

École polytechnique de Louvain

Étude d'inondations dans la commune d'Aiseau-Presles

Auteur: **Maxime RAISON**

Promoteur: **Sandra SOARES-FRAZÃO**

Lecteurs: **João SARAIVA ESTEVES PACHECO DE ALMEIDA, Nathan
DELPIERRE**

Année académique 2022–2023

Master [120] : ingénieur civil des constructions

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la rédaction ainsi qu'au suivi de ce mémoire.

Dans un premier temps, je voudrais remercier ma promotrice, Sandra Soares-Frazão qui a toujours été présente pour mes questions et qui a su m'aiguiller tout au long de l'année afin de faire de ce mémoire une réussite.

Je souhaite aussi remercier Nathan Delpierre d'avoir accepté d'être lecteur de ce mémoire, mais également pour tout le temps qu'il m'a accordé pendant cette année.

Un grand merci au professeur João Saraiva Esteves Pacheco De Almeida pour avoir accepté d'être lecteur de ce mémoire.

Je remercie mes parents, Cynthia et Grégory, qui m'ont soutenu pendant toutes mes études et qui ont relu ce travail avec plaisir à maintes reprises ; ma soeur, Eugénie, pour ses encouragements incessants ; et ma compagne, Sophie, qui m'a épaulé durant tout ce travail.

Enfin, Martin Petitjean, toi qui m'as accompagné durant ces 5 dernières années, qui as été le meilleur binôme dans tous les travaux qu'on a réalisés ensemble, et qui m'as encore énormément aidé pour ce mémoire sans rien attendre en retour, je te remercie du fond du coeur.

Table des matières

Introduction	9
I Contexte	13
1 Historique minier	14
1.1 Exploitation minière belge	14
1.2 Exploitation minière d’Aiseau-Presles	15
2 Historique des inondations	17
2.1 Grandes inondations qui impactent la Sambre	17
2.2 Inondation de juillet 2021	18
2.2.1 Événements à Aiseau-Presles	19
3 Configuration des lieux	24
3.1 Configuration géographique - Affaissement et cuvette	24
3.2 Rétrécissement à la confluence	26
3.2.1 Théorie du rétrécissement	27
3.3 Station de démergements	28
3.3.1 Au niveau national	28
3.3.2 Au niveau local	29
3.4 Dignes	31
3.4.1 Le long de la Sambre	31
3.4.2 Le long de la Biesme	32
3.5 Conclusion sur la configuration des lieux	33
4 Enquête à la population	35
4.1 Impact social du mémoire	35
4.2 Traitement des réponses	36

II	Modélisation	39
5	Étude hydrologique	40
5.1	Logiciels et ressources utilisés	40
5.1.1	Athys	40
5.1.2	QGIS	40
5.1.3	Géoportail de la Wallonie	41
5.2	Zone d'étude pour validation	41
5.2.1	Détermination du bassin versant	41
5.2.2	Calcul d'un hydrogramme	43
5.3	Zone réelle d'étude	50
5.4	Conclusion intermédiaire	51
6	Hydroflow	52
6.1	Fonctionnement du modèle	52
6.1.1	Théorie	52
6.1.2	Utilisation du programme	55
6.2	Validation du modèle	57
6.2.1	Première simulation	57
6.2.2	Simulation plus représentative	58
6.2.3	Dernière simulation de validation	63
6.3	Conclusion intermédiaire	67
III	Propositions d'aménagements	70
7	Analyse des résultats la modélisation de référence	71
7.1	Éléments clefs de l'inondation	71
8	Augmentation de la taille de la pompe	74
8.1	Méthode utilisée	74
8.2	Analyse des résultats	74
9	Agrandissement de la largeur de la Biesme à la confluence	78
9.1	Méthode utilisée	78
9.2	Analyse des résultats	81
10	Réévaluation des digues	84
10.1	Méthode utilisée	84
10.2	Analyse des résultats	85
10.2.1	Digues augmentées de 1m	85
10.2.2	Digues augmentées de 2m	87

Conclusion	92
Bibliographie	96

Introduction

Depuis la nuit des temps, les hommes ont fait face à des épisodes de pluies intenses et à des inondations. Mais dans les derniers siècles, ces inondations ont fait des dégâts de plus en plus importants dûs, entre autres, à l'imperméabilisation des surfaces puisque nos routes et nos villes sont principalement constituées de béton.

En juillet 2021, la Belgique a subi un épisode pluvieux très intense qui a provoqué des inondations record dans énormément de villes et de villages. C'est suite à cette inondation désastreuse que le bourgmestre de la commune d'Aiseau-Presles a décidé de faire appel à l'UCLouvain pour demander une étude de la zone impactée.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier la commune d'Aiseau-Presles et, plus particulièrement, la zone autour de la confluence entre la Biesme, une petite rivière qui traverse la commune, et la Sambre. Ceci afin d'essayer de trouver des aménagements à mettre en place pour limiter les inondations en se basant sur celles de juillet 2021.

Pour ce faire, je vais commencer par une mise en contexte de la problématique. Je passerai en revue le passé minier de la commune, la récurrence des inondations et des gros épisodes pluvieux de la région ainsi que la configuration géographique de la zone étudiée. J'en profiterai pour examiner plus en détail l'épisode dramatique subi en juillet 2021. J'aborderai également un aspect plus social que je ne m'attendais pas à traiter avant de commencer ce mémoire.

Ensuite je m'attaquerai à la partie plus pratique. En effet, j'exposerai comment j'ai obtenu, grâce au logiciel Athys, l'hydrogramme utilisé lors de cette étude. Je traiterai l'aspect théorique d'HydroFlow, le programme que j'utiliserai pour toutes les simulations, puis enfin, je détaillerai les simulations que j'ai entreprises avec ce même programme.

En ce qui concerne les simulations, je commencerai par une phase de validation. Lors de cette phase, on retrouvera la partie de recherche et de calibration afin que la simulation corresponde le plus possible à la réalité. Je devrai, entre autres, modéliser une pompe de démergement qui n'est pas une fonction implémentée dans HydroFlow. Ceci nécessitera donc de la réflexion afin d'obtenir une représentation cohérente.

Une fois la modélisation calibrée de façon satisfaisante, je passerai à l'implémentation de différentes mesures de protection. Ces dernières proviennent notamment d'une discussion avec la commune d'Aiseau-Presles vis-à-vis de leurs attentes par rapport à la finalité du mémoire.

La première mesure de protection consiste à augmenter la capacité de la pompe de démergement qui est déjà présente. La question du dimensionnement de cette pompe est en effet une question que la commune ainsi que la population se posent, à tel point qu'une étude parallèle est actuellement menée par l'INASEP sur le dimensionnement de cette pompe.

La deuxième mesure de protection qui sera étudiée est l'élargissement de la confluence entre la Biesme et la Sambre. En effet, à l'heure actuelle la Biesme se rétrécit en arrivant à la confluence et la question de l'impact de ce rétrécissement sur la hauteur d'eau s'est posée à plusieurs reprises.

Enfin, la dernière mesure étudiée sera l'augmentation de la hauteur des digues qui bordent la Biesme. J'étudierai deux cas d'augmentation de hauteur afin de comparer leurs effets sur l'inondation.

Première partie

Contexte

Chapitre 1

Historique minier

1.1 Exploitation minière belge

La Belgique est un pays avec un riche passé minier qui a permis un développement conséquent de notre économie lors de la révolution industrielle. En effet, un bassin houiller important se situe en Wallonie et s'étend de l'est de Liège jusqu'à la frontière française à l'ouest de Mons comme l'image 1.1 l'illustre.

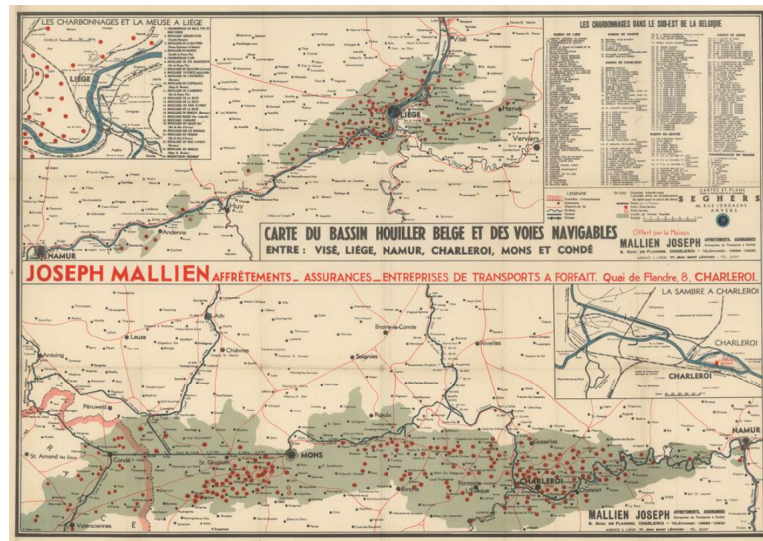


FIGURE 1.1 – Bassin houiller belge [1].

Ce bassin a commencé à être exploité au Moyen Âge mais la période de charbonnage, et donc de minage plus industriel et organisé, commence vers le milieu du 18^{ème} siècle. Dès l'indépendance de la Belgique en 1830, le pays, et plus

précisément la Wallonie, est déjà un des plus gros producteurs de charbon au monde. On observe que près d'un tiers du charbon extrait de nos mines est exporté, ce qui amène naturellement des profits importants. Vu les bénéfices que l'industrie charbonnière apporte, on voit apparaître une politique d'investissement de la part du gouvernement ainsi que de la part d'investisseurs privés. Lors de la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, l'exportation du charbon belge diminue suite au fait que d'une part, l'Angleterre signe un accord de libre échange et que leurs prix sont alors plus compétitifs et d'autre part, que les charbonnages allemands sont en pleine expansion.

Pour faire face à cette concurrence de plus en plus importante, les concessions n'ont d'autre choix que de fusionner ou se faire intégralement racheter par des sociétés telles que des banques. Ces fusions permettent aux mines d'opérer dans des conditions qui sont plus optimisées et qui permettent surtout de mettre en place des avancées technologiques. On observe alors une nouvelle prospérité dans le milieu charbonnier aux alentours de la fin du 19^{ème} siècle. À partir des années 1930, on commence à observer une fermeture progressive des mines notamment causée par la grande dépression et par l'apparition 10 ans auparavant de la concurrence d'autres combustibles. Après la seconde guerre mondiale, on retrouve un nouveau pic d'extraction de charbon belge dans les mines qui n'ont pas été détruites par les années d'invasion et de bombardements. Vers la fin des années 50, une nouvelle vague de fermeture survient et la tendance ne s'inversera plus jusqu'à la fermeture de la dernière mine de Wallonie en 1984.

1.2 Exploitation minière d'Aiseau-Presles

Dans la commune actuelle d'Aiseau-Presles, on retrouve historiquement deux sociétés majeures, la Société Anonyme des Charbonnages Réunis de Roton-Farciennes et Oignies-Aiseau et la Société Anonyme du Charbonnage d'Aiseau-Presles.

La première trace de l'une de ces sociétés remonte au 20 Novembre 1801, date à laquelle une demande de concession est accordée à "Desgain et compagnies" situés à Farciennes. Peu de temps après, en 1807, la concession, qui à ce moment était nommée "Concession du Roton", a été revendue à Philippe-Joseph de Néverlée et Jean-François Gendebien ainsi qu'au comte de Courcy. Ces derniers ont exploité la mine jusqu'en 1853, date à laquelle ils ont décidé de fusionner avec la concession de Sainte Catherine et ainsi devenir la "Concession du Roton-Ste-Catherine", couvrant une superficie de 410 hectares. Après une série de fusions et de scissions, le nom de la société est changé en "Société Anonyme des Charbonnages-Réunis de Roton-Farciennes et Oignies-Aiseau". Durant cette période, la société emploie près de 1200 ouvriers pour une production annuelle d'environ 216.000 tonnes d'antracite. En parallèle, on trouve la concession d'Aiseau-Presles qui devient celle de Tergnée-

Chapitre 2

Historique des inondations

2.1 Grandes inondations qui impactent la Sambre

Nous pouvons lister plusieurs grandes inondations qui sont survenues en Belgique et qui ont eu un impact le long de la Sambre depuis 1960. Ceci va nous permettre de se rendre compte de la récurrence des faits et des différents chiffres.

- 30 janvier 1961 : Débordement de la Sambre dû à $40mm$ de précipitations et à la fonte des neiges,
- 10 janvier 1965 : Inondations dues à de fortes précipitations et à la fonte des neiges,
- Novembre - Décembre 1966 : Inondations dues à des précipitations sur une longue durée,
- Été 1977 : Violent orage et précipitations de $75mm$ conduisant à des inondations,
- Janvier - Février 1984 : Fortes précipitations sur une longue durée. $465mm$ de pluies ont été mesurées sur 30 jours, ce qui est le record du siècle,
- 24 août 1987 : Pluies diluviennes qui inondent et provoquent beaucoup de dégâts,
- 2 au 8 juillet 2000 : Inondation due à de fortes pluies suivies par un ruissellement important,
- 13 au 27 février 2002 : Débordements dus à une pluie dont la période de retour est de 50 ans,
- 11 au 15 novembre 2010 : Pluie importante avec une période de retour de plus de 100 ans qui cause des débordements et des inondations,

- 5 mai au 24 juillet 2016 : Débordements et ruissellement dûs à une pluie très intense.

Cette liste illustre parfaitement que les inondations sont assez fréquentes dans le bassin de la Sambre et que c'est donc un problème sur lequel il est intéressant de se pencher. En effet, les inondations créent énormément de dégâts matériels et humains. S'il est possible de réduire ces dégâts en les étudiant, cela représenterait un réel gain.

2.2 Inondation de juillet 2021

Passons à présent aux événements de 2021.

En juillet 2021, une goutte froide s'est déplacée entre la France et l'Allemagne entre le 12^{ème} et le 16^{ème} jour du mois. Cette goutte froide, qui est une bulle météorologique qui s'est détachée de la circulation associée au courant-jet polaire et qui descend dans des latitudes plus basses, a provoqué une série d'averses relativement importantes. Ces averses ont eu comme première conséquence de saturer les sols en eau et donc d'augmenter la quantité de ruissellement lors de prochaines précipitations.

Cette goutte froide a ensuite été suivie par des précipitations historiques. En effet, le 14 juillet, plus de 100mm de pluies sont tombés en une seule journée sur une grande zone de la Wallonie, comme on peut le voir à la carte 2.1, alors que la moyenne de précipitations annuelle belge tourne autour de 800mm. Ces précipitations ont conduit à des inondations dévastatrices, voire meurtrières dans plusieurs communes en Belgique. Le coût total des inondations est aux alentours des 2 milliards d'euros.

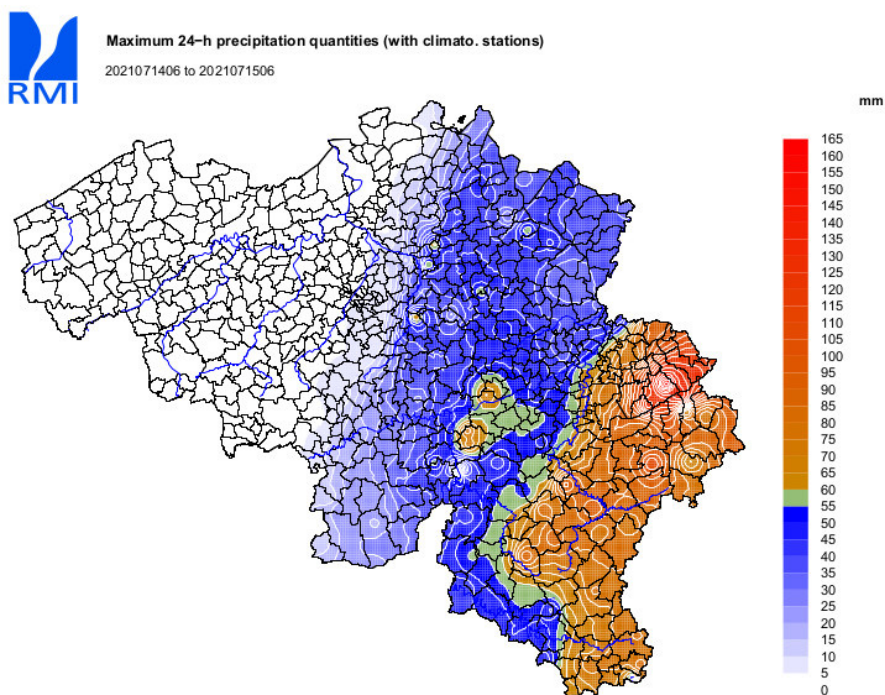


FIGURE 2.1 – Cumul des précipitations en Belgique le 14 juillet 2021 [3].

