ces choix sont cruciaux, car ils influencent la fiabilité des résultats en rendant les conditions aussi proches de la réalité que possible.

Il est évident qu'il faut introduire de la masse, c'est-à-dire de l'eau, dans le système pour permettre la résolution des équations de Saint-Venant sur chaque volume fini constituant le maillage. Par conséquent, un débit est imposé à l'entrée du maillage. Ce débit imposé correspond en fait à l'hydrogramme (représenté en bleu sur la Figure 44) obtenu à la confluence à l'aide du modèle hydrologique. Il est important de noter que le débit imposé varie à chaque pas de temps de la simulation. Cette condition imposée est illustrée sur la Figure 61.

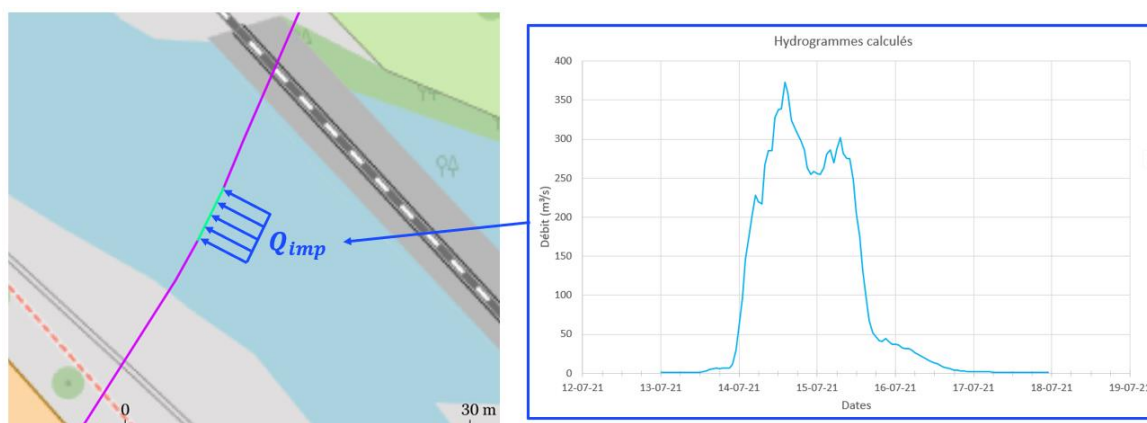


Figure 61 : Imposition de l'hydrogramme comme condition limite amont du modèle.

En ce qui concerne la frontière aval du maillage, deux options se présentent. Si l'écoulement est en régime supercritique, il convient d'imposer une condition dite « transmissive », permettant à l'eau de s'écouler à travers la dernière cellule. Si l'écoulement est en régime subcritique, il faudrait alors imposer une condition de « niveau imposé » pour définir une profondeur d'eau à l'aval de l'écoulement. Cependant, déterminer l'état de l'écoulement ainsi que la profondeur d'eau appropriée à imposer à l'aval peut être complexe.

Pour simplifier, il a été décidé de supposer que l'écoulement est en régime supercritique et d'imposer une condition « transmissive » à l'aval. Dans le cas où l'écoulement serait en réalité en régime subcritique dans les dernières cellules, le logiciel « Hydroflow » imposera la profondeur critique sur la dernière cellule, ce qui influencera l'écoulement en amont, mais seulement sur une certaine distance. Il existera donc une zone où les résultats ne sont pas entièrement fiables. La portée de l'influence de la condition aval sur l'écoulement est explorée plus en détail à la section 3.4.6.

OUTILS ET MÉTHODES

En choisissant d'imposer une condition de « niveau imposé » dans le cas d'un écoulement supercritique, un retour d'informations vers l'amont intervient, modifiant l'écoulement en amont qui, à son tour, influe sur l'écoulement en aval. Cette situation peut entraîner une sorte de « jeu de ping-pong », et par conséquent une accumulation d'eau fictive près de la limite aval, ce qui n'est pas réaliste. Il est alors plus judicieux de travailler avec une condition « transmissive », où l'eau s'écoule simplement à travers l'interface de la limite aval, comme illustré sur la Figure 62.

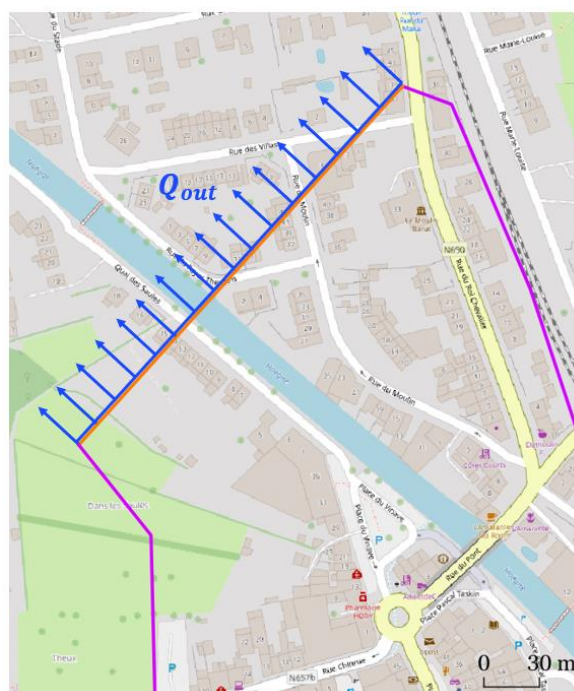


Figure 62 : Condition « transmissive » imposée à la limite aval du modèle.

En ce qui concerne les autres frontières, la condition limite imposée est une condition de « mur », empêchant l'eau de passer. En principe, étant donné la construction du maillage englobant la zone inondée réelle avec une marge de sécurité, l'eau ne devrait pas atteindre ces frontières. Toutefois, dans l'éventualité où l'eau atteindrait ces limites, une recalibration des paramètres du modèle serait nécessaire.

3.4.6 Zone de fiabilité des résultats en aval

Comme mentionné précédemment, en imposant une condition "transmissive" en aval de l'écoulement, si l'écoulement est subcritique, il y aura une zone de transition à partir de la dernière cellule où la profondeur critique est imposée jusqu'à un peu plus en amont où l'écoulement ne sera pas représentatif de la réalité. L'objectif de cette section est d'estimer la distance à laquelle cette zone de transition aurait lieu.

Pour ce faire, nous allons utiliser le fait que les dernières cellules du maillage se trouvent le long d'un tronçon rectiligne de la Hoëgne. Cette caractéristique nous permet de supposer un écoulement unidimensionnel, pour autant que le débit reste confiné dans le lit du cours d'eau.

OUTILS ET MÉTHODES

Nous supposons également que le canal peut être modélisé comme un canal prismatique. Sous ces hypothèses, l'influence du niveau d'eau à l'aval sur l'amont peut être décrite en utilisant un écoulement permanent dans le tronçon du cours d'eau. L'équation qui régit un tel écoulement peut être déduite des équations de Saint-Venant en une dimension, en supposant un écoulement permanent dans un canal prismatique. L'équation obtenue est l'équation des axes hydrauliques, qui donne l'évolution de la profondeur d'eau le long du cours d'eau :

$$\frac{dh}{ds} = \frac{S_0 - S_f}{\sqrt{1 - S_0^2} - \frac{Q^2 l}{g A^3}} = \frac{S_0 - \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{4/3}}}{\sqrt{1 - S_0^2} - \frac{Q^2 l}{g A^3}} \quad (54)$$

où l est la largeur de fond du canal.

La section du canal que nous supposons prismatique, approximée par un trapèze, est illustrée en orange sur la Figure 63. Cette section a été obtenue en approximant la forme par un trapèze à partir d'une coupe réalisée dans le fichier MNT le long du tronçon rectiligne, près de la limite aval du modèle.

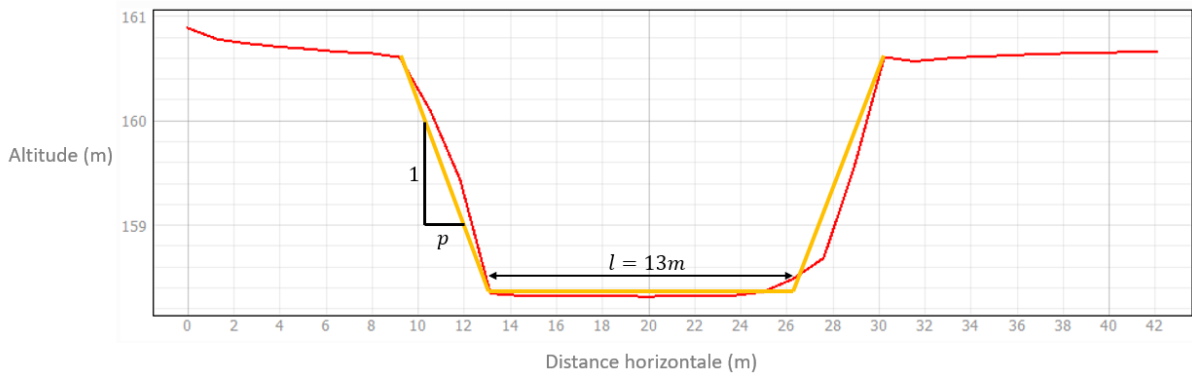


Figure 63 : Section du canal dans le tronçon rectiligne du MNT (en rouge) et canal trapézoïdal approximé (en orange).

Pour cette section trapézoïdale, la profondeur uniforme¹², h_u , peut être calculée par itération en utilisant l'expression suivante :

$$h_u^{5/3} = \frac{Qn}{S_0^{1/2}} \frac{(l + 2h_u\sqrt{1 + p^2})^{2/3}}{(l + ph_u)^{5/3}} \quad (55)$$

où p est l'inverse de la pente des berges de la section trapézoïdale.

La profondeur critique, h_c , peut également être calculée par itération en utilisant l'expression suivante :

$$h_c^3 = \frac{Q^2}{g\sqrt{1 - S_0^2}} \frac{l + 2ph_c}{(l + ph_c)^3} \quad (56)$$

¹² La profondeur uniforme est la profondeur d'équilibre vers laquelle un écoulement uniforme et permanent tend.

OUTILS ET MÉTHODES

La pente de fond, S_0 , est obtenue en traçant le profil en long de la Hoëgne sur le tronçon rectiligne et en prenant la pente de la droite qui approxime ce profil en long.

En prenant les valeurs suivantes :

- $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit classique dans la Hoëgne)
- $S_0 = 0,006$
- $l = 13 \text{ m}$
- $p = 1,8$
- $n = 0,03 \text{ s/m}^{1/3}$

nous trouvons $h_u = 0,192 \text{ m}$ et $h_c = 0,14 \text{ m}$.

En discrétisant l'équation des axes hydrauliques, le profil de l'écoulement peut être tracé pour différentes hauteurs d'eau à l'aval imposées. Les différents profils obtenus sont illustrés sur la Figure 64.

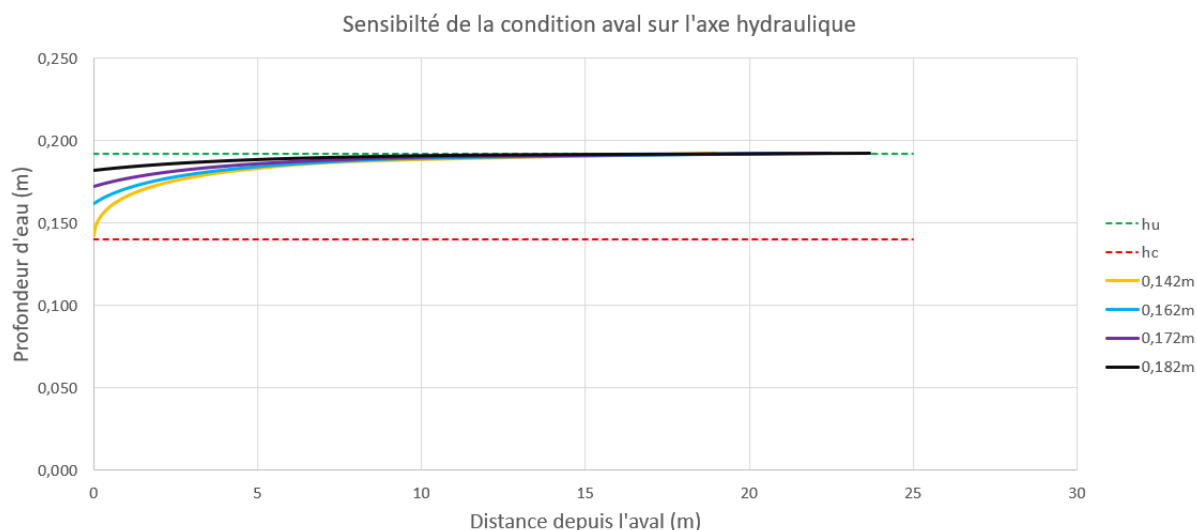


Figure 64 : Influence de la profondeur d'eau imposée à l'aval sur l'évolution du profil.

Le profil de l'écoulement prend au maximum environ 25 m pour revenir à son équilibre un peu plus en amont. Par conséquent, sur cette distance, les résultats obtenus en cas d'écoulement subcritique seront erronés. La zone où les résultats ne sont pas fiables est encadrée en rouge sur la Figure 65. Pour accorder une marge de sécurité, la distance d'influence a été multipliée par deux dans cette estimation, car cette analyse repose sur plusieurs hypothèses. Pour obtenir une estimation plus précise de la distance d'influence, il serait idéal de réaliser une démarche similaire en utilisant le logiciel HEC-RAS. Cette approche permettrait de modéliser plusieurs sections différentes pour mieux analyser la distance d'influence.

OUTILS ET MÉTHODES

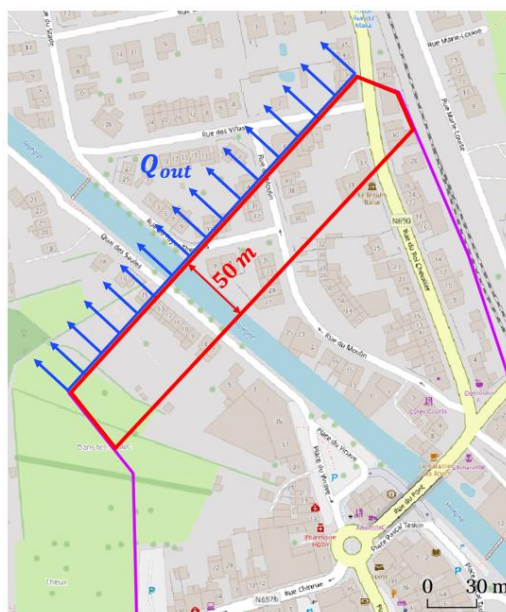


Figure 65 : Zone d'influence de la condition aval sur la profondeur d'eau amont (en rouge).

3.4.7 Application du modèle hydraulique

Maintenant que le modèle hydraulique a été décrit et que la zone modélisée a été construite avec les conditions imposées aux frontières, nous pouvons procéder à l'utilisation du modèle.

Dans cette section, les résultats obtenus à partir de l'utilisation du modèle hydraulique, en imposant à la limite amont l'hydrogramme construit par le modèle hydrologique, sont présentés. Un coefficient de Manning de $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ a été choisi pour cette simulation, car c'est une valeur moyenne classiquement utilisée pour représenter l'écoulement dans un cours d'eau (voir le tableau à l'annexe E).

Pour commencer, une première simulation avec le modèle hydraulique a été réalisée en imposant un débit constant de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ à la limite amont, simulant ainsi l'état du cours d'eau avant l'événement pluvieux. L'équilibre hydraulique dans la Hoëgne est atteint après environ 1 heure et 20 minutes d'écoulement. Cet état est illustré sur la Figure 66.

OUTILS ET MÉTHODES

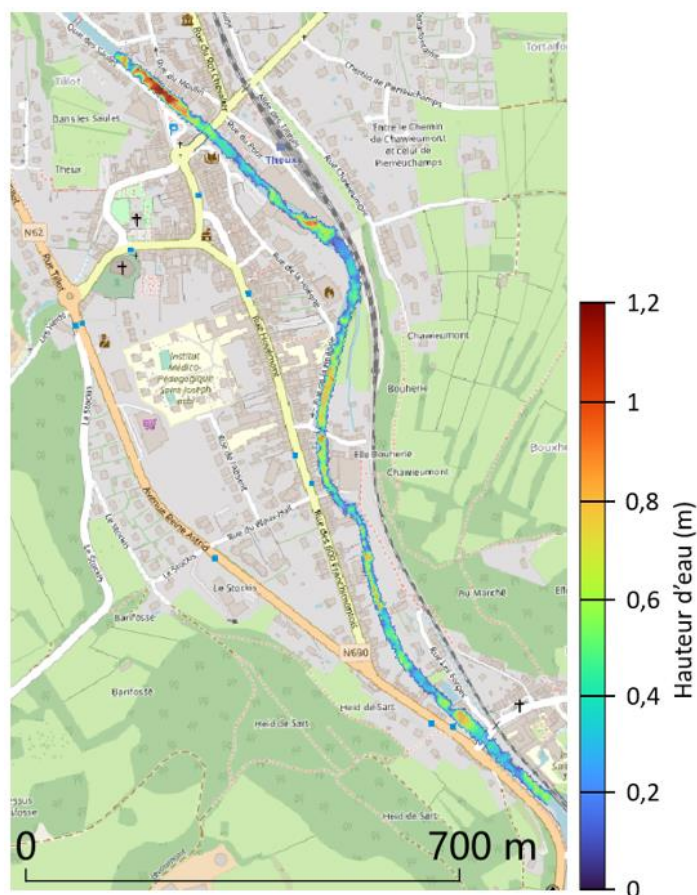


Figure 66 : Hauteurs d'eau calculées avec « Hydroflow » pour un débit permanent de $1\text{m}^3/\text{s}$ après 1h20 de simulation.

Ensuite, en utilisant les hauteurs d'eau calculées avec le débit permanent comme conditions initiales, la simulation sur l'ensemble de l'hydrogramme peut être effectuée. La Figure 67 présente la comparaison entre la zone inondée déterminée par le SPW et l'étendue, ainsi que les hauteurs d'eau maximales calculées par le modèle hydraulique. Il est également important de noter que par soucis de précision, le fichier MNT avec la plus haute résolution a été utilisé, plutôt que celui discrétisé en pixels de 20 m de côté.

CALAGES DES MODÈLES

4 Calages des modèles

Nous avons constaté que les paramètres des modèles pourraient nécessiter une réévaluation. Pour ce faire, nous allons entreprendre un processus de calage des modèles, visant à déterminer les paramètres les plus appropriés de manière à obtenir des résultats qui correspondent au mieux aux données observées, et donc à la réalité. Nous débuterons par calibrer le modèle hydrologique, puis nous discuterons du modèle hydraulique où seul le coefficient de Manning pourrait avoir une influence sur les résultats.

4.1 Calage du modèle hydrologique

Pour calibrer le modèle hydrologique, il est essentiel de se référer à des données disponibles. À cet égard, il existe deux limnimètres opérationnels situés le long de la Hoëgne et du Wayai, l'un à Spixhe et l'autre à Polleur. Idéalement, le processus de calibrage des paramètres devrait s'appuyer sur les mesures de débit effectuées à Spixhe, car cette station est très proche de l'exutoire du bassin versant du Wayai que nous utilisons. Par conséquent, les paramètres obtenus grâce à un calibrage basé sur les mesures à Spixhe seraient hautement représentatifs du bassin versant du Wayai que nous étudions. En procédant de manière similaire, nous pourrions appliquer cette démarche au bassin versant de la Hoëgne en utilisant les mesures du limnimètre à Polleur, même si ce dernier est relativement éloigné de l'exutoire. Ainsi, nous serions en mesure de déterminer des paramètres spécifiques à chaque bassin versant.

Cependant, il est à noter que le limnimètre de Spixhe a cessé de fonctionner dès le début des inondations de juillet 2021. Durant ces inondations, seul le limnimètre de Polleur était opérationnel. Par conséquent, le processus de calibrage du modèle hydrologique reposera sur les données de ce limnimètre pour les deux bassins versants, en supposant que les paramètres ainsi obtenus soient représentatifs pour les deux bassins versants.

Critère d'optimisation

Le processus de calibrage peut être réalisé à l'aide de l'un des modules d'ATHYS, qui offre la possibilité d'optimiser les paramètres en se basant sur un hydrogramme observé. Dans ce contexte, différentes combinaisons de paramètres sont testées afin d'ajuster l'hydrogramme calculé de manière à le rapprocher au maximum de l'hydrogramme observé, en minimisant un critère d'erreur. La fonction critère utilisée est celle de Nash, définie comme suit :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad (57)$$

où Q_i^{sim} est la i -ème valeur de débit simulée, Q_i^{obs} est la i -ème valeur de débit observée et $\bar{Q}^{obs}$ est la moyenne des valeurs observées.

CALAGES DES MODÈLES

La valeur du critère de Nash est située entre $-\infty$ et 1, et plus elle se rapproche de 1, plus les valeurs calculées se rapprochent des valeurs observées. Généralement, un modèle peut être considéré comme satisfaisant lorsque la valeur du critère de Nash dépasse 0,8.

Optimisation à Polleur

Ce critère est ensuite utilisé pour effectuer l'optimisation des paramètres en utilisant l'emplacement du limnimètre de Polleur comme exutoire, dont le bassin versant est représenté sur la Figure 68. Étant donné que la superficie supplémentaire du bassin versant de la Hoëgne est relativement faible par rapport à la superficie totale du bassin versant, l'utilisation des paramètres « optimaux » déterminés pour le bassin versant de Polleur sur le bassin versant de la Hoëgne semble être une hypothèse raisonnable.

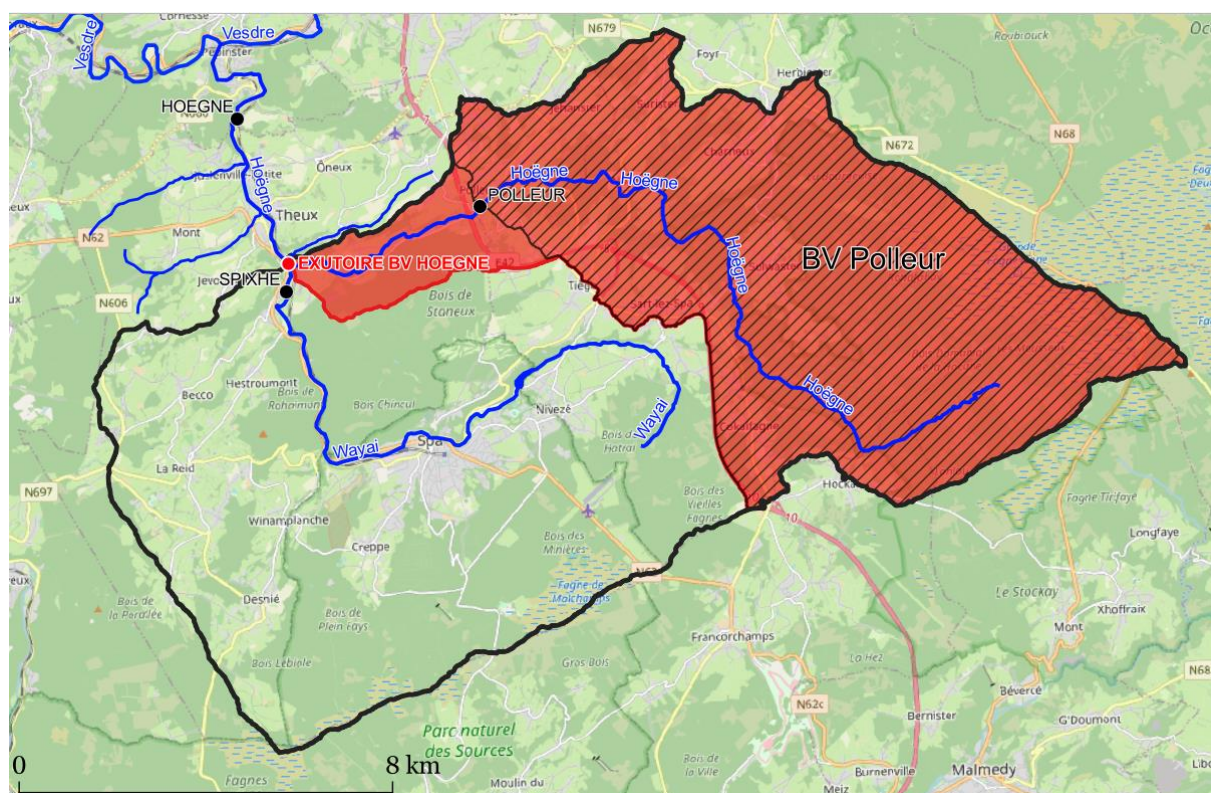


Figure 68 : Bassin versant associé au limnimètre de Polleur (en hachuré), bassin versant de l'exutoire sur la Hoëgne (en rouge) et bassin versant global du Wayai et de la Hoëgne (délimité en noir).

Comme discuté précédemment, nous faisons varier uniquement les paramètres S et V_0 du modèle hydrologique car ce sont les paramètres qui ont le plus d'influence sur les fonctions de production et de transfert. La procédure d'optimisation permet de trouver les deux valeurs optimales pour le bassin versant de Polleur :

$$\begin{cases} S = 17,04 \text{ mm} \\ V_0 = 0,24 \text{ m/s} \end{cases}$$

CALAGES DES MODÈLES

Avec ces valeurs de paramètres, le critère de Nash évalué sur les débits est de 0,92, ce qui signifie que le modèle simule bien l'hydrogramme comparé à l'hydrogramme observé, comme illustré sur la Figure 69. La différence des volumes est de 2,4 % entre l'hydrogramme optimal et l'hydrogramme observé, et la différence des débits est de 2,2 %. Dans l'ensemble, les deux hydrogrammes sont très similaires, à l'exception de la décrue qui arrive plus tard mais qui se produit plus rapidement dans l'hydrogramme simulé. Cependant, ce qui compte principalement, c'est la crue et la valeur du pic, car c'est l'étendue maximale des inondations qui est importante dans ce travail. Sur la Figure 69, nous remarquons également que l'hydrogramme simulé avec les paramètres utilisés par Yves Zech pour Chaudfontaine (en mauve) ne correspond pas au cas de notre bassin versant.

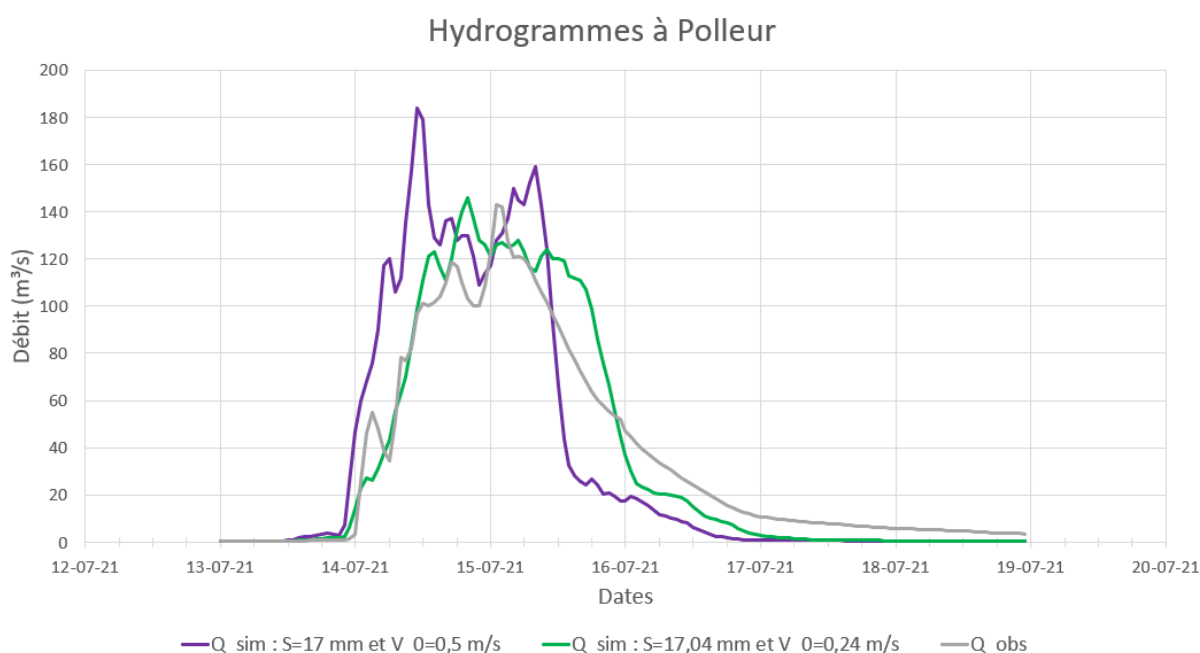


Figure 69 : Hydrogramme observé à Polleur (en gris), hydrogramme issu de l'optimisation (en vert) et hydrogramme avec les paramètres de Chaudfontaine (en mauve).

Hydrogrammes calculés à la confluence avec les paramètres issus de l'optimisation à Polleur

Avec ces nouveaux paramètres optimisés pour le bassin versant du limnimètre de Polleur, les hydrogrammes aux deux exutoires dans la Hoëgne et dans le Wayai peuvent être construits en supposant que ces paramètres sont également représentatifs de ces deux bassins versants, bien que celui du Wayai soit peut-être différent. Sur la Figure 70, les hydrogrammes calculés aux deux exutoires étudiés et l'hydrogramme total à la confluence sont représentés en utilisant les paramètres obtenus suite au processus d'optimisation, ainsi que celui obtenu précédemment avec les paramètres calibrés pour Chaudfontaine (en mauve). Le nouvel hydrogramme obtenu est analysé dans la section suivante.

CALAGES DES MODÈLES

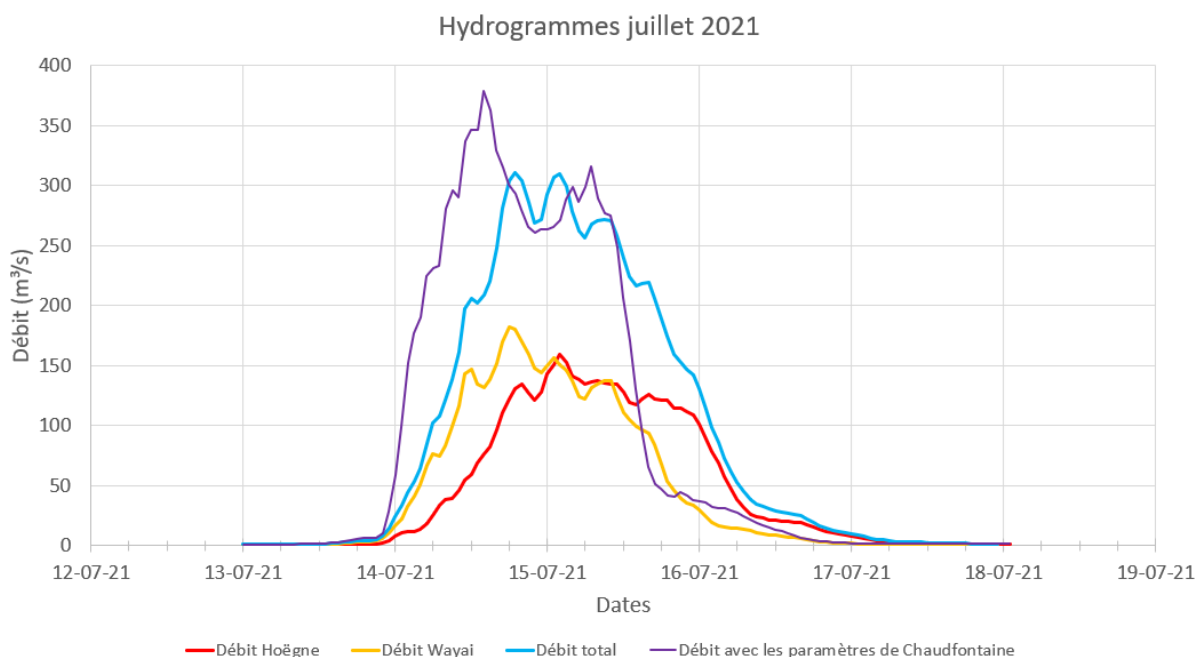


Figure 70 : Hydrogrammes calculés par le modèle hydrologique avec les paramètres issus du calage ($S = 17,04 \text{ mm}$ et $V_0 = 0,24 \text{ m/s}$) et hydrogramme total obtenu avec les paramètres de Chaudfontaine ($S = 17 \text{ mm}$ et $V_0 = 0,5 \text{ m/s}$).