2.2.1 Événements à Aiseau-Presles

La phase provinciale du plan d'urgence a été lancée le 15 juillet à 12h44. De plus, un cas sur la plateforme ICMS (Incident & Crisis Management System) a été ouvert afin que le centre de crise provincial puisse communiquer avec les différentes communes et se coordonner pour amener de l'aide à l'endroit nécessaire au bon moment.

La commune d'Aiseau-Presles m'a permis d'avoir accès à l'extrait de ce logiciel de crise afin que je puisse avoir une vision globale du déroulement des événements. C'est grâce à cet extrait ainsi qu'aux témoignages de certains riverains que je vais retracer les inondations.

Moins d'une heure après le lancement de la phase provinciale, vers 13h30, la Biesme sort de son lit, passe au dessus des digues et envahit les jardins et les rues.

À 14h16, la commune d'Aiseau-Presles ouvre un centre d'accueil dans le Hall omnisport Sambrexpo.

À 15h06, la commune fait un rapport de situation dans laquelle elle cite les rues fermées et informe que la rue Lambot est en pleine évacuation. Durant les prochaines heures, plusieurs autres rues ont été évacuées.

La phase fédérale est déclenchée à 17h04 et le centre provincial demande de récolter

les questions des communes à ce propos.

À 20h06, la commune fait un nouveau rapport de situation sur les rues fermées et sur le fait que 2 couples ont été relogés à l'hôtel pour la nuit.

Le centre provincial demande un état des lieux du nombre de victimes de chaque commune à 22h58 en vue d'une réunion avec les différents gouverneurs le lendemain. Le matin du 16 juillet à 8h03, la commune envoie un dernier rapport de situation sur les routes bloquées et sur l'activité de la nuit. L'évolution des routes fermées peut être observée à la figure 2.3.

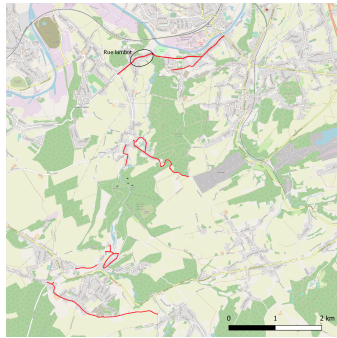


FIGURE 2.2 – État des routes à 15h06 le 15 juillet.

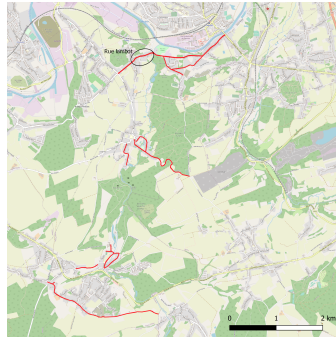


FIGURE 2.3 – État des routes à 20h06 le 15 juillet.

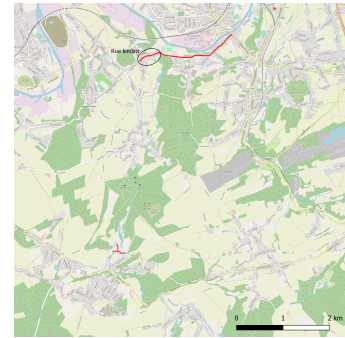


FIGURE 2.4 – État des routes à 08h03 le 16 juillet.

Aucun autre incident n'est rapporté pour la journée du 16 juillet. La seule anomalie est une pollution aux hydrocarbures dans la rue Lambot qui n'a pas pu être traitée par la protection civile qui était débordée. Cependant le problème a été relayé au niveau fédéral.

Le 17 juillet, le problème de pollution n'est toujours pas réglé et aucun relogement n'est nécessaire.

Le 19 juillet, la commune établit un dernier rapport de situation à 16h45 et informe la province des éléments suivants :

- 1 couple est relogé à l'hôtel pour la nuit,
- 3 familles sont relogées dans des logements communaux,
- Suite à la visite d'un architecte, une habitation est évacuée temporairement pour un problème de stabilité et la commune s'occupe de leur trouver une habitation,
- Le hall omnisport Sambrexpo est encore ouvert les deux prochains jours,
- Les différents besoins des sinistrés en terme de biens matériels,
- L'électricité est non fonctionnelle dans la rue Lambot,

- Le déblaiement des habitations est toujours en cours,
- Les enfants des sinistrés ont accès à une garderie.

Les inondations dans la commune d’Aiseau-Presles, et encore plus précisément dans la rue Lambot, ont eu un gros impact sur la population. En effet, l’entièreté des maisons se situant dans la dite rue ont subi des dégâts importants et les habitants ont perdu énormément de possessions. Près de deux ans après la catastrophe, certaines maisons se trouvent toujours vides de leurs occupants. On peut voir quelques photos des inondations de la rue Lambot comparée à des photos prises récemment.



FIGURE 2.5 – Comparaison de la plaine Rue Lambot inondée et sèche.



FIGURE 2.6 – Comparaison de Rue Lambot, 148 inondé et sec.



FIGURE 2.7 – Comparaison de Rue Lambot, 179 inondé et sec.



FIGURE 2.8 – Comparaison de la "chapelle" Rue Lambot inondée et sèche.

Tous ces éléments nous montrent une fois de plus que la conjonction de quelques phénomènes météorologique anodins peut en quelques heures mener à une catastrophe humaine et matérielle.

Nous allons étudier dans le chapitre suivant la configuration des lieux qui, par son passé minier et son profil géographique et géologique engendre de tels dégâts.

Chapitre 3

Configuration des lieux

3.1 Configuration géographique - Affaissement et cuvette

La commune d'Aiseau-Presles est une commune relativement petite avec une superficie d'un peu plus de $22km^2$. Le mémoire se concentre cependant sur une zone plus petite que l'entièreté de la commune. En effet, la zone d'étude se situe à la confluence entre la Biesme et la Sambre et remonte $1,4km$ en amont par rapport à cette confluence.

La zone est délimitée par plusieurs frontières assez marquantes. Au nord-est, on peut voir que la Sambre délimite toute cette zone. Au nord, on retrouve les voies de chemin de fer qui, comme le montrent les images ci-dessous, sortent de façon assez importante du sol. À l'ouest ainsi qu'à l'est, on y voit des reliques de l'ère minière. Il y a en effet un terril à l'ouest ainsi que deux autres à l'est de la zone d'étude.



FIGURE 3.1 – Voies de chemin de fer plus élevées que la plaine.

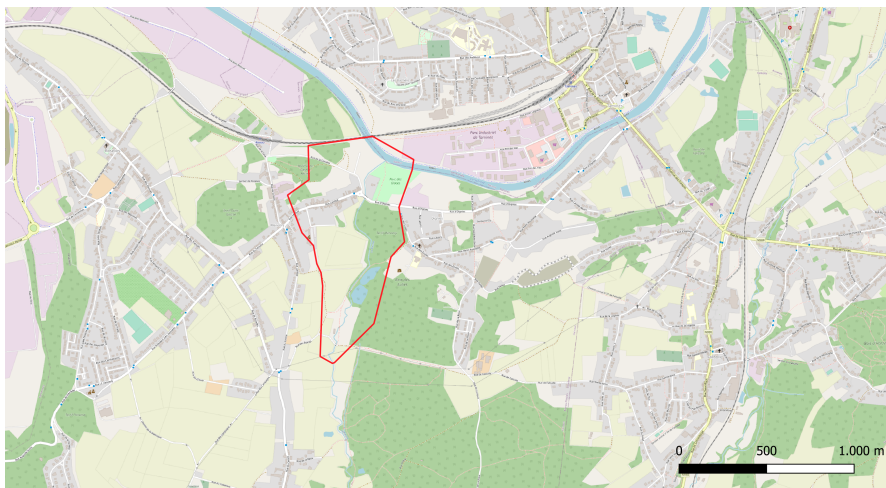


FIGURE 3.2 – Zone d'étude.

La mise en contexte de l'histoire minière de la commune qui a été exposée plus haut, nous indique que la zone a été fortement exploitée pendant plusieurs siècles. Or, qui dit exploitation minière intense, dit affaissement de sol survenant assez rapidement après l'exploitation et étant suivi d'un tassement dont la majeure partie se fait dans les 10 années qui suivent. La cause principale du tassement provient du remblayage insuffisant des mines. Même s'il a été fait, il ne remplit habituellement pas tous les vides des galeries et permet donc à la roche par dessus de s'affaisser.

Ceci provoque ensuite l'affaissement des sols. Cette situation s'applique à la zone sur laquelle le mémoire se concentre. En effet, comme je viens de le faire remarquer, elle se situe à la confluence de la Biesme et de la Sambre et est située entre 3 petits terrils. On observe facilement que le niveau du sol est inférieur au niveau normal et il semble évident que la zone a subi des affaissement miniers au cours de son histoire.

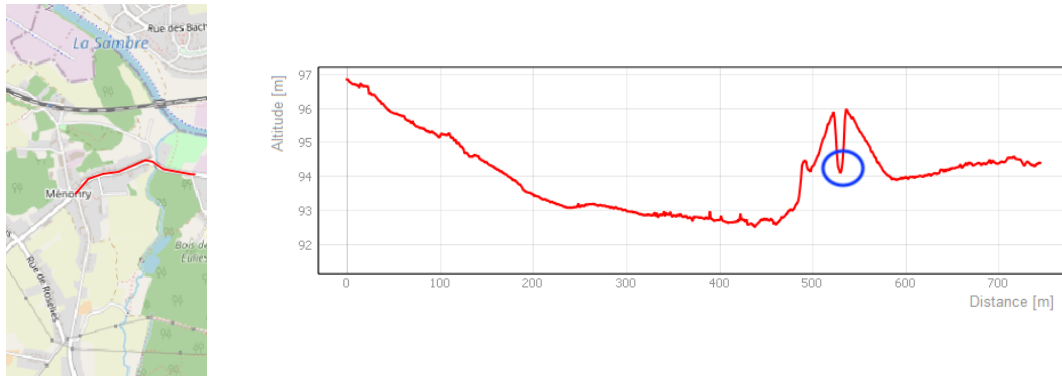


FIGURE 3.3 – Coupe de niveau le long de la rue Lambot.

Pour illustrer mes propos, j'ai mené une analyse altimétrique focalisée sur la rue Lambot et le début de la rue d'Oignies, faisant près de 1km de long. On peut voir sur le graphique 3.3 un affaissement important sur les 500 premiers mètres. À l'endroit le plus bas, le sol est à $92,5\text{m}$ au dessus du niveau de la mer, soit en dessous du niveau de la Biesme (entourée en bleu) qui se situe à 94m par rapport à la mer.

Ceci est une claire indication d'affaissements miniers. Cette différence de niveau peut naturellement mener à des problèmes d'évacuation d'eau vers l'aval.

Les différents éléments qui viennent d'être exposés nous illustrent que la zone sur laquelle je me suis concentré peut être qualifiée de cuvette. Entre les différentes frontières qui renvoient l'eau vers le centre de la zone et le fait qu'il y ait eu des affaissements miniers, on se rend assez facilement compte que lors de fortes pluies, le risque d'inondations est élevé. C'est ce que nous illustrerons plus loin dans ce document.

3.2 Rétrécissement à la confluence

Un point important de questionnement de la commune est le comportement au niveau de la confluence. En effet, comme on peut le voir sur les photos ci-dessous,

la Biesme transitionne d'un tronçon de cours d'eau naturel à un tronçon en béton. En plus de cette transition, on observe que la largeur de la rivière rétrécit, ce qui pourrait avoir un impact non négligeable sur la montée des eaux lors de précipitations importantes.



FIGURE 3.4 – Section de la Biesme qui se rétrécit à la confluence.

L'aménagement de la confluence a probablement été réalisé de sorte à rediriger le flux d'eau dans le sens de la Sambre afin d'éviter toute perturbation de son écoulement.

3.2.1 Théorie du rétrécissement

Le débit d'eau est régi par l'équation 3.1 dans laquelle on retrouve la vitesse ainsi que l'aire de la section.

$$Q = V \cdot A \quad (3.1)$$

Dans le cas d'un rétrécissement, on a une diminution de la section qui va entraîner une augmentation de la vitesse ainsi qu'une augmentation de la hauteur de l'eau.

Vu cette relation, on se rend compte que lors de pluies importantes, le niveau d'eau à la confluence augmenterait et aurait donc un impact sur les inondations.

3.3 Station de démerglements

3.3.1 Au niveau national

Au niveau national, il existe trois grands organismes et donc trois grandes zones dans lesquelles on retrouve une forme de démergement. Mais tout d'abord, qu'est-ce que le démergement ? C'est un processus qui a comme but de lutter contre les inondations causées par des affaissement miniers. Il existe sous plusieurs formes mais sa forme principale se compose d'un réseau de collecteurs qui mènent vers une station de pompage afin de remonter l'eau qui se situe sous le niveau du cours d'eau. Dans certains cas, les pompes s'activent uniquement lorsque le niveau du cours d'eau est trop haut et donc empêche le déversement des collecteurs de façon naturelle. Dans d'autres cas, les pompes sont toujours actives.

Un des organismes est l'Association Intercommunale pour le Démergement et l'Épuration des communes de la province de Liège (AIDE). Comme son nom l'indique, elle s'occupe du démergement dans la province de Liège et se focalise principalement le long de la Meuse puisqu'il s'agit d'une zone qui a été minée intensivement.

Sa mission se divise en 3 grandes parties. La première est la construction d'exutoires pour permettre à toute l'eau qui tombe sur les collines et plaines aluviales de se déverser dans la Meuse. La seconde est de réaliser des réseaux de collecteurs dans les plaines et de placer des pompes de démergement aux endroits où les collecteurs ne peuvent pas se déverser naturellement dans la Meuse. Enfin, la dernière est de remblayer les terrains qui ont subi des affaissements, quand cela s'avère possible. C'est évidemment fait dans de très rares cas puisqu'il faudrait qu'aucune habitation n'existe dans la zone.

Un deuxième organisme est l'Intercommunale de Développement Économique et d'Aménagement du coeur du Hainaut (IDEA) qui était précédemment l'Intercommunale pour le Démergement et l'Assainissement de la Vallée de la Haine Inférieure (IDAVHI). Cette intercommunale s'occupe principalement des régions du Borinage et du Centre. Elle existe depuis 1956 et, a été historiquement créée afin de protéger

la population des inondations et de rendre constructible 5000ha de terrain afin de permettre la création d'industries et donc de stimuler l'économie locale. Elle comporte actuellement 25 stations de pompage pour une capacité totale d'un peu plus de 22 Mm³ dont à peu près 20% sont revalorisés.

Finalement, le dernier organisme est celui qui gère la zone d'étude de ce mémoire, l'Intercommunale pour la Gestion et la Réalisation d'Études Techniques et Économiques (IGRETEC). IGRETEC se concentre sur la région de Charleroi depuis 1987 et a comme mission principale, en terme de démergement, la gestion des réseaux de collecteurs et des pompes de démergements.

3.3.2 Au niveau local

Dans le cas d'Aiseau-Presles, une station de démergement a été installée au bord de la Sambre et en aval de toute la zone affaissée comme le montre la carte 3.5. Il y a deux systèmes de collecteurs dans la zone affaissée qui permettent d'un côté, de récolter les eaux usées et les emmener vers la station d'épuration de Roselies et de l'autre, de récolter l'eau de pluie et de l'emmener vers la station de démergement. J'ai eu la chance de pouvoir visiter cette station dans le cadre de la réalisation de mon mémoire. On peut voir sur les différentes photos ci-dessous que l'eau qui provient du système de démergement se retrouve à près de 4m sous terre et que les gros débris sont filtrés à l'aide d'un gros tamis. Ensuite, l'eau est remontée vers la surface à l'aide d'une pompe à un débit maximal de $4000 \frac{m^3}{h}$ pour finalement se déverser dans la Sambre.

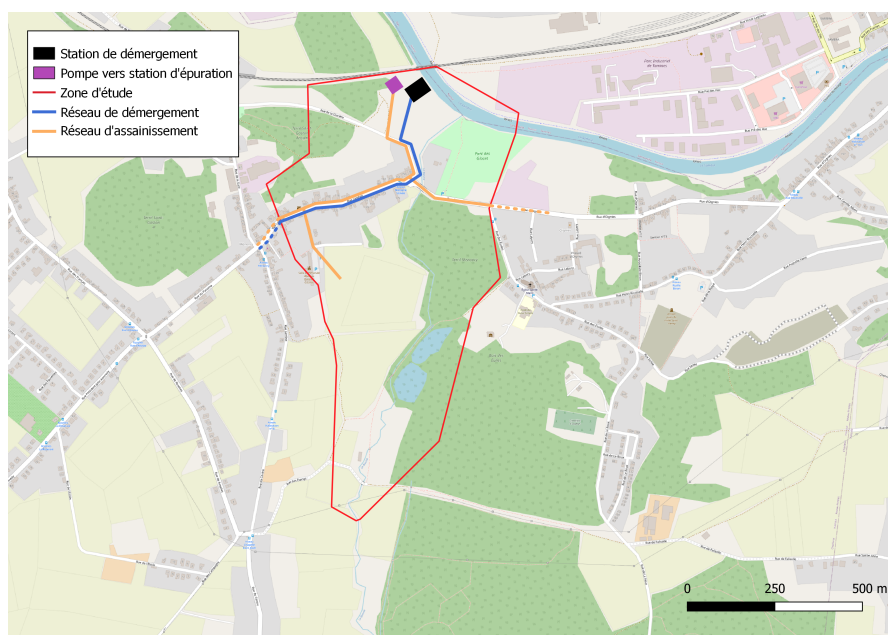


FIGURE 3.5 – Réseau de démergement et d'assainissement dans le rue Lambot.