4.1.1 Influence des paramètres et analyse des hydrogrammes

Dans cette section, nous analysons la Figure 70 qui, pour rappel, illustre les deux hydrogrammes obtenus à la confluence, utilisant des ensembles de paramètres différents. L'un des hydrogrammes a été construit à partir de paramètres dérivés d'une étude à Chaudfontaine (représenté en mauve), tandis que l'autre a été obtenu à l'aide d'un processus d'optimisation à Polleur (représenté en bleu).

Influence des paramètres sur l'hydrogramme

Avant de procéder à la comparaison, il est judicieux d'examiner l'impact des paramètres S et V_0 sur l'hydrogramme afin de valider la pertinence des paramètres obtenus par le processus d'optimisation. Le paramètre S influe sur le volume d'eau qui s'infiltre, et par conséquent sur la quantité d'eau qui ruisselle, sans toutefois influencer le moment du pic de crue. D'autre part, le paramètre V_0 influence la pente de l'hydrogramme, et donc le timing du pic de crue, tout en maintenant inchangé le volume total d'eau qui s'écoule (HydroSciences Montpellier, 2020). L'effet de ces paramètres est illustré dans la Figure 71, issue d'une étude menée sur le bassin versant de Anduze (HydroSciences Montpellier, 2020).

CALAGES DES MODÈLES

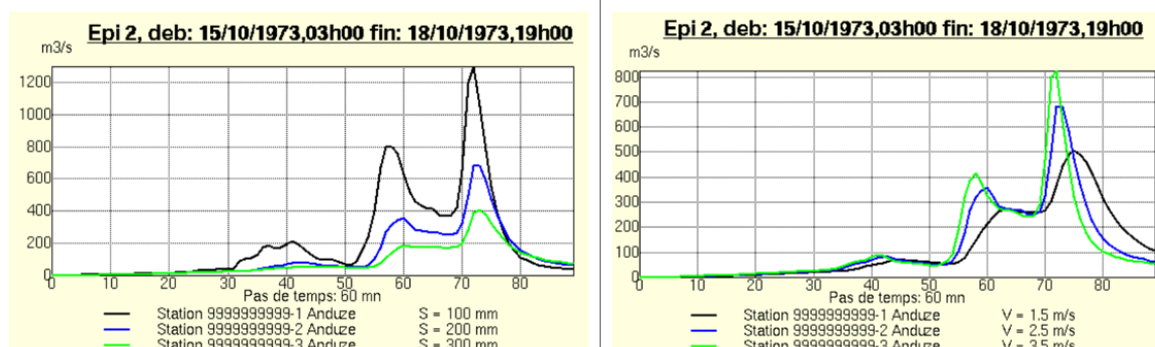


Figure 71 : Influence du paramètre S (à gauche) et du paramètre V_0 (à droite) sur les hydrogrammes calculés.
Tirée du travail sur l'utilisation du logiciel ATHYS sur le bassin de Anduze (HydroSciences Montpellier, 2020).

Analyse des hydrogrammes

Une comparaison des deux hydrogrammes en tenant compte de l'effet des paramètres permet de mettre en évidence des différences significatives entre eux.

Tout d'abord, la phase d'augmentation de la crue dans l'hydrogramme optimisé se déroule plus lentement que dans l'autre hydrogramme. Cette décélération de l'augmentation du débit a été influencée par le paramètre V_0 , qui a été réduit d'environ la moitié dans le cas de l'hydrogramme optimisé. En conséquence, cela se traduit par un événement qui s'étale dans le temps, retardant ainsi le pic de crue.

De plus, le pic de débit atteint dans l'hydrogramme optimisé est inférieur, mesurant $311 \text{ m}^3/\text{s}$ (contre $373 \text{ m}^3/\text{s}$ dans l'autre hydrogramme). Cette réduction du pic est également attribuable à la diminution du paramètre V_0 , qui a permis de prolonger la durée de l'hydrogramme. Étant donné que le paramètre S n'a pas été modifié de manière significative, le volume total d'eau ruisselée reste essentiellement inchangé, mais cette quantité s'écoule sur une période de temps plus longue, ce qui réduit l'intensité du pic de débit.

Face à ces deux hydrogrammes différents, il devient nécessaire de faire un choix entre les deux jeux de paramètres proposés. La section suivante se penche sur la discussion de ce choix en tentant de le valider à partir d'observations pertinentes.

4.1.2 Validation des paramètres

Dans cette section, nous analysons les valeurs des différents paramètres dans les deux scénarios, récapitulés dans le Tableau 2. L'objectif est de choisir et de valider le jeu de paramètres le plus pertinent pour représenter le débit dans la Hoëgne à Theux lors des intempéries de juillet 2021.

CALAGES DES MODÈLES

	Chaudfontaine	Polleur
S (mm)	17	17,04
V_0 (m/s)	0,5	0,24
Pic de débit (m^3/s)	373	311
Moment du pic	14/07/2021 14h	14/07/2021 19h

Tableau 2 : Tableau récapitulatifs des caractéristiques de l'hydrogramme construit à partir des paramètres de Chaudfontaine et de l'hydrogramme construit à partir des paramètres issus du processus d'optimisation à Polleur.

Tableau des valeurs de S et pente moyenne du bassin versant

Dans un premier temps, nous pouvons utiliser le tableau qui donne les valeurs de S en fonction du type de sol et des conditions hydrologiques, disponible à l'annexe C, pour valider la valeur d'environ 17 mm que nous avons obtenue. Pour le paramètre V_0 , une analyse des pentes du bassin versant peut être réalisée afin de vérifier la pertinence de l'ordre de grandeur choisi.

En ce qui concerne le paramètre de production S , sa valeur autour de 17 mm est inférieure à celle recommandée pour un milieu rural, selon le tableau. Cependant, une hypothèse plausible est que le sol était déjà saturé en raison de précipitations antérieures à l'événement de juillet 2021. Cette saturation aurait réduit la capacité du sol à retenir l'eau, expliquant ainsi la faible valeur du paramètre S .

Le paramètre de transfert V_0 reflète notamment l'effet de la pente du bassin versant. Plus la pente est élevée, plus la vitesse de ruissellement est grande, et donc plus le paramètre V_0 est important. Comme mentionné dans l'introduction, le relief près de Theux est très accidenté, ce qui se traduit par des pentes plutôt prononcées sur le bassin versant, comme le montre la Figure 72. La pente moyenne est d'environ 6 degrés, équivalant à une pente d'environ 10 %. Bien que la pente moyenne soit élevée, les valeurs de V_0 dans les deux cas sont relativement faibles. Lors de l'optimisation à Polleur, qui a une pente moyenne similaire, la valeur de V_0 obtenue est également plus basse que celle obtenue à Chaudfontaine, malgré un relief moins accidenté à Chaudfontaine.

Cependant, il est important de noter que la valeur du paramètre V_0 ne dépend pas uniquement de la pente, mais d'autres facteurs exercent également une influence, notamment la couverture végétale du sol. Sur le bassin versant étudié, la couverture végétale est plus boisée que sur le bassin versant de Chaudfontaine. Cette différence pourrait expliquer une vitesse d'écoulement plus faible malgré la pente plus élevée.

CALAGES DES MODÈLES

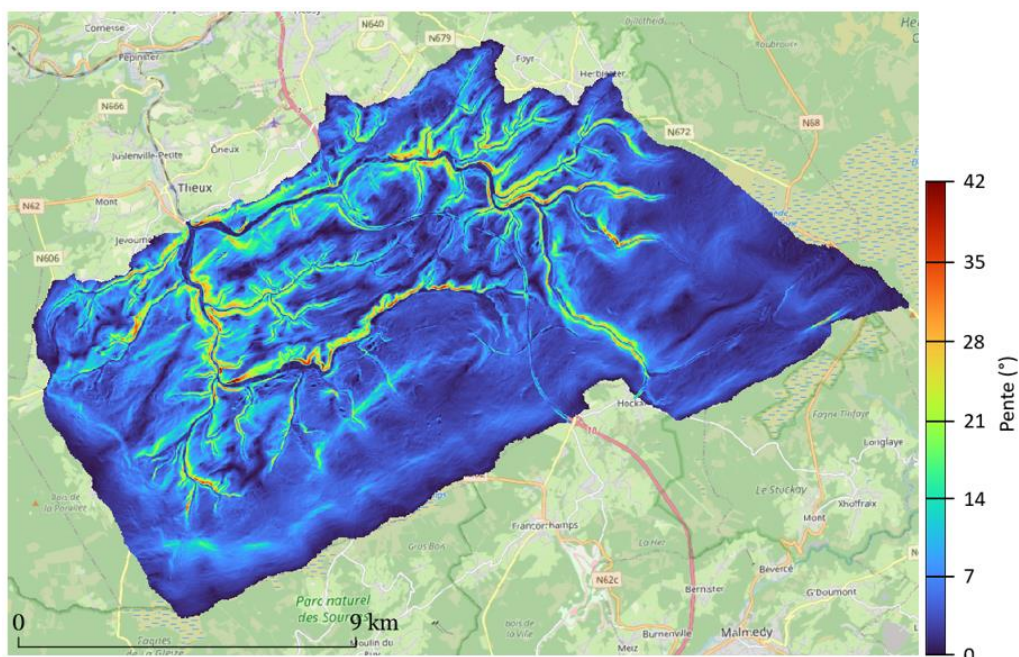


Figure 72 : Cartes des pentes (exprimée en °) sur le bassin versant étudié.

Enfin, il est difficile de conclure en isolant chacun des paramètres, car le calage se fait sur les deux en même temps. Ainsi, il détermine une combinaison qui reproduit bien l'hydrogramme observé, mais il est possible qu'une autre combinaison aurait pu tout aussi bien reproduire l'hydrogramme observé. De plus, le calage a été réalisé uniquement sur deux paramètres parmi les cinq possibles. Les trois autres ont été choisis avec des valeurs classiques, mais il est possible que dans le cas particulier de juillet 2021, ils auraient pu avoir une autre valeur. Ou bien, il se peut que l'événement de juillet 2021 soit tellement exceptionnel et hors normes qu'il devient complexe d'associer un caractère physique à ces paramètres.

Témoignages et résultats d'autres études

La tentative de validation des paramètres basée sur le tableau et les pentes du bassin versant ne permet pas d'obtenir des conclusions définitives. C'est pourquoi les observations, les témoignages de juillet 2021 et les résultats d'autres études sont utilisés ci-dessous pour tenter de valider l'un des deux jeux de paramètres.

Tout d'abord, les résultats du modèle hydraulique soumis à l'hydrogramme construit avec les paramètres de Chaudfontaine montrent un débordement de la Hoëgne le 13 juillet vers 14h30, comme illustré sur la Figure 73. Cependant, plusieurs sources d'informations suggèrent que la Hoëgne aurait débordé bien plus tard, dans la matinée du 14 juillet. En effet, selon « L'Avenir » (L'avenir.net, s.d.) et Jean Leroy, vivant près de la Hoëgne, le débordement se serait produit aux alentours de 8h. Le deuxième hydrogramme construit avec les paramètres issus de l'optimisation à Polleur semble beaucoup plus pertinent, car grâce à un V_0 plus faible, la pente de l'hydrogramme est également plus faible. Par conséquent, le débordement serait retardé et correspondrait davantage à la réalité que l'autre hydrogramme.

CALAGES DES MODÈLES

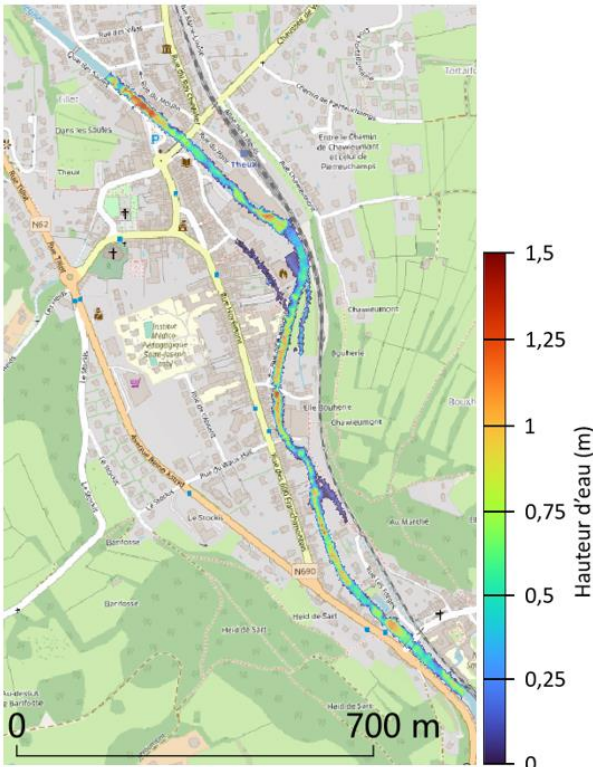


Figure 73 : Hauteurs d'eau calculées avec le modèle hydraulique le 13 juillet à 14h30 pour l'hydrogramme construit avec les paramètres de Chaudfontaine comme condition amont.

Ensuite, le pic obtenu avec le nouvel hydrogramme est plus faible que celui obtenu avec l'autre. Une fois de plus, à ce niveau, l'hydrogramme issu du calage à Polleur semble plus pertinent. En effet, l'hydrogramme avec le pic de débit plus élevé aboutit à une surestimation de l'étendue de la zone inondée par rapport à la réalité. Le nouvel hydrogramme, avec un pic de débit plus faible, se traduira par une zone inondée plus modérée, ce qui correspondra probablement davantage à la réalité.

De plus, le bureau Stucky a expérimenté plusieurs modèles pour tenter de reconstituer le débit dans la Hoëgne, et ils estiment que le débit dans la Hoëgne, à l'emplacement du limnimètre de Theux, situé en aval de la confluence (voir Figure 26), était de $367 \text{ m}^3/\text{s}$ (Stucky, 2021). Le tableau récapitulant les résultats des pics de débit de l'étude de Stucky est disponible à l'annexe G. Le débit du premier hydrogramme atteignant une valeur supérieure à $367 \text{ m}^3/\text{s}$ est moins pertinent étant donné qu'il a été calculé pour un emplacement plus en amont que celui étudié dans le rapport de Stucky. L'hydrogramme construit à partir de l'optimisation à Polleur semble plus pertinent puisque le débit maximal atteint est de $311 \text{ m}^3/\text{s}$.

Mais encore, le rapport de Stucky a également recueilli les données enregistrant la date et l'heure des débits de pointe à plusieurs endroits de la Région wallonne. À Theux, le débit de pointe a été mesuré le 14 juillet à 20 heures, comme illustré sur la carte dans l'annexe G, et il a été estimé qu'un deuxième pic a eu lieu pendant la nuit du 14 au 15 juillet. L'hydrogramme construit avec les paramètres issus du calage à Polleur est le plus pertinent, car le premier pic de débit de cet hydrogramme est atteint le même jour à 19 heures, et le deuxième pic survient également pendant la nuit.

CALAGES DES MODÈLES

D'autres mesures à d'autres moments ont pu être fait à plusieurs endroits comme illustré dans le dernier tableau de l'annexe G (Stucky, 2021). Voici les données utiles mesurées à Theux et à Spixhe :

- Le 14 juillet à 11h00 : $170,7 \text{ m}^3/\text{s}$ à Theux.
- Le 14 juillet à 08h40 : $92,3 \text{ m}^3/\text{s}$ à Spixhe.

Comme représenté sur la Figure 74, les débits à ces instants précis dans les hydrogrammes à la confluence et dans le Wayai, construits avec les paramètres de Polleur, sont en bonne concordance avec les mesures effectuées à Theux et à Spixhe.

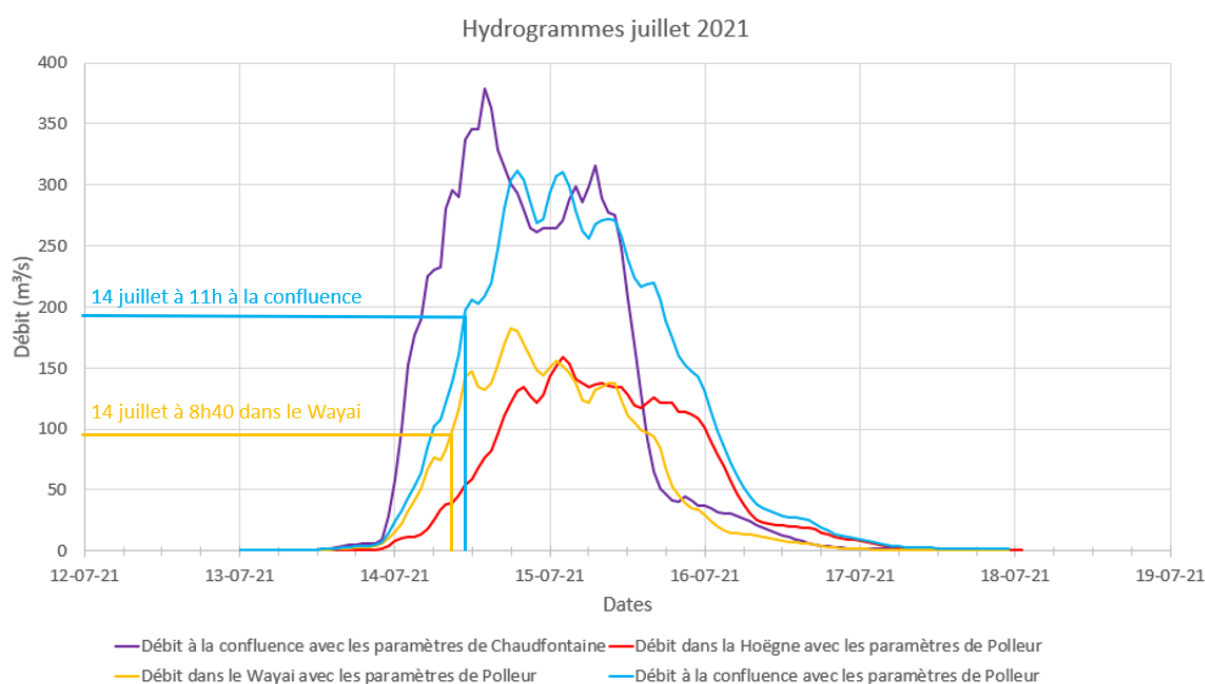


Figure 74 : Hydrogrammes calculés dans le Wayai, dans la Hoëgne et à la confluence avec les paramètres de Chaudfontaine et de Polleur. Les moments clés correspondants aux instants des mesures du rapport de Stucky sont mis en évidence.

En conclusion, même si les valeurs des paramètres S et V_0 du modèle hydrologique ne peuvent pas être validées à partir de valeurs classiques, l'hydrogramme construit avec les paramètres issus du processus d'optimisation à Polleur semble bien représenter la réalité du débit dans la Hoëgne lors des intempéries de juillet 2021. Par conséquent, pour la suite de notre analyse, nous utiliserons ce nouvel hydrogramme construit, qui rappelons-le, est basé sur les paramètres suivants :

$$\begin{cases} S = 17,04 \text{ mm} \\ V_0 = 0,24 \text{ m/s} \end{cases}$$

Afin de vérifier la pertinence de ce nouvel hydrogramme, l'une des méthodes les plus simples consiste à appliquer le modèle hydraulique avec ce nouvel hydrogramme en entrée, puis à comparer l'étendue de la zone inondée avec les données réelles. C'est ce qui a été réalisé dans la section suivante.

CALAGES DES MODÈLES

4.2 Calage du modèle hydraulique

Dans cette section, nous avons appliqué le modèle hydraulique en utilisant le nouvel hydrogramme obtenu à la confluence, comme illustré sur la Figure 70. Les résultats obtenus, notamment l'étendue maximale de la zone inondée ainsi que les hauteurs d'eau correspondantes calculées, sont représentés sur la Figure 75. Comparée à l'autre hydrogramme, l'étendue de la zone inondée a été réduite, ce qui la rend plus cohérente lorsqu'elle est comparée à la zone inondée réelle marquée en quadrillage.

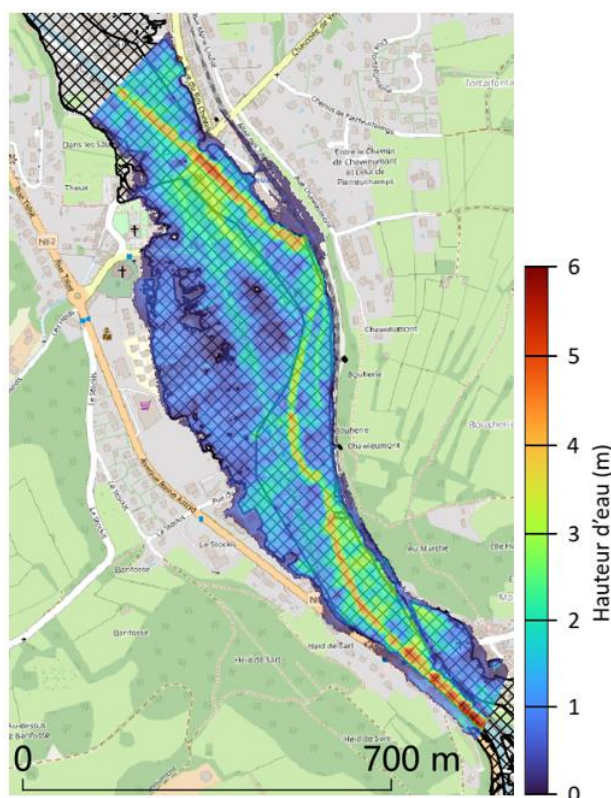


Figure 75 : Zone inondée et enveloppe des hauteurs d'eau calculées avec « Hydroflow » pour l'hydrogramme obtenu avec le modèle hydrologique avec les paramètres suivants : $S = 17,04 \text{ mm}$ et $V_0 = 0,24 \text{ m/s}$ (voir Figure 70).

La pertinence du nouvel hydrogramme peut également être confirmée visuellement, comme illustré sur la Figure 76. Cette figure montre la différence entre les hauteurs d'eau calculées par le modèle et les données du SPW (Service Public de Wallonie). Les zones en bleu indiquent les endroits où la simulation surestime les hauteurs d'eau par rapport aux données du SPW, tandis que les zones en rouge indiquent les endroits où la simulation sous-estime les hauteurs d'eau. Dans le cas de gauche, avec l'hydrogramme construit à partir des paramètres de Chaudfontaine, les hauteurs d'eau calculées sont généralement trop élevées, avec plusieurs endroits présentant une grande différence. Dans le cas de droite, avec l'hydrogramme construit à partir de la procédure de calage, les couleurs sont plus équilibrées, avec une tendance vers le bleu, mais moins prononcée, indiquant que les résultats sont plus proches de la réalité.

CALAGES DES MODÈLES

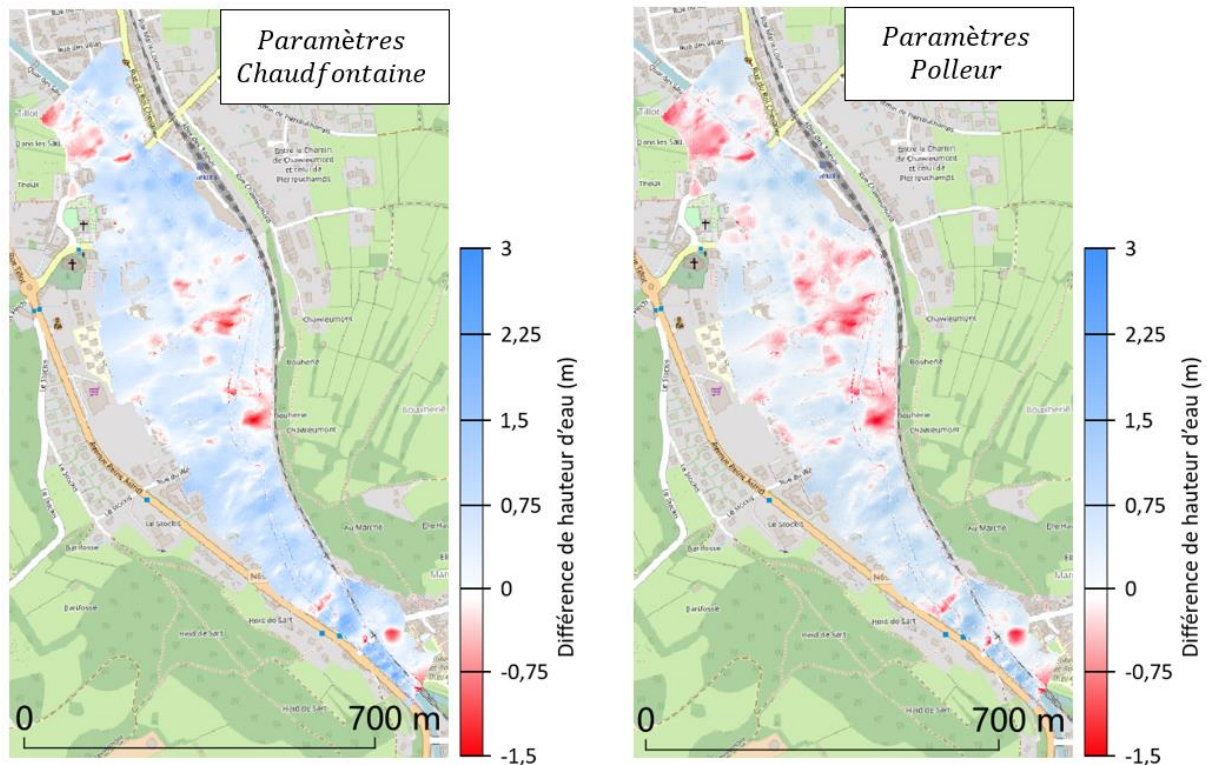


Figure 76 : Différences de hauteur d'eau entre les hauteurs calculées (avec l'hydrogramme non-optimisé à gauche et l'hydrogramme optimisé à droite) et les données du SPW.

Une autre méthode pour visualiser les résultats du modèle hydraulique consiste à créer des coupes à travers le maillage dans la ville de Theux pour afficher les niveaux d'eau calculés à partir des deux hydrogrammes ainsi que les niveaux d'eau fournis par le SPW (Service Public de Wallonie). La Figure 77, la Figure 78, la Figure 79 et la Figure 80 présentent les résultats sous forme de quatre coupes. Dans ces coupes, le niveau du lit de la rivière est représenté en noir et correspond aux données du modèle numérique de terrain (MNT). Le niveau du maillage est indiqué en vert et représente l'altitude de chaque cellule du maillage, avec des valeurs interpolées entre celles-ci. Cependant, il est important de rester critique envers ces résultats, car les niveaux calculés en bordure du maillage sont souvent sujets à des erreurs d'interpolation. De plus, il convient de rappeler que les données de hauteurs fournies par le SPW sont basées sur des mesures ponctuelles parfois assez éloignées les unes des autres, avec des interpolations entre ces valeurs.

Ces quatre coupes permettent de mettre en évidence les mêmes tendances que précédemment. En effet, on peut facilement remarquer que dans l'ensemble, les niveaux d'eau calculés avec l'hydrogramme non optimisé sont supérieurs à ceux calculés avec l'hydrogramme optimisé, qui sont eux-mêmes supérieurs aux niveaux donnés par le SPW.

CALAGES DES MODÈLES

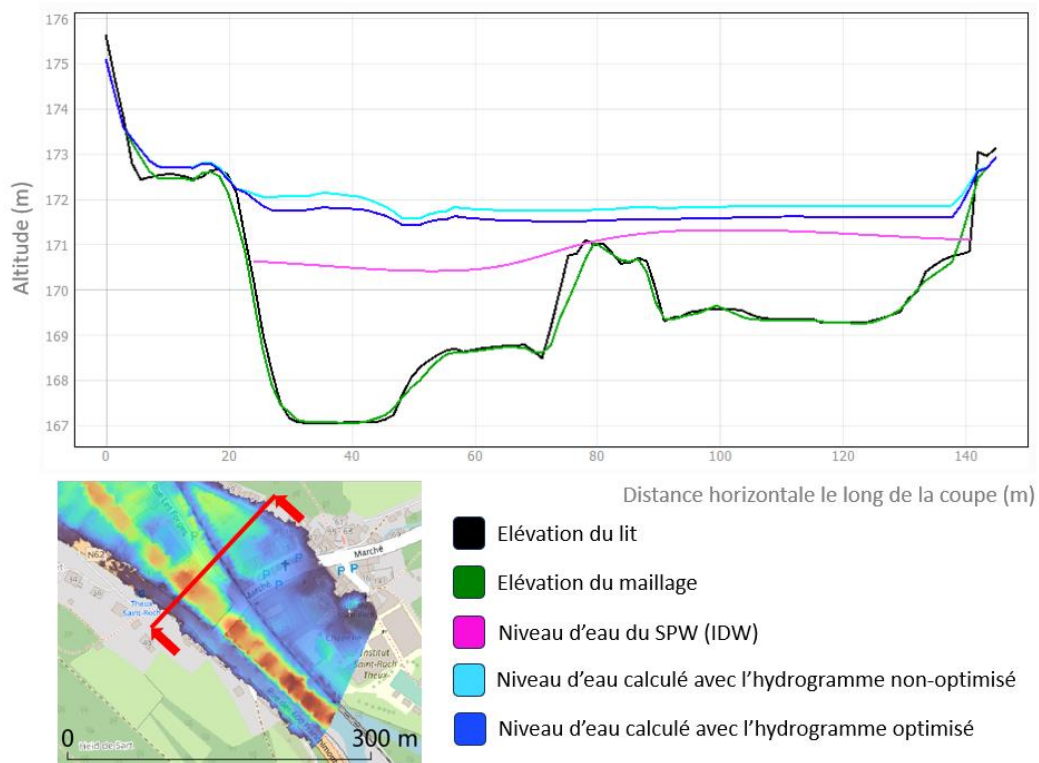


Figure 77 : Coupe dans Theux montrant les résultats du niveau d'eau calculé et le niveau d'eau donné par le SPW.