FIGURE 3.6 – Profondeur à laquelle l'eau arrive à la station.



FIGURE 3.7 – Filtre pour les gros débris.



FIGURE 3.8 – Pompe qui remonte l'eau.



FIGURE 3.9 – Réseau de conduites.

3.4 Dignes

3.4.1 Le long de la Sambre

La Sambre n'a pas toujours été aussi facilement navigable qu'aujourd'hui. En effet, c'était un cours d'eau réputé compliqué à naviguer avant les années 1830. Du fait que la navigation n'était pas aisée et de l'augmentation de l'industrialisation de la région le long de la Sambre, le gouvernement hollandais décida de commencer des travaux d'aménagement de ce cours d'eau.

Afin de l'uniformiser sur toute sa longueur, la Hollande a réussi à se mettre d'accord avec la France pour entreprendre une canalisation de la Sambre à grande échelle. celle-ci s'est achevée en 1829 du côté hollandais et en 1836 du côté français.

La Sambre est alors devenue ce canal artificiel bordé de digues comme on a l'habitude de le voir. Ces digues permettent à priori d'éviter au maximum les débordements lors de crues. On peut voir quelques images ci-dessous des digues à la confluence de la Biesme et la Sambre.



FIGURE 3.10 – Digues le long de la Sambre au niveau de la confluence.

De plus, pour se rendre compte de la hauteur des digues par rapport au niveau de la Sambre, on peut distinguer une coupe dans le sens de la largeur de la Sambre à la figure 3.11. On voit que la digue gauche qui est celle du côté de la station de démergement est à peu près $1,5m$ plus haute que celle de l'autre côté et que donc il y a peu de chance de voir un débordement au dessus de cette digue.

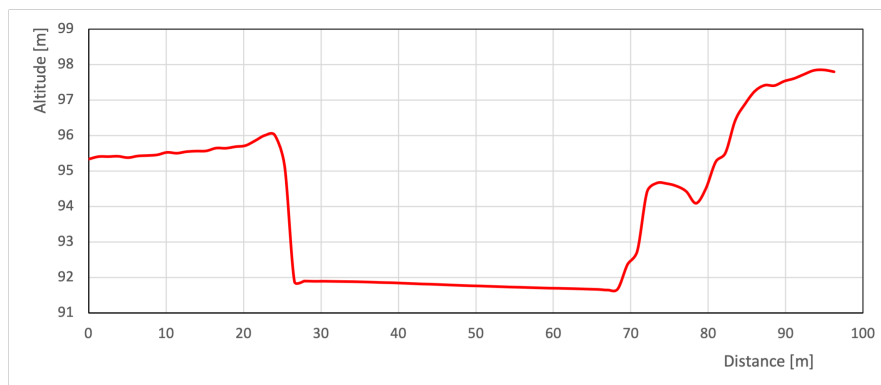


FIGURE 3.11 – Section de la Sambre et de ses digues.

3.4.2 Le long de la Biesme

La Biesme, elle aussi, est bordée de digues de part et d'autre. Ces digues sont cependant présentes seulement sur environ $1km$ et ont comme but de protéger la

zone affaissée des crues de la Biesme. Contrairement à celles de la Sambre, ces digues sont principalement faites de terre et non de matériaux de type béton et pierre.

On peut les distinguer sur l'image 3.12 et on peut voir qu'elles délimitent réellement toute une zone.

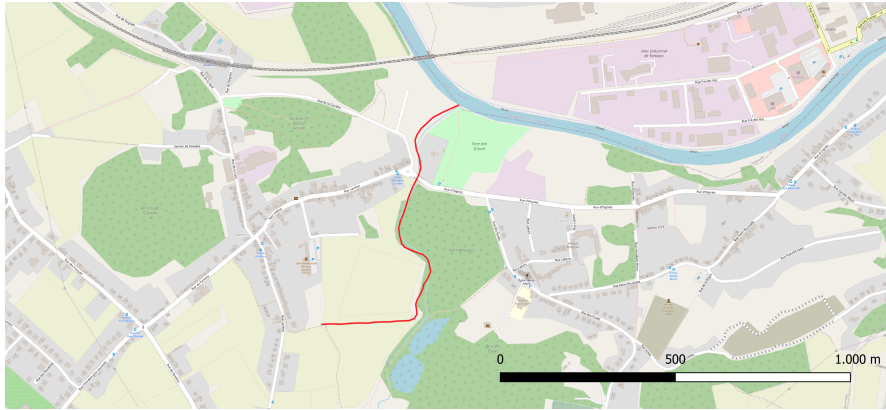


FIGURE 3.12 – Carte de la digue le long de la Biesme.

Le problème principal avec les digues en terre est que si l'eau réussit à passer par dessus, l'eau érode la couche supérieure de la digue, ce qui entraîne une brèche plus importante, phénomène qui va en empirant.

Un autre problème de ce type de protection est qu'une fois que l'eau est passée par dessus et que la décrue a lieu, l'eau prend beaucoup plus de temps à se retirer. En effet, il faut souvent que l'homme intervienne pour que l'eau se retire.

3.5 Conclusion sur la configuration des lieux

Pour revenir sur les différents éléments importants, on a pu remarquer que les facteurs de risques de notre zone sont les suivants :

- Affaissement minier qui a créé une cuvette dans le bas de la rue Lambot.
- Rétrécissement de la Biesme à la confluence qui peut augmenter le niveau de l'eau lors de pluies importantes.
- Ruissellement des différents points haut autour de la zone.

Suite à ces facteurs de risque, certains aménagements de mitigation sont mis en place :

- Station de démergement qui pompe l'eau vers la Sambre.

— Dignes qui bordent la Biesme pour limiter le débordement.

Ces aménagement sont visiblement insuffisants au vu de la catastrophe de 2021 et il faut donc les réévaluer et pourquoi pas penser à d'autres méthodes.

Chapitre 4

Enquête à la population

4.1 Impact social du mémoire

Lors de mes échanges avec la commune d'Aiseau-Presles, il a été mentionné que la population se posait beaucoup de questions sur ce qu'il s'était passé en juillet 2021. Les habitants ont particulièrement l'impression que la commune ne fait pas grand chose pour résoudre les problèmes.

Il a donc été envisagé de faire une récolte d'information auprès de la population afin de voir s'ils avaient des informations intéressantes mais également pour savoir s'ils étaient au courant des aménagements mis en place.

J'ai donc décidé de faire une enquête pour récolter de l'information auprès des habitants. Les questions posées dans l'enquête étaient les suivantes :

- Quelle est votre adresse ?
- Quel est votre métier ?
- Depuis quand habitez-vous dans la commune d'Aiseau-Presles ?
- Pouvez-vous nous parler des inondations de juillet 2021 (déroulement temporel, spatial, ampleur des dégâts, ...) ?
- Quel est le premier épisode d'inondation marquant dont vous vous souvenez + autres épisodes ?
- Trouvez-vous que les inondations deviennent des plus en plus importantes ou pas forcément (hauteur, superficie touchée, dégâts, ...) ?
- Avez-vous remarqué un changement dans le déroulé d'un épisode d'inondation (ruissellement, débordement, remontée par canalisations) ?
- Avez-vous remarqué un élément déclencheur par rapport au changement de l'intensité des inondations (nouvelle construction d'habitation, démolition, construction de digue ou barrage, ...) ?

- Vous souvenez-vous d'affaissements miniers qui ont eu lieu sur le territoire ?
- Pensez-vous que des aménagements ont été réalisés pour limiter l'impact de ces inondations ? Si oui : lesquels ? Avez-vous vu une amélioration ?
- Que pensez-vous qu'il faudrait mettre en place afin de limiter ces inondations (moyens de prévention, de protection, ...) ?

4.2 Traitement des réponses

L'enquête a été déposée dans toutes les boîtes aux lettres de la rue Lambot en plus d'avoir été postée sur le groupe Facebook de la commune. Malheureusement, il y a eu assez peu de retours.

Parmi ces différents retours, il est à noter que c'est la première fois qu'une telle inondation a lieu depuis que les habitants interrogés vivent là. En effet, d'après eux, il est assez commun d'avoir des remontées d'eau dans les caves et les garages. Une montée de 15 à 20cm est relativement commune mais pas d'une telle ampleur. Plusieurs habitants parlent du fait que la digue érigée à la suite des inondations de 1966 n'a pas été entretenue depuis et que le cours de la Biesme n'est pas non plus entretenu régulièrement. Ils m'ont informé que depuis juillet 2021, le cours d'eau a été nettoyé et que les digues ont été remontées de 50cm. Certains évoquent des points d'attention qu'il faudrait étudier, comme la taille de la pompe de démergement ainsi que le rétrécissement de la Biesme au niveau de la confluence.

Les réponses ainsi que le questionnement des habitants conforte l'idée initiale de ce mémoire, à savoir se concentrer sur plusieurs points d'amélioration qui répondent exactement aux questions de la population.

Cette enquête ne m'a pas permis d'identifier d'éléments réellement nouveaux par rapport aux informations déjà collectées. Elle a permis par contre d'ajouter un caractère social à ce mémoire, ce que je n'avais pas vraiment imaginé il y a quelques mois.

En effet, suite à mon enquête, j'ai été contacté par la centre culturel d'Aiseau-Presles. Ils comptent organiser une journée thématique en septembre 2023 autour de l'eau. La journée a, entre autres, comme but de sensibiliser la population aux problèmes d'inondation. Étant donné que le mémoire est basé sur cette problématique, il a été envisagé que je participe à cette journée avec Martin Petitjean, qui devrait travailler sur la suite de ce mémoire. Ceci permettra de donner une dimension sociale au mémoire et de lui permettre de potentiellement répondre aux questions des habitants, et notamment de les rassurer par rapport aux aménagements déjà

mis en place ou à venir.

Deuxième partie

Modélisation

Chapitre 5

Étude hydrologique

5.1 Logiciels et ressources utilisés

5.1.1 Athys

Pour l'étude hydrologique, la première étape a été d'utiliser le logiciel Athys. L'atelier hydrologique spatialisé (ATHYS) est un logiciel qui regroupe plusieurs modèles hydrologiques qui permettent de traiter des données hydro-climatiques et géographiques. Il a été développé dans un but de faire de la gestion de ressources en eau, de la prévision d'événements extrêmes et des études d'impact liées à des modifications de climat ou de civilisation.

Le logiciel contient quatre modules qui ont tous une utilité différente [4].

- MERCEDES : plateforme de modélisation spatialisée
- VISHYR : traitement des données hydro-climatiques stationnelles
- VICAIR : traitement des données géographiques spatialisées
- SPATIAL : plate-forme d'interpolation spatiale

Dans notre cas, nous allons utiliser seulement trois des quatre modules, à savoir, MERCEDES, VISHYR et VICAIR.

5.1.2 QGIS

QGIS est un outil de type "Geographic Information System (GIS)", c'est donc un outil qui permet de représenter toute une série d'informations de façon graphique. C'est un logiciel très puissant qui, en plus de donner des rendus graphiques, permet de faire des calculs et des interpolations pour aider à créer le bassin versant ou le maillage. Les différentes tâches que le logiciel m'a permis d'accomplir seront exposées dans la suite du mémoire.

5.1.3 Géoportail de la Wallonie

Le géoportail est un site géré par la Wallonie qui regroupe énormément d'informations sur la géographie dans la partie francophone de la Belgique. Le géoportail nous a entre autres permis d'avoir accès au modèle numérique de terrain (MNT) de la zone étudiée. Le MNT est une représentation du terrain avec une résolution d'un mètre et une indication sur l'altitude de tous ces points. Nous avons également eu accès à des modélisations d'inondations de juillet 2021 faites par le SPW que je détaillerai plus loin.

5.2 Zone d'étude pour validation

Afin de mener à bien une étude, il faut un point de départ de ma zone ou tout au moins un point de référence. Le point qui a été choisi est situé à la rue des Forges, comme on peut le voir sur la carte à l'image 5.1, car il y a un limnimètre qui y est installé pour calculer le débit de la Biesme. J'ai donc choisi ce point car il serait possible d'avoir une comparaison entre la modélisation et les mesures de débits qui ont été faites durant les inondations de juillet 2021.



FIGURE 5.1 – Limnimètre à la rue des Forges.

5.2.1 Détermination du bassin versant

La première étape de l'étude hydrologique a été de télécharger le modèle numérique qui englobe l'entièreté du bassin versant de la Biesme. Il a donc fallu prendre une zone assez large pour cette première étape même si nous finirons par seulement nous concentrer sur la confluence. On peut voir le modèle numérique de

terrain dans la figure 5.2, où les différents tons de gris suggèrent différentes altitudes.

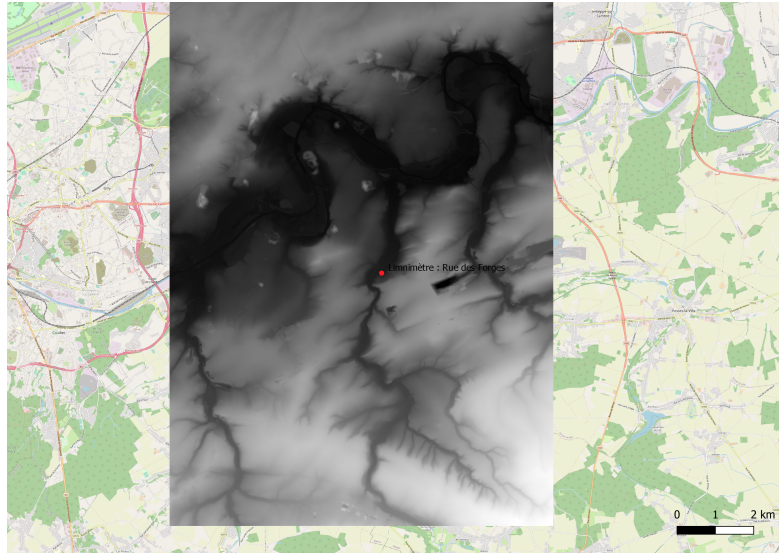


FIGURE 5.2 – Modèle Numérique de Terrain.

Une fois ce modèle récupéré, il a fallu le traiter pour qu'il soit accepté par le logiciel ATHYS ainsi que pour baisser sa résolution, sans quoi le fichier serait trop lourd pour être traité par ATHYS.

Ensuite, j'ai lancé le module "VICAIR" de ATHYS qui a une fonction qui permet de traiter les MNT. Cette fonction permet de tirer depuis le MNT un fichier de direction des écoulements qui, à son tour va permettre de connaître les endroits où l'eau va ruisseler lors de fortes précipitations.

L'étape suivante a été de tirer depuis le fichier des écoulements, un fichier du bassin versant par rapport au point de départ de l'étude. Une fois cette étape effectuée avec succès, j'ai pu repasser sur QGIS pour avoir une représentation graphique dudit bassin que l'on peut voir à l'image 5.3.

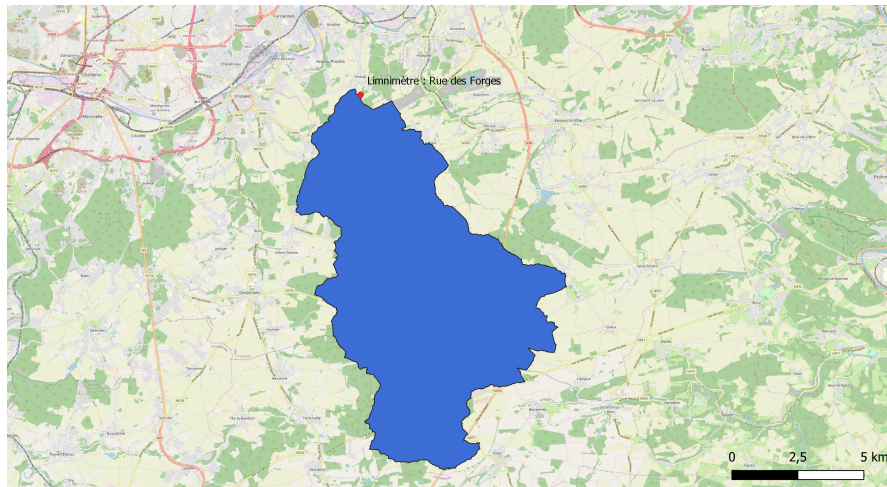


FIGURE 5.3 – Bassin versant du limnimètre à la rue des Forges.

5.2.2 Calcul d'un hydrogramme

La seconde grande étape a été de déterminer l'hydrogramme au point de référence. Puisque je dispose à présent du bassin versant par rapport à ce point, je peux utiliser la fonction des polygones de Thiessen ou Voronoï de QGIS avec les pluviomètres présents autour du bassin pour déterminer l'impact de chacun de ceux-ci.

Polygones de Thiessen ou de Voronoï

Les polygones de Thiessen ou de Voronoï sont créés à partir d'un ensemble de points appelés "sites" (ici ce sont les pluviomètres). Chaque site est entouré d'un polygone qui représente la région la plus proche de ce point que des autres sites. Par conséquent, chaque point à l'intérieur du polygone est plus proche de son site que de n'importe quel autre site.

En appliquant cette théorie au bassin versant, on peut trouver le pourcentage d'impact de chaque pluviomètre sur le bassin versant à l'image 5.4. Les pluviomètres sont désignés par des points [bleu](#).

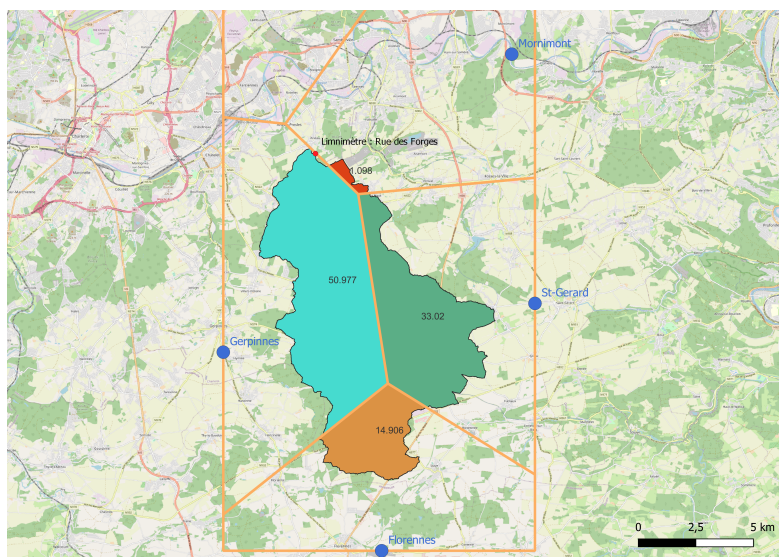


FIGURE 5.4 – Méthode de Voronoï appliquée au bassin versant du limnimètre à la rue des Forges.

Je peux ensuite changer de logiciel et passer sur ATHYS et plus précisément le module VISHYR. Je peux entrer un fichier avec les précipitations observées à chaque pluviomètre et les débits observés au limnimètre ainsi qu'un fichier d'entête dans lequel se trouve mes différentes stations avec leurs coordonnées. Ce module permet de transformer ces fichiers en un seul fichier qui pourra être lu facilement par le module MERCEDES.

Passons à présent au dernier module qui sera utilisé, à savoir MERCEDES. Ce dernier permet de créer l'hydrogramme à proprement parler en simulant la production d'eau due aux pluies et le transfert de l'eau d'une maille à une autre. Les mailles représentent une zone géographique d'une certaine résolution qui, dans notre cas, est de $1m \times 1m$.

Fonctions de production

En regardant le schéma à la figure 5.5, on se rend compte qu'il y a des appellations de pluies différentes. En effet, la première est la pluie brute ($P_b(t)$); c'est simplement celle qui tombe du ciel quand il pleut. L'autre est la pluie efficace ($P_e(t)$); c'est la pluie qui n'est pas captée par le sol et qui ne s'infiltré donc pas.

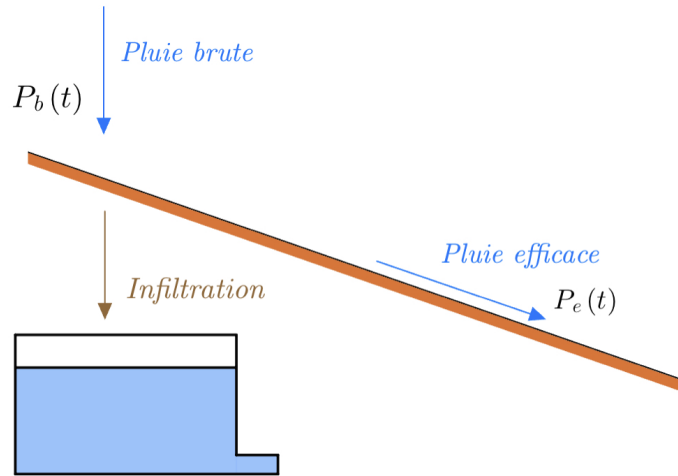


FIGURE 5.5 – Différentiation de la pluie brute et efficace (adapté de [5]).

Pour passer de la pluie brute à la pluie efficace, il y a plusieurs modèles qui sont les suivants :

Infiltration constante

$$P_e(t) = P_b(t) - I \text{ avec } I \text{ l'infiltration} \quad (5.1)$$

Coefficient de ruissellement constant

$$P_e(t) = C \cdot P_b(t) \text{ avec } C \text{ le coefficient de ruissellement} \quad (5.2)$$

Seuil

$$P_e(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } P_b(t) \leq \text{seuil} \\ P_b(t) & \text{si } P_b(t) > \text{seuil} \end{cases} \quad (5.3)$$

SCS

$$P_e(t) = C(t) \cdot P_b(t) \text{ avec } C(t) \text{ le coefficient de ruissellement} \quad (5.4)$$

Le module MERCEDES utilise le modèle SCS ce qui fait que dans ce cas, la pluie efficace s'exprime comme dans l'équation 5.4. À l'aide de la conservation de masse et de l'hypothèse de base de Mockus qu'on trouve ci-dessous, on peut assez facilement déterminer le coefficient de ruissellement.

point précédent ruisselle d'une maille à la suivante en suivant ces flèches. Le débit dans chaque case est donc facilement obtenu.

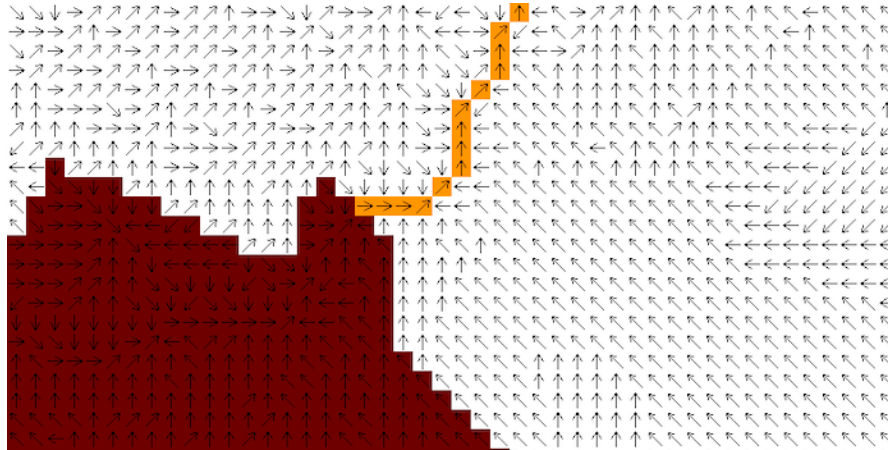


FIGURE 5.7 – Exemple de carte avec la direction d'écoulement des mailles.

Maintenant que l'on a compris comment l'eau se générerait dans une maille, et se propageait d'une maille à une autre, il reste à déterminer deux paramètres : le premier étant la vitesse de propagation de l'eau, et le deuxième, le temps de propagation.

La vitesse est en général égale à la vitesse initiale posée car dans la plupart des cas, les paramètres α et β valent 0. Dans l'équation 5.8, I_k représente la pente de la maille et S_k la superficie du bassin drainé par la maille.

$$V_k(t) = V_0 \cdot I_k^\alpha \cdot S_k^\beta \quad (5.8)$$

Le temps de propagation, lui, est déterminé par la distance que l'eau doit parcourir avant d'arriver à l'exutoire (l_k) ainsi que par les vitesses d'écoulement de chaque maille (V_k). Le temps de propagation s'exprime donc comme ceci :

$$T_m = \sum_{m \rightarrow \text{exutoire}} \left(\frac{l_k}{V_k} \right) \quad (5.9)$$

Une fois que tout est connu, il est possible de sommer chaque petit hydrogramme de chaque maille qui pourrait ressembler à l'image 5.8 pour former l'hydrogramme complet.

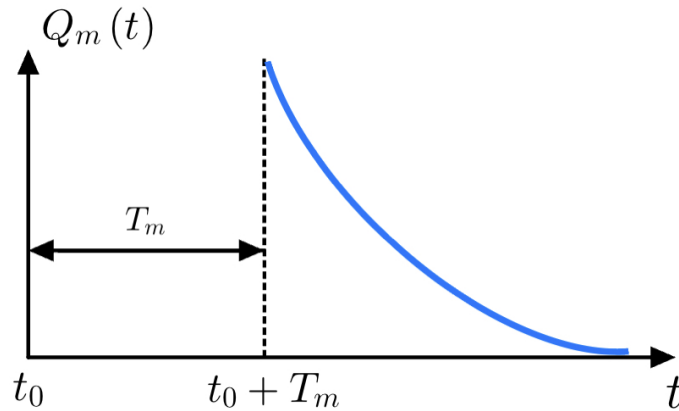


FIGURE 5.8 – Exemple d'hydrogramme unitaire (adapté de [5]).

Maintenant que le fonctionnement du module MERCEDES est clair, passons à l'explication de ce que j'ai fait pour mon cas d'étude.

Les fichiers d'entrées dans MERCEDES sont d'un côté le bassin versant calculé précédemment et de l'autre, le fichier regroupant toutes les informations sur les stations que je viens d'obtenir. Ensuite, il faut entrer les paramètres du modèle qui initialement sont choisis à peu près aléatoirement.

Les paramètres à entrer sont les suivants :

- S [mm] : Capacité de stockage souterrain
- $\frac{I_a}{S}$ [/] avec I_a : Perte avant tout ruissellement
- ω [/] : Facteur de reprise de vidange
- $\frac{1}{C_{vid}} \left[\frac{1}{\text{jour}} \right]$ avec C_{vid} : Facteur de vidange
- $V_0 \left[\frac{m}{s} \right]$: Vitesse d'eau initiale
- $\alpha \left[\frac{1}{\text{jour}} \right]$: Lié à la vitesse d'écoulement
- K_0 [/], K_1 [min] : Liés au coefficient de diffusion

Une fois les paramètres entrés, je peux faire tourner le programme et trouver en sortie un hydrogramme qui habituellement est assez proche de celui observé par le limnimètre mais qui ne colle évidemment pas parfaitement. On peut observer à l'image 5.9 la courbe **bleue** qui est l'hydrogramme observé introduit dans le logiciel, et la courbe **verte** qui est celle que le logiciel a calculé.

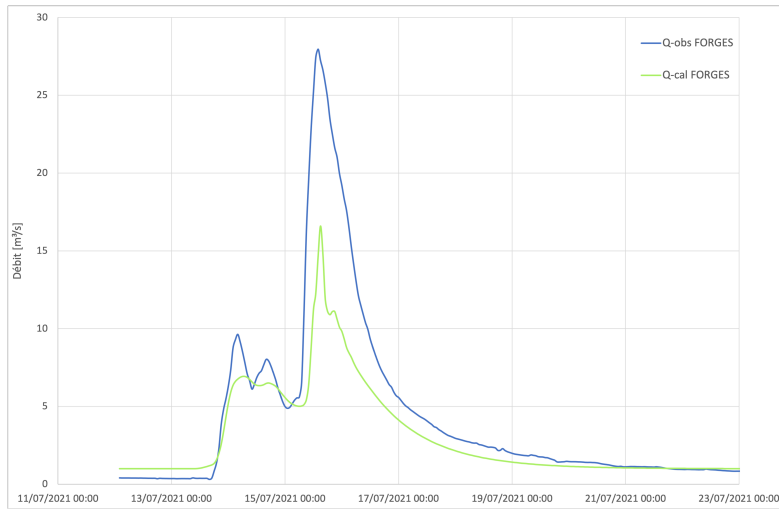


FIGURE 5.9 – Hydrogramme avant l'optimisation.

Pour essayer de faire coller la courbe un peu plus à la réalité, on se rend compte qu'il faut optimiser les paramètres. Cette étape est relativement facile puisque ATHYS dispose d'une fonction d'optimisation de paramètres dans le module MERCEDES. Il suffit de sélectionner les paramètres sur lesquels on veut jouer. Après avoir optimisé du mieux que l'on peut les différents paramètres, j'obtiens le nouvel hydrogramme, à nouveau en **vert**, sur l'image 5.10.

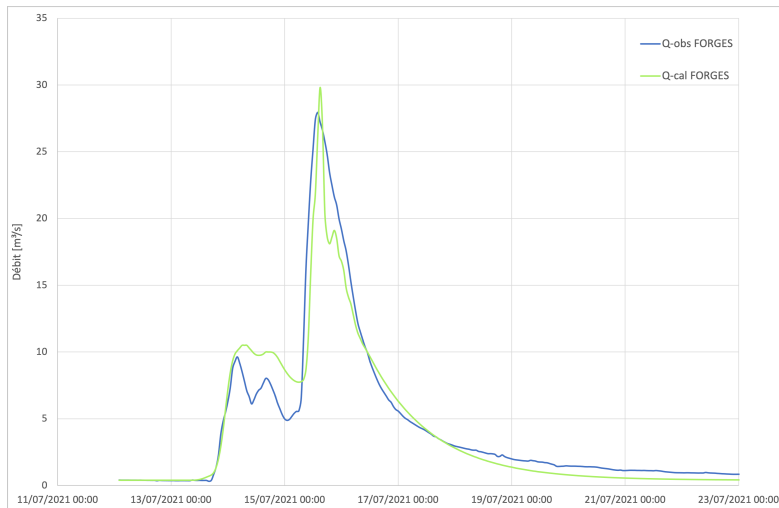


FIGURE 5.10 – Hydrogramme après l'optimisation.

Les paramètres après optimisation sont les suivants :

— S : 139,8 [mm]

- $\frac{I_a}{S} : 0,27 [/]$
- $\omega : 0,37 [/]$
- $\frac{1}{C_{vid}} : 0,9 \left[\frac{1}{jour} \right]$
- $V_0 : 0,96 \left[\frac{m}{s} \right]$
- $\alpha : 0 \left[\frac{1}{jour} \right]$
- $K_0 : 0 [/]$
- $K_1 : 0 [min]$

5.3 Zone réelle d'étude

Maintenant que j'ai pu déterminer les différents paramètres de la zone géographique de l'étude, je peux appliquer ces paramètres au point amont réel de la zone d'étude. Ce point peut être vu sur la carte ci dessous.



FIGURE 5.11 – Carte avec le point de départ de la zone d'étude.

On peut voir l'hydrogramme dans le graphe à l'image 5.12 avec, en **bleu** et **vert**, les données qu'on avait précédemment et, en **orange**, le calcul de l'hydrogramme au point explicité ci-dessus.

On ne remarque pas une grande différence entre les deux courbes calculées car la distance entre ces deux points est assez proche et ceci nous pousse donc à garder l'hydrogramme mesuré au limnimètre à la rue des Forges. En effet, le fait d'utiliser l'hydrogramme calculé au point amont de notre zone introduit beaucoup plus d'erreurs que d'utiliser celui mesuré un peu plus à l'amont.

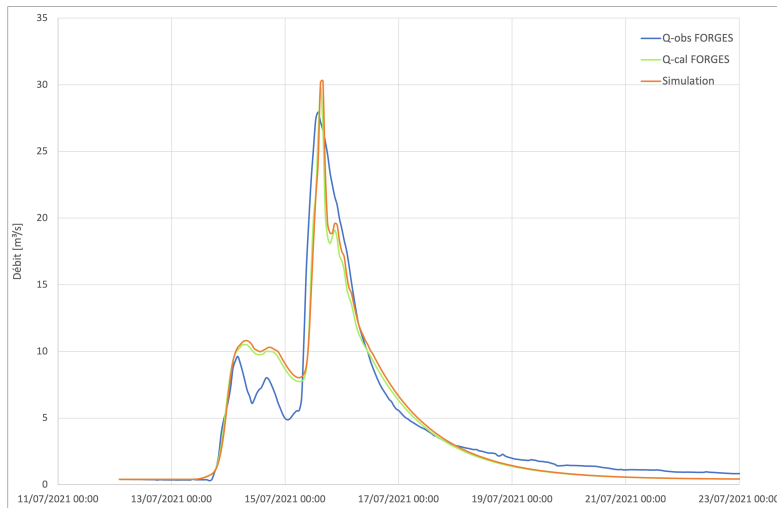


FIGURE 5.12 – Hydrogramme appliqué au point de départ.