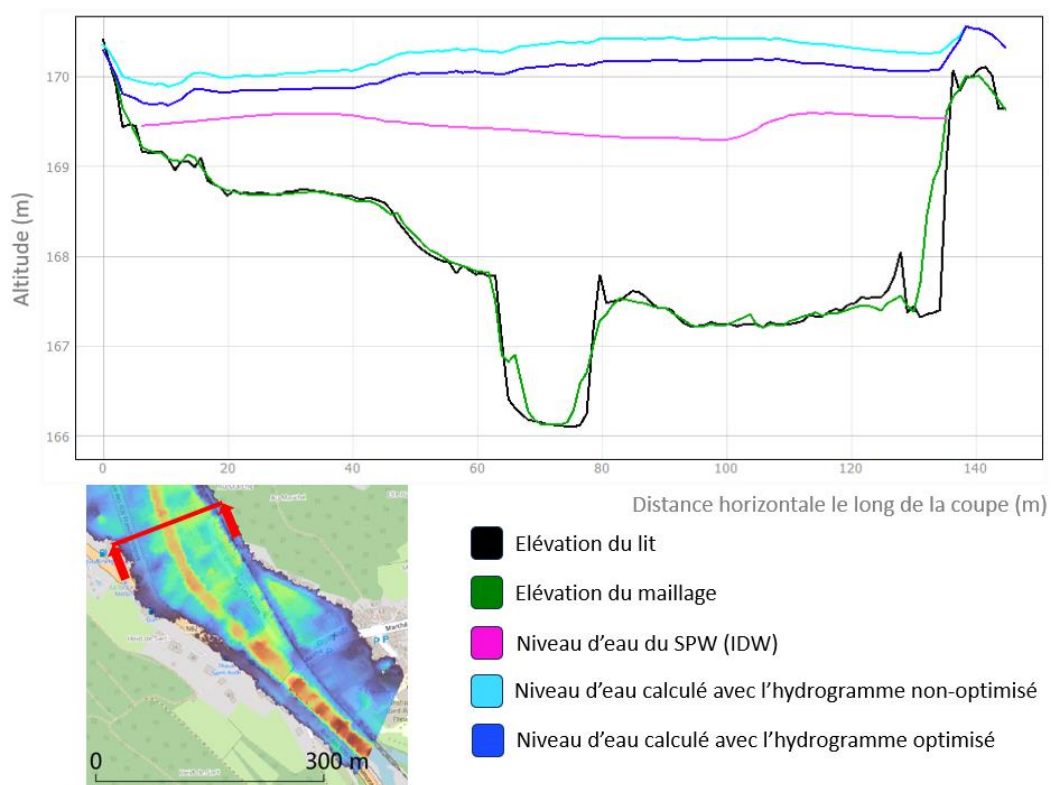


Figure 78 : Coupe dans Theux montrant les résultats du niveau d'eau calculé et le niveau d'eau donné par le SPW.

CALAGES DES MODÈLES

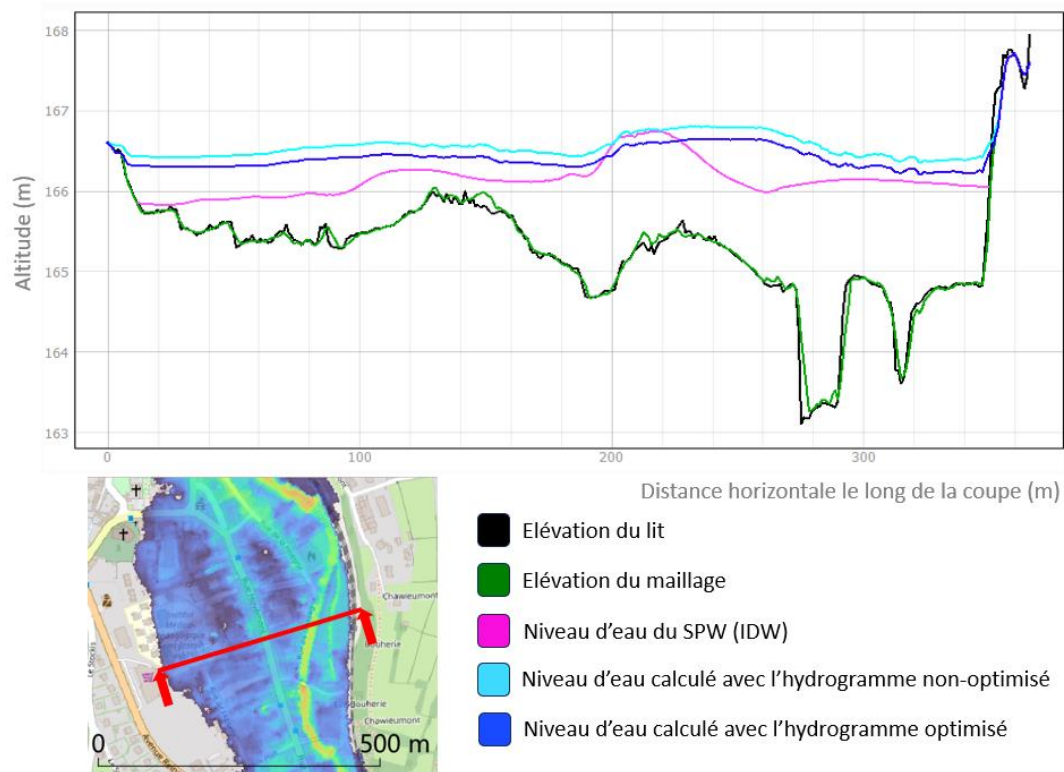


Figure 79 : Coupe dans Theux montrant les résultats du niveau d'eau calculé et le niveau d'eau donné par le SPW.

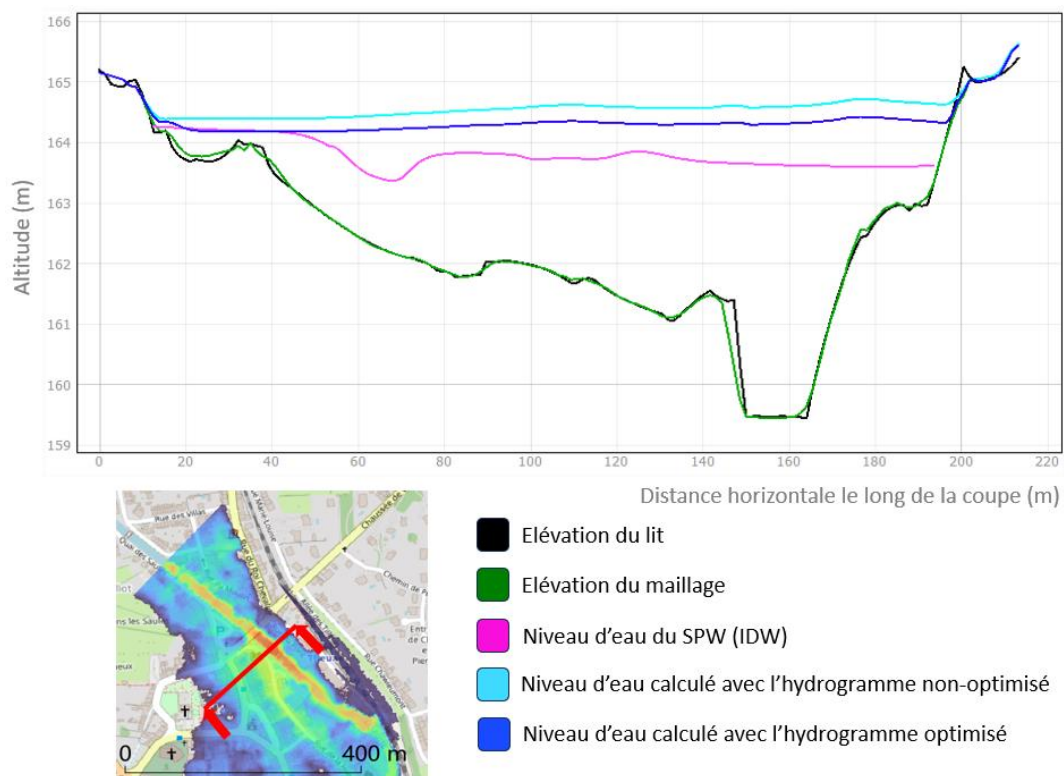


Figure 80 : Coupe dans Theux montrant les résultats du niveau d'eau calculé et le niveau d'eau donné par le SPW.

CALAGES DES MODÈLES

Avec l'hydrogramme optimisé, une légère tendance à surestimer les hauteurs d'eau persiste. Cette surestimation peut être attribuée au fait que le modèle numérique de terrain (MNT) ne représente pas exactement le vrai fond de la rivière. Lors de la création du fichier MNT, des photographies ont été prises alors que de l'eau coulait dans la Hoëgne. Par conséquent, le niveau de l'eau en mouvement a été déterminé comme étant le fond du lit. Il est donc logique d'obtenir des hauteurs d'eau légèrement surestimées. Cependant, à l'échelle de telles inondations, ces imprécisions du MNT restent de faible importance.

Il est important de noter les quelques zones rouges, parfois foncées, sur la figure, indiquant des endroits où les hauteurs sont sous-estimées. Cette sous-estimation pourrait être attribuée à un coefficient de Manning légèrement trop bas dans le modèle hydraulique, à des erreurs d'interpolation dans le modèle hydraulique ou à des erreurs dans les données du Service Public de Wallonie (SPW).

Comme discuté précédemment, il pourrait être pertinent d'augmenter légèrement le coefficient de Manning pour mieux prendre en compte l'effet des bâtiments, ce qui augmenterait légèrement les niveaux d'eau. Cependant, l'augmentation du coefficient de Manning aurait pour conséquence une augmentation générale des niveaux d'eau, risquant ainsi de s'éloigner des résultats fournis par le SPW.

Étant donné que le MNT ne représente pas complètement le lit de la rivière et que les valeurs de coefficient de Manning données dans les tableaux sont des estimations grossières, il est difficile de déterminer un coefficient de Manning idéal. Par conséquent, il est raisonnable de conserver un coefficient de Manning de $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$, tout en gardant à l'esprit qu'il existe une marge d'erreur sur les résultats. Une étude de sensibilité des résultats au coefficient de Manning a été réalisée dans la section suivante 4.2.1 pour évaluer cette marge d'erreur.

4.2.1 Étude de sensibilité du coefficient de Manning

Dans cette section, l'influence du coefficient de Manning sur les résultats est étudiée dans l'objectif d'estimer la marge d'erreur qui est faite en choisissant un coefficient de $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$, par exemple. Pour ce faire, plusieurs simulations ont été faites avec l'hydrogramme optimisé pour différentes valeurs du coefficient de Manning : 0,01 ; 0,02 ; 0,03 ; 0,04 ; 0,05 ($\text{s/m}^{1/3}$). Puis sur quatre coupes réparties le long du maillage, sur chaque maille j , l'écart-type du niveau d'eau est évalué de la manière suivante :

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (z_{j,i} - m_j)^2}{N - 1}}$$

où $z_{j,i}$ est le niveau d'eau sur la maille j sur la i -ème simulation, m_j est la moyenne des niveaux sur la maille j , σ_j est l'écart-type du niveau d'eau sur la maille j et N est le nombre de simulation, dans notre cas il y en a cinq.

Ensuite la moyenne des écart-types est calculée sur chacune des quatre sections. Enfin, l'écart-type final est obtenu en faisant la moyenne des quatre valeurs moyennes obtenues sur chaque section.

CALAGES DES MODÈLES

Chacune des sections étudiées sont présentées à l'annexe H. En procédant ainsi, l'écart-type moyen obtenu est de 26 *cm*. Et sans prendre en compte la simulation avec un coefficient de Manning de 0,01 *s/m*^{1/3} car elle est jugée comme trop irréaliste, l'écart-type moyen est de 20 *cm*. Puisque ce dernier est plutôt faible, nous pouvons conclure que l'influence du coefficient de Manning sur les résultats n'est pas importante. En effet, dans le cadre d'étude d'inondations, une différence de quelques centimètres de hauteur d'eau sur les résultats ne modifie pas considérablement les conclusions qui peuvent être tirées.

4.3 Conclusion sur l'utilisation des modèles

Dans cette section, une conclusion est tirée en se basant sur les résultats obtenus lors du calage du modèle hydrologique et de la discussion concernant le modèle hydraulique. Cette conclusion est essentielle pour déterminer les paramètres à utiliser dans les simulations futures visant à étudier les mesures de protection contre les inondations.

En ce qui concerne le modèle hydrologique, la décision a été prise d'utiliser les paramètres issus du processus d'optimisation. Ces paramètres ont démontré leur capacité à produire une étendue et des hauteurs d'eau plus proches de la réalité. Comparativement à l'utilisation de valeurs provenant d'une étude à Chaudfontaine, les paramètres optimisés sont plus pertinents, plus fiables et permettent une meilleure reproduction des données observées. Pour rappel, les paramètres retenus sont les suivants : $S = 17,04 \text{ mm}$ et $V_0 = 0,24 \text{ m/s}$.

En ce qui concerne le modèle hydraulique, le même maillage sera conservé. L'utilisation de mailles de 5 *m* offre un compromis optimal entre précision des résultats et temps de calcul. En ce qui concerne le coefficient de Manning, une valeur de $n = 0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ sera maintenue. Comme expliqué précédemment, l'estimation de ce coefficient est complexe et cette valeur permet d'obtenir des résultats qui se rapprochent de la réalité. Il est important de garder à l'esprit qu'une petite marge d'erreur d'environ une dizaine de centimètres existe en raison de l'influence de ce paramètre, comme démontré dans la section précédente.

En résumé, ces décisions permettront d'effectuer des simulations futures cohérentes et représentatives pour l'étude des mesures de protection contre les inondations. Les paramètres choisis pour les modèles hydrologique et hydraulique sont basés sur des justifications solides et prennent en compte les limites et les incertitudes associées à ces modèles.

MESURES DE PROTECTION

5 Mesures de protection

Dans cette partie, les modèles hydrologiques et hydrauliques qui viennent d'être fixés vont être utilisés afin de proposer et de tester des aménagements dans le but de réduire l'étendue de la zone inondée et des hauteurs d'eau lors d'inondations à Theux.

Pour ce faire, l'hydrogramme obtenu pour les inondations de juillet 2021 servira de base mais d'autres cas de crues seront également étudiés afin de vérifier l'efficacité des mesures de protection proposées. Nous nous intéresserons à la montée des eaux dans la Hoëgne en juin 2018 ainsi qu'à des pluies fictives ayant une période de retour de 5 ans jusqu'à des pluies fictives ayant une période de retour de 200 ans.

Dans un premier temps, nous allons tenter d'estimer le débit à partir duquel la Hoëgne déborde et, par conséquent, à partir duquel les inondations commencent. Pour ce faire, nous nous baserons sur les événements de juillet 2021 et de juin 2018 et des observations qui ont été faites sur place par Jean Leroy et Jean-Philippe Boutet. Ensuite, une estimation du volume d'eau qui déborde dans le cas de la crue de juillet 2021 pourra être faite.

A partir de ce volume d'eau, des solutions peuvent être proposées. Dans ce travail, nous nous dirigerons plutôt vers des aménagements permettant de stocker de l'eau comme des bassins car c'est une des manières les plus efficace pour lutter contre les inondations, comme cela a été discuté dans l'état de l'art. De plus, c'est une solution qui peut facilement être intégrer au modèle hydraulique en modifiant la topographie en jouant sur la hauteur des mailles.

Puis, l'efficacité des solutions proposées pourra être testée lors de différents événements pluvieux.

Enfin, nous terminerons par une conclusion des résultats apportés dans ce chapitre.

5.1 Débit de débordement

Dans cette section, l'objectif est d'estimer le débit à partir duquel la Hoëgne ne peut plus retenir toute l'eau qui s'écoule, entraînant ainsi des débordements. Le volume d'eau qui débordera pourra également être estimé par la suite.

La méthode utilisée pour déterminer le débit de débordement repose sur les résultats de la simulation effectuée précédemment pour l'événement de juillet 2021. L'idée est de faire avancer la simulation pas à pas dans le temps, en affichant à chaque pas de temps l'étendue de l'eau ainsi que la date et l'heure. Lorsque l'étendue de l'eau dépasse la capacité de la rivière à la contenir, on identifie le moment du premier débordement. Cette date et heure de débordement peuvent ensuite être reportées sur l'hydrogramme, ce qui permet de déterminer le débit correspondant qui a été injecté dans la Hoëgne à ce moment précis. Cette démarche est illustrée de manière schématique sur la Figure 81.

MESURES DE PROTECTION

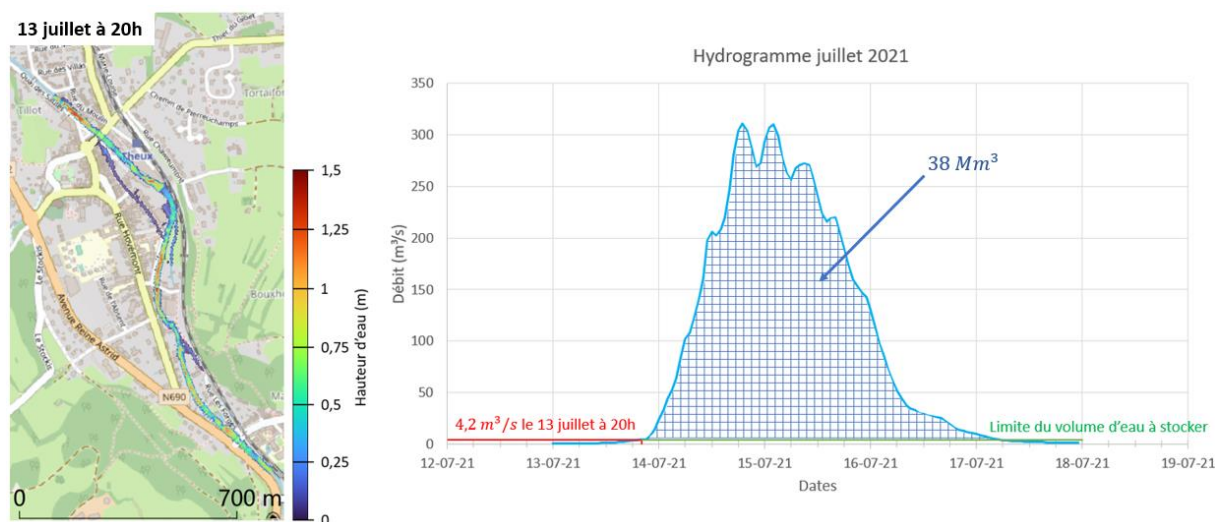


Figure 81 : Le premier débordement selon la simulation dans une rue survient le 13 juillet à 20h pour un débit de $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$ impliquant un volume d'eau qui déborde correspondant à la surface en quadrillage de l'hydrogramme de 38 Mm^3 .

Sur la figure ci-dessus, nous remarquons que dans la simulation, la Hoëgne déborde très tôt, le 13 juillet à 20h, et pour un débit très faible de $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$. En supposant que la quantité d'eau qui déborde correspond à toute l'eau participant à un débit supérieur à celui du débordement, le volume d'eau qui participe aux inondations de juillet 2021 correspond à la surface comprise entre l'hydrogramme et l'horizontale représentant le débit limite de $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (représentée en vert). En estimant cette surface par une discrétisation en rectangle d'une heure de largeur, le volume d'eau à stocker est d'environ 38 Mm^3 .

Cependant, la faible valeur du débit de débordement et le moment précoce où le débordement se produit soulèvent des interrogations. Pour vérifier la pertinence de nos résultats et tenter de trouver une explication, nous allons nous appuyer sur les témoignages de certains habitants de Theux.

5.1.1 Témoignages

En effet, le premier débordement survenant le 13 juillet à 20h semble incohérent, car comme nous l'avons mentionné précédemment, les médias indiquent que la Hoëgne aurait débordé le lendemain, un peu avant 9h (L'avenir.net, s.d.). De plus, une photo prise par Jean Leroy à 8h et présentée à la Figure 82 montre clairement le débordement de la Hoëgne. D'autres témoignages provenant du rapport de Stucky permettent également de confirmer que le débordement s'est produit vers 8h suite à la rupture d'un muret (Stucky, 2021).

MESURES DE PROTECTION

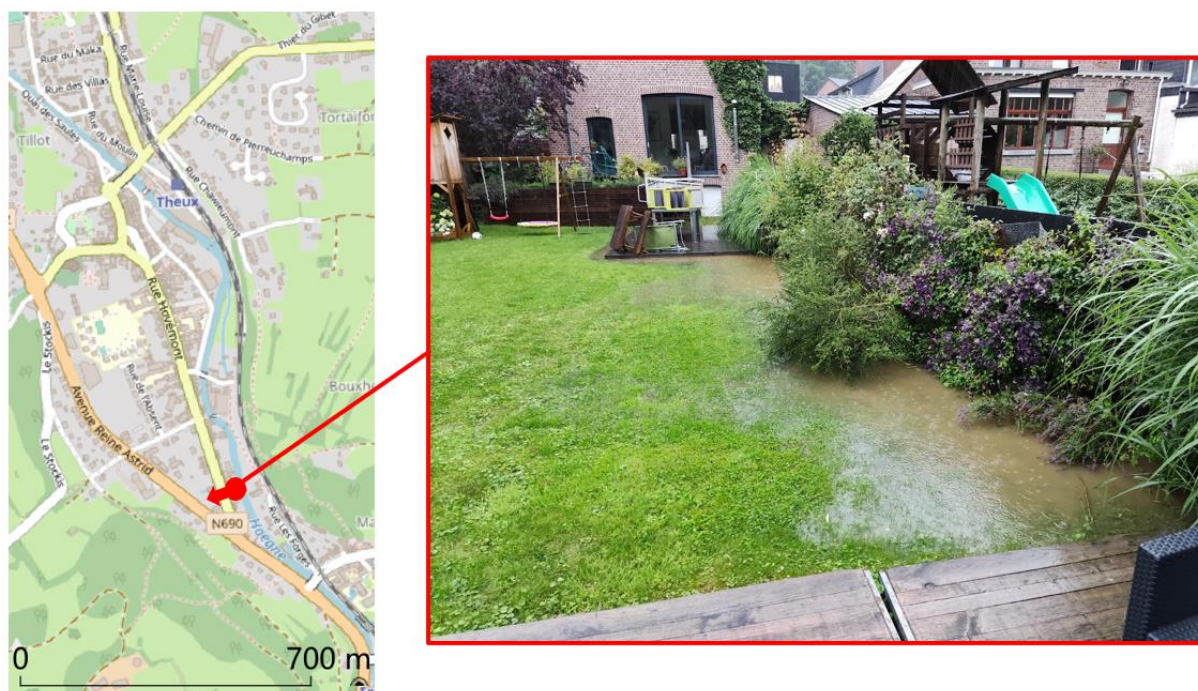


Figure 82 : Photo prise par Jean Leroy le 14 juillet à 8h au bord de la Hoëgne montrant le début de son débordement.

Par mesure de sécurité et pour garantir une meilleure fiabilité, il est justifié de considérer que le débordement ait eu lieu le 14 juillet à 8h, conformément aux témoignages et aux observations. La Figure 83 illustre le débit correspondant à ce moment précis sur l'hydrogramme, et par conséquent, le volume d'eau qui aurait débordé peut être estimé à partir de cette valeur.

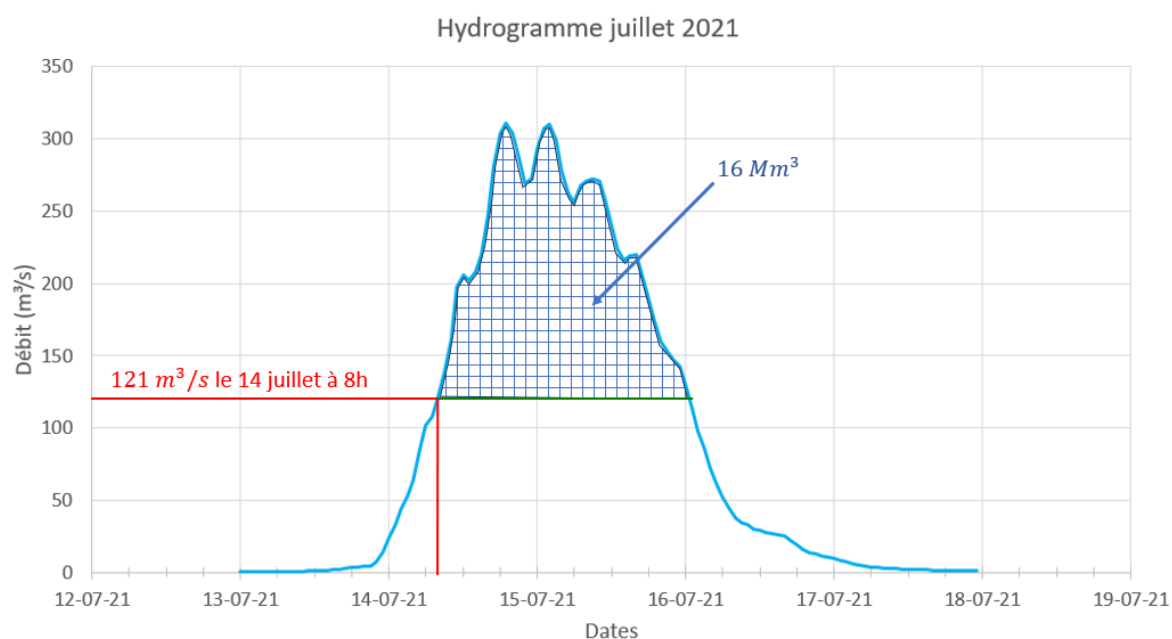


Figure 83 : Le débordement, selon les témoignages, survient le 14 juillet à 8h pour un débit de $121 \text{ m}^3/\text{s}$ impliquant un volume d'eau qui déborde (correspondant à la surface en quadrillage de l'hydrogramme) de 16 Mm^3 .

MESURES DE PROTECTION

La grande différence entre le moment du premier débordement dans la simulation et dans la réalité peut être expliquée par la présence de murets le long de la Hoëgne qui permettent de retarder le débordement. Ces murets ne sont pas représentés dans le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé pour la simulation. Par exemple, à l'endroit où le premier débordement se produit dans la rue de la Hoëgne dans la simulation, il y a en réalité un muret, comme illustré sur la Figure 84. La présence de ces murets peut avoir un impact significatif sur le moment du débordement réel par rapport à ce qui est prédit par la simulation.



Figure 84 : Vue (tirée de Google Maps) depuis la rue de la Hoëgne illustrant la présence de muret entre la Hoëgne et la rue permettant de retarder le débordement.

Cependant, il est important de noter que même si certains témoignages indiquent que la Hoëgne aurait débordé à 8h, cela ne signifie pas nécessairement que le débordement n'a pas eu lieu ailleurs plus tôt. Par conséquent, considérer le débit du premier débordement comme étant celui atteint le 14 juillet à 8h n'est pas totalement sécuritaire.

Cette démarche a permis de déterminer un intervalle dans lequel se situe le débit de débordement réel. En effet, il se situe entre $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$ et $121 \text{ m}^3/\text{s}$. Afin de réduire davantage cet intervalle, qui reste relativement large, nous allons examiner la montée des eaux de juin 2018 à l'aide de nos modèles dans la section suivante.

MESURES DE PROTECTION

5.1.2 Evènement de juin 2018

Dans cette section, nous analysons l'évènement survenu du 1er au 3 juin 2018. Durant cette période, le bassin versant de la Hoëgne et du Wayai a subi de fortes précipitations, entraînant une augmentation inhabituelle du niveau d'eau dans la Hoëgne, comme le montre la Figure 85.

Cet évènement est très intéressant car, malgré la hausse significative du niveau de la Hoëgne, il n'y a pas eu de débordement ni d'inondations, selon les témoignages de Jean Leroy et Jean-Philippe Boutet. Par conséquent, en calculant l'hydrogramme résultant de ces précipitations, nous pourrions déterminer le débit maximal atteint lors de cet évènement, ce qui nous permettra de réduire l'intervalle possible du débit que la Hoëgne est capable de contenir.



Figure 85 : Photo prise par Jean Leroy montrant l'état de la Hoëgne le 1er juin 2018.

Pour ce faire, il a été nécessaire de collecter les données de précipitations de l'évènement survenu en juin 2018. Ces données sont présentées dans l'annexe F pour chaque pluviomètre, à l'exception de celui de Mont-Rigi qui était défectueux. En suivant la même méthodologie d'optimisation décrite dans la section 4.1, les paramètres « optimaux » caractérisant la situation de juin 2018 ont pu être déterminés. Cette fois-ci, le limnimètre de Spixhe, étant fonctionnel, a été utilisé comme base pour l'optimisation à cet endroit. Étant donné que ce limnimètre est plus proche de l'exutoire étudié, tel qu'illustré sur la Figure 86, il est plus pertinent de travailler avec ses données que celles du limnimètre de Polleur. La Figure 87 présente l'hydrogramme mesuré par le limnimètre de Spixhe ainsi que l'hydrogramme calculé en utilisant les paramètres « optimaux » obtenus suivants :

$$\begin{cases} S = 195,45 \text{ mm} \\ V_0 = 1,24 \text{ m/s} \end{cases}$$

MESURES DE PROTECTION

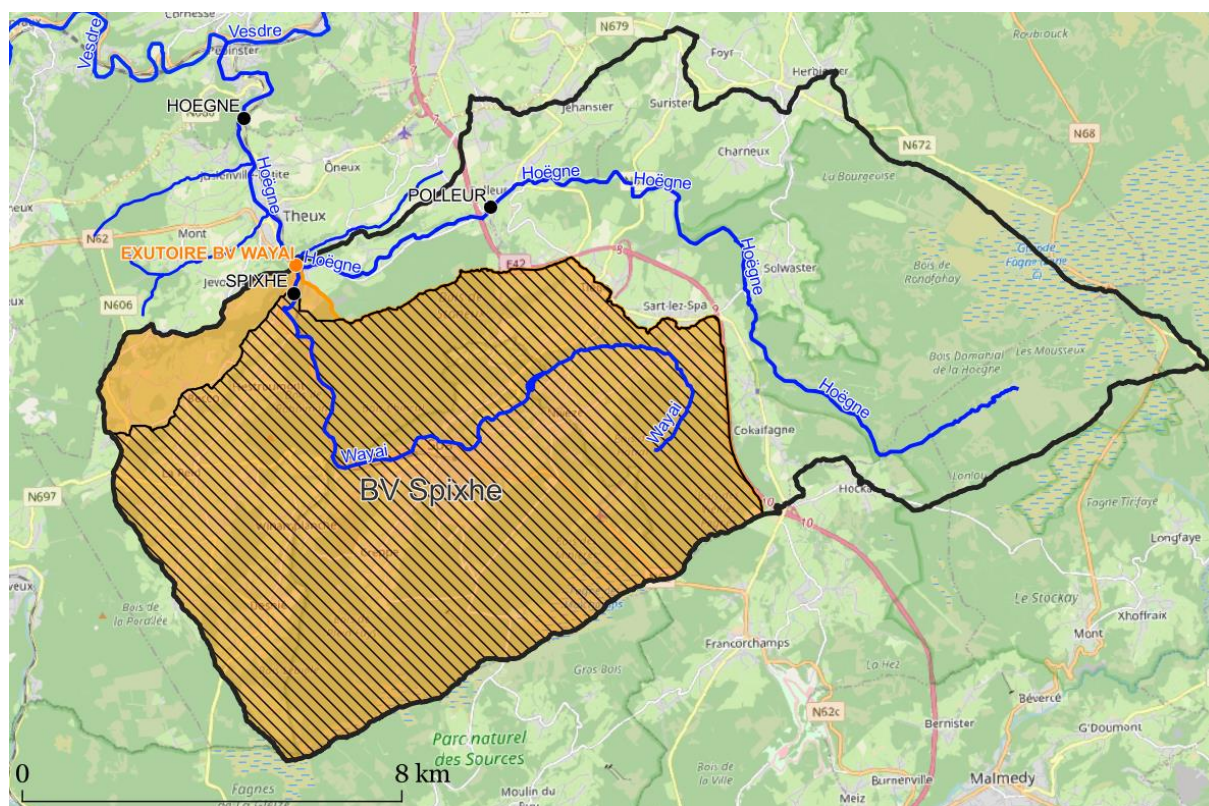


Figure 86 : Bassin versant associé au limnimètre de Spixhe (en hachuré), bassin versant de l'exutoire sur le Wayai (en jaune) et bassin versant global du Wayai et de la Hoëgne (délimité en noir).