5.4 Conclusion intermédiaire

Nous avons, dans ce chapitre, déterminé un modèle qui permet à présent de calculer le volume d'eau qui arrive au point étudié en fonction du temps. Dans le processus de détermination de l'hydrogramme, beaucoup de travail a été fait pour finalement choisir l'hydrogramme mesuré dont je disposais depuis le début. Cependant, toute cette étude m'a permis d'être confiant que d'utiliser cet hydrogramme était la meilleure des solutions.

Il nous reste à présent plus qu'à commencer la simulation et c'est ce que nous verrons dans le prochain chapitre.

Chapitre 6

Hydroflow

6.1 Fonctionnement du modèle

6.1.1 Théorie

Hydroflow est basé sur la méthode des volumes finis. Cette méthode a comme principe de transformer les équations différentielles qui agissent sur des volumes différentiels en équations algébriques sur des volumes finis. La première étape de la méthode est de discrétiser le domaine en un maillage, donc les mailles peuvent prendre n'importe quelle forme. La forme la plus utilisée reste cependant les triangles, cela étant dû à la facilité avec laquelle on peut les inscrire dans des géométries complexes. Ensuite les équations sont transformées en équations algébriques en les intégrant sur chaque élément. Enfin, les équations sont résolues pour déterminer les valeurs des variables sur chaque élément.

Sur le domaine, les éléments partagent des interfaces avec d'autres éléments et à chaque itération, les variables sont mises à jour via la formule suivante :

$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^n - \frac{\Delta t}{\Omega_i} \sum_{j=1}^{nb} \mathbf{T}_j^{-1} \mathbf{F}_j^* (\bar{\mathbf{U}}_j) \mathbf{L}_j + \mathbf{S}_i \Delta t \quad (6.1)$$

Avec,

- \mathbf{U} , le vecteur de variables
- n , l'exponentielle temporelle
- i , l'index spatial
- Δt , le pas de temps
- Ω_i , l'aire de l'élément i
- nb , le nombre d'éléments dans le domaine

- \mathbf{T} , la matrice de rotation
- \mathbf{F}_j^* , le flux à l'arête j
- \mathbf{L}_j , la longueur de l'arête j
- \mathbf{S} , les termes sources

La méthode des volumes finis est une méthode strictement conservative, ce qui implique que le volume d'eau sortant d'une cellule via une arête doit impérativement être égal à celui entrant dans la cellule suivante via la même arête.

Pour déterminer ces flux qui passent d'une cellule à une autre, il faut avoir recours à un solveur. Le solveur est implémenté de façon particulière pour chaque modèle utilisé. Dans le cas d'hydroflow, le modèle le plus simple qui est implémenté est le modèle de Saint-Venant en 2D et le solveur utilisé est le HLLC.

Modèle de Saint-Venant en 1D

Les équations de Saint-Venant permettent de caractériser l'écoulement à surface libre, entre autre, dans le cadre de l'étude numérique du profil de la ligne d'eau ainsi que du débit.

Les hypothèses qui permettent d'arriver aux équations de Saint-Venant sont les suivantes (SOARES FRAZÃO 2002 [6] et DELPIERRE 2022 [7])

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

À l'aide des équations tirées de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement, on peut obtenir les équations de Saint-Venant suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = gA(S_0 - S_f) + gI_2 \end{cases} \quad (6.2)$$

Avec,

- A , l'aire de la section de canal
- Q , le débit
- g , l'accélération gravitationnelle
- S_0 , la pente de fond du canal
- S_f , la pente de la ligne de charge
- $I_1 = A\frac{h}{2}$ pour un canal rectangulaire
- $I_2 = 0$ pour un canal avec une largeur constante

Ce sont ces équations qui seront résolues par le solveur et qui permettent de déterminer le flux.

La résolution complète pour obtenir l'équation 6.2 peut être retrouvée dans le mémoire de Nathan Delpierre (DELPIERRE 2022 [7]).

Solveur HLLC

Le solveur utilise des estimations de la vitesse des vagues basées sur les valeurs propres de la jacobienne du modèle pour déterminer les flux. Ces estimations de vitesses de vagues permettent d'introduire des poids pour ajuster correctement les flux d'une cellule à une autre.

Les équations de Saint Venant en 2D possèdent 3 caractéristiques qu'on retrouve à l'équation 6.3. Les caractéristiques sont des chemins de propagation d'information du système 6.2 le long desquelles les dérivées partielles deviennent des dérivées totales.

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= u_n - c \\ \lambda_2 &= c \\ \lambda_3 &= u_n + c\end{aligned}\tag{6.3}$$

Avec,

- u_n , la vitesse de l'eau dans la direction normale à l'arête analysée
- $c = \sqrt{gh}$, la célérité où g est l'accélération gravitationnelle et h la hauteur d'eau.

Grâce à ces caractéristiques, on peut estimer la vitesse des vagues comme ceci :

$$\begin{aligned}\lambda^- &= \max(\lambda_{1,L}, \lambda_{1,R}, 0) \\ \lambda^+ &= \max(\lambda_{3,L}, \lambda_{3,R}, 0)\end{aligned}\tag{6.4}$$

Où le L et le R désignent respectivement la cellule gauche et droite.

Il est finalement possible d'obtenir les flux :

$$\begin{aligned}
 q_n^* &= \frac{\lambda^+ q_{n,L} - \lambda^- q_{n,R} + \lambda^+ \lambda^- (z_{w,R} - z_{w,L})}{\lambda^+ - \lambda^-} \\
 \sigma_n^* &= \frac{\lambda^+ \sigma_{n,L} - \lambda^- \sigma_{n,R} + \lambda^+ \lambda^- (q_{n,R} - q_{n,L})}{\lambda^+ - \lambda^-} \\
 \mu_{nt}^* &= \begin{cases} v_{t,L} q_n^* & \text{if } u_n \geq 0 \\ v_{t,R} q_n^* & \text{if } u_n < 0 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

Avec,

- n et t qui indiquent respectivement les directions normales et tangentielles au côté
- v , la vitesse
- σ_n , le flux de quantité de mouvement normal
- μ_{nt} , le flux de quantité de mouvement tangentiel

6.1.2 Utilisation du programme

Hydroflow est basé sur un git qui est continuellement mis à jour et retravaillé par l'équipe de Mme Soares-Frazão de l'UCLouvain. Ils travaillent sur le programme pour le rendre plus intuitif pour les utilisateurs ainsi que pour rajouter des fonctionnalités et pour le rendre encore plus exact.

Une fois lié au git, il est possible d'explorer différentes branches du projet sur lesquelles différentes personnes travaillent mais pour avoir la version la plus au point, il faut se mettre sur la branche principale. En effet, la branche principale a été testée et est normalement au point et fonctionne sans erreur.

Le programme s'organise en deux parties dans deux langages de programmation différents. La première est l'interface qui permet de lancer la simulation et cette partie est codée en python. La deuxième est le code de résolution à proprement parler qui est codé en C.

Interface python

Dans l'interface python, on retrouve toute une série de fonctions qui permettent d'initialiser la simulation. Je vais lister les fonctions principales que j'ai utilisé ci-dessous :

```
mesh = hydroflow.mesh(mesh_path)
```

Qui permet d'initialiser le maillage à partir d'un fichier que j'introduis.

```
mesh.set_nodes_elevation_from_tif("MNT_reduit.tif")
```

Qui initialise la hauteur de chaque noeud à partir du modèle numérique de terrain de la zone d'analyse.

```
model.set_transmissive_boundaries("Q_out")
model.set_boundary_hydrogram("Q_in_Biesme",
                              "hydrogramme_Biesme.txt")
model.set_boundary_water_discharge("Q_in_demergement", -0.356)
```

Qui permettent de poser différents types de frontières. Dans le premier cas, on impose une condition transmissive, c'est à dire que toute l'eau qui arrive à cette frontière peut s'écouler librement. Dans le deuxième cas, on impose un hydrogramme à l'entrée d'une frontière et enfin dans le dernier, on impose un débit constant.

```
model.set_friction_coefficient("domain", 0.03)
```

Qui permet de poser un coefficient de Manning pour l'entièreté du domaine ou seulement certaines parties.

```
model.set_ending_time(504000)
```

Qui détermine le temps total de simulation en secondes.

```
model.export()
model.solve()
```

Qui envoient les informations au code C et qui le lancent pour la simulation.

```
model.resume_simulation("Domaine_rempli.txt")
```

Qui permet de relancer la simulation à partir d'un résultat d'une simulation précédente. C'est très pratique pour changer le type de maillage seulement sur une certaine partie de la simulation.

Une fois le code python lancé et les différentes lignes de codes exécutées, le code lance la partie en C et il n'est plus possible de contrôler le programme C avec l'interface python.

Programme en C

Une fois que l'on est dans le programme C, le code calcule des pas de temps et résout les équations expliquées précédemment sur les différentes mailles du domaine.

Il sort des fichiers de type ".txt" à intervalles réguliers avec les coordonnées de chaque point ainsi que la hauteur d'eau et les débits dans les deux directions plan. Ceci permet par la suite d'afficher les résultats des différents fichiers et de pouvoir voir l'évolution de la simulation dans le temps.

6.2 Validation du modèle

6.2.1 Première simulation

Dans un premier temps et pour m'habituer au fonctionnement d'hydroflow et des différentes fonctions, j'ai opté pour une modélisation très simple. En effet, le domaine ne prenait pas encore en compte la Sambre et l'étendue du domaine s'avérait ne pas être assez large comme on pourra le voir par la suite.

Comme expliqué précédemment, il fallait entrer un maillage dans le programme et le maillage que j'ai décidé d'utiliser n'était pas homogène. C'était un maillage dont les points étaient écartés de $15m$ au niveau du lit majeur et de $5m$ au niveau du lit mineur. Ceci permet d'avoir une plus grande précision dans les zones où c'est plus important tout en limitant le temps de calcul.

J'ai introduit un débit constant de $7\frac{m^3}{s}$ dans la Biesme qui était proche de la moyenne de l'hydrogramme que l'on avait obtenu précédemment et à l'aval, j'ai simplement laissé une condition transmissive pour laisser l'eau s'écouler naturellement.

On peut voir à l'image 6.1 l'état de la zone après 6h de simulation. On peut observer que l'eau vient buter contre une frontière qui n'existe pas en réalité. Cela vient du fait que le domaine choisi n'est pas assez large et que par conséquent le niveau d'eau monte contre la bordure du domaine.

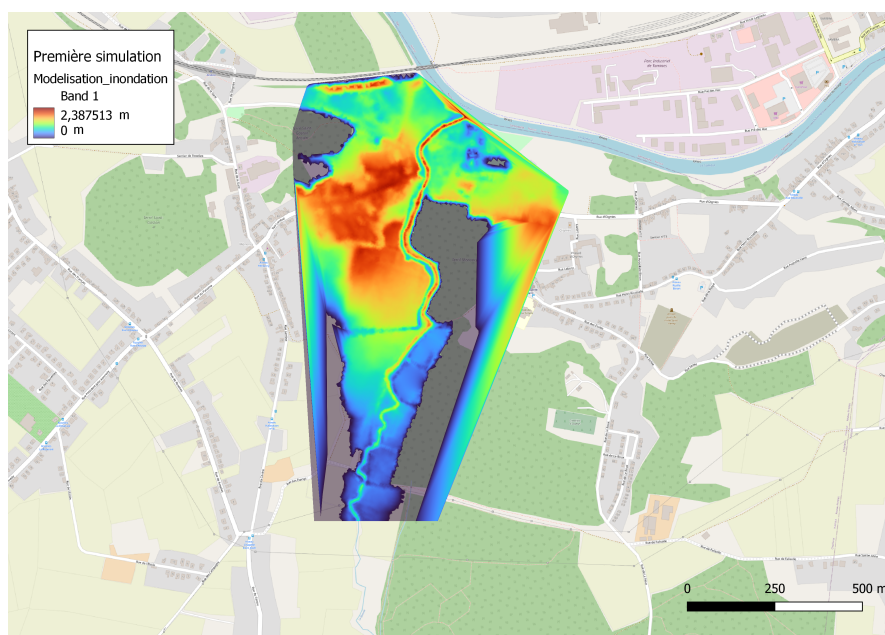


FIGURE 6.1 – Hauteur d'eau lors de la première simulation.

Cette première modélisation a permis d'avoir des premiers résultats qui n'étaient évidemment pas corrects mais qui montraient tout de même où et comment l'inondation s'est produite. De plus, elle m'a permis d'adapter mon domaine et de me familiariser avec la méthode.

6.2.2 Simulation plus représentative

Dans un deuxième temps, j'ai implémenté l'hydrogramme d'entrée dans la Biesme ainsi que celui dans la Sambre.

L'hydrogramme de la Sambre a été obtenu via le Département Expertises Hydrauliques et Environnement du SPW et les mesures de débits ont été faites à la station de Châtelet. Si on regarde sur la carte à l'image 6.2, on peut voir un point qui indique la station de mesure de Châtelet et l'autre qui indique l'entrée de notre domaine au niveau de la Sambre. Dû au fait que la station de mesure est assez proche de l'entrée de notre domaine et que la Sambre ne joue pas un rôle majeur dans l'inondation, il a été décidé d'appliquer l'hydrogramme à l'entrée du domaine et de négliger l'apport d'eau supplémentaire entre la station de mesure et notre domaine.

L'instrument de mesure utilisé par le SPW à Châtelet est un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) dont une représentation peut être vue à l'image 6.3. Un ADCP est un instrument de mesure qui utilise l'effet de Doppler en envoyant des ondes avec une certaine fréquence afin qu'elles aillent buter contre les particules

d'eau pour ensuite revenir vers l'instrument. Les particules qui se rapprochent de l'ADCP retournent une fréquence plus élevée et ceux qui s'éloignent retournent une fréquence plus faible. En fonction de la fréquence de l'onde de retour et du temps qu'elle a pris pour revenir, il est possible de déterminer des vitesses et donc des débits. L'ADCP peut être installé dans le fond du lit, mesurant vers le haut tout comme en étant sur le côté et mesurant cette fois ci transversalement.



FIGURE 6.2 – Position de la station de mesure de châtelet.

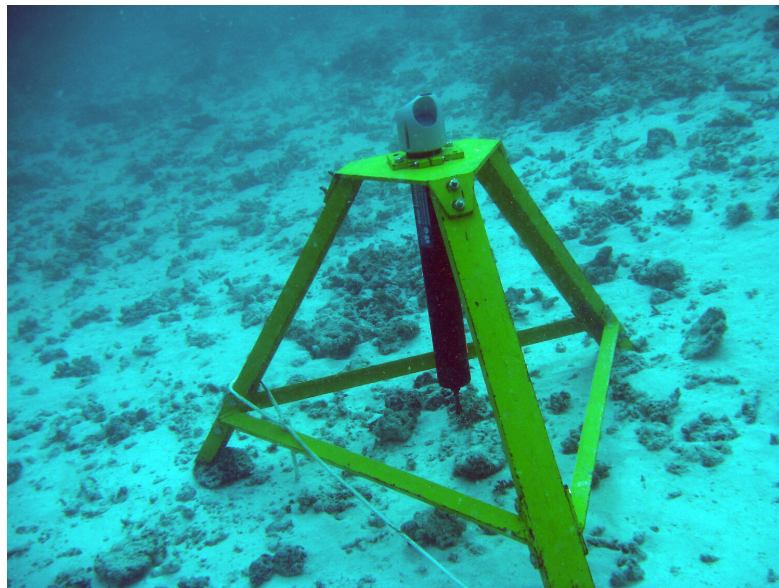


FIGURE 6.3 – Un ADCP placé sur le sol marin [8].

L'hydrogramme de Châtelet, qui est un hydrogramme horaire et qui peut être

vu dans le graphique à la figure 6.4, présente plusieurs valeurs non existantes pour la période que l'on étudie. Nous pouvons imaginer que c'est dû à un problème de l'instrument de mesure qui n'a probablement pas pris de mesure ou bien la mesure n'était pas logique et a donc été supprimée par le SPW.

Afin de régler ce problème de mesure, j'ai décidé d'égaliser les mesures manquantes aux mesures de l'heure précédente. Une autre possibilité aurait été de prendre la moyenne entre l'heure d'avant et l'heure d'après mais j'ai préféré simplement reporter la mesure précédente.