Hydrogrammes à Spixhe

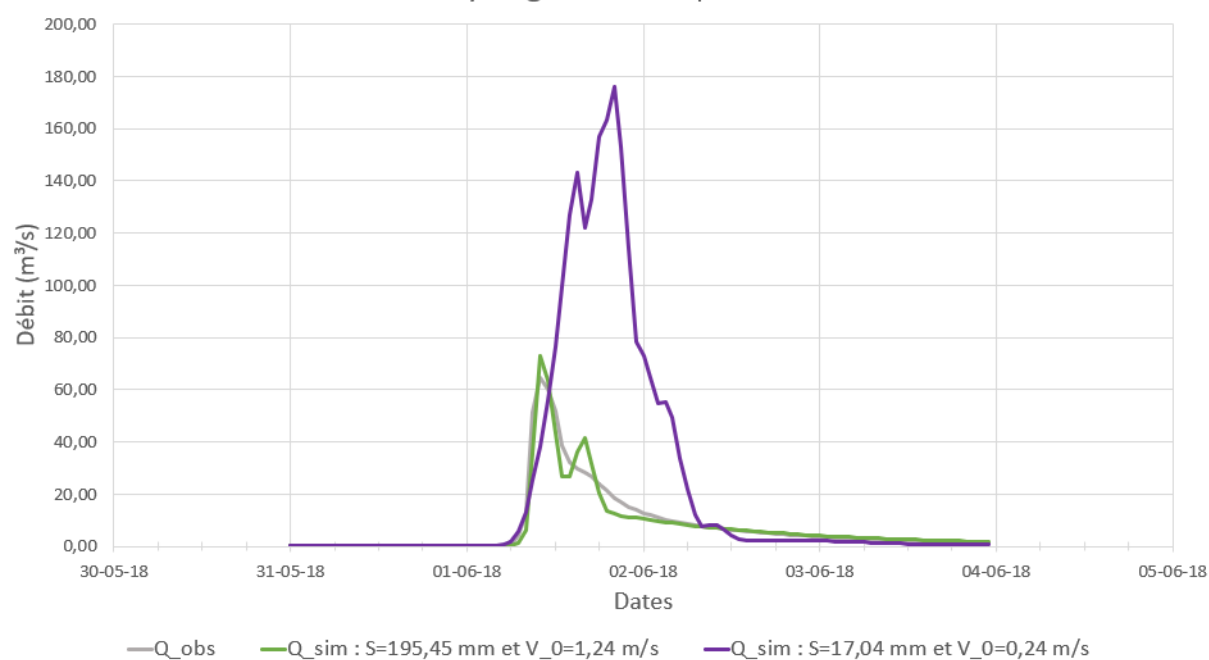


Figure 87 : Hydrogramme observé à Spixhe (en gris), hydrogramme calculé issu de l'optimisation (en vert) et hydrogramme calculé avec les paramètres de juillet 2021 (en mauve).

MESURES DE PROTECTION

Le coefficient de Nash est évalué à 0,94, la différence entre les volumes est de 6% et la différence entre les débits est de 12%. Ces valeurs indiquent que le modèle reproduit très bien l'hydrogramme observé en utilisant ces paramètres. Comme illustré dans la Figure 87, il est évident que l'utilisation des paramètres déterminés pour juillet 2021 serait complètement incorrecte, comme en témoigne la grande différence entre l'hydrogramme en mauve et l'hydrogramme en gris. En effet, chaque événement est unique car il dépend des conditions météorologiques des jours précédents, ce qui influe sur l'état du sol.

Avec ces paramètres qui permettent de représenter l'événement de juin 2018, les hydrogrammes à l'exutoire de la Hoëgne, du Wayai ainsi que celui à la confluence peuvent être construits et sont illustrés sur la Figure 88.

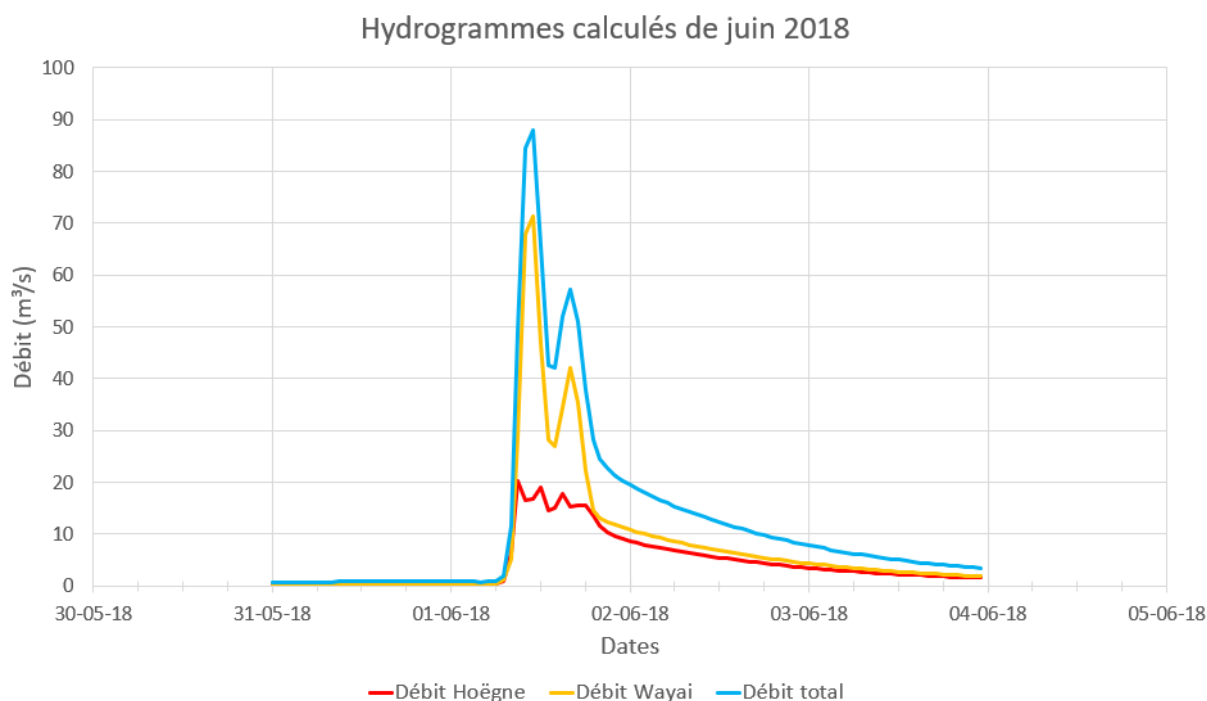


Figure 88 : Hydrogrammes calculés par le modèle hydrologique avec les paramètres issus du calage ($S = 195,45 \text{ mm}$ et $V_0 = 1,24 \text{ m/s}$).

Le pic de débit atteint en juin 2018 peut être lu sur l'hydrogramme à la confluence et est de $88 \text{ m}^3/\text{s}$. En juillet 2021, ce débit a été atteint le 14 juillet à 5h, comme illustré dans la Figure 89. Le volume d'eau correspondant à un débit supérieur à $88 \text{ m}^3/\text{s}$ est de 21 Mm^3 .

MESURES DE PROTECTION

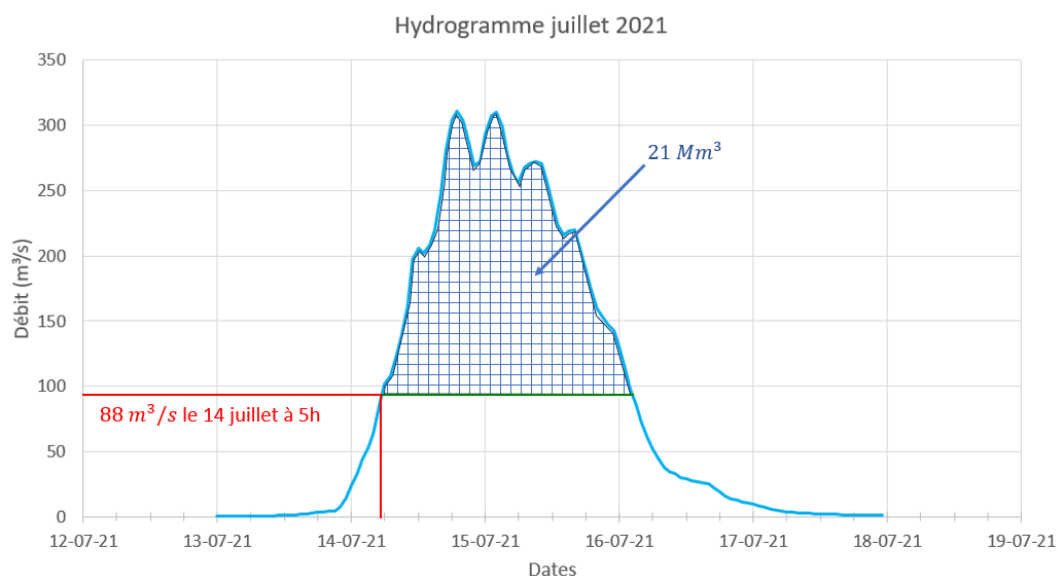


Figure 89 : Le débit correspondant au pic de juin 2018 (88 m³/s) survient en juillet 2021 le 14 à 5h impliquant un volume d'eau supérieur à cette limite correspondant à la surface en quadrillage de l'hydrogramme de 21 Mm³.

Par conséquent, sachant qu'un débit de 88 m³/s n'a pas provoqué de débordement dans la Hoëgne, comme illustré dans la Figure 90, l'intervalle du débit de débordement de la Hoëgne peut être réduit à l'intervalle suivant :

$$Q_{\text{débord}} \in [88 ; 121] \text{ (m}^3/\text{s)}$$

Et en termes de volume qui déborde en juillet 2021 :

$$V_{\text{débord}} \in [21 ; 16] \text{ (Mm}^3\text{)}$$

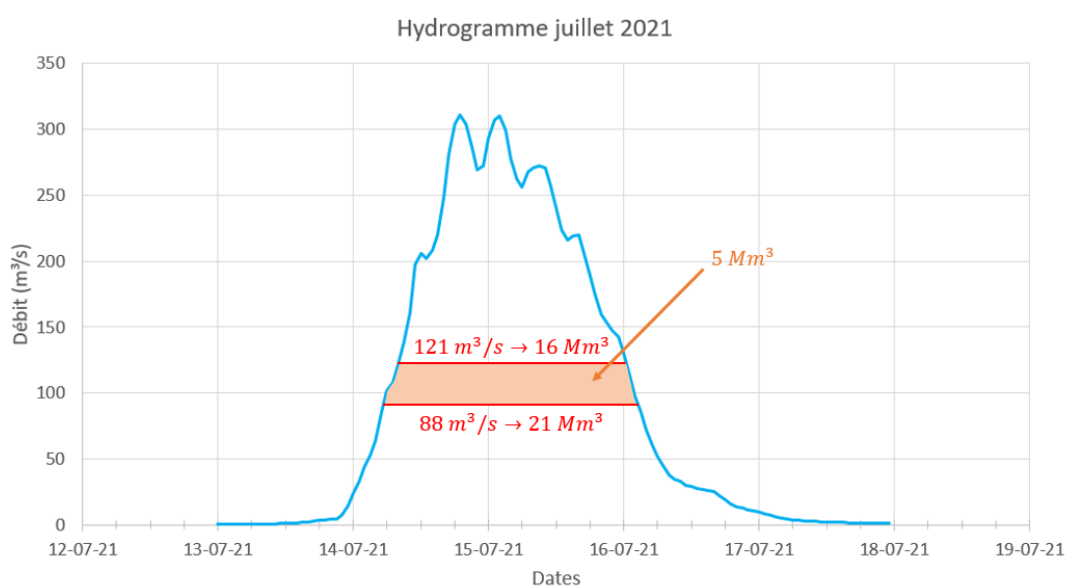


Figure 90 : Intervalle dans lequel se situe le débit de débordement de la Hoëgne et intervalle de volume d'eau débordé en juillet 2021.

MESURES DE PROTECTION

En appliquant l'hydrogramme obtenu pour juin 2018 à l'entrée du modèle hydraulique, une zone inondée serait inévitablement simulée puisque le débit de débordement de la simulation est de $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$, même si cela ne correspond pas à la réalité. Sur la Figure 91, les résultats de la simulation sont représentés. La zone inondée et les hauteurs d'eau atteintes sont nettement inférieures à celles obtenues en juillet 2021. Bien que la zone inondée représentée ne soit pas correcte, les résultats de cette simulation seront néanmoins utiles.

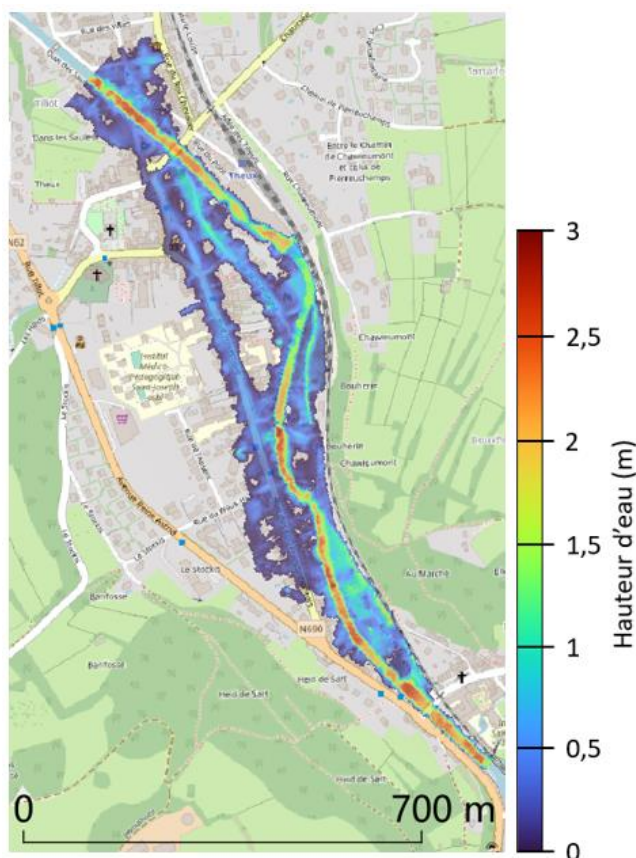


Figure 91 : Zone inondée et enveloppe des hauteurs d'eau calculées avec « Hydroflow » pour l'hydrogramme calculé pour juin 2018 avec le modèle hydrologique.

En effet, en utilisant les résultats de cette simulation, il est possible d'estimer une borne inférieure pour la hauteur des murets. En traçant un profil en long des résultats le long des berges de la Hoëgne, la différence de hauteur entre le niveau d'eau atteint et le niveau du fichier MNT utilisé pour la simulation doit être au moins égale à la hauteur des murets qui ne sont pas représentés dans ce fichier. Le profil en long de la berge de la rive gauche est illustré sur la Figure 92. Dans la zone où a eu lieu le premier débordement dans la simulation, c'est-à-dire dans la rue de la Hoëgne, en moyenne, il y a une différence d'environ 30 cm entre le niveau d'eau atteint et le niveau du MNT. Par conséquent, à cet endroit, le muret doit faire au moins une trentaine de centimètres de haut pour retenir l'eau qui est sortie du lit pendant la simulation. Nous considérons que la hauteur du muret est de 40 cm. Cette estimation semble correspondre à la réalité, comme le montre la Figure 84 qui présente une vue du muret sur Google Maps.

MESURES DE PROTECTION

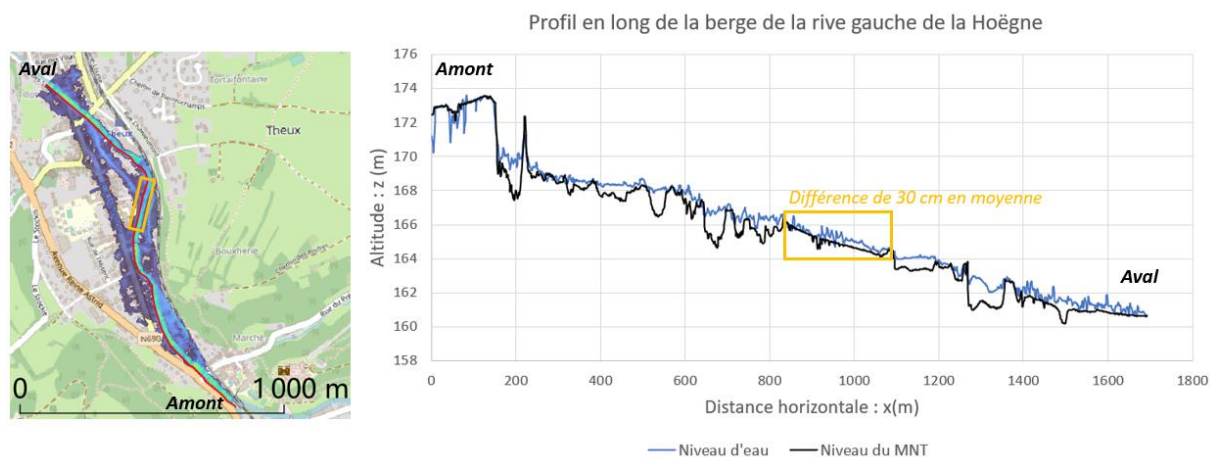


Figure 92 : Profil en long de la berge de la rive gauche de la Hoëgne illustrant le niveau de la berge dans le fichier MNT et le niveau d'eau atteint dans la simulation en juin 2018.

Sur la Figure 93, une coupe de la Hoëgne à cet endroit est présentée, montrant le fichier MNT utilisé pour la simulation ainsi que le muret qui devrait être ajouté pour correspondre à la réalité.

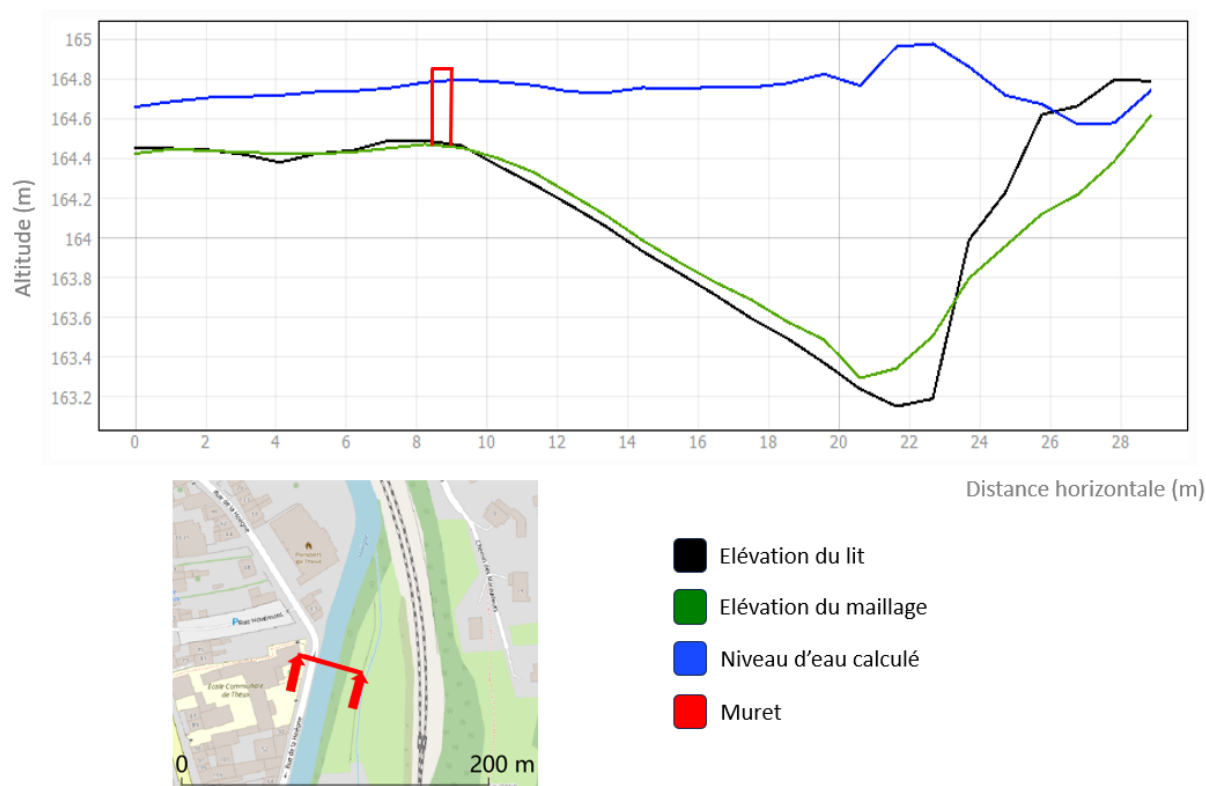


Figure 93 : Coupe dans la Hoëgne illustrant l'élévation du lit (MNT), le niveau d'eau calculé pour la simulation de juin 2018 et le muret de 40 cm de haut qu'il faudrait rajouter au fichier MNT pour correspondre à la réalité.

MESURES DE PROTECTION

Cette analyse de la hauteur des murets renforce l'idée que les résultats des simulations semblent correspondre à la réalité, à l'exception du moment du débordement. Étant donné que les murets ne sont pas représentés, toutes les simulations basées sur un hydrogramme ayant un pic inférieur à celui de juin 2018 ($88 \text{ m}^3/\text{s}$) et supérieur à $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$ produiront des résultats qui ne reflètent pas la réalité, car ces simulations aboutiront à des inondations fictives. En revanche, pour les simulations avec un pic d'hydrogramme plus important, comme celui des inondations de juillet 2021, l'étendue de l'eau et les hauteurs d'eau calculées par le modèle hydraulique semblent être relativement proches de la réalité.

En conclusion de cette section sur le débit auquel la Hoëgne déborde, nous pouvons désormais affirmer que le débordement se produit pour un débit compris entre $88 \text{ m}^3/\text{s}$ et $121 \text{ m}^3/\text{s}$. Par mesure de sécurité, le débit de débordement est pris comme étant la borne inférieure de cet intervalle. Par conséquent, la quantité d'eau considérée comme ayant débordé lors des inondations de juillet 2021 est d'environ 21 Mm^3 . L'objectif pour la suite de ce travail est alors de trouver des moyens de retenir cette quantité d'eau en la stockant quelque part, ou du moins une partie de celle-ci, afin d'atténuer l'écoulement dans la Hoëgne et ainsi éviter des débordements excessifs.

5.2 Bassin de stockage dans Theux

Pour pouvoir retenir une quantité significative d'eau, il est nécessaire de concevoir un ou plusieurs bassins de rétention en amont des zones où les débordements ont tendance à se produire. Dans cette section, nous allons nous focaliser sur la conception d'un bassin de rétention situé à Theux. Pour modéliser efficacement ce bassin, il doit être intégré dans notre maillage et positionné de manière à intercepter l'eau lorsqu'elle est sur le point de déborder. L'idée sous-jacente est de situer ce bassin à proximité du premier point où les eaux de la Hoëgne débordent vers une plaine, comme illustré dans la Figure 94.

MESURES DE PROTECTION

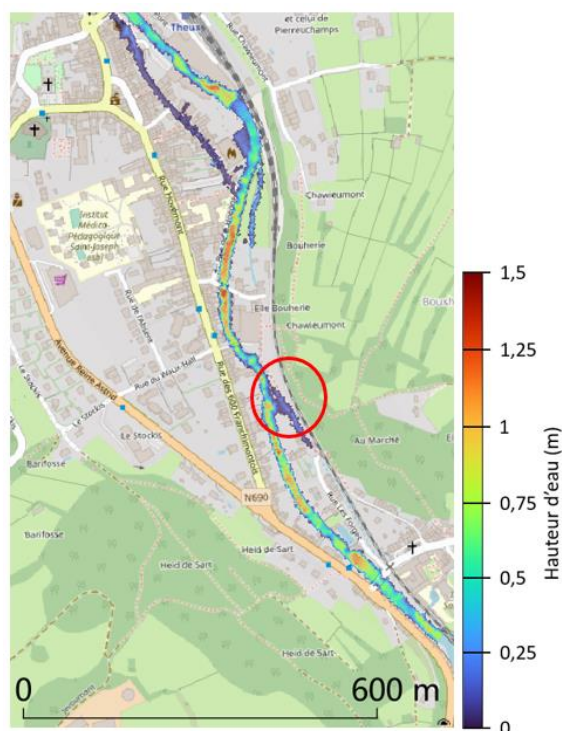


Figure 94 : Résultats de la simulation des inondations de juillet 2021 lors du premier débordement dans la rue. Le cercle rouge montre l'endroit qui déborde en premier dans un endroit non-habité.

Nous allons donc procéder à la modélisation d'un bassin à cet emplacement spécifique. À cette fin, la mise en place d'un canal peut être envisagée pour dévier l'eau de la Hoëgne vers l'autre côté des voies ferrées, en passant sous celles-ci. Cela permettrait de diriger l'eau vers un espace propice à la construction d'un bassin de rétention, comme illustré dans la Figure 95. Dans ce méandre du cours d'eau, l'eau pourrait naturellement s'écouler dans le canal grâce à son inertie dès que le niveau de l'eau atteint un niveau critique.



Figure 95 : Le canal représenté en brun permet de diriger l'eau sous le chemin de fer vers le bassin en brun.

Sur la Figure 96 et la Figure 97 sont représentées des coupes dans le bassin et dans le canal, respectivement.

MESURES DE PROTECTION

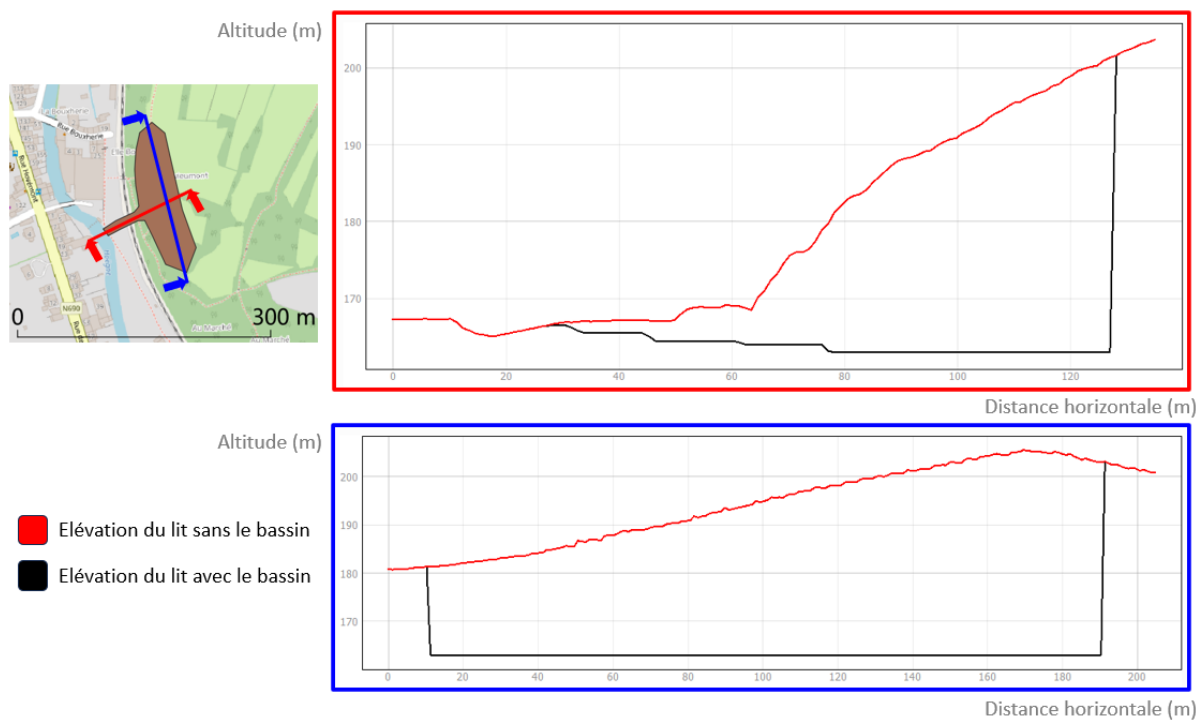


Figure 96 : Coupes dans le bassin montrant le MNT sans la construction du bassin (en rouge) et avec le bassin (en noir).

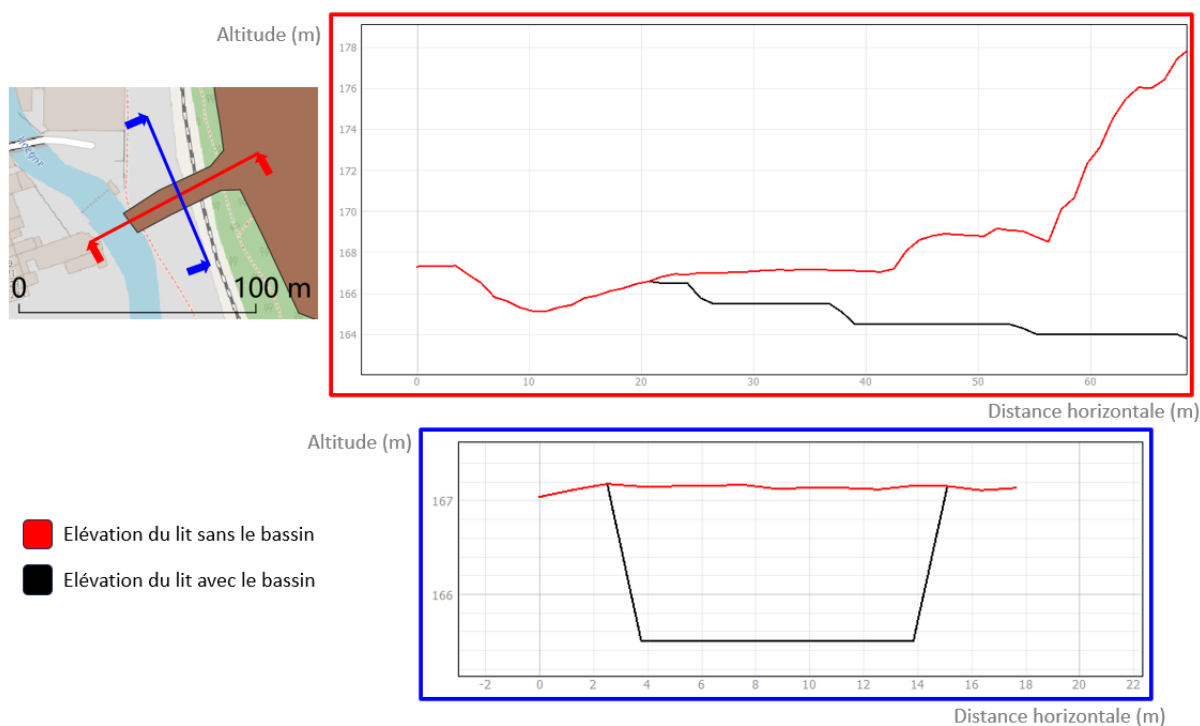


Figure 97 : Coupes dans le canal montrant le MNT sans la construction du canal (en rouge) et avec le canal (en noir).