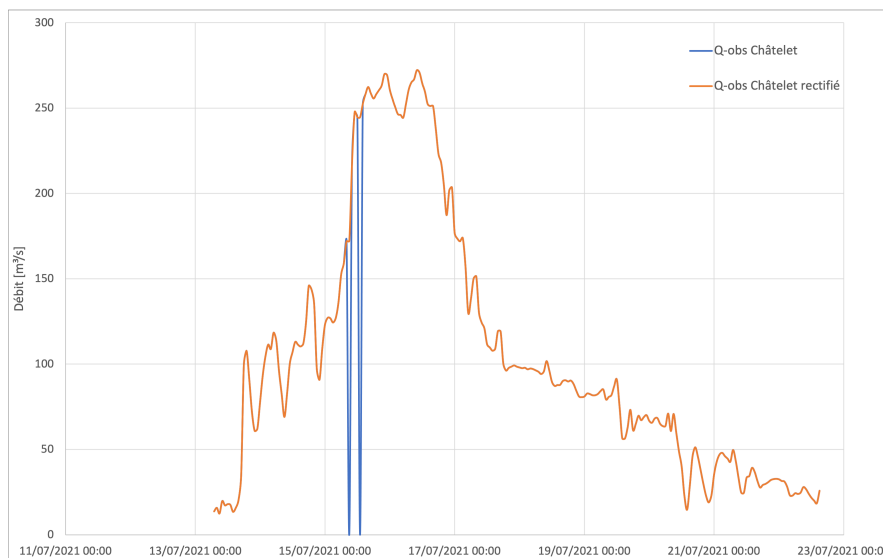


FIGURE 6.4 – Hydrogramme observé à Châtelet.

En plus de l'implémentation des hydrogrammes, j'ai pu adapter le domaine pour faire disparaître en grande partie les murs contre lesquels l'eau montait. Pour ce faire, j'ai trouvé une couche de données du SPW qui indiquait les zones qui avaient été submergées durant les inondations de juillet 2021. Le modèle a été créé en interpolant le plan d'eau entre les différentes données de hauteur d'eau qui ont été récoltées lors de l'enquête de terrain "SURVEY Géomatique" du SPW [9]. Cette carte m'a permis de facilement englober la zone et de constituer mon nouveau domaine d'analyse.

Le même type de maillage que précédemment a été utilisé, toujours dans le but d'avoir plus de précision aux endroits importants tout en limitant le temps de calcul.

Les résultats étaient assez encourageants car on se rapprochait de hauteurs d'eau qui étaient vraisemblables. En effet, au niveau du rond point de la rue lambot, on peut observer une hauteur d'eau qui est aux alentours de 2,5m. En comparant avec

les données d'inondation du SPW et la hauteur observée qui, d'après les habitants, arrivait en dessous de la fenêtre du premier étage, la simulation était dans le même ordre de grandeur.

On peut voir une comparaison de notre simulation à ce stade avec les données d'inondations du SPW. On observe que ce sont les mêmes zones qui sont inondées et que les couleurs qui indiquent la hauteur d'eau sont assez semblables.

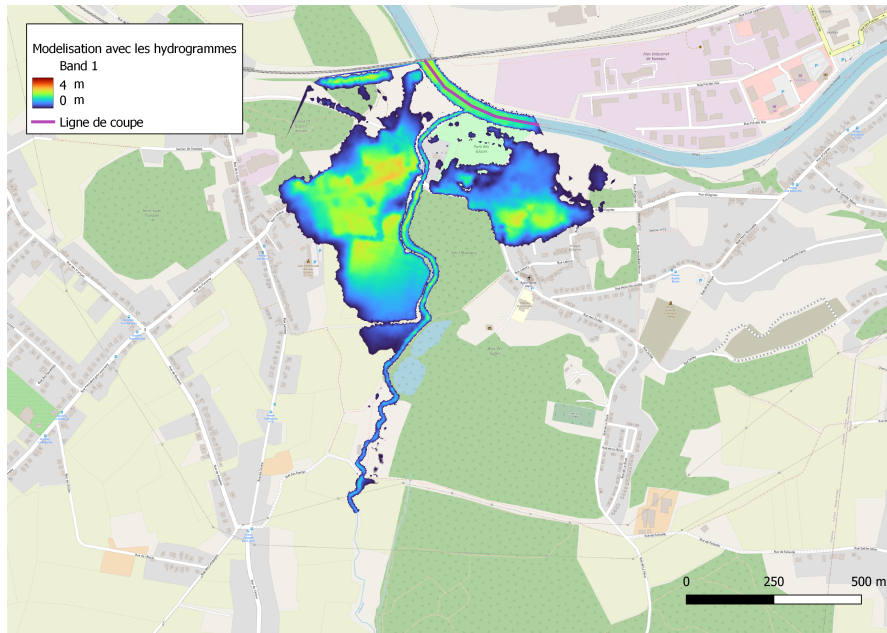


FIGURE 6.5 – Hauteurs d'eau en prenant en compte les hydrogrammes en entrée.

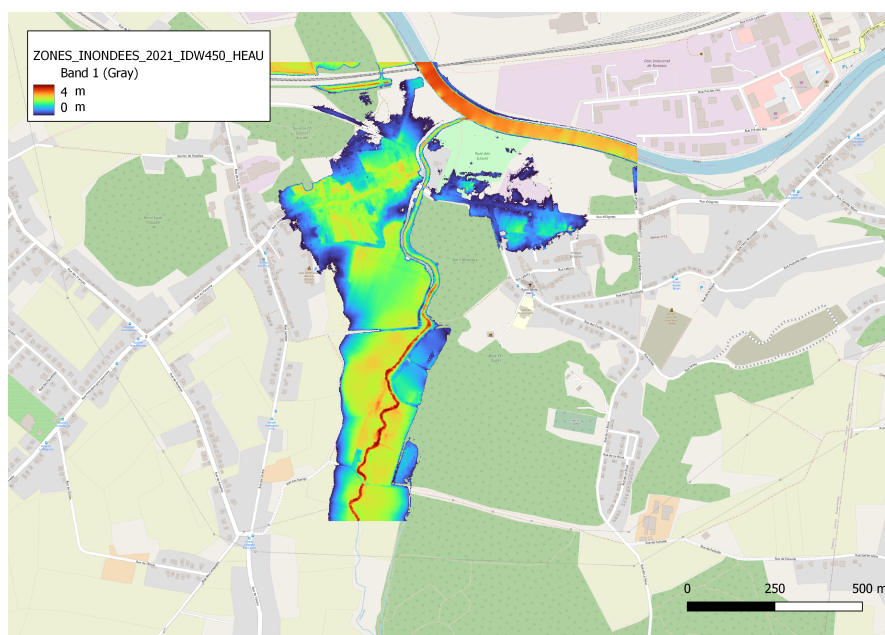


FIGURE 6.6 – Hauteurs d'eau modélisées par le SPW.

Un problème est apparu après inspection du niveau d'eau dans la Sambre. En effet, si l'on regarde le niveau d'eau le long de la ligne mauve dans l'image 6.5, on peut voir qu'un profil d'eau M2 apparaît et influence le niveau d'eau en amont de la confluence. Ce profil peut être observé car la condition avale est une condition transmissive et que par conséquent, l'eau sort du domaine comme si nous avions un trou infiniment grand. Puisque ce profil M2 impacte le niveau d'eau en amont de la confluence, la simulation ne représente pas la réalité. En effet, le niveau d'eau au niveau de la confluence devrait être plus haut et donc causer une augmentation du niveau d'eau dans la Biesme qui, à son tour, pourrait provoquer un débordement plus important.

Il existe deux solutions pour remédier à ce problème : la première étant d'imposer une condition avale sur le niveau d'eau et la deuxième, qui est celle que j'ai choisi, est d'augmenter la longueur de la Sambre prise dans le domaine. Ceci permet de décaler le profil M2 vers l'aval et donc d'éviter que le profil impacte le niveau d'eau à hauteur de la confluence.

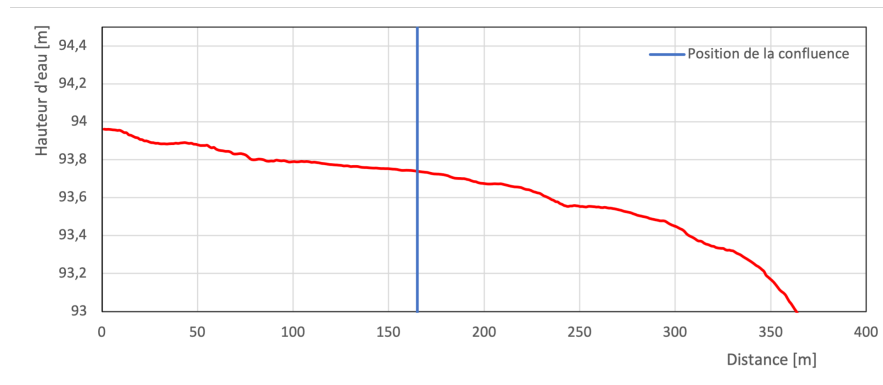


FIGURE 6.7 – Profilé M2 qui remonte plus haut que la confluence.

6.2.3 Dernière simulation de validation

Dans cette dernière simulation, plusieurs choses ont été corrigées afin de représenter au mieux la réalité. Tout d’abord, comme expliqué au point précédent, le domaine a été agrandi, comme on peut le voir sur l’image 6.8, pour ne plus avoir de problème avec le profil d’eau M2 au niveau de la confluence. Ceci pourra être prouvé plus bas.

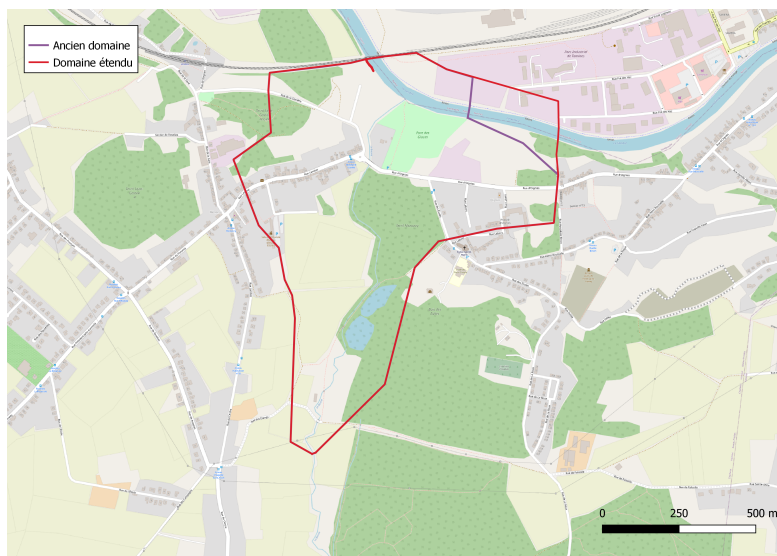


FIGURE 6.8 – Comparaison de l’ancien domaine et du domaine étendu.

Ensuite, il a fallu prendre en compte l’impact de la station de démergement. Comme expliqué précédemment, la station de démergement permet de pomper de

l'eau de la cuvette vers, d'un côté la Sambre et de l'autre, la station d'épuration de Roselies. Comme il n'existe pas de fonction dans hydroflow pour faire passer de l'eau d'une cellule à une autre et donc de simuler l'effet de la pompe, j'ai procédé en faisant une entaille dans le domaine le long de la digue. Cette entaille ne pose pas de problème puisque la digue qui sépare la station de la Sambre n'a jamais été submergée, que ce soit lors des différentes simulations que j'ai pu faire auparavant ou lors des inondations de juillet 2021. Pour simuler la pompe, j'ai créé une zone de frontière depuis laquelle je sors un débit constant d'eau, qui est de $5250 \frac{m^3}{h}$ puisque $4000 \frac{m^3}{h}$ sont pompés vers la Sambre et $1250 \frac{m^3}{h}$ sont pompés vers la station d'épuration. J'ai également créé une zone de frontière avec un débit d'entrée constant de $4000 \frac{m^3}{h}$ vers la Sambre. Tout ceci peut être vu sur la carte à l'image 6.9 où les flèches représentent le déplacement de l'eau avec les pompes.

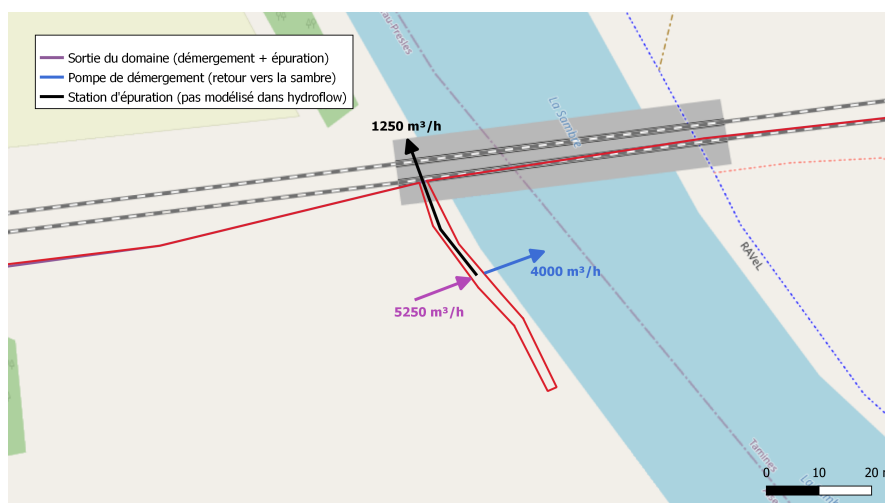


FIGURE 6.9 – Implémentation de la station de démergement et d'épuration dans hydroflow.

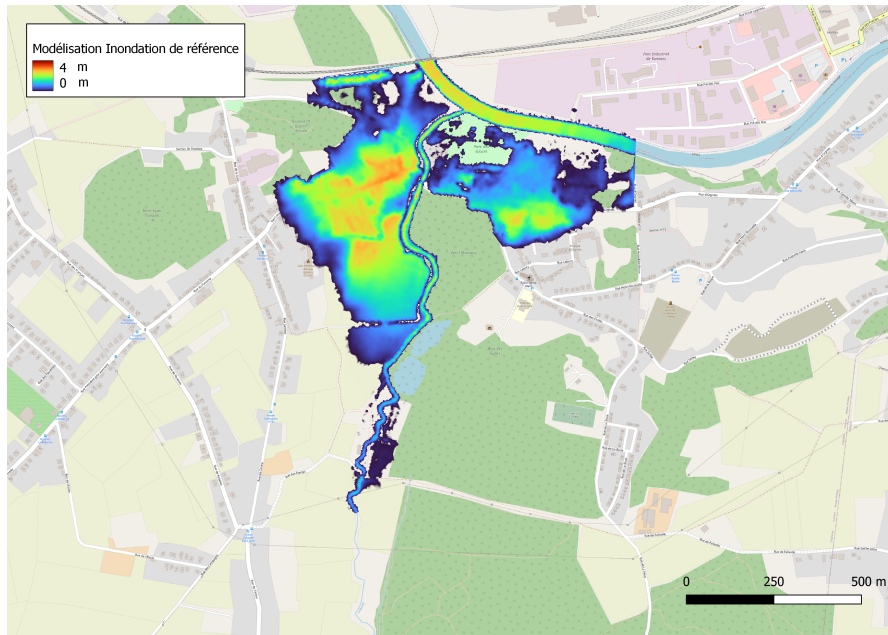


FIGURE 6.10 – Simulation de référence.

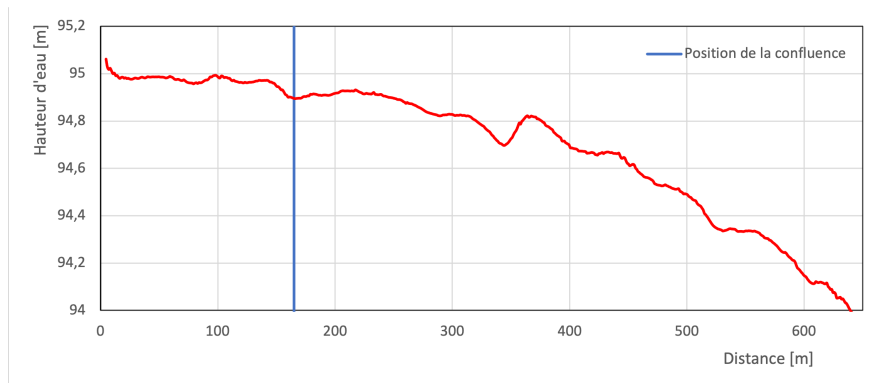


FIGURE 6.11 – Profil d'eau avec le domaine adapté.

Les résultats de la simulation peuvent être vus à la figure 6.10 et on peut les comparer aux données d'inondations du SPW qui se trouvent à la figure 6.6. On peut voir que dans l'ensemble les hauteurs d'eau sont assez similaires. Ceci m'indique que la simulation commence à être assez précise mais il faut tout de même analyser plus de choses.

On peut, par exemple, comparer un graphe de la profondeur d'eau le long de la rue lambot dans le cas de ma simulation en rouge et dans le cas des mesures du SPW en bleu.

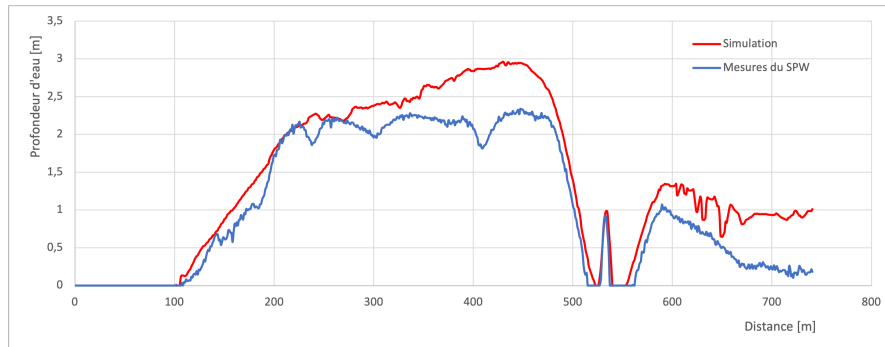


FIGURE 6.12 – Comparaison des profondeurs d'eau.

On peut voir que les deux courbes sont assez similaires mais qu'à un endroit elles divergent fortement. On peut se rendre compte que la courbe de mesures du SPW présente une descente fort marquée suivie d'une remontée également fort marquée. Pour voir si cette anomalie est liée à notre simulation ou bien aux données récoltées par le SPW, j'ai fait un graphe qui somme la profondeur de l'eau à la hauteur du sol. Dans la théorie, on devrait observer un plan d'eau parfaitement plat puisqu'on a affaire à un liquide.

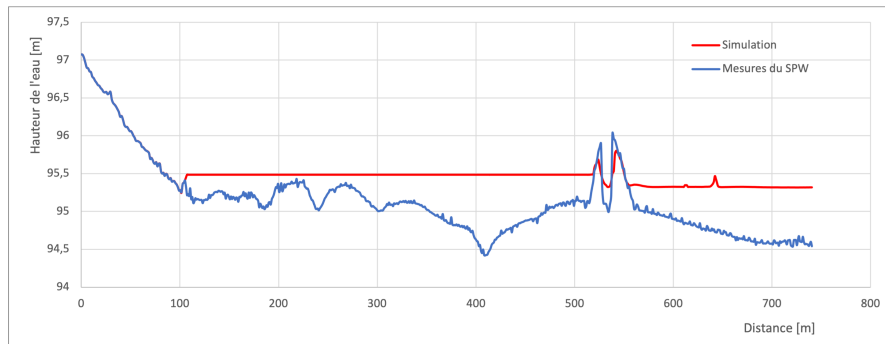


FIGURE 6.13 – Comparaison des hauteurs d'eau par rapport au niveau de la mer.

On peut voir que la simulation n'a pas de soucis au niveau de la hauteur d'eau puisque le plan d'eau est bien horizontal. En revanche, les données d'inondations récoltées ne sont pas parfaites et cela vient probablement du fait que ce sont des mesures faites à différents endroits qui ont par la suite été interpolées.

Un autre point auquel il faut prêter attention est que la direction dans laquelle les débits sont injectés dans les deux cours d'eau sont dans la même direction que l'écoulement. Ceci permet d'éviter des redirections de l'écoulement qui viendraient légèrement fausser la simulation. C'est encore plus important pour le cas de la

Biesme dans cette étude puisque le cours d'eau est assez étroit et ne possède pas de hautes berges. Dans le cas de la Sambre, il y a de grandes digues sur les côtés et la Sambre n'a pas d'impact sur les inondations à cette entrée du domaine. Pour être sûr que la direction du débit injecté est satisfaisante, j'ai pu sortir les graphes 6.15 depuis hydroflow qui a une option pour afficher la direction de l'écoulement.

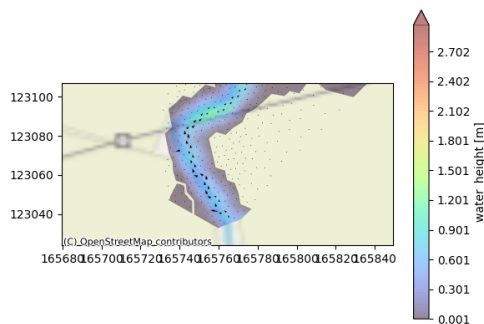


FIGURE 6.14 – Direction du débit à l'entrée de la Biesme.

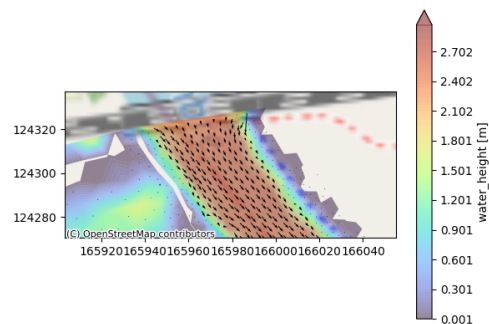


FIGURE 6.15 – Direction du débit à l'entrée de la Sambre.

Pour finir, la question de la taille du maillage a été abordée. Je me suis demandé si le maillage utilisé jusqu'à présent était assez représentatif ou s'il fallait que je l'affine. Pour ce faire, j'ai lancé une simulation avec un maillage homogène de $5m$ par maille pour l'entièreté du domaine. Les résultats obtenus avec ce maillage sont très semblables mais par contre le temps de calcul s'est vu très fortement augmenté. En effet, la simulation habituelle d'environ $24h$ avec le maillage en gradient allant de $15m$ par maille à l'extrémité du domaine à $5m$ dans le lit mineur des cours d'eau, est passé à une simulation d'à peu près $75h$.

Avec ces informations, j'ai décidé de garder le maillage initial car le rapport temps de calcul-précision était bien meilleur que pour le maillage homogène.

6.3 Conclusion intermédiaire

Ce chapitre nous a permis de comprendre comment le programme de simulation fonctionnait ainsi qu'une partie de la théorie derrière celui-ci. Le chapitre est également passé sur les différentes étapes depuis la première simulation jusqu'à la simulation la plus réaliste que j'ai effectué.

Maintenant qu'une simulation de référence est disponible et correspond à mes attentes, il convient de mettre en place plusieurs aménagements différents qui pourraient impacter la montée des eaux. C'est de ceci que la prochaine partie du mémoire va traiter.

Troisième partie

Propositions d'aménagements

Chapitre 7

Analyse des résultats la modélisation de référence

L'analyse de la modélisation de référence a déjà été faite précédemment afin de s'assurer qu'on pouvait lui faire confiance pour les aménagements que l'on veut implémenter. Cependant, les résultats en tant que tels n'ont pas été analysés. Dans ce court chapitre, je vais exposer les différentes données intéressantes que je pourrai par la suite comparer aux aménagement, ceci afin de déterminer si l'aménagement a un effet bénéfique.

7.1 Éléments clefs de l'inondation

L'eau commence légèrement à sortir du lit de la Biesme 7000 secondes après le début de la simulation, c'est-à-dire vers 9h le 13 juillet. Ceci paraît assez étonnant car, d'après les différents rapports lus, les inondations n'ont commencé que plus tard. Ceci est probablement dû aux légères imprécisions dans le modèle numérique de terrain car on voit un relativement gros rétrécissement de la Biesme à l'endroit du débordement. Or après vérification sur le terrain, ce rétrécissement n'a pas l'air d'exister.

Vers 10h30 (11000sec), l'eau atteint une petite trentaine de centimètres derrière la digue et commence à passer par dessus à un endroit bien précis.

Pendant les 8h suivantes, le champ qui se trouve à l'aval de la digue se remplit doucement jusqu'à ce que le niveau submerge la route séparant le champ de la ville. À partir de ce moment, la rue Lambot commence à être inondée et le niveau d'eau ne fait qu'augmenter jusqu'à se stabiliser vers 3,20m à l'endroit le plus profond. Ce niveau est atteint le 15 juillet à 14h après environ 200000sec de simulation.

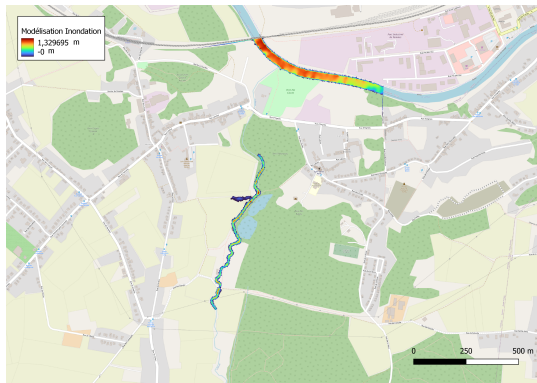


FIGURE 7.1 – Simulation de 7000 sec.

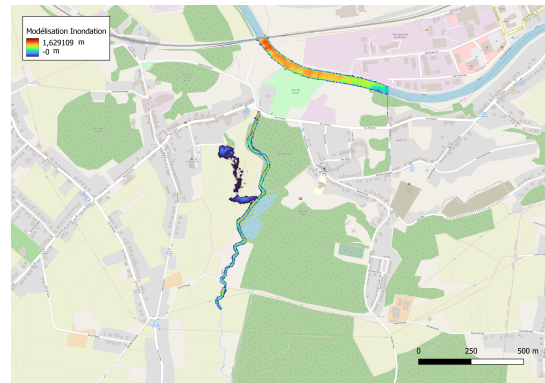


FIGURE 7.2 – Simulation de 11000 sec.

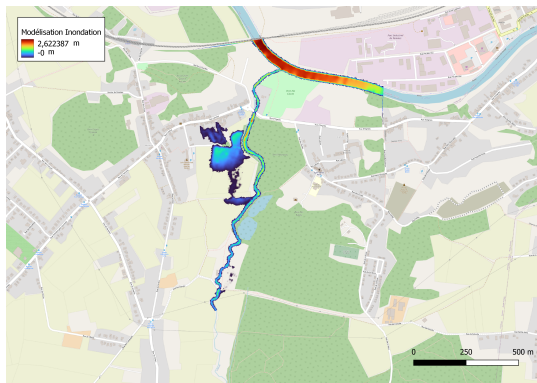


FIGURE 7.3 – Simulation de 40000 sec.

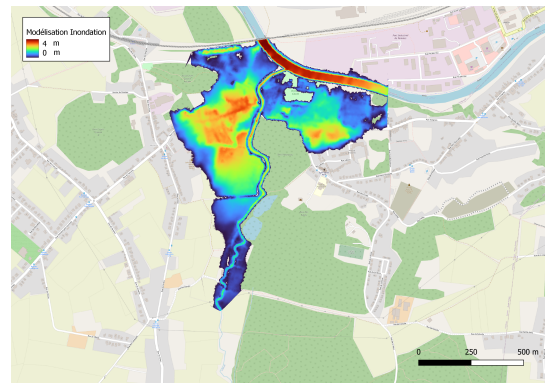


FIGURE 7.4 – Simulation de 200000 sec.

On peut, par la suite, voir que le niveau d'eau commence à baisser puisque le gros de la pluie est passée. À la fin de notre simulation, longue de 503000sec (5 jours et 20 heures), il y a une profondeur maximale d'eau de 2,89m. L'image 7.5 montre l'état général de la zone à la fin de la simulation.

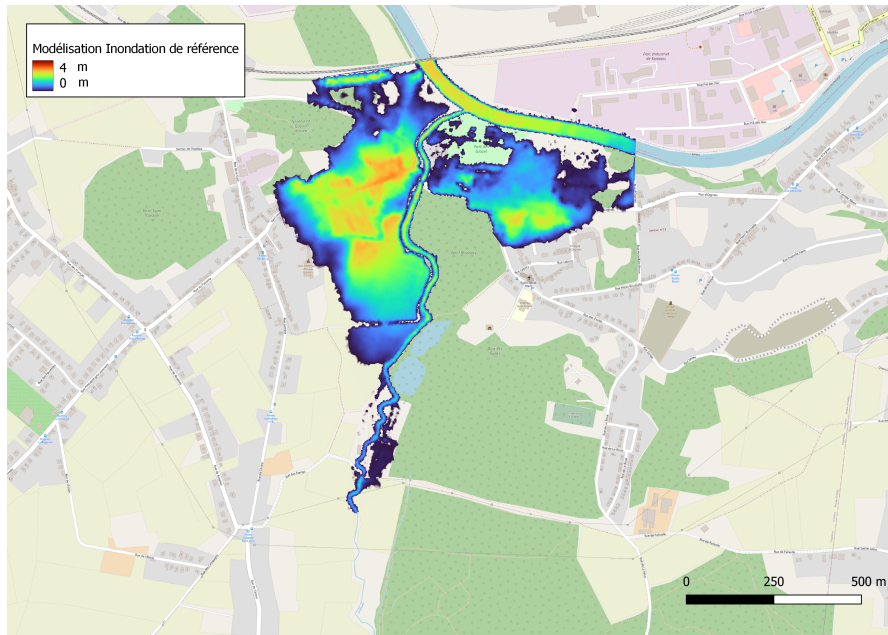


FIGURE 7.5 – Simulation de référence.

Chapitre 8

Augmentation de la taille de la pompe

Comme expliqué précédemment, la pompe actuelle permet de pomper $4000 \frac{m^3}{h}$ depuis la cuvette vers la Sambre.

Un des points qui avait été abordé avec la commune était de voir s'il était possible d'augmenter la taille de la pompe et si ceci aurait un impact sur le niveau d'eau.

8.1 Méthode utilisée

Afin d'explorer cette possibilité, j'ai décidé de doubler la capacité de la pompe de démergement pour arriver à une capacité de $8000 \frac{m^3}{h}$. En parallèle de cette pompe, et comme exposé plus tôt dans ce document, une pompe supplémentaire qui approvisionne la station d'épuration existe. Ceci donne une capacité de pompage totale de $9250 \frac{m^3}{h}$.

Afin de doubler la capacité de la pompe de démergement, il a suffi de modifier la valeur de pompage dans le code Python.

8.2 Analyse des résultats

Pour donner une idée à l'échelle globale, on peut voir ci-dessous des cartes de l'état de l'inondation aux mêmes moments que ceux de la section 7. On ne remarque pas de différence majeure par rapport à la simulation de référence.

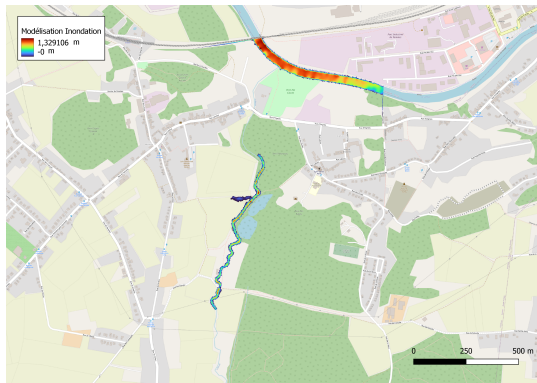


FIGURE 8.1 – Simulation de 7000 sec.

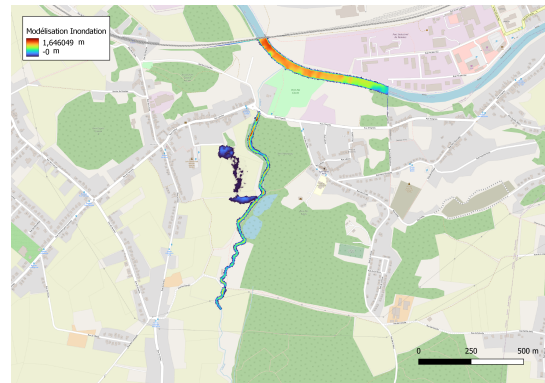


FIGURE 8.2 – Simulation de 11000 sec.

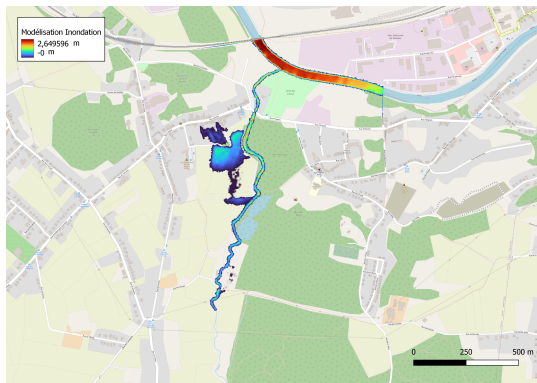


FIGURE 8.3 – Simulation de 40000 sec.

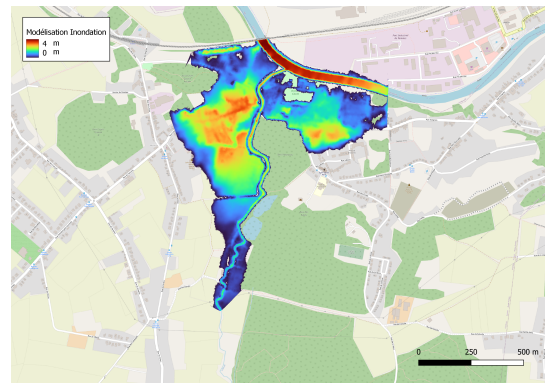


FIGURE 8.4 – Simulation de 200000 sec.