MESURES DE PROTECTION

En examinant les coupes présentées, il est clair que l'emplacement choisi pour le bassin présente un inconvénient majeur en termes de relief. En réalité, la zone où le bassin serait construit est caractérisée par un relief très abrupt, comme illustré dans la Figure 96 et la Figure 97. La construction d'un bassin à cet endroit nécessiterait d'importants travaux de terrassement pour adapter le terrain. Cependant, il reste pertinent d'intégrer cette configuration dans la modélisation hydraulique afin d'évaluer son impact et de visualiser l'efficacité potentielle d'un bassin de rétention. La Figure 98 illustre les résultats de la simulation sous l'hydrogramme de juillet 2021, mettant en évidence l'effet de la présence du bassin.

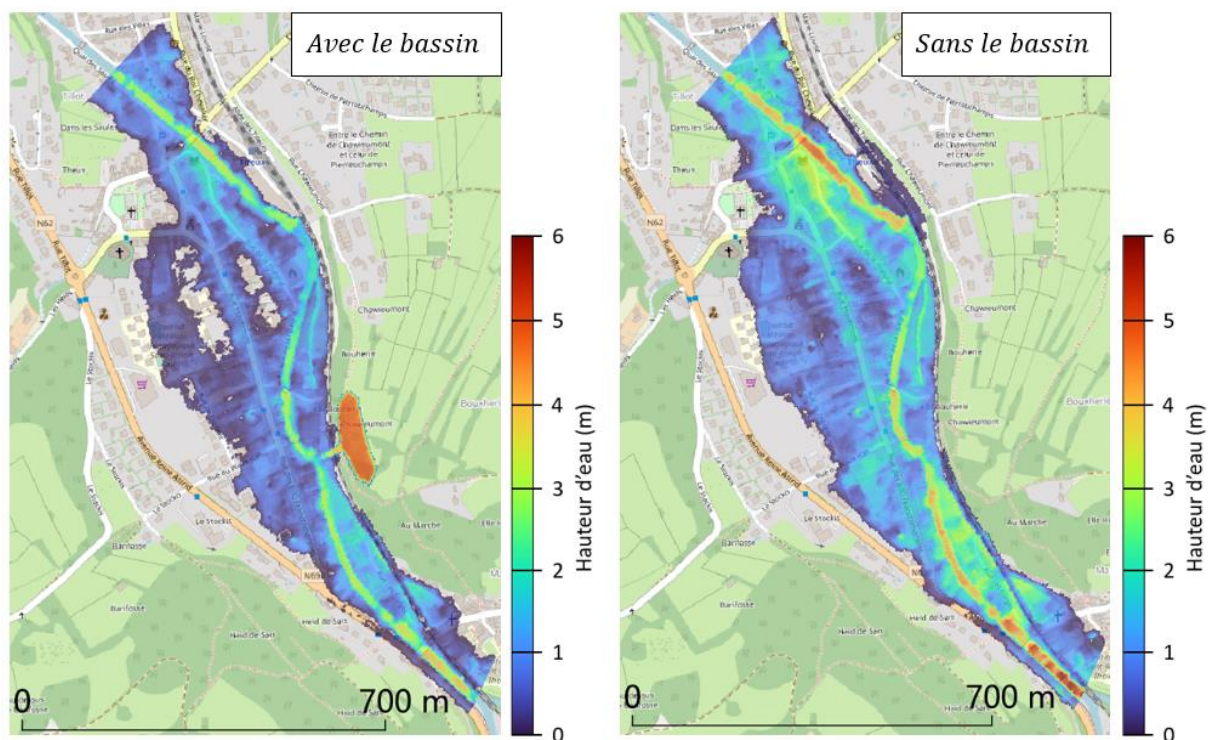


Figure 98 : Zone inondée et enveloppe des hauteurs d'eau calculées avec « Hydroflow » pour l'hydrogramme de juillet 2021 avec le bassin (à gauche) et sans (à droite).

Le bassin a été en mesure de stocker $36\,000\text{ m}^3$ d'eau, comme le montre la Figure 99, mais cette capacité n'est pas tout suffisante pour empêcher les débordements de la Hoëgne lors des événements de juillet 2021. En effet, pour rappel, l'eau qui a débordé en juillet 2021 est de 21 Mm^3 . Néanmoins, cette mesure a contribué à réduire l'étendue des inondations et, de manière plus importante encore, à diminuer les hauteurs d'eau maximales, comme le montre la Figure 100. Cette dernière illustre les différences de hauteurs d'eau entre les deux scénarios.

MESURES DE PROTECTION

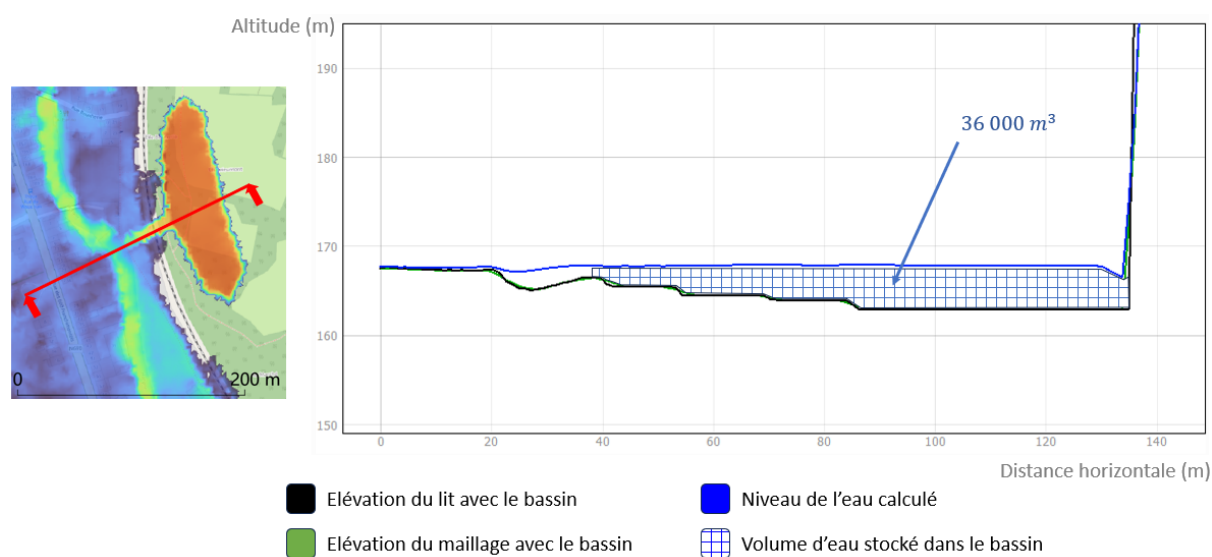


Figure 99 : Niveau d'eau calculé avec l'hydrogramme de juillet 2021 sur une coupe dans le bassin et volume d'eau stocké.

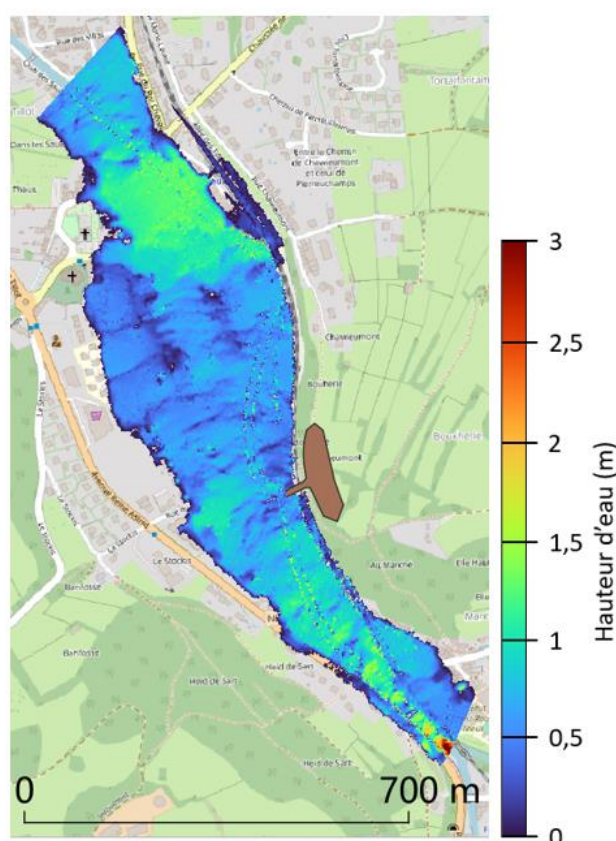


Figure 100 : Différence des hauteurs d'eau maximales atteintes entre la simulation avec le bassin modélisé et la simulation sans, avec le fichier MNT classique.

MESURES DE PROTECTION

La Figure 101 offre une approche visuelle plus intuitive pour constater la significative diminution de la hauteur d'eau. Dans cette section, l'utilisation du bassin a permis de réduire le niveau de l'eau de plus d'un mètre.

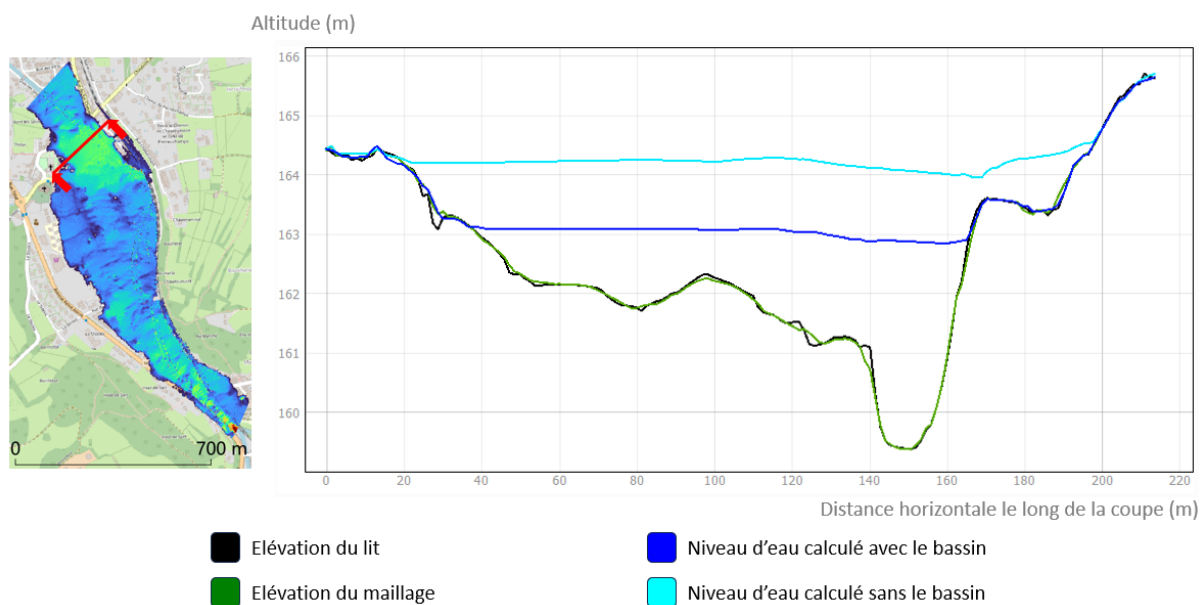


Figure 101 : Niveau d'eau calculé par les simulations avec l'hydrogramme de juillet 2021, avec et sans le bassin, sur une coupe dans Theux.

Pour conclure cette section dédiée à l'étude des inondations associées au bassin modélisé ci-dessus dans Theux, malgré que ce bassin puisse sembler irréalisable au vu du relief à Theux et de l'ampleur des travaux que cela nécessiterait pour le mettre en place, cette analyse a pu mettre en évidence plusieurs éléments.

Tout d'abord, même si le volume de stockage offert par ce bassin est relativement modeste par rapport à celui nécessaire pour prévenir les inondations de juillet 2021, il a néanmoins une influence significative sur les résultats. Bien que le bassin ne puisse stocker qu'une fraction minime du volume requis pour empêcher les inondations majeures, son impact sur la réduction de l'étendue inondée et surtout sur la diminution des niveaux d'eau observés à certains endroits est notable. Cette réduction, même d'un mètre et demi, peut sembler insignifiante en apparence, mais pour les habitants de Theux, cette différence de hauteur d'eau pourrait faire toute la différence. En effet, un mètre en moins au rez-de-chaussée de chez soi cela fait une grande différence en termes de dégâts subis.

Ensuite, cela a permis de mettre en évidence la difficulté de prévoir un bassin suffisamment grand dans Theux pour lutter contre les inondations d'une ampleur de celle de juillet 2021. Du fait que Theux est située dans une vallée encaissée, l'espace disponible pour la construction d'un bassin de grande capacité est extrêmement limité.

MESURES DE PROTECTION

Enfin, la modélisation de ce bassin offre un aperçu de l'impact potentiel sur les résultats en fonction du volume d'eau retenu. Même si l'implémentation d'un bassin de grande taille dans la ville de Theux semble complexe, différentes configurations peuvent être explorées en envisageant des bassins en amont de la ville. Désormais, nous disposons d'une idée plus précise de l'influence qu'a un volume de $36\,000\text{ m}^3$ sur l'étendue des inondations et les hauteurs d'eau. Ceci permet alors d'envisager d'autres solutions de bassins, en amont dans la suite de l'étude sans nécessiter une nouvelle simulation, ce qui nous obligerait à ajuster le maillage en l'agrandissant, ce qui augmenterait considérablement les temps de calcul.

5.3 Zone d'expansion de crues en amont de Theux

Après avoir remarqué qu'un bassin dans la ville semble irréalisable et insuffisant, un aménagement à l'amont semble une meilleure idée. En effet, le bassin versant est beaucoup moins urbanisé laissant de la place à d'éventuels aménagements plus importants.

Cependant, en raison du relief toujours aussi accidenté, voire plus prononcé en amont, la création d'un bassin artificiel reste difficile en raison de la complexité des travaux nécessaires. Néanmoins, ce relief peut être exploité pour créer un bassin naturel. L'idée consiste à ériger des digues transversales de part et d'autre du cours d'eau, comme illustré sur la Figure 102. Cette configuration créerait une zone tampon en amont des digues, pouvant être utilisée en cas de fortes précipitations. En période d'étiage, l'écoulement se poursuivrait normalement. En revanche, en cas de crue, une grande quantité d'eau serait retenue derrière les digues, régulant ainsi le débit qui s'écoule entre elles pour éviter une surcharge de la Hoëgne à Theux. Ce processus aurait pour effet d'amortir l'hydrogramme, prolongeant la durée de l'écoulement tout en réduisant le débit et les vitesses.

En choisissant judicieusement les emplacements des digues, il serait possible de créer un bassin de grande envergure. Toutefois, le choix de l'emplacement s'avère complexe, car la zone tampon ne devrait pas comporter d'habitations ni de constructions.

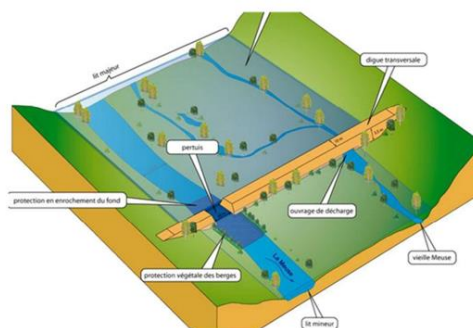


Figure 102 : Digues permettant de créer une zone d'expansion de crues en amont de Charlevilles-Mézières (à gauche) et le schéma de fonctionnement en cas de crue (à droite). Tirée du cours « Analysis and mitigation of floods » donné par Sandra Soares Frazao (Soares Frazao, Analysis and mitigation of floods, s.d.).

MESURES DE PROTECTION

Pour déterminer l'emplacement optimal de ces digues, une analyse du bassin versant en amont de Theux est nécessaire. Cette analyse peut être effectuée pour le Wayai ainsi que pour la Hoëgne, car les deux cours d'eau possèdent de vastes bassins versants. En examinant de plus près le bassin versant du Wayai, il apparaît que la mise en place d'un tel projet est complexe. La vallée est en effet profondément encaissée et des habitations bordent le Wayai jusqu'à Spa. En raison du relief, la construction de digues de grande hauteur serait nécessaire pour stocker un grand volume d'eau, ce qui pourrait ne pas être esthétiquement acceptable. De plus, la zone tampon nécessiterait une extension considérable en amont, ce qui est difficile en raison de la présence d'habitations.

En revanche, la vallée de la Hoëgne est moins encaissée et moins urbanisée à certains endroits. L'idée serait de localiser un endroit propice à l'aménagement de cette zone d'expansion en cas de crue, mais sans remonter trop en amont de Theux, afin de garantir que la majeure partie de l'eau qui tombe sur le bassin versant passe par cet emplacement. L'endroit qui semble idéal est encadré en rouge sur la Figure 103. Dans cette zone, la vallée s'élargit avec des plaines s'étendant sur plusieurs dizaines de mètres de largeur, et cette région n'est pas urbanisée.



Figure 103 : Endroit idéal pour créer une zone d'expansion de crues sur le bassin versant de la Hoëgne.

L'idée consiste à créer une zone inondable en érigeant des digues transversales en aval de cette zone, avec une hauteur telle que le niveau de l'eau ne dépasse pas celui des habitations en amont. L'objectif est d'assurer que les habitations ne se retrouvent pas dans la zone inondable. Le concept de cette approche, avec l'emplacement de la digue, est illustré sur la Figure 104. En construisant des digues capables de retenir l'eau jusqu'à une hauteur maximale de sept mètres, il serait possible de stocker une grande quantité d'eau en amont sans provoquer l'inondation des habitations situées en amont de cette zone.

MESURES DE PROTECTION

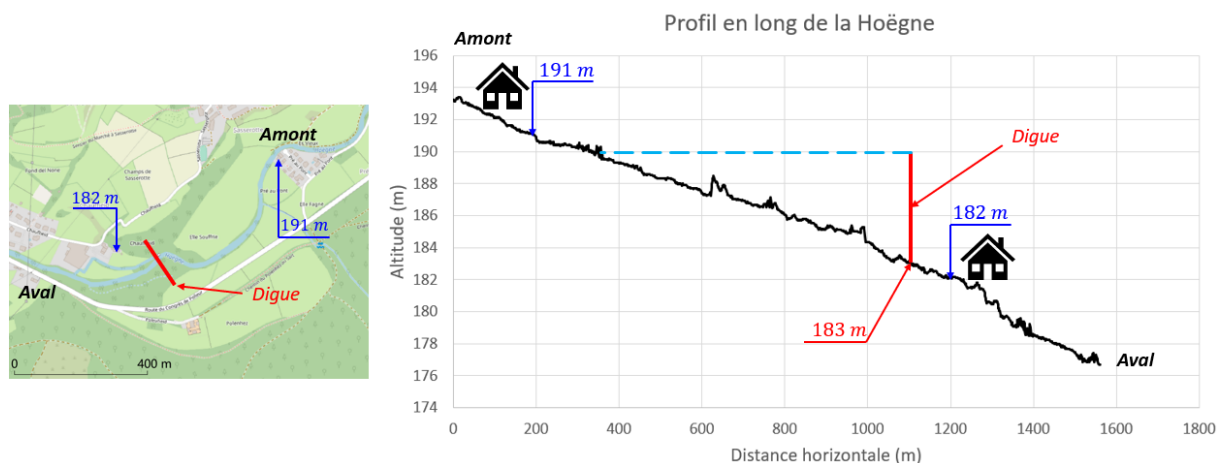


Figure 104 : Principe de la construction de la zone d'expansion de crues en amont de Theux permettant de stocker de l'eau jusqu'au niveau en bleu en traits pointillés. L'altitude des habitations proches est donnée en bleu et l'altitude de la base des digues est en rouge.

Une autre approche pourrait être d'adopter un système de sous-bassins en construisant plusieurs digues moins hautes qui s'étendraient le long de la Hoëgne. Cela permettrait de réduire la hauteur des digues nécessaires. Cependant, en utilisant ce principe d'escaliers, comme illustré sur la Figure 105 avec trois niveaux de digues distincts, une grande quantité d'eau par rapport au scénario avec un seul niveau de digues ne peut pas être stockée. C'est pourquoi, pour l'analyse, nous nous concentrerons sur le scénario d'un seul niveau. De plus, compte tenu du relief accidenté, des digues d'environ cinq mètres de hauteur pourraient être relativement bien intégrées au paysage, surtout si ces digues sont végétalisées.

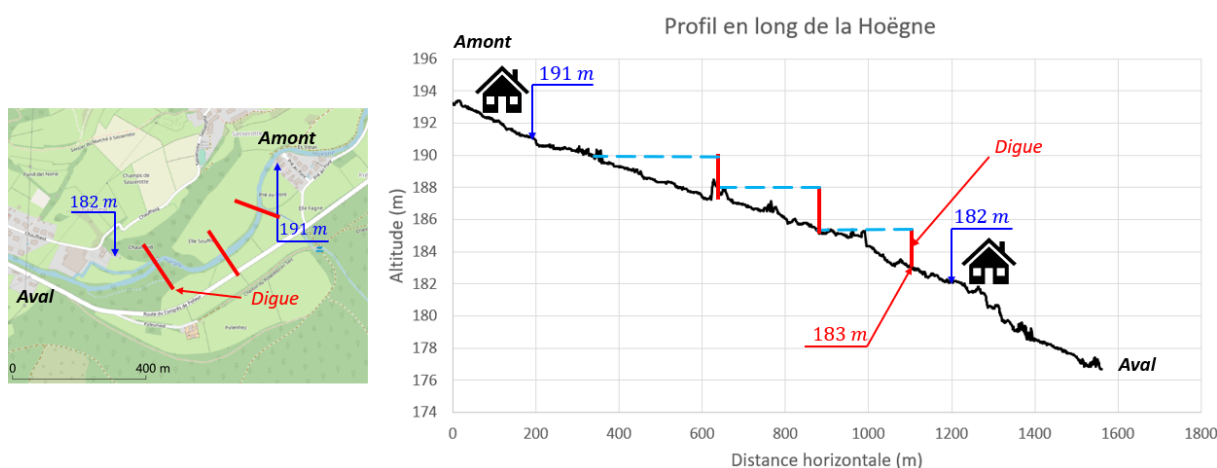


Figure 105 : Principe en créant trois sous-bassins.

La Figure 106 présente une coupe transversale de la Hoëgne au niveau des digues. Ces digues ont une hauteur maximale d'environ 5 m et elles permettent de retenir l'eau sur une profondeur maximale de 6,6 m. Grâce à ces digues, la zone inondable à l'amont peut stocker jusqu'à 154 000 m³ d'eau. La Figure 107 illustre les hauteurs d'eau maximales atteintes dans la zone inondable, confirmant que les habitations en amont ne sont pas submergées.

MESURES DE PROTECTION

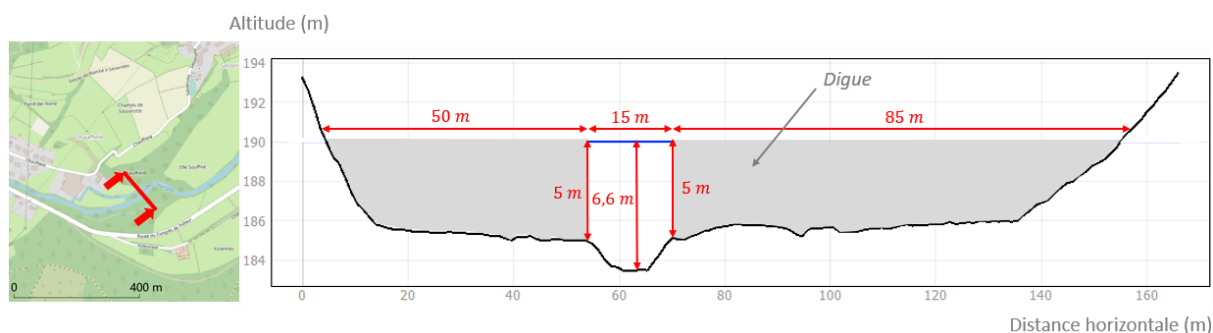


Figure 106 : Coupe dans la Hoëgne au niveau de la digue avec le niveau d'eau maximal représenté en bleu.

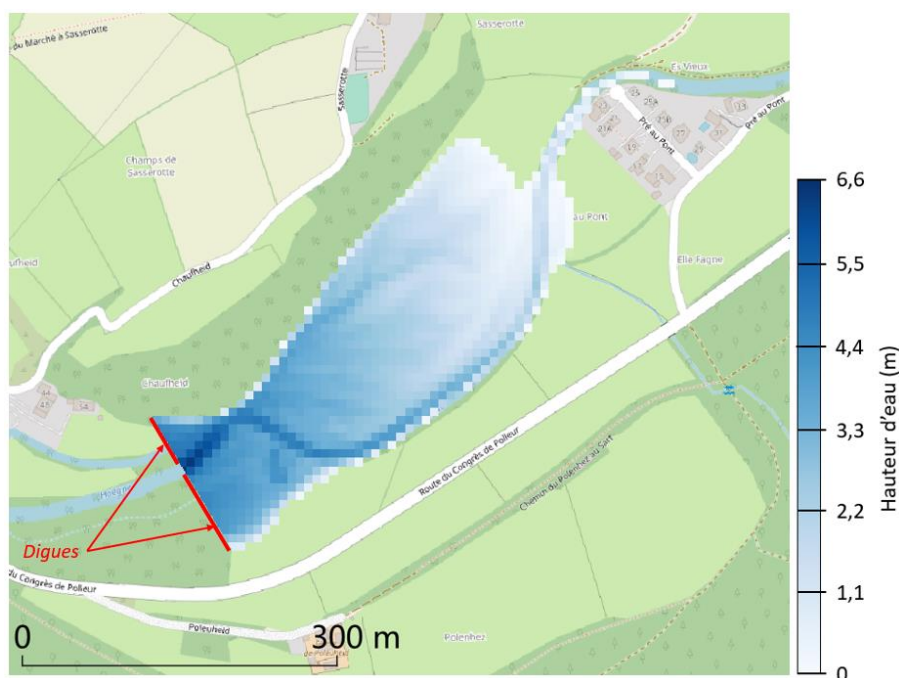


Figure 107 : Hauteurs d'eau maximales atteintes dans la zone inondable en amont des digues.

La zone inondable ainsi créée est capable de retenir plus de quatre fois la quantité d'eau stockée par le bassin modélisé à Theux dans la section précédente, tout en nécessitant des travaux d'envergure moins importante. Malgré cela, le stockage en amont de ces digues demeure inférieur au volume d'eau nécessaire pour empêcher les inondations dans la ville de Theux lors des événements de juillet 2021. Néanmoins, compte tenu de l'impact significatif observé avec le bassin modélisé à Theux, nous pouvons imaginer l'effet encore plus notable de cette zone d'expansion de crues, dont la capacité est plus de quatre fois supérieure, sur la réduction de l'étendue et des hauteurs des inondations.

L'ampleur des inondations survenues en juillet 2021 est telle qu'il semble extrêmement difficile de retenir l'intégralité du volume d'eau pour prévenir ces inondations. Heureusement, de tels épisodes de fortes pluies et de circonstances exceptionnelles ne se produisent que très rarement. La réduction de l'étendue et des hauteurs d'eau constitue déjà une avancée significative dans la gestion des inondations.

MESURES DE PROTECTION

Cependant, en ce qui concerne des épisodes de pluies moins intenses et plus fréquents, il est primordial d'empêcher les débordements de la Hoëgne afin de minimiser la fréquence des inondations. Dans la section suivante, nous allons nous pencher sur des scénarios de précipitations fictives moins intenses, associées à des périodes de retour spécifiques.

5.4 Application à d'autres pluies

Dans cette section, nous allons aborder des scénarios de précipitations moins intenses que celles de juillet 2021. Pour cela, nous utiliserons les données de l'IRM (Institut Royal Météorologique) de la Belgique afin de créer des précipitations fictives correspondant à des périodes de retour spécifiques définies par l'IRM (Institut Royal Météorologique (IRM), s.d.). Les données de précipitations fournies par l'IRM pour la commune de Theux sont présentées dans le Tableau de la Figure 108. Il est important de noter que ce tableau est basé sur des analyses statistiques effectuées sur des données allant de 1991 à 2020, excluant ainsi l'événement survenu en juillet 2021.

Durée	Période de retour (années)											
	2	5	10	15	20	25	30	40	50	75	100	200
10 min	8.1	11.6	14.2	15.8	17.0	18.0	18.7	20.0	21.0	23.0	24.4	28.1
20 min	12.1	17.5	21.5	24.0	25.8	27.3	28.5	30.5	32.0	35.0	37.2	42.8
30 min	14.2	20.6	25.3	28.3	30.4	32.1	33.5	35.8	37.7	41.1	43.7	50.3
1 h	17.6	25.1	30.7	34.1	36.6	38.5	40.2	42.9	45.0	49.0	52.0	59.6
2 h	21.4	29.8	36.2	40.0	42.8	45.0	46.9	49.9	52.3	56.8	60.1	68.6
3 h	23.7	32.7	39.3	43.3	46.2	48.6	50.5	53.7	56.2	60.9	64.4	73.3
6 h	28.8	37.4	43.7	47.6	50.4	52.6	54.4	57.4	59.8	64.3	67.6	76.1
12 h	35.7	45.8	53.3	57.8	61.1	63.7	65.8	69.3	72.1	77.4	81.2	91.1
1 j	44.5	56.2	64.7	69.7	73.4	76.3	78.6	82.4	85.5	91.1	95.2	105.5
2 j	58.4	73.3	83.8	90.0	94.4	97.8	100.7	105.2	108.8	115.4	120.1	131.9
3 j	63.6	80.0	91.3	97.9	102.6	106.3	109.3	114.1	117.9	124.7	129.7	141.9
4 j	69.8	87.6	99.7	106.7	111.7	115.5	118.7	123.7	127.7	134.9	140.0	152.6
5 j	79.4	99.1	112.5	120.2	125.6	129.8	133.3	138.7	143.0	150.8	156.3	169.9
7 j	92.6	114.0	128.4	136.5	142.3	146.8	150.4	156.1	160.6	168.7	174.5	188.5
10 j	111.5	137.2	154.2	163.8	170.6	175.8	180.0	186.7	191.8	201.2	207.8	223.8
15 j	135.5	165.2	184.6	195.5	203.1	208.9	213.7	221.1	226.8	237.1	244.4	261.7
20 j	158.0	193.0	215.6	228.3	237.0	243.8	249.2	257.7	264.2	276.0	284.2	303.8
25 j	170.4	207.4	231.3	244.5	253.6	260.6	266.3	275.1	281.9	294.0	302.5	322.6
30 j	196.8	235.7	260.5	274.3	283.7	291.0	296.8	305.9	312.9	325.3	334.0	354.5

Figure 108 : Niveau de retour estimé pour une durée de précipitations (en mm) allant de 10 minutes à 30 jours (lignes) et une période de retour allant de 2 à 200 années (colonnes) à Theux.
Tirée du site de l'IRM de Belgique (Institut Royal Météorologique (IRM), s.d.).

Ces données fournissent les quantités de précipitations correspondant à une durée spécifique et à une période de retour donnée. Pour chaque période de retour, ces données peuvent être exprimées sous forme de différences de précipitations et de différences d'intensité pour une durée déterminée. Ensuite, une pluie synthétique symétrique est associée à chaque période de retour.

MESURES DE PROTECTION

Un exemple de pluie synthétique est illustré dans la Figure 109 pour une période de retour de 100 ans. Les hyétogrammes correspondant à différentes périodes de retour, qui seront utilisés dans la suite de cette étude, sont présentés dans la Figure 110.

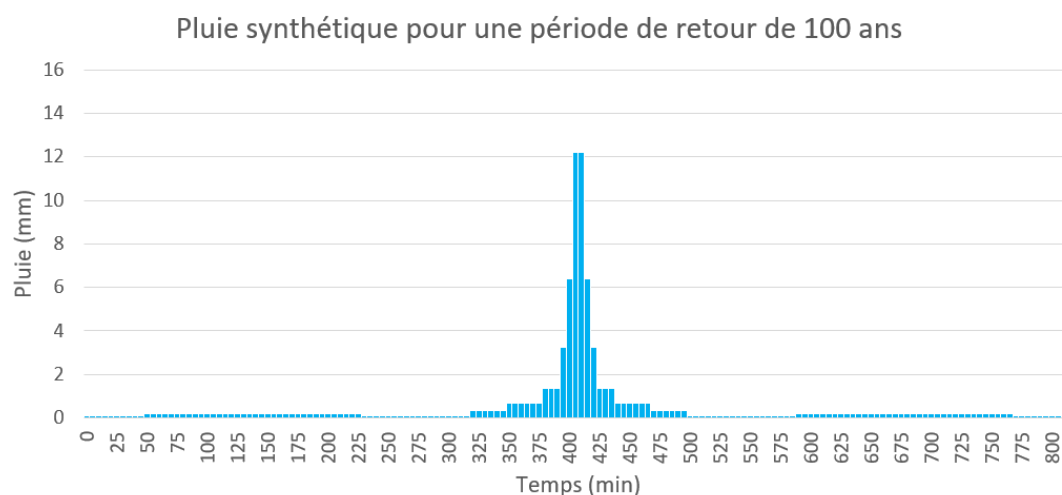


Figure 109 : Pluie synthétique exprimée en mm pour une période de retour de 100 ans à Theux.

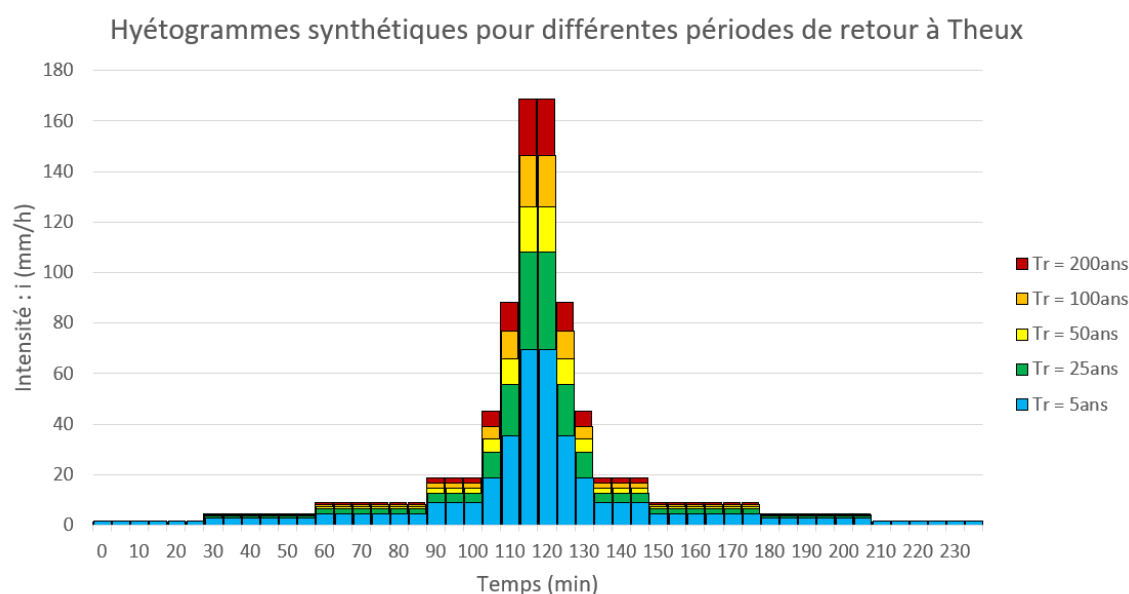


Figure 110 : Hyétogrammes synthétiques pour des périodes de retour (T_r) de 5, 25, 50, 100 et 200 années à Theux.

Les hyétogrammes ont été élaborés à partir des données de précipitations fournies par l'IRM, qui couvrent le bassin versant de Theux. Par conséquent, pour appliquer le modèle hydrologique, le bassin ne sera pas subdivisé en zones correspondant aux pluviomètres, mais nous supposons que les hyétogrammes s'appliquent uniformément sur l'ensemble du bassin versant du Wayai et de la Hoëgne. Bien qu'il serait possible d'utiliser les données spécifiques de chaque pluviomètre et de travailler avec des zones d'influence distinctes, cela est en quelque sorte déjà pris en compte dans les données utilisées pour Theux.

MESURES DE PROTECTION

Le modèle hydrologique peut alors être employé pour générer les hydrogrammes synthétiques correspondants. À cet effet, les paramètres utilisés sont ceux qui ont été déterminés suite à l'optimisation à Spixhe pour la pluie de juin 2018. Cette dernière est considérée comme un événement plus conventionnel en comparaison avec les précipitations exceptionnelles de juillet 2021. En effet, les paramètres optimisés pour cette dernière sortent de l'ordinaire. Il est donc plus cohérent d'utiliser les paramètres plus courants qui reflètent mieux les conditions habituelles du sol. Pour rappel, ces paramètres sont les suivants :

$$\begin{cases} S = 195,45 \text{ mm} \\ V_0 = 1,24 \text{ m/s} \end{cases}$$

En appliquant le modèle hydrologique avec ces paramètres sur les hyétogrammes synthétiques, les hydrogrammes synthétiques correspondants à ces pluies sont obtenus et sont illustrés sur la Figure 111. Les hydrogrammes des événements de juin 2018 et juillet 2021 y sont également représentés afin de les comparer.

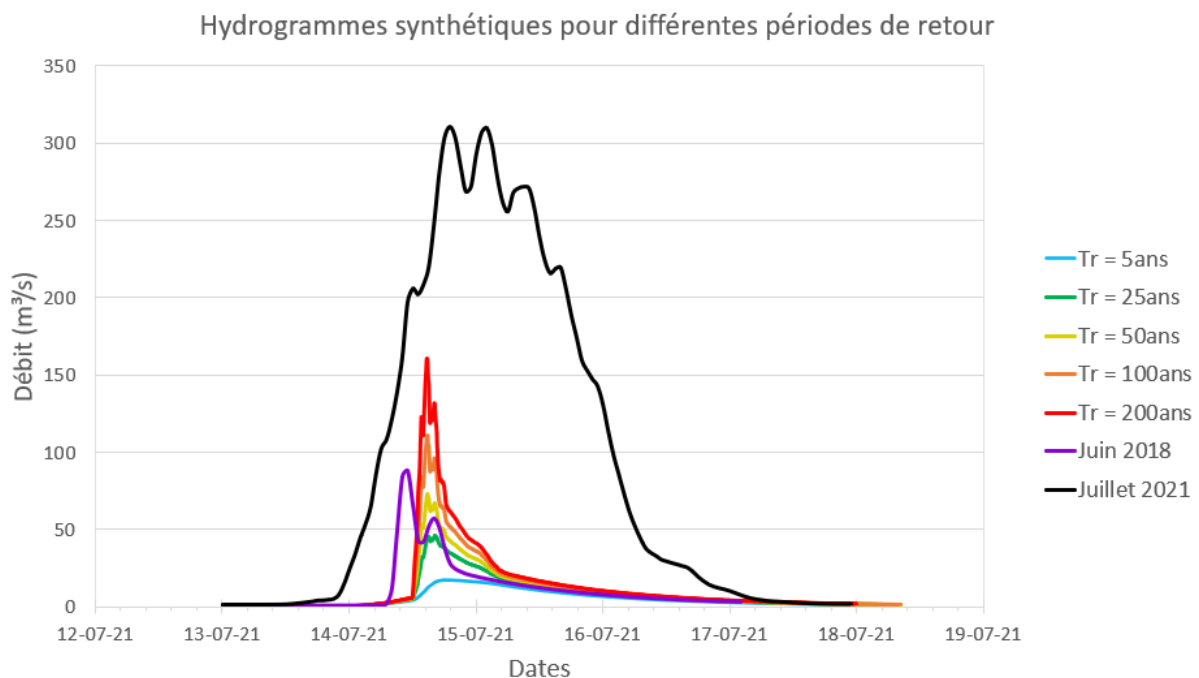


Figure 111 : Hydrogrammes synthétiques pour des périodes de retour de 5, 25, 50, 100 et 200 ans et hydrogrammes de juin 2018 et juillet 2021. Tous les hydrogrammes ont été exprimés en fonctions des dates de juillet 2021 afin de pouvoir les comparer.

Les pics de débits de chacun des hydrogrammes et le volume d'eau qui déborde de la Hoëgne sont résumés dans l'ordre croissant dans le Tableau 3 ci-dessous.

MESURES DE PROTECTION

Evènements	Pic de débit (m^3/s)	Volume qui déborde (m^3)
$T_r = 5 \text{ ans}$	17	0
$T_r = 25 \text{ ans}$	46	0
$T_r = 50 \text{ ans}$	73	0
Juin 2018 (Débit de débordement)	88	0
$T_r = 100 \text{ ans}$	111	68 500
$T_r = 200 \text{ ans}$	161	484 000
Juillet 2021	311	21 000 000

Tableau 3 : Tableau récapitulatif du pic de débit et du volume d'eau situé au-dessus du débit de débordement ($88 \text{ m}^3/s$) pour chaque évènement.

Les volumes d'eau qui débordent ont été calculés en se basant sur le débit de débordement observé en juin 2018, dans un souci de sécurité. Une analyse des hydrogrammes et des données mentionnées ci-dessus met en évidence plusieurs points importants.

Tout d'abord, en comparant l'hydrogramme de juillet 2021 avec les autres, il est clair que ces inondations étaient d'une ampleur exceptionnelle. Le pic de débit atteint en juillet est environ deux fois supérieur à celui observé pour une pluie se produisant en moyenne une fois tous les 200 ans. En théorie, un hydrogramme atteignant un pic d'une telle importance ne devrait pas se produire aussi fréquemment. Cela a été confirmé dans un rapport d'une étude plus approfondie réalisée par le bureau Stucky (Stucky, 2021), qui a estimé la période de retour d'un événement similaire, à Theux, à plus de 10 000 ans. Néanmoins, ils soulignent l'incertitude significative liée à de tels événements.

Ensuite, les intempéries pour des périodes de retour de 5 à 50 ans affichent des pics de débit inférieurs à celui de juin 2018, ce qui signifie que la Hoëgne a la capacité de supporter des pluies ayant des périodes de retour de 50 ans. Les hydrogrammes correspondant à des périodes de retour de 5 et 50 ans ont été utilisés comme entrée dans le modèle hydraulique pour obtenir des résultats sur l'étendue et les hauteurs d'eau. Cependant, comme prévu, le modèle simule un débordement de la Hoëgne en raison de l'absence des murets de protection. Ces résultats de simulation sont présentés dans l'annexe I, car ils sont considérés comme moins pertinents.

Après, l'événement du début juin 2018 peut être classé comme ayant une période de retour située entre 50 et 100 ans. Par conséquent, sans aucun aménagement additionnel, la Hoëgne ne déborde pas pour des événements qui, en moyenne, se produisent tous les 50 à 100 ans.

Cependant, l'hydrogramme synthétique d'une période de retour de 100 ans provoque le débordement de la Hoëgne, avec un volume d'eau débordant d'environ $68\,500 \text{ m}^3$. Les résultats relatifs à l'étendue inondée et aux hauteurs d'eau obtenus à l'aide du modèle hydraulique pour cet hydrogramme, en comparaison avec ceux de juillet 2021, sont illustrés sur la Figure 112. Bien que l'étendue inondée soit moindre pour un hydrogramme ayant une période de retour de 100 ans, les hauteurs d'eau sont surtout moins élevées.

MESURES DE PROTECTION

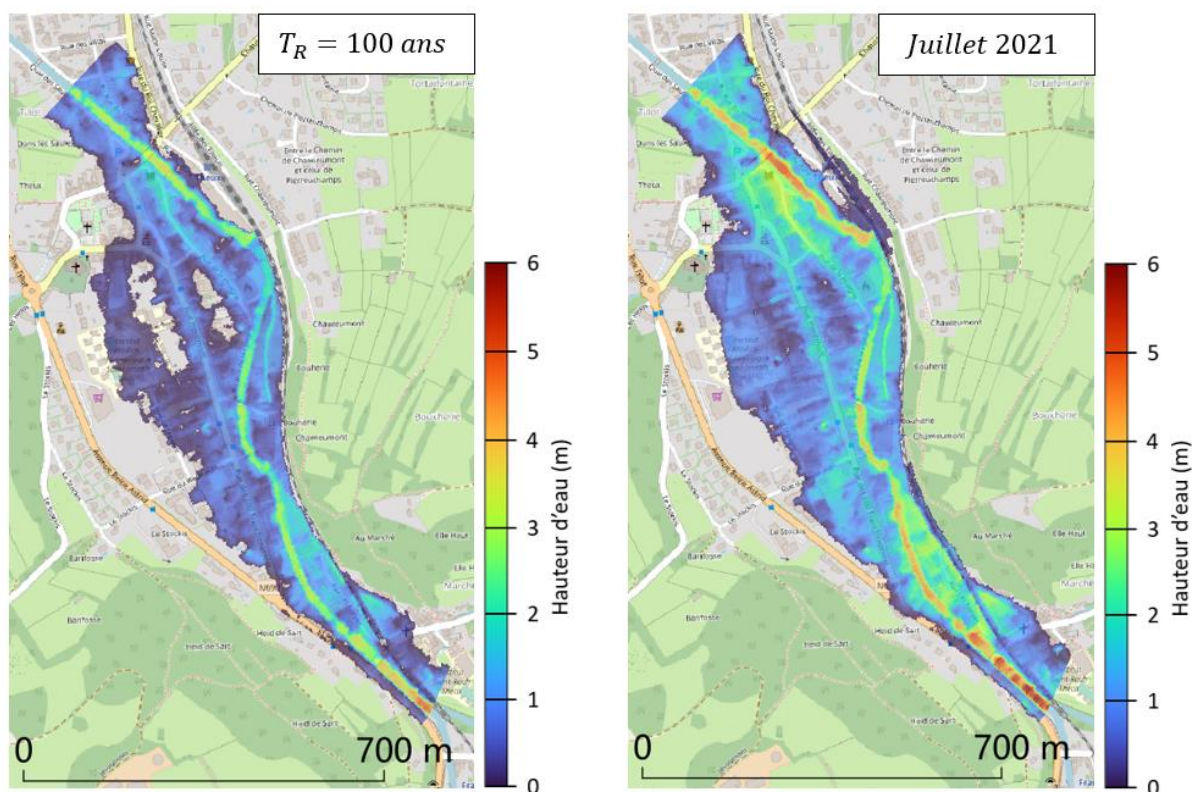


Figure 112 : Etendue des inondations et hauteurs d'eau calculées pour un hydrogramme synthétique d'une période de retour de 100 ans (à gauche) et pour l'hydrogramme de juillet 2021 (à droite).

Comparé à juillet 2021, le volume d'eau qui déborde pour l'hydrogramme ayant une période de retour de 100 ans est nettement moins élevé. D'ailleurs, cette quantité d'eau pourrait être retenue dans la zone d'expansion de crues en amont de Theux, que nous avons discutée précédemment, car cette zone a la capacité d'accueillir $154\,000\text{ m}^3$ d'eau. Toutefois, l'autre solution impliquant le bassin dans Theux ne serait pas suffisante pour contenir ces débordements, bien qu'elle permettrait tout de même une réduction significative de la zone inondée et des niveaux d'eau, comme illustré sur la Figure 113. Une fois de plus, cette figure met en évidence les effets positifs du stockage d'un certain volume d'eau dans un bassin. En effet, les hauteurs d'eau sont considérablement réduites, atteignant des niveaux très faibles, grâce à ce bassin, même s'il ne parvient pas à prévenir totalement les inondations.

MESURES DE PROTECTION

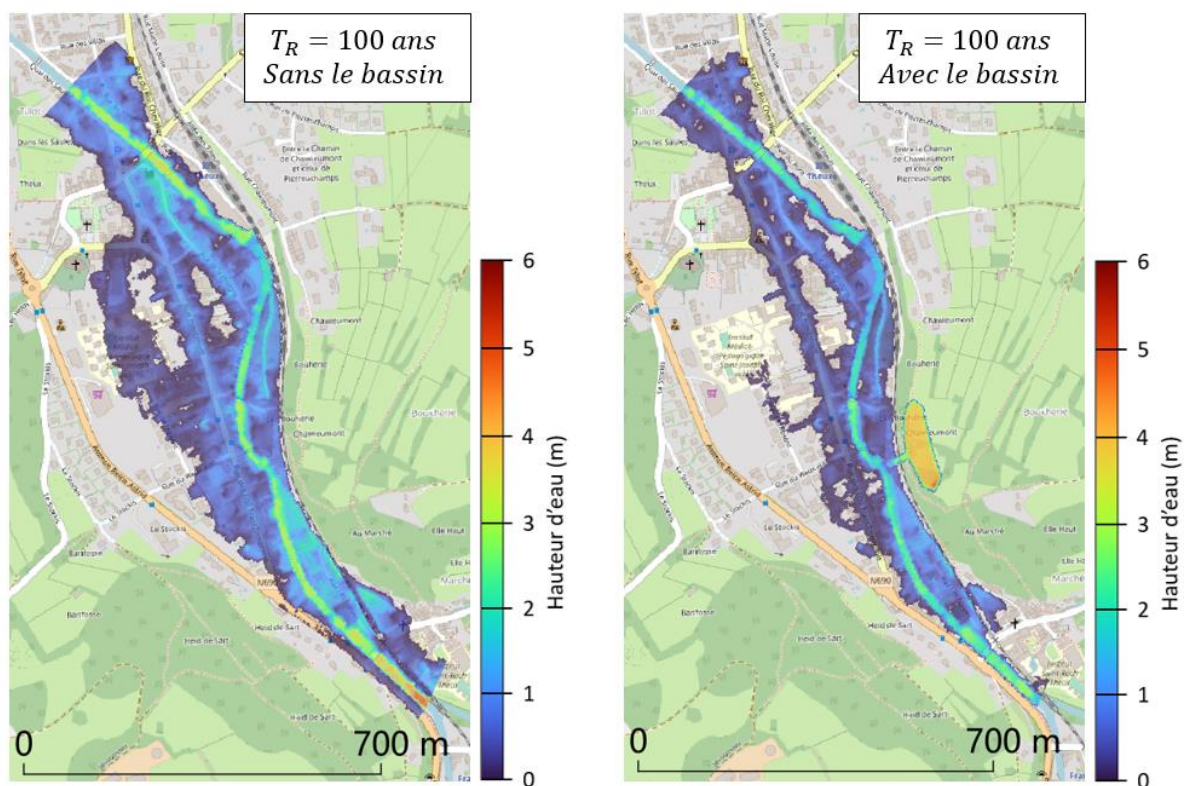


Figure 113 : Etendue des inondations et hauteurs d'eau calculées pour l'hydrogramme synthétique d'une période de retour de 100 ans sans bassin (à gauche) et avec le bassin dans Theux (à droite).

En revanche, l'hydrogramme associé à une période de retour de 200 ans nécessite une quantité d'eau trop importante à stocker pour éviter le débordement. En effet, 484 000 m^3 d'eau débordent, et même la zone d'expansion de crues en amont de Theux ne serait pas en mesure de retenir un tel volume d'eau. Cependant, ce type d'aménagement pourrait considérablement limiter les dommages en ayant la capacité de stocker environ un tiers du volume nécessaire. Les résultats de la simulation en appliquant cet hydrogramme dans le modèle avec le bassin à Theux sont illustrés sur la Figure 114. Une fois encore, l'efficacité d'un tel bassin de stockage est clairement visible. Cela nous amène à imaginer l'impact encore plus significatif qu'aurait la zone d'expansion de crues en amont de Theux.

MESURES DE PROTECTION

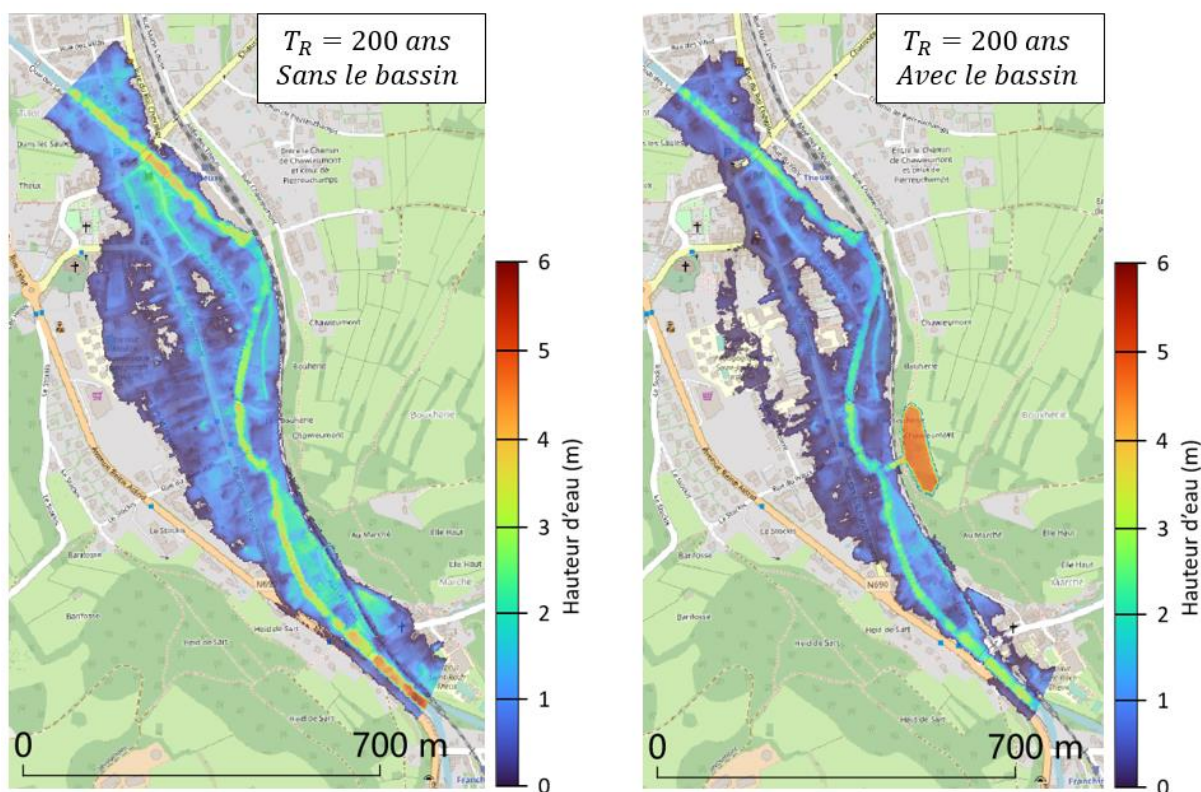


Figure 114 : Etendue des inondations et hauteurs d'eau calculées pour l'hydrogramme synthétique d'une période de retour de 200 ans sans bassin (à gauche) et avec le bassin dans Theux (à droite).

Enfin, il est important de souligner que les données de l'IRM sont basées sur les précipitations antérieures à l'événement de juillet 2021. Par conséquent, les hydrogrammes construits pour différentes périodes de retour pourraient différer si les données liées aux précipitations de juillet 2021 étaient incluses. En effet, cet événement exceptionnel aurait pour conséquence d'augmenter l'intensité des pics de débit de chaque hydrogramme pour une période de retour donnée.

En résumé, bien que les précipitations de juillet 2021 aient causé d'importants dégâts, la Hoëgne est en mesure de rester dans son lit lors de pluies d'une période de retour allant jusqu'à 50 ans. De plus, en combinant cette capacité avec la zone d'expansion de crues en amont de Theux présentée précédemment, elle pourrait même éviter de déborder à Theux lors de pluies ayant une période de retour de 100 ans.

5.5 Conclusions sur les mesures de protection

En conclusion de cette section traitant des mesures de protection, un récapitulatif de la situation et des solutions envisagées, ainsi que des actions concrètes qui sont proposées par le gouvernement, est présenté.

MESURES DE PROTECTION

Tout d'abord, il est clair que la construction d'un bassin artificiel dans la ville de Theux est une option peu réalisable en raison du relief. Cependant, cette idée a été bénéfique pour mettre en évidence l'impact positif du stockage d'eau sur l'étendue et les hauteurs d'eau lors des inondations.

Ensuite, la proposition d'utiliser des digues pour créer une zone d'expansion de crues en amont de Theux semble plus réaliste. Cette approche permet de retenir davantage d'eau tout en minimisant les travaux nécessaires. Bien que cet aménagement ne soit pas suffisant pour prévenir les débordements lors d'événements similaires à celui de juillet 2021, il a néanmoins le potentiel de considérablement réduire l'étendue et les hauteurs d'eau, comme l'a démontré la modélisation du bassin à Theux d'une capacité inférieure. De plus, étant donné le caractère rare, voire très rare, des intempéries de juillet 2021, la probabilité de leur récurrence est très faible. Par ailleurs, la zone d'expansion de crues pourrait empêcher les débordements de la Hoëgne même en cas de pluies présentant une période de retour supérieure à 100 ans. Cependant, malgré les avantages apparents de cette solution, des risques doivent être pris en compte. La question de la submersion des digues est cruciale. Il serait nécessaire de déterminer le débit qui entraînerait leur submersion. Dans cette optique, deux options sont envisageables : concevoir les digues pour qu'elles soient submersibles et analyser les conséquences d'une telle submersion, ou les dimensionner pour qu'elles restent insubmersibles. Cependant, cette dernière approche comporte des limites, nécessitant la définition de la plage de débit jusqu'à laquelle elles resteraient insubmersibles.

L'objectif de zéro débordement face à des événements de l'ampleur de juillet 2021 semble difficile à atteindre. Cependant, des mesures peuvent être prises pour viser des niveaux d'eau acceptables dans les rues. Réduire les hauteurs d'eau est essentiel pour minimiser les dégâts. Les résultats de la simulation avec le bassin à Theux (voir Figure 98) suggèrent qu'obtenir une hauteur d'eau maximale dans les rues de 1 à 2 mètres semble réalisable. Pour y parvenir, une simulation sur un maillage plus étendu en amont de Theux en modélisant les digues pourrait être envisagée. Si nécessaire, d'autres bassins naturels pourraient également être prévus ailleurs dans le bassin versant de la Hoëgne, renforçant ainsi la capacité de réduction des inondations.

En plus des zones d'expansion de crues pour ralentir et stocker l'eau, d'autres mesures compensatoires pourraient être adoptées à Theux et en amont pour ralentir l'écoulement et éviter les dégâts supplémentaires dus à l'érosion et aux coulées de boue. Dans la ville, des solutions telles que les chaussées poreuses et les puits d'infiltration pourraient être mises en place pour favoriser l'infiltration des eaux de pluie. En amont, des actions comme la plantation de haies pour ralentir le ruissellement et l'installation d'obstacles dans les cours d'eau, telles que des diguettes, pourraient être envisagées. Ces mesures compensatoires sont tout à fait compatibles avec la zone d'expansion de crues proposée. C'est en multipliant tous ces aménagements que Theux luttera au mieux contre les inondations.

MESURES DE PROTECTION

En dernier lieu, le gouvernement élabore progressivement des propositions de solutions et d'aménagements. À la fin de septembre 2022, le journal "Vedia" a rapporté que le conseil communal envisageait la transformation de la piscine communale et de trois maisons voisines en une zone submersible (Yvens, 2022).

Cette initiative se concentre sur un emplacement situé juste après la confluence entre le Wayai et la Hoëgne, à proximité d'un rétrécissement du cours d'eau, comme illustré sur la Figure 115. Ce projet viserait à créer une zone inondable d'environ 700 m², représentant une superficie limitée pour le stockage d'eau. Néanmoins, cette démarche permettrait d'éviter la reconstruction de résidences ou de la piscine à un emplacement particulièrement exposé aux risques d'inondation. De plus, pour certaines pluies, cette petite zone submersible pourrait potentiellement avoir un impact significatif.

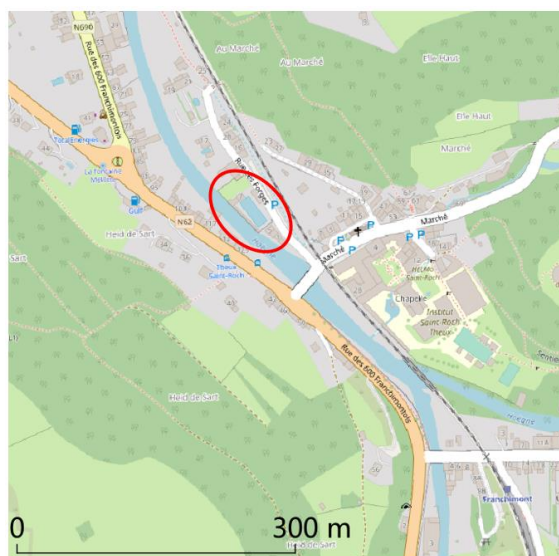


Figure 115 : Transformation de la zone entourée en rouge en une zone submersible. Cette zone se trouve juste après la confluence entre la Hoëgne et Wayai et au niveau d'un rétrécissement de la Hoëgne.

Le journal "Vedia" a également parlé d'un projet d'envergure dans un article daté du 4 juillet 2023 (Michel, 2023). Ce projet, prévu pour débuter en 2024, est issu d'une collaboration multidisciplinaire regroupant des experts en hydraulique, hydrologie et environnement. L'initiative envisage de retracer le parcours de la Hoëgne au cœur même de Theux, une zone particulièrement vulnérable aux inondations. L'objectif majeur de ce projet consiste à réaménager le cours de la rivière en créant des méandres, permettant ainsi de contrôler tout débordement potentiel du côté droit de la Hoëgne et de restaurer la naturalité des berges du côté gauche. Pour ce faire, des travaux sont prévus pour déplacer le lit de la Hoëgne de 20 à 30 mètres en direction de la ligne de chemin de fer, s'étendant du pont de la Buxherie à la caserne, comme illustré sur la Figure 116. Cette modification vise à protéger les résidents de Theux contre des événements ayant une période de retour de 50 ans.

MESURES DE PROTECTION

Le tronçon sélectionné pour ces travaux correspond à la zone où les premiers débordements avaient été identifiés dans les simulations hydrauliques menées dans le cadre de ce travail, touchant notamment la rue de la Hoëgne. De nouveau, ce projet pourrait être complémentaire à la proposition de la zone d'expansion de crues en amont de Theux, abordée dans ce travail. Une combinaison de ces deux solutions pourrait être intégrée dans le modèle hydraulique.

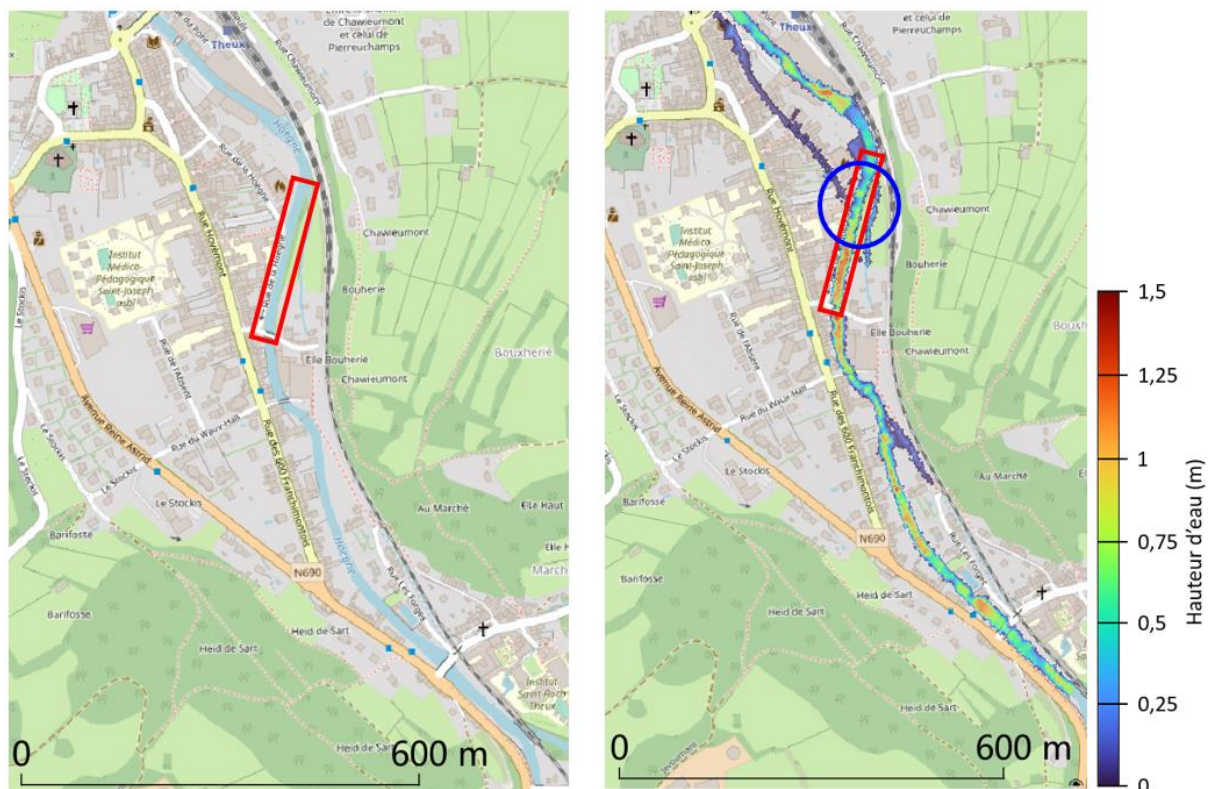


Figure 116 : Projet de déplacer le lit de la Hoëgne de 20 à 30 mètres sur le tronçon encadré en rouge vers la ligne de chemin de fer. L'image de droite illustre les premiers débordement (en bleu) de la simulation en juillet 2021.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

6 Conclusions et perspectives

Dans cette dernière section de l'étude, les conclusions qui en découlent sont mises en évidence. De plus, plusieurs perspectives pour d'éventuelles améliorations et développements futurs sont proposées.

Les objectifs initiaux de ce travail consistaient à analyser les inondations dans la commune de Theux et à explorer des solutions potentielles pour réduire les risques associés. Pour répondre à ces questions, diverses étapes importantes ont été entreprises, impliquant des prises de décisions et des hypothèses.

En premier lieu, le contexte à Theux a été dressé pour mettre en évidence les enjeux liés à la situation de cette commune sur l'écoulement de l'eau, sur le bassin versant et dans la ville. Cette mise en perspective préliminaire a permis de mettre en évidence des éléments clés avant d'entamer l'étude proprement dite.

Par la suite, un bref aperçu d'études similaires ainsi que des modèles utilisés ont été fournis pour mieux comprendre les similitudes et les différences avec ce travail présent. Cette section a permis de choisir de manière éclairée les modèles appropriés. On peut noter que les travaux précédents se concentraient généralement sur des études hydrologiques de bassins versants ou sur des analyses hydrauliques de zones étendues. Ce mémoire se distingue en combinant un modèle hydrologique et un modèle hydraulique pour caractériser différents épisodes pluvieux dans une zone restreinte, en vue de proposer des solutions d'atténuation des inondations.

Ensuite, les divers modèles utilisés ont été décrits et appliqués tout en tenant compte des simplifications inhérentes à leur utilisation. Le calibrage du modèle hydrologique et du modèle hydraulique a été réalisé à l'aide de données disponibles sur l'épisode pluvieux de juillet 2021, en tenant compte d'autres études et de témoignages.

Finalement, l'application du modèle hydrologique et du modèle hydraulique a permis de démontrer comment un bassin de rétention pourrait influencer l'étendue et les hauteurs d'eau pour divers épisodes pluvieux. Sur cette base, une proposition de zone d'expansion de crues a été avancée pour atténuer les effets des pluies avec une période de retour allant jusqu'à 100 ans, en retenant l'eau en amont de Theux à l'aide de digues. Bien que ce bassin ne puisse pas prévenir totalement les débordements en cas d'événements similaires à juillet 2021, il pourrait significativement réduire le niveau de l'eau dans la ville. Ces solutions peuvent être associées aux mesures gouvernementales en cours de déploiement. Il est évident que des mesures préventives et de gestion des inondations doivent également être prises pour permettre aux résidents de réagir efficacement lors d'événements de crue.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Alors que ce travail de fin d'études touche à sa conclusion, il ouvre la porte à de nouvelles perspectives et opportunités pour affiner et compléter cette recherche.

Tout d'abord, une amélioration majeure pourrait consister à modéliser les murets des berges de la Hoëgne dans le modèle hydraulique, en utilisant des données d'observation sur place, par exemple. Cela permettrait une meilleure représentation de la réalité et éliminerait les débordements fictifs du cours d'eau dans la simulation. Ainsi, le moment du débordement simulé pour les inondations de juillet 2021 devrait être retardé pour mieux correspondre à la réalité.

Ensuite, l'effet des bâtiments pourrait être intégrée au modèle hydraulique. Une approche consisterait à attribuer un coefficient de Manning plus élevé aux cellules du maillage situées en dehors du lit mineur. Cela ralentirait l'écoulement autour des bâtiments dans les rues de Theux, correspondant davantage à la réalité. Une autre approche consisterait à modéliser les bâtiments de la zone inondée mais cela demanderait beaucoup de temps.

Il pourrait également être pertinent d'ajouter les débits des cours d'eau se déversant dans la Hoëgne à Theux, afin de déterminer leur influence sur le débit global.

Par ailleurs, l'extension de la zone modélisée par le modèle hydraulique en amont permettrait d'inclure la zone d'expansion de crues en amont de Theux proposé, offrant une visualisation concrète de son efficacité. Bien que cela exigerait plus de temps de calcul, cette extension resterait gérable compte tenu de la taille du maillage.

Une autre piste à explorer serait l'évaluation de l'effet de cette zone d'expansion de crues sur les villes en aval de Theux. Cette démarche nécessiterait une extension de la zone modélisée vers l'aval jusqu'au village concerné, suivi de l'application du modèle hydraulique en incluant la zone d'expansion de crues modélisée. Une telle simulation nécessiterait davantage de temps de calcul, mais cela pourrait être envisagée avec des ordinateurs plus performants.

Enfin, il serait intéressant d'affiner les statistiques des données pluviométriques de l'IRM en tenant compte de l'événement de juillet 2021. Cela permettrait de construire de nouveaux hydrogrammes synthétiques prenant en compte cet événement exceptionnel, puis de les introduire dans le modèle hydraulique pour évaluer leur impact sur l'étendue et les hauteurs d'eau.

Pour conclure, ce mémoire a permis de proposer une solution potentielle pour réduire l'exposition des habitants de Theux aux risques d'inondation. Il a également, et surtout, ouvert de nouvelles perspectives de recherche pour progresser vers cet objectif.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Archambeau et al., P. (s.d.). Modélisation numérique et gestion du risque inondation en milieu urbain sur base de modèles topographiques à haute résolution.
- Archambeau, P. (2006). Contribution à la modélisation de la genèse et de la propagation des crues et inondations.
- Areas. (2013). Notions de base en hydrologie et modélisation de bassin versant.
- Biancamaria, S. (2009). *ResearchGate*.
- Boulay, E. (2011). Etude et modélisation des phénomènes karstiques du bassin versant du Rognon.
- Brabant, F. (2021). *Mémoires vives*. Bruxelles, Belgique: Wilfried.
- Cirkwi. (s.d.). *La fenêtre de Theux*.
- Deraedt et al., D. (2014). Représentation du couvert forestier dans la modélisation hydrologique : comparaison de dix modèles (synthèse bibliographique).
- Elio Di Rupo Ministre-Président. (2022). *Inondations de juillet 2021 : Bilan et perspectives*.
- Futura-sciences. (s.d.). *La Malaisie frappée par ses « pires inondations depuis 5 décennies »*.
- Granja, J. (2016). *XPSolutionsMedia by Innovyze*. Consulté le 18 mai 2023, sur <https://www.youtube.com/watch?v=J3qpkAtwu5M>
- HydroSciences Montpellier. (2020). Modélisation pluie-débit distribuée avec le logiciel ATHYS - Application au Gardon à Anduze.
- HydroSciences Montpellier. (s.d.). *ATelier HYdrologique Spatialisé*. Consulté le 8 mai 2023, sur <http://www.athys-soft.org/>
- Institut Royal Météorologique (IRM). (s.d.). *Le climat dans votre commune*. Consulté le 25 mai 2023, sur <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/climat-dans-votre-commune>
- L'avenir.net. (s.d.). *Heure par heure, ce qui s'est passé lors des inondations en Wallonie en juillet 2021*.
- Lequien, A. (2003). Analyse et évaluation des crues extrêmes par modélisation hydrologique spatialisée : cas du bassin versant du Vidourle.
- Lerat, J. (2009). Quels apports hydrologiques pour les modèles hydrauliques ? Vers un modèle intégré de simulation des crues.
- Michel, A. (2023). Le lit de la Hoëgne déplacé de 20 à 30 mètres au centre de Theux. *Vedia*.
- Ministère de l'Environnement. (s.d.). Evaluation quantitative du ruissellement.
- OpenAI. (s.d.). *ChatGPT*. Consulté le 2 août 2023, sur <https://chat.openai.com/>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Perrin, C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'un approche comparative.
- QGIS. (s.d.). Consulté le 6 mai 2023, sur <https://www.qgis.org/fr/site/index.html#>
- Rentschler et al., J. (2020). *1,47 milliard de personnes sont exposées à un risque d'inondation, et plus d'un tiers d'entre elles à des catastrophes aux effets dévastateurs.*
- Rossignol, H. (s.d.). *Vortex eau petit*. Consulté le 19 mai 2023, sur <https://osteo.bzh/biokinergie/vortex-eau-petit/>
- RTBF. (2020). Connaissez-vous les noms des cours d'eau de votre commune ?
- Ryckmans, C. (2021). Influence des contraintes turbulentes dans un écoulement à lit composé : implémentation du modèle k-e.
- Salesses, M. (2022). Élaboration d'un modèle hydrologique conceptuel et parcimonieux pour l'étude de l'impact du changement climatique sur les crues extrêmes en région méditerranéenne française : application au bassin-versant de l'Orbieu (Aude-11). *HAL Open Science*.
- Scarwell, H.-J., & Laganier, R. (2004). Risque d'inondation et aménagement durable des territoires.
- Service Public de Wallonie. (s.d.). *SPW*. Consulté le 29 octobre 2022, sur <https://spw.wallonie.be/>
- Soares Frazao, S. (s.d.). Analysis and mitigation of floods.
- Soares Frazao, S. (s.d.). Finite-volume resolution of the Saint-Venant shallow-water equations.
- Soares Frazao, S. (s.d.). Numerical simulation of transient flow.
- Stucky. (2021). Analyse indépendante sur la gestion des voies hydrauliques lors des intempéries de la semaine du 12 juillet 2021.
- SudInfo. (2021). Inondations : l'administration wallonne chargée des barrages publie ses données. *SudInfo*.
- Topographic-map. (s.d.). *Carte topographique Liège*. Consulté le 21 juillet 2023, sur <https://fr-be.topographic-map.com/map-vt6/Li%C3%A8ge/?center=50.53578%2C5.72204&zoom=10>
- Vegas Galdos, F. (2006). Application d'un modèle hydrologique global à un bassin versant de haute montagne tropicale (Cordillère Blanche - Pérou).
- Villiers, C. (2023). *De plus en plus de tempêtes et d'inondations au 21e siècle*.
- Vilmos, R. (2021). *Les inondations catastrophiques de juillet 2021*.
- Wikipédia. (s.d.). *Theux*. Consulté le 21 juillet 2023, sur <https://fr.wikipedia.org/wiki/Theux>
- XPSolutionsMedia. (2016). *Modélisation Hydraulique 1D et 2D Introduction*. Consulté le 18 mai 2023, sur <https://www.youtube.com/watch?v=J3qpkAtwu5M>

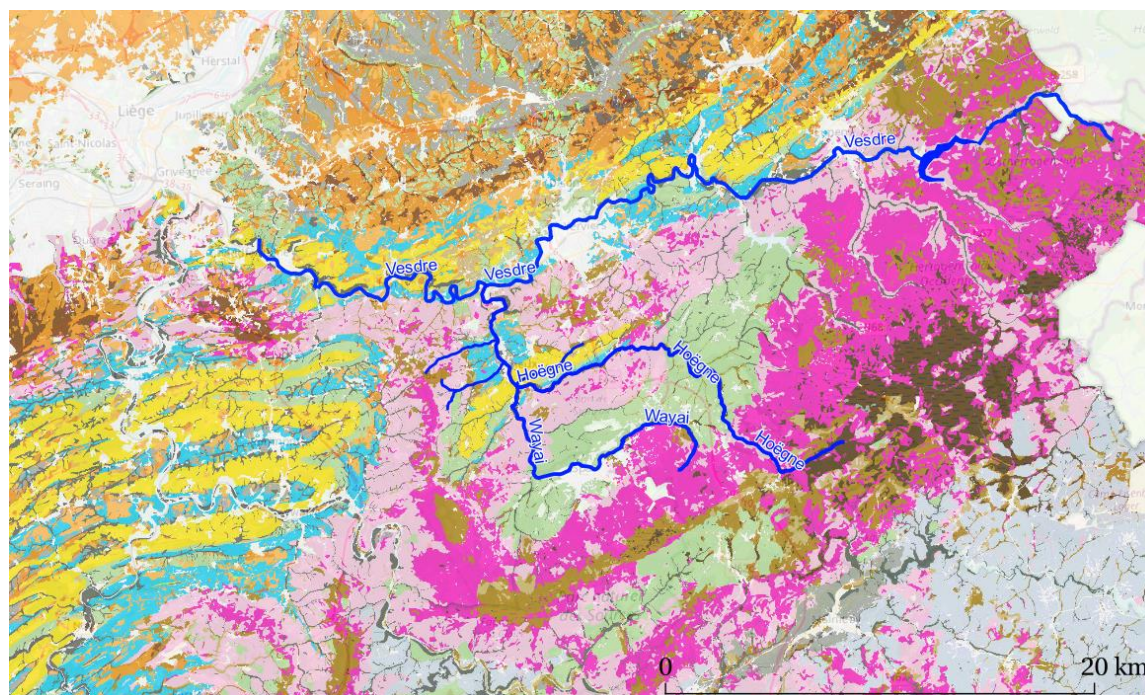
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Yvens, M. (2022). Theux : un plan B sur la table pour reconstruire la piscine. *Vedia*.

Zech, Y. (2022). Présentation QGIS-ATHYS.

ANNEXES

A. Carte de types de sols avec légende complète

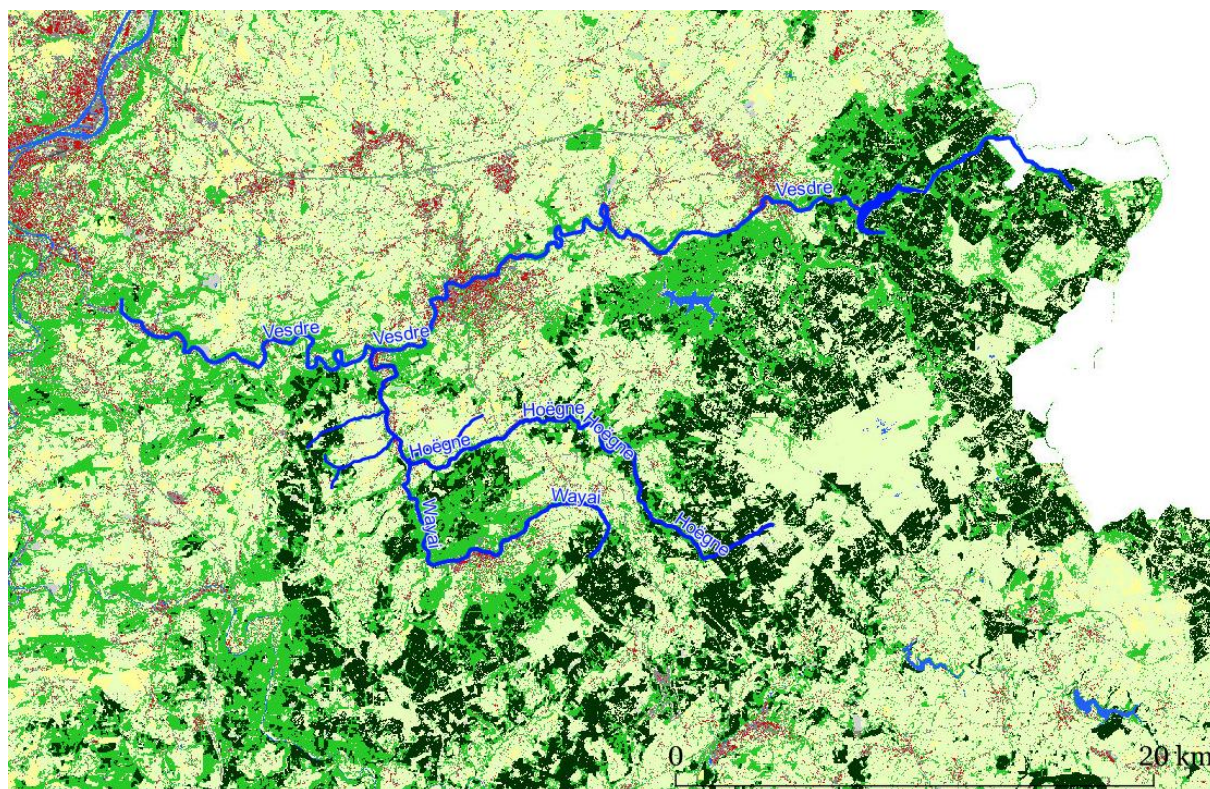


- Sols tourbeux ou tourbières
- Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif
- Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel principalement modéré ou imparfait
- Sols sablo-limoneux à drainage naturel principalement favorable
- Sols sablo-limoneux à drainage naturel principalement modéré ou imparfait
- Sols limoneux à drainage naturel favorable
- Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait
- Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre
- Sols argileux à drainage naturel favorable à imparfait
- Sols argileux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre
- Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable
- Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel principalement modéré à assez pauvre
- Sols limono-caillouteux à charge schisto-phylleuse et à drainage naturel quasi-exclusivement favorable
- Sols limono-caillouteux à charge schisto-gréseuse ou gréseuse et à drainage naturel favorable
- Sols limono-caillouteux à charge schisto-gréseuse ou gréseuse et à drainage naturel modéré à assez pauvre
- Sols limono-caillouteux à charge schisteuse et à drainage naturel principalement favorable
- Sols limono-caillouteux à charge psammitique ou schisto-psammitique et à drainage naturel principalement favorable
- Sols limono-caillouteux à charge calcaire ou contenant du calcaire et à drainage naturel quasi-exclusivement favorable
- Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable
- Sols limono-caillouteux à charge de grès calcaire ou de grès argilo-calcaire et à drainage naturel favorable à imparfait
- Sols limono-caillouteux à charge crayeuse et à drainage naturel favorable
- Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocailleux

Figure 117 : Carte de types de sols du bassin de la Vesdre.

ANNEXES

B. Carte des occupations du sol avec légende complète



- 1_Classes avec couvert végétal
 - Couvert herbacé en rotation dans l'année (ex: culture annuelle)
 - Couvert herbacé toute l'année
 - Résineux (> 3m)
 - Feuillus (> 3m)
 - Résineux (≤ 3m)
 - Feuillus (≤ 3m)
- 2_Terrains naturels
 - Sols nus
 - Eaux de surface
- 3_Classes sans couvert végétal
 - Revêtement artificiel au sol
 - Réseau ferroviaire
- 4_Construction artificielles
 - Constructions artificielles hors sol

Figure 118 : Carte des occupations du sol du bassin de la Vesdre.

ANNEXES

C. Tableau d'estimation du paramètre S de la fonction de production SCS

Milieu rural

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

Milieu urbain

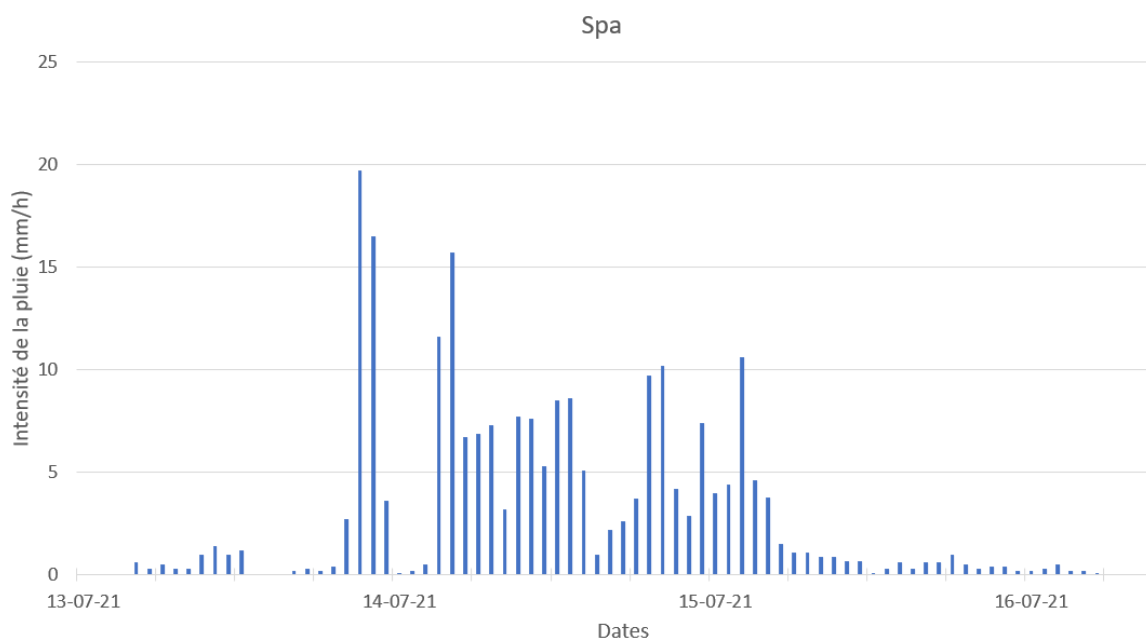
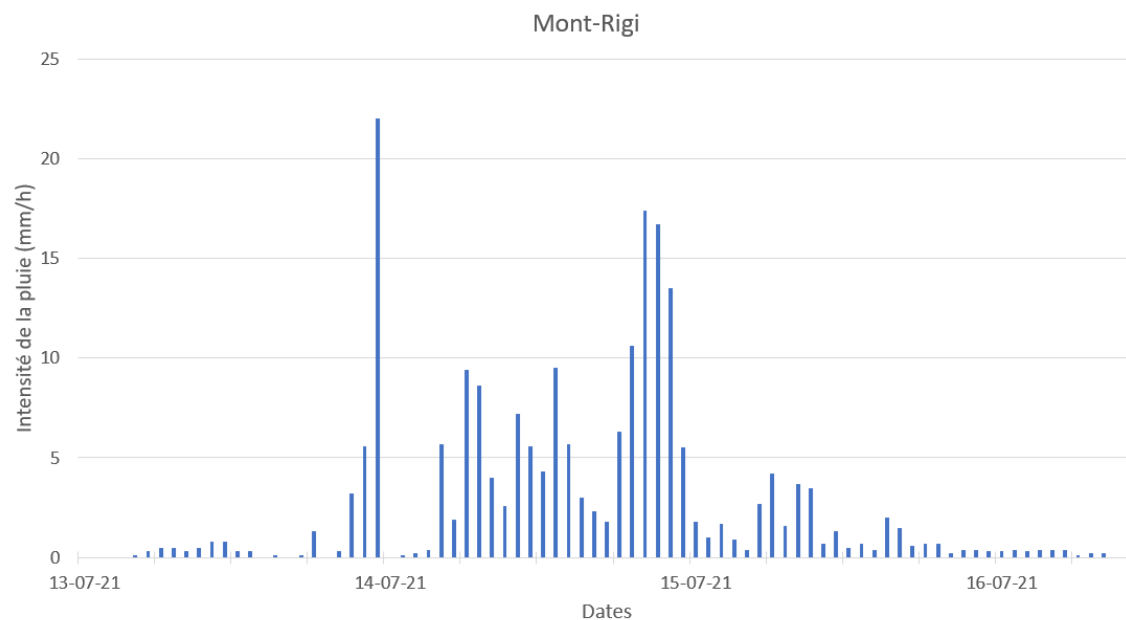
Couverture		Capacité de stockage (mm) par type hydrologique de sol			
		A	B	C	D
Espaces ouverts (parc, etc.)	Espaces verts < 50 %	120	68	41	31
	Espaces verts 50 ... 75 %	264	114	68	48
	Espaces verts > 75 %	397	162	89	64
Surfaces imperméables	Parkings, toitures	5	5	5	5
	Asphaltées	5	5	5	5
Rues et routes	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 m² (65 % imperméable)	76	45	28	22
	Parcelles de 500 à 1000 m² (38 % imperméable)	162	85	52	38
	Parcelles de 1000 à 1350 m² (30 % imperméable)	192	99	60	41
	Parcelles de 2000 m² (25 % imperméable)	216	109	64	45
	Parcelles de 4000 m² (20 % imperméable)	244	120	68	48
	Parcelles de 8000 m² (12 % imperméable)	298	137	76	56

- Conditions hydrologiques des surfaces cultivées
 - Mauvaises : cultures en ligne, pas de travail de conservation des sols
 - Bonnes : rotation des cultures, travail de conservation des sols
- Types hydrologiques de sol
 - A : Sable > 90 % - Argile < 10 %
 - B : Sable 50 à 90 % - Argile 10 à 20 %
 - C : Sable < 50 % - Argile 20 à 40 %
 - D : Argile > 40 % - Couche imperméable à moins de 50 cm de la surface

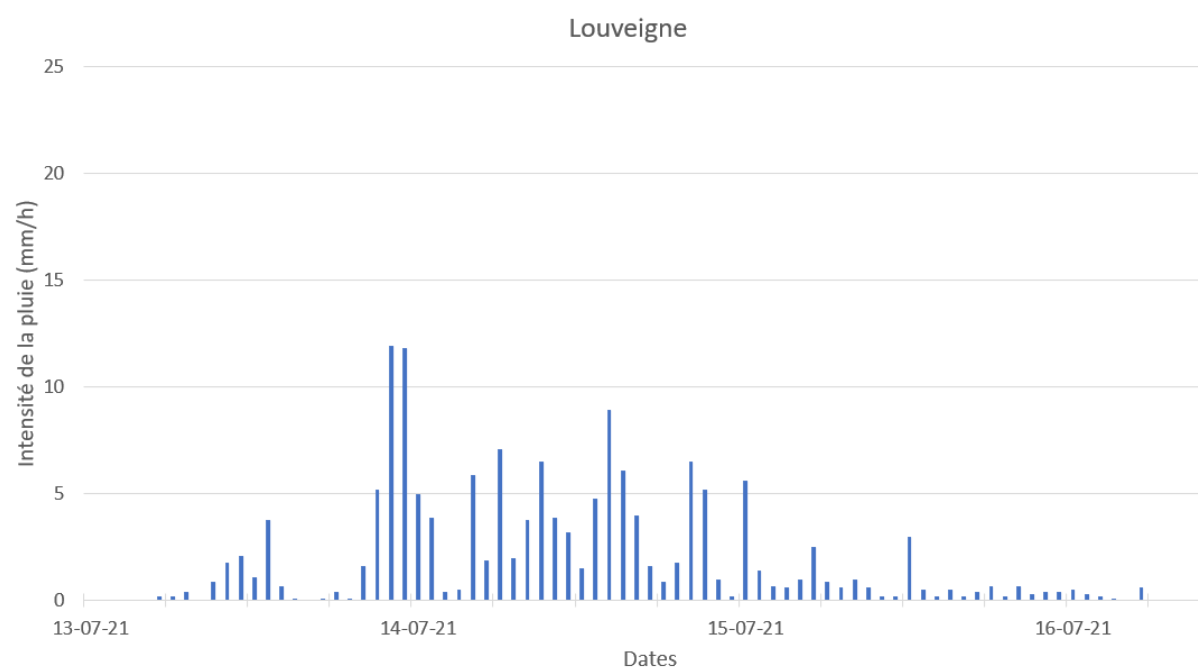
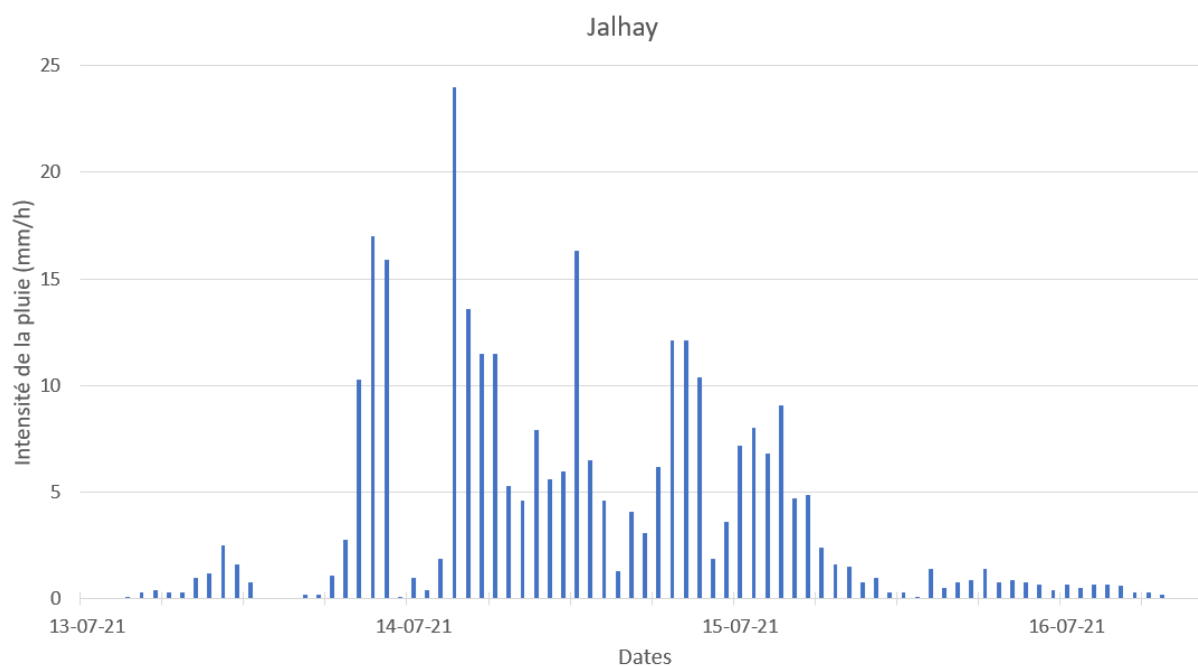
Figure 119 : Tableau d'estimation du paramètre S de la fonction de production SCS.

ANNEXES

D. Intensité des précipitations du 13 juillet 2021 au 17 juillet 2021
mesurées par le SPW



ANNEXES



ANNEXES

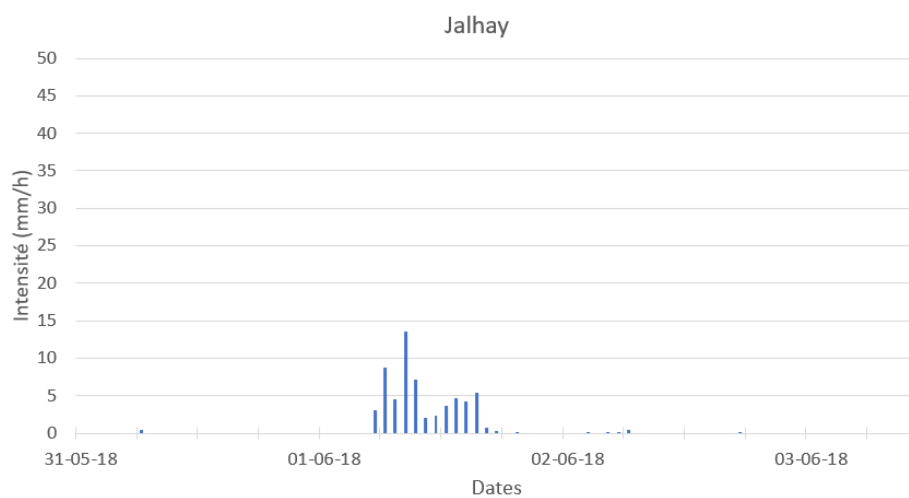
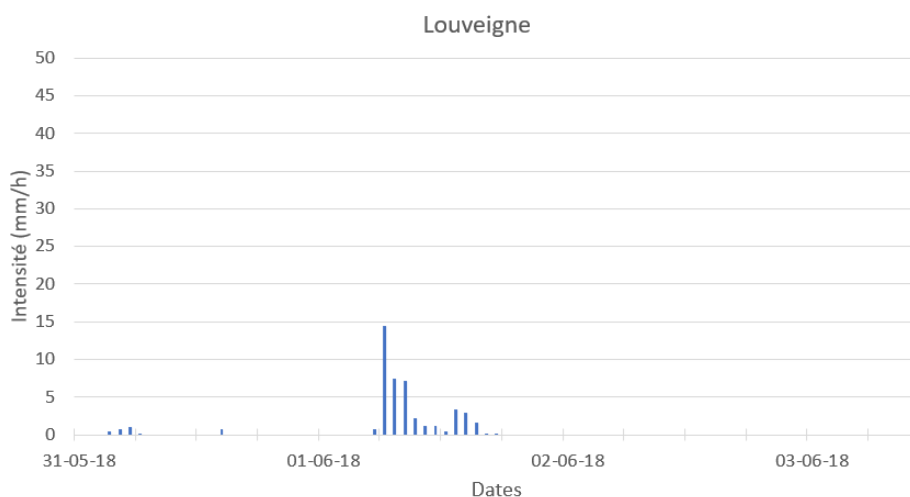
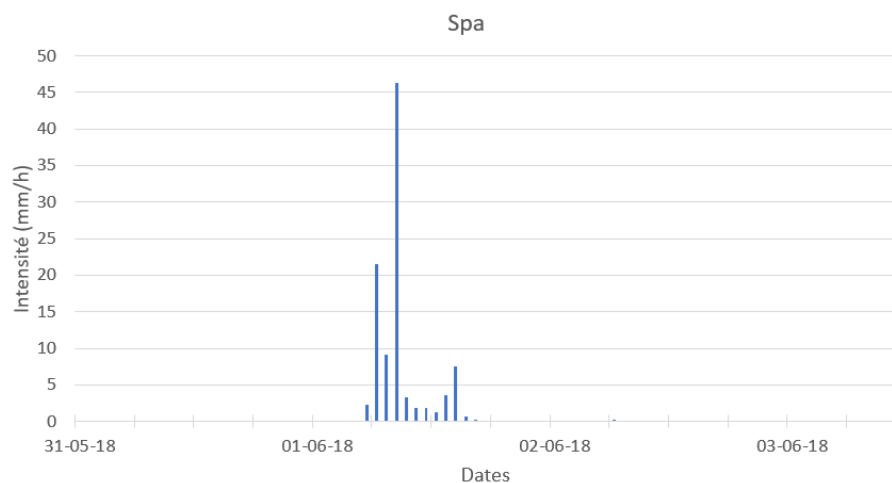
E. Tableau des rugosités de Manning exprimées en $s/m^{1/3}$

Valeurs du coefficient n de Manning

Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
A) Canaux artificiels				
Ciment lissé	0,01	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,01	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moëllons bruts	0,017	0,02	0,025	0,03
Pierres sèches	0,025	0,03	0,033	0,035
Moëllons dressés	0,013	0,014	0,015	0,017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisse	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre droits et uniformes	0,017	0,020	0,0225	0,025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0,035	0,040	0,045	-
Canaux en terre à larges méandres	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre dragués	0,025	0,0275	0,030	0,033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0,028	0,030	0,033	0,035
B) Cours d'eau naturels				
1) Propres, rives en ligne droite	0,025	0,0275	0,030	0,033
2) Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0,030	0,033	0,035	0,040
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0,035	0,040	0,045	0,050
4) Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0,040	0,045	0,050	0,055
5) Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0,033	0,035	0,040	0,045
6) Idem 4, avec pierres	0,045	0,050	0,055	0,060
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0,050	0,060	0,070	0,080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0,075	0,100	0,125	0,150

ANNEXES

F. Hyétogrammes sur chaque pluviomètre de l'évènement de juin 2018



ANNEXES

G. Données et résultats de l'étude du bureau Stucky (Stucky, 2021)

Station	Code	Rivière	Bassin Versant	Qh_pic [m3/s]				
				Mesure station	Mesure reconstituée	Laisse de crue	Méthode rationnelle	Rapport Uni. Liège
TARGNON	66711002	Amblève	Amblève	484				-
STAVELOT	67321002	Amblève	Amblève	261				-
LASNENVILLE	67531002	Amblève	Amblève	70				-
MARTINRIVE	66211002	Amblève	Amblève	661		614		-
VISE	54511002	Basse Meuse	Meuse	2550	3078			-
LIXHE Aval	54361002	Basse Meuse	Meuse	3078				-
BOMAL-SUR-OURTHE	L5491	Aisne	Ourthe	116.5				
EREZEE	L6690	Aisne	Ourthe	35.3				
MARCHE-EN-FAMENNE	L7120	Marchette	Ourthe	31.4				
RENSIWE	L7070	Martin-Moulin	Ourthe	33.8				
HAMOIR	L5630	Néblon	Ourthe	21.8				
DURBUY	59531002	Ourthe	Ourthe	379.6				
HOTTON	5962SCC2	Ourthe	Ourthe	374.2				
SAUHEID	58261002	Ourthe	Ourthe	1136	1150.8	200-1000		
NISRAMONT	59911002	Ourthe	Ourthe	226.6				
ANGLEUR (2bis)	580800C2	Ourthe	Ourthe	-	1430			
TABREUX	5921SVC2	Ourthe	Ourthe	542.2	476.5	760		
MOIRCY	L8500	Ourthe Occidentale	Ourthe	12.9				
AMBERLOUP	L6290	Ourthe Occidentale	Ourthe	15.9				
BRIZY	L6550	Ourthe Orientale	Ourthe	13.3				
HOUFFALIZE	L5930	Ourthe Orientale	Ourthe	58.4				
Wyompont	L5950	Ourthe Orientale	Ourthe	60.7				
BISTAIN	L6560	Ruisseau de Rettigny	Ourthe	13.3				
SPRIMONT	L6850	Ruisseau du Laval	Ourthe	32.1				
BAILLONVILLE	L6050	Ruisseau Heure	Ourthe	20.7				
RESTITUTION VESDRE	Stucky	Vesdre	Vesdre	-	196			190
POLLEUR	65171002	Hoëgne	Vesdre	-	228		100	145
BELLEHEID	65261002	Hoëgne	Vesdre	-	106	-	130	60
THEUX	L5860	Hoëgne	Vesdre	-	367	265-650	200	260
FORET	L7600	Magne	Vesdre	43			60	58
BELLEVAUX	L7700	Vesdre	Vesdre	-		420-530	50	
TROOZ	L7720	Vesdre	Vesdre	-		535	400	
VERVIERS	L7150	Vesdre	Vesdre	-		440-575		410
CHAUDFONTAINE Pisc	6228SVC2	Vesdre	Vesdre	-		650		580-660
SPIXHE	L6790	Wayai	Vesdre	-		50-200	150	140

Figure 120 : Synthèse des débits de pointe obtenus par différentes méthodes aux stations de mesures hydrométriques (Stucky, 2021).

ANNEXES

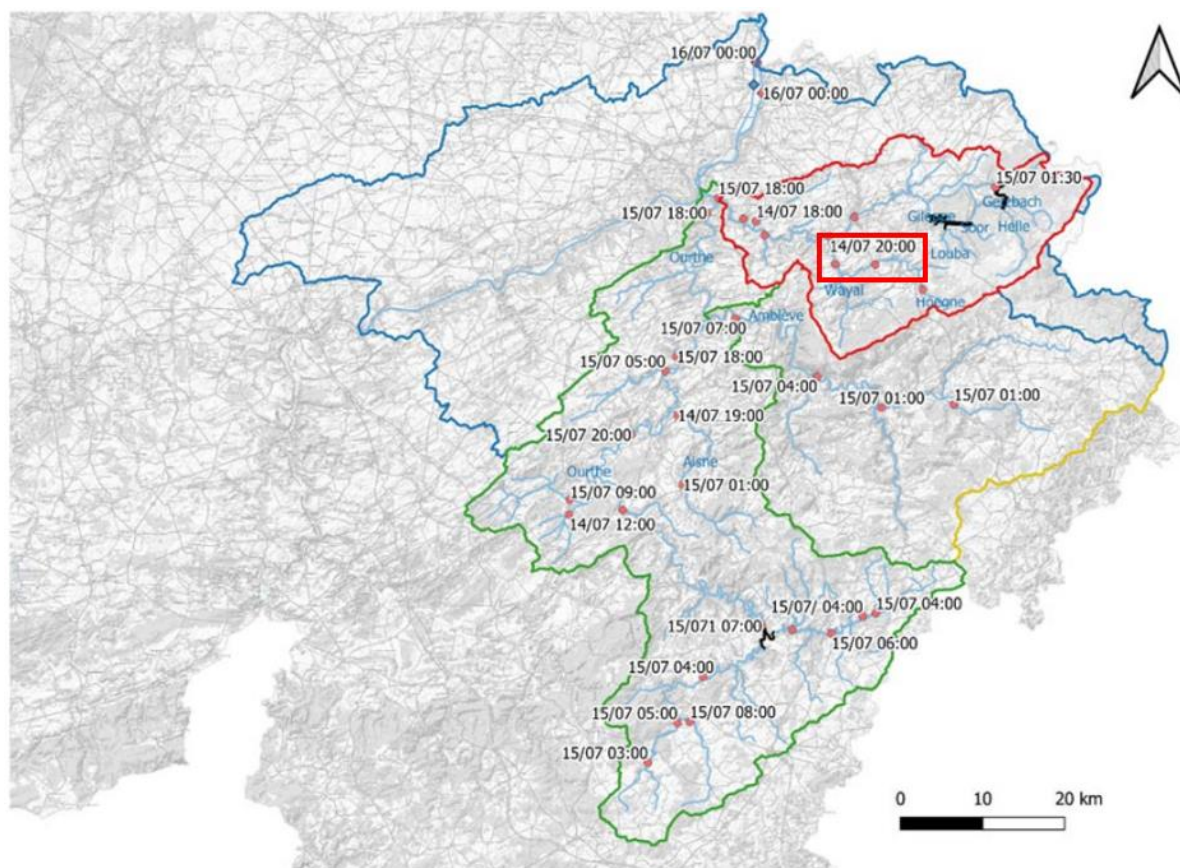


Figure 121 : Date et heure d'enregistrement des débits de pointe mesurés pour les stations de l'Ourthe de l'Amlève et de la Vesdre en juillet 2021 (Stucky, 2021).

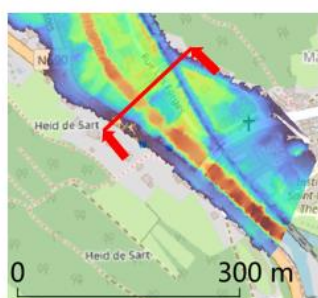
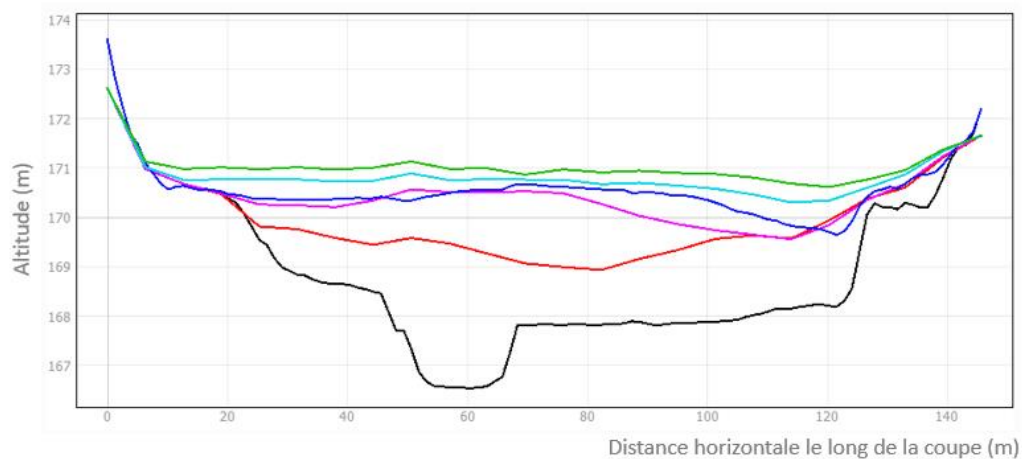
ANNEXES

	Section	Station	Cours d'eau	Date et heure	Débit [m3/s]
DGH	5826005J	Sauheid	Ourthe	14/07/2021 06:48	117.3
	5826005J	Sauheid	Ourthe	16/07/2021 07:44	754.5
	5826005J	Sauheid	Ourthe	16/07/2021 15:26	663.4
	5826005J	Sauheid	Ourthe	17/07/2021 07:09	405.8
	5826005J	Sauheid	Ourthe	18/07/2021 10:12	217.5
	5921000J	Tabreux	Ourthe	13/07/2021 11:14	11.3
	5921004J	Tabreux	Ourthe	16/07/2021 09:11	407.7
	5921000J	Tabreux	Ourthe	17/07/2021 08:19	205.5
	5953002J	Durbuy	Ourthe	13/07/2021 10:12	7.3
	5953002J	Durbuy	Ourthe	15/07/2021 11:33	361.2
	5953006J	Durbuy	Ourthe	18/07/2021 08:51	85.4
	5962000J	Hotton	Ourthe	16/07/2021 12:35	175.5
	5962000J	Hotton	Ourthe	17/07/2021 09:24	107.8
	5991002J	Nisramont	Ourthe	16/07/2021 14:01	98.3
	6021001J	Mabompré	Ourthe orientale	15/07/2021 13:13	94.2
	6122002J	Ortho	Ourthe occidentale	15/07/2021 14:09	94.4
	6122003J	Ortho	Ourthe occidentale	16/07/2021 09:36	54.7
	6228001J	Chaufontaine	Vesdre	14/07/2021 07:37	150.6
	6671000J	Targnon	Amblève	14/07/2021 14:20	113.5
	6671000J	Targnon	Amblève	17/07/2021 10:38	80.6
	6732000J	Stavelot	Amblève	14/07/2021 13:41	64.7
	6803000J	Chevron	Lienne	17/07/2021 12:16	14.7
	6832002J	Trois-Ponts	Salm	17/07/2021 11:15	19.6
DCENN	L6510	Stavelot	Amblève	15/07/2021 09:25	157.2
	L7670	La Gleize	Amblève	15/07/2021 07:00	307.7
	L6070	Trois Ponts	Amblève - Salm	15/07/2021 08:40	90.5
	L5580	Thioux	Amblève - Warche	15/07/2021 11:00	52.7
	L5491	Juzaine	Ourthe - Aisne	22/07/2021 11:00	4.3
	L5930	Houffalize	Ourthe	15/07/2021 12:20	44.7
	L6050	Baillonville	Ourthe	13/07/2021 13:00	0.4
	L6550	Brizy	Ourthe	15/07/2021 11:00	26.6
	L7120	Marche en Famenne	Ourthe	13/07/2021 15:15	0.9
	L6690	Erezée	Ourthe - Aisne	22/07/2021 12:00	1.9
	L7070	Rensiwez	Ourthe - Martin-Moulin	15/07/2021 13:20	24.8
	L6560	Bistain	Ourthe - R. de Rettigny	15/07/2021 11:40	11.1
	L6300	Vieuxville	Ourthe - Ry de Logne	23/07/2021 10:30	0.7
	L7150	Verviers	Vesdre	14/07/2021 13:15	115.2
	L7700	Bellevaux	Vesdre	22/07/2021 15:50	5.6
	L5860	Theux	Vesdre - Hoegne	14/07/2021 11:00	170.7
	L6790	Spixhe	Vesdre - Wayai	14/07/2021 08:40	92.3
	L6790	Spixhe	Vesdre - Wayai	23/07/2021 12:45	1.1

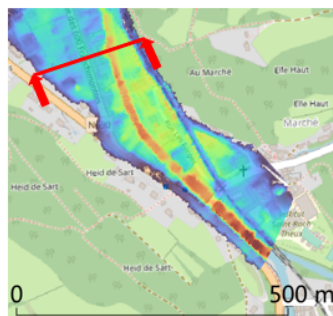
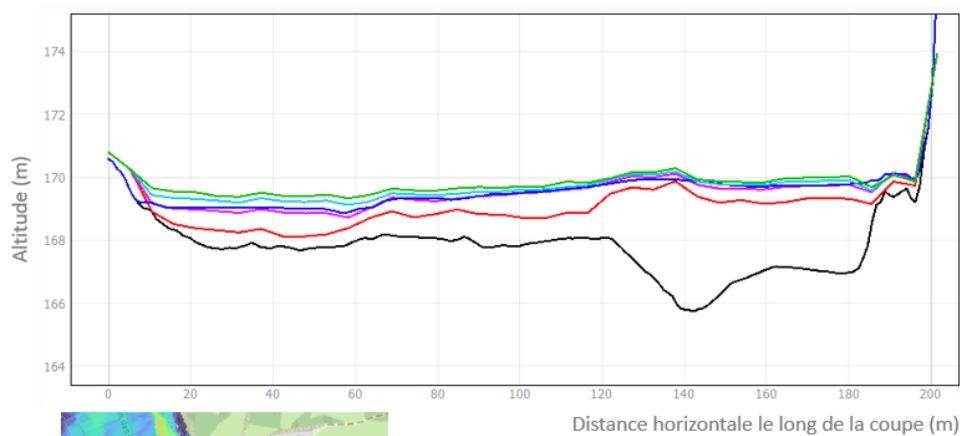
Figure 122 : Jaugeages réalisés par la DGH et la DCENN sur les bassins versants de la Vesdre, de l'Ourthe et de l'Amblève du 13 au 23 juillet 2021.

ANNEXES

H. Résultats des simulations de juillet 2021 pour plusieurs coefficients de Manning

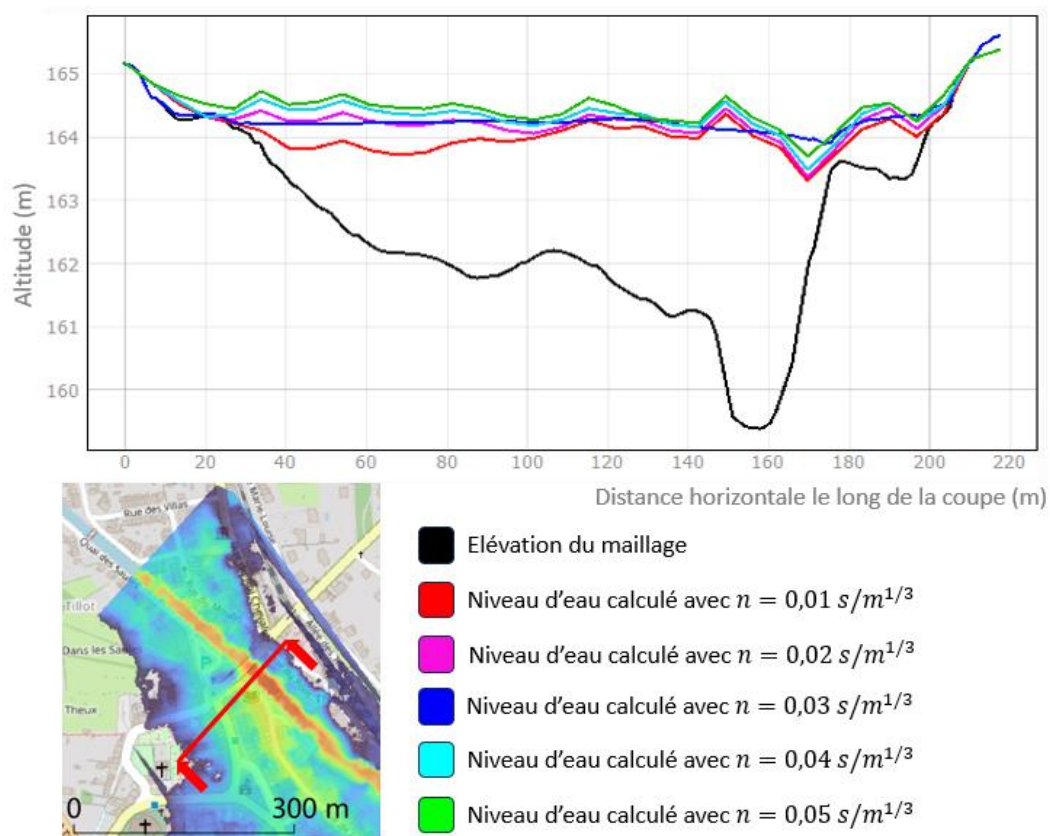
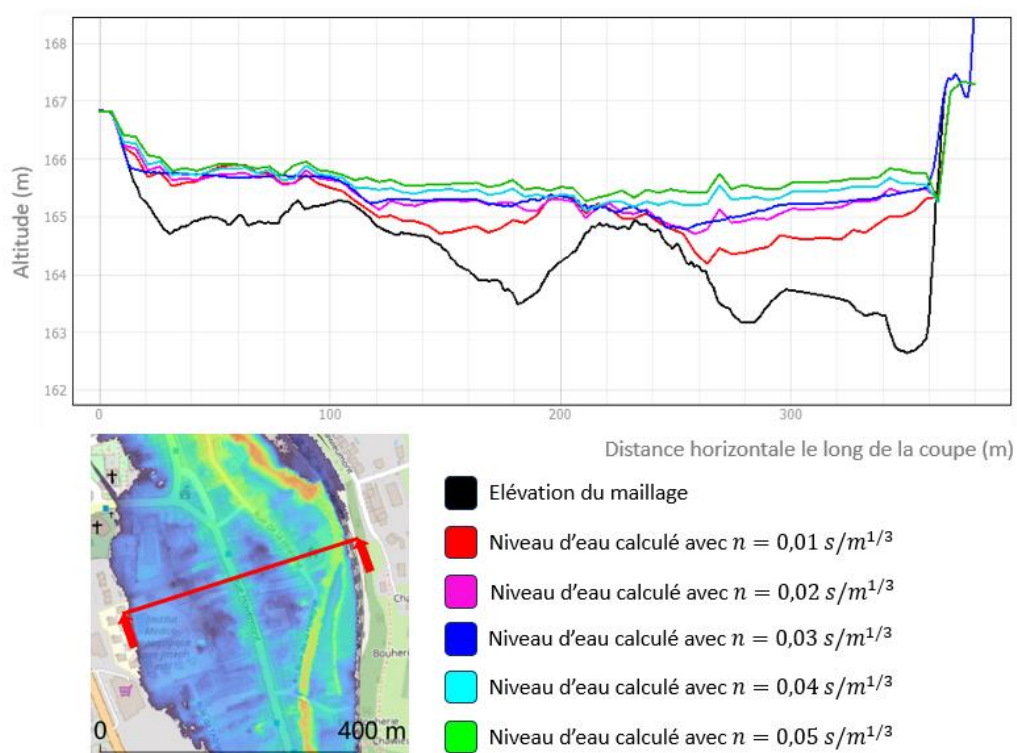


- Elévation du maillage
- Niveau d'eau calculé avec $n = 0,01 \text{ s/m}^{1/3}$
- Niveau d'eau calculé avec $n = 0,02 \text{ s/m}^{1/3}$
- Niveau d'eau calculé avec $n = 0,03 \text{ s/m}^{1/3}$
- Niveau d'eau calculé avec $n = 0,04 \text{ s/m}^{1/3}$
- Niveau d'eau calculé avec $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$



- Elévation du maillage
- Niveau d'eau calculé avec $n = 0,01 \text{ s/m}^{1/3}$
- Niveau d'eau calculé avec $n = 0,02 \text{ s/m}^{1/3}$
- Niveau d'eau calculé avec $n = 0,03 \text{ s/m}^{1/3}$
- Niveau d'eau calculé avec $n = 0,04 \text{ s/m}^{1/3}$
- Niveau d'eau calculé avec $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$

ANNEXES



ANNEXES

I. Résultats des simulations pour les hydrogrammes synthétiques de période de retour de 5 ans et 50 ans

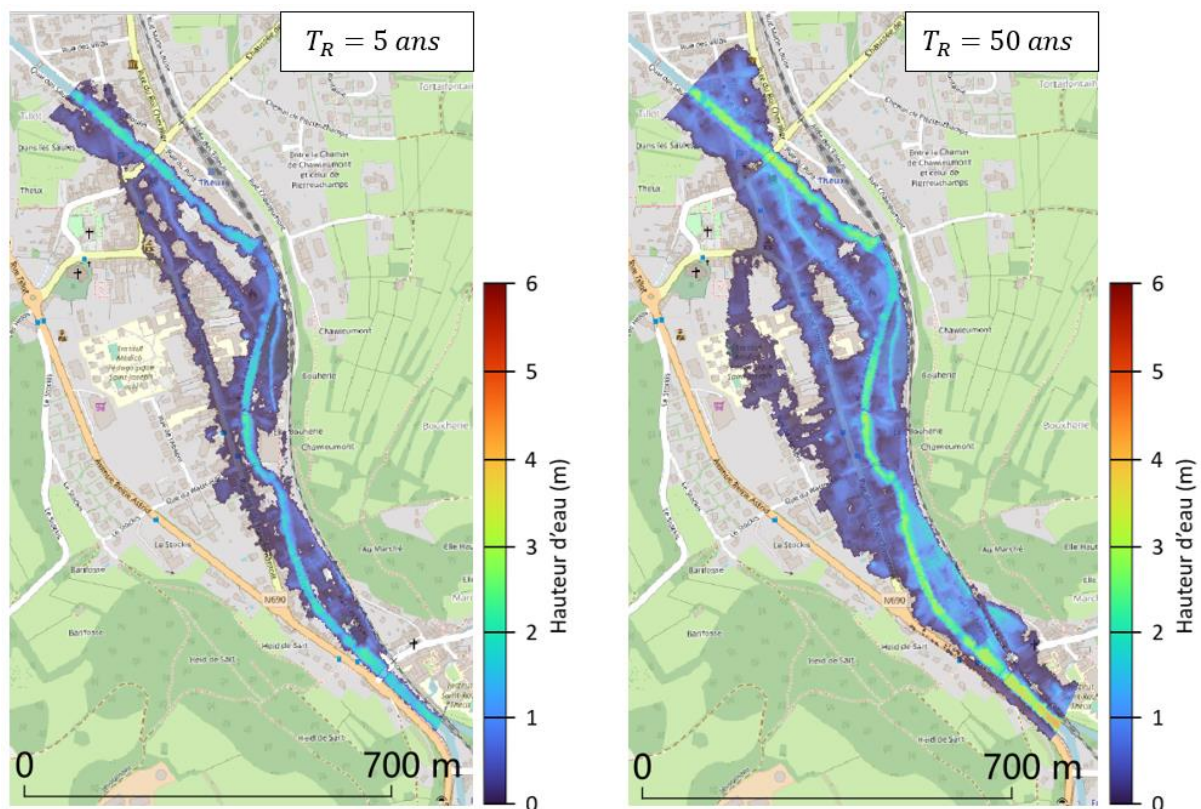


Figure 123 : Etendue des inondations et hauteurs d'eau calculées pour un hydrogramme synthétique d'une période de retour de 5 ans (à gauche) et de 50 ans (à droite).

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

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