Le moment où l'on peut voir une légère différence est quand on compare la profondeur d'eau à la fin de la simulation (figure 8.6). On remarque que l'étendue de la zone inondée est légèrement plus faible dans le scénario de la pompe doublée. Cela est aussi visible quand on prend une coupe le long de la rue Lambot pour les deux scénarios (figure 8.7).

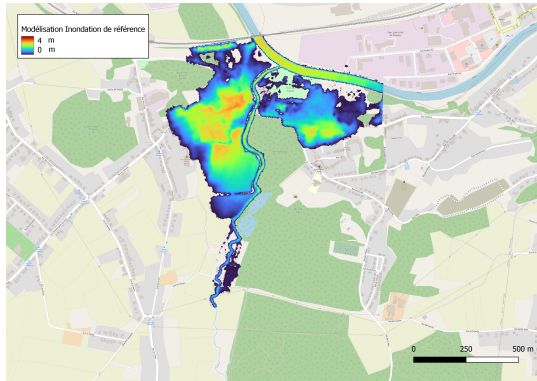


FIGURE 8.5 – Fin de la simulation de référence.

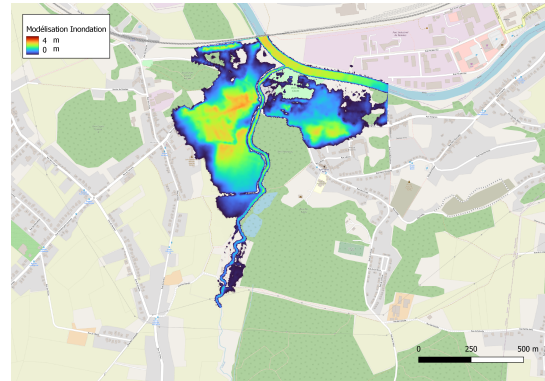


FIGURE 8.6 – Fin de la simulation avec la capacité de pompe doublée.

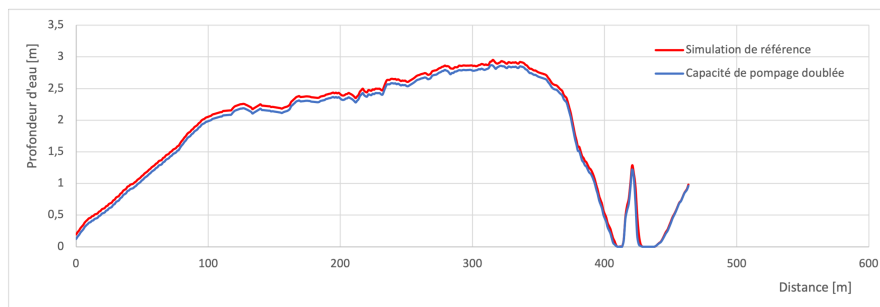


FIGURE 8.7 – Coupe le long de la rue Lambot à la fin de la simulation.

On peut également inspecter l'endroit où la pompe est placée de la même manière. On retrouve à la figure 8.9 la profondeur d'eau des deux scénarios suivant la ligne de coupe que l'on voit tracée à la figure 8.8.

On remarque que la différence de profondeur d'eau est de l'ordre de 10cm comme pour la coupe le long de la rue Lambot.

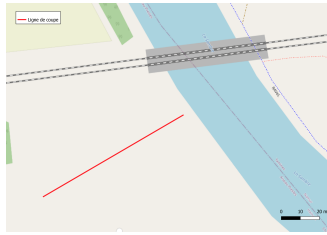


FIGURE 8.8 – Ligne de coupe.

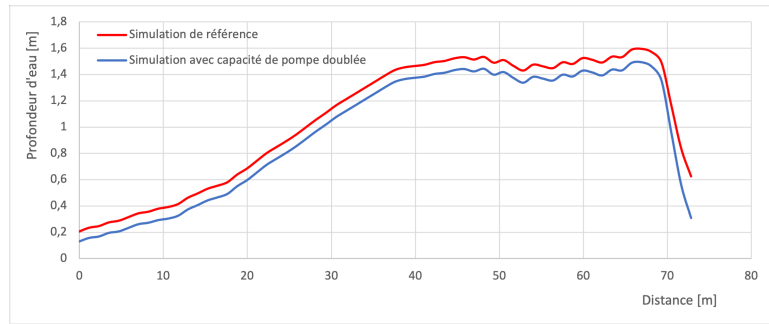


FIGURE 8.9 – Coupe de la profondeur d'eau.

Pour conclure cette proposition d'aménagement, on voit que l'augmentation de la taille de la pompe n'a qu'un léger impact sur l'inondation. Cependant, elle permet malgré tout un abaissement plus rapide du niveau de l'eau lors de la décrue. Une chose importante à garder en tête est que le modèle numérique de terrain n'a pas été modifié pour l'implémentation de la pompe de démergement. C'est à dire que les conduites et le système de collecteurs actuels qui mènent vers la station de démergement, ne sont pas modélisés dans cette étude et par conséquent, l'impact de la pompe s'en trouve simplifié.

Lors d'une étude plus approfondie de la problématique, cet aspect pourrait être retravaillé. En effet, il pourrait être intéressant de modéliser le système d'égouttage afin que la pompe soit continuellement en service.

Dans ce cas, on pourrait potentiellement remarquer un impact plus important.

Chapitre 9

Agrandissement de la largeur de la Biesme à la confluence

9.1 Méthode utilisée

L'objectif de cet aménagement est de transformer le rétrécissement évoqué à la section 3.2 en un élargissement, afin de favoriser l'évacuation de l'eau vers la Sambre et ainsi de limiter l'impact que la Sambre pourrait avoir sur l'augmentation de la hauteur de l'eau.

Pour ce faire, j'ai envisagé deux méthodes. La première que j'ai mise en place a été de polygoniser le modèle numérique de terrain et de redescendre la zone autour de la confluence de quelques mètres. Ceci permet d'agrandir le lit mineur de la Biesme. La dernière étape de cette méthode est de retransformer cet ensemble de polygones en une couche continue de hauteur de sol.

Après avoir appliqué la méthode, j'ai pu découvrir en prenant une coupe au niveau de la confluence que la hauteur était très irrégulière, comme on peut le voir ci-dessous. Cette irrégularité était telle que cela impacterait plus que probablement l'écoulement de façon irréaliste.

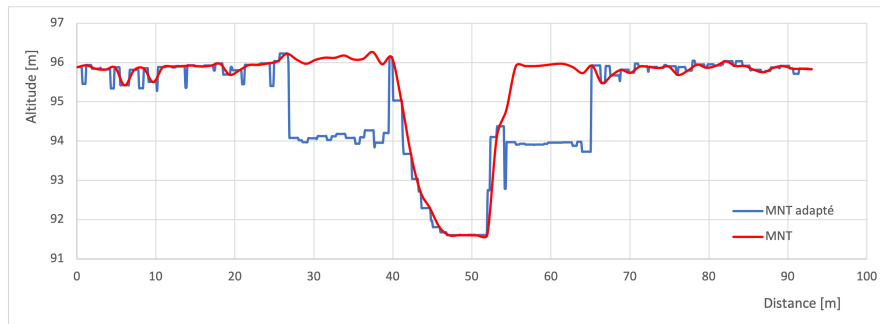


FIGURE 9.1 – Coupe au niveau de la confluence du MNT normal et du MNT adapté avec la première méthode.

Vu l'échec de la première méthode, j'ai activement cherché une méthode différente pour avoir un rendu plus proche de la réalité. C'est à ce moment, et grâce à l'aide de Nathan Delpierre, que m'est apparue une solution plus simple et plus réaliste. En effet, celle-ci consiste en la création d'une zone en plaçant des points d'une certaine altitude à la frontière que j'ai choisi pour l'élargissement. L'altitude de ces points est basée sur l'altitude du lit mineur de la Biesme. Ensuite, il ne reste plus qu'à interpoler entre les points afin d'obtenir la zone à la figure 9.2 et de fusionner le MNT avec cette zone. Le résultat final peut être vu à la figure 9.3 accompagné de la même coupe que précédemment.

Malgré le fait qu'on observe tout de même une différence de hauteur instantanée dans cette deuxième méthode comme le montre la figure 9.4, le profil de la section ressemble plus fortement à la section originale que lors de l'utilisation de l'autre méthode.

Si cet aménagement devait être appliqué dans la réalité, il serait alors possible de modéliser le changement de façon plus précise afin d'avoir une meilleure vision des changements que cet aménagement peut apporter.

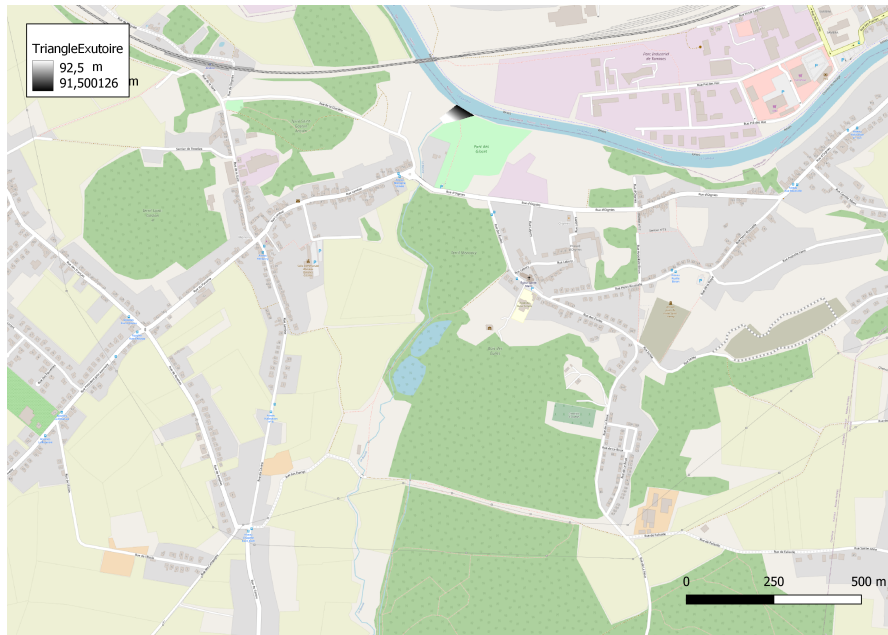


FIGURE 9.2 – Zone de la confluence interpolée.

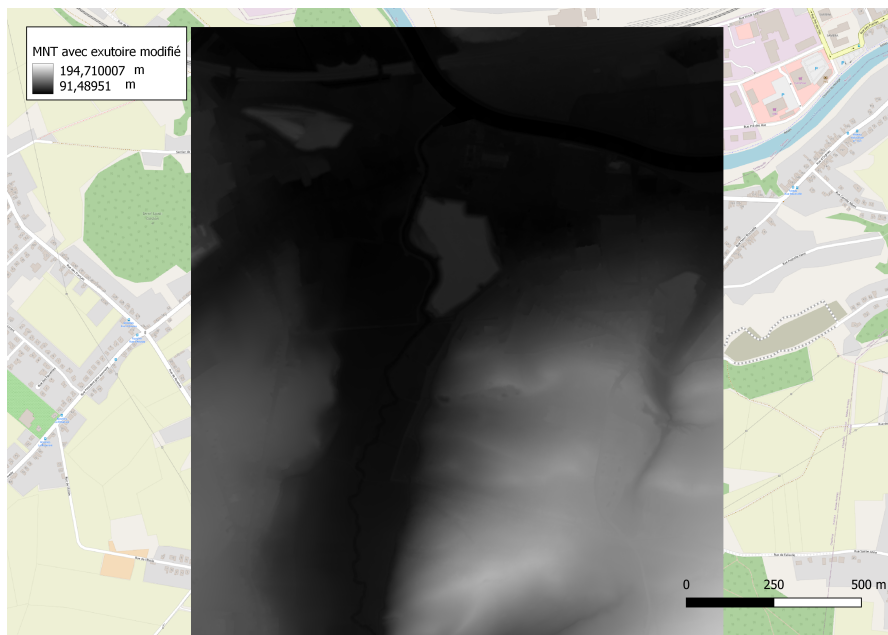


FIGURE 9.3 – MNT fusionnée avec la zone de la confluence.

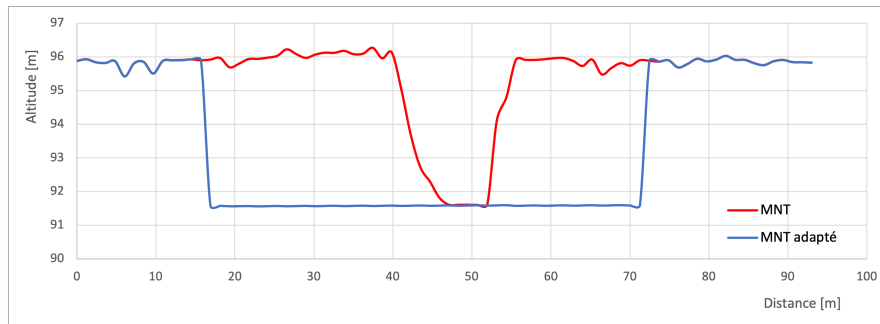


FIGURE 9.4 – Coupe au niveau de la confluence du MNT normal et du MNT adapté avec la deuxième méthode.

9.2 Analyse des résultats

En analysant les données qui ressortent de la simulation, on peut voir qu'il n'y a pas de différence au niveau de la temporalité des événements. En effet, l'eau commence à déborder à partir du même nombre de secondes de simulation, et c'est également le cas pour le franchissement de la digue et du champ. Les images de la simulation aux mêmes instants que celles de référence se trouvent plus bas et attestent de ce que je viens d'énoncer.

Par contre, nous pouvons voir une différence au niveau de la hauteur maximale atteinte. En effet, le niveau d'eau se stabilise une quinzaine de centimètres plus bas par rapport à la simulation de référence. Cette différence est visible quand on compare les niveaux d'eau dans la rue Lambot comme sur l'image 9.9 après 200000 secondes de simulation mais également à la fin de la simulation, lorsque la diminution du niveau d'eau est en cours, comme le montre la coupe à la figure 9.10.

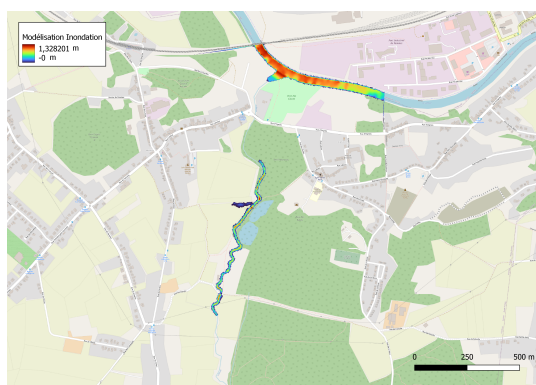


FIGURE 9.5 – Simulation de 7000 sec.

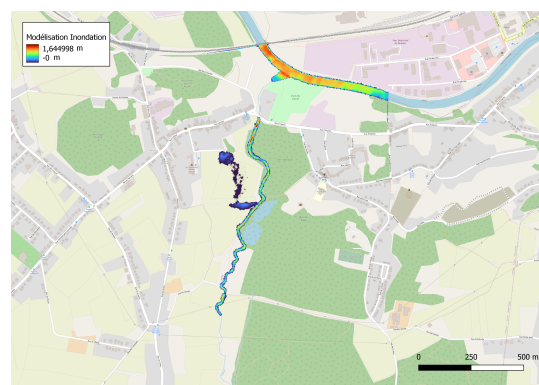


FIGURE 9.6 – Simulation de 11000 sec.

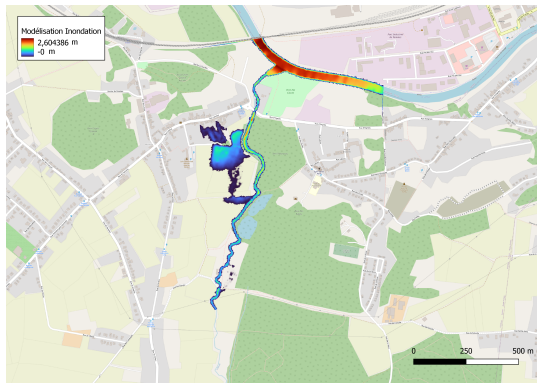


FIGURE 9.7 – Simulation de 40000 sec.

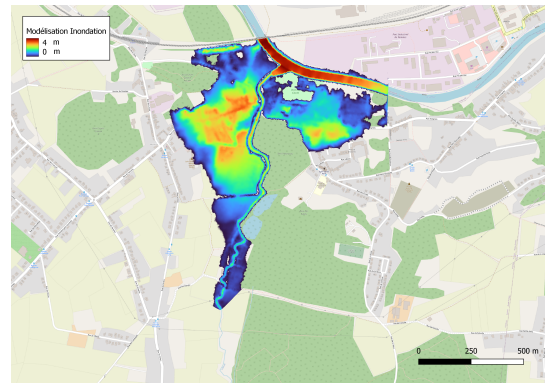


FIGURE 9.8 – Simulation de 200000 sec.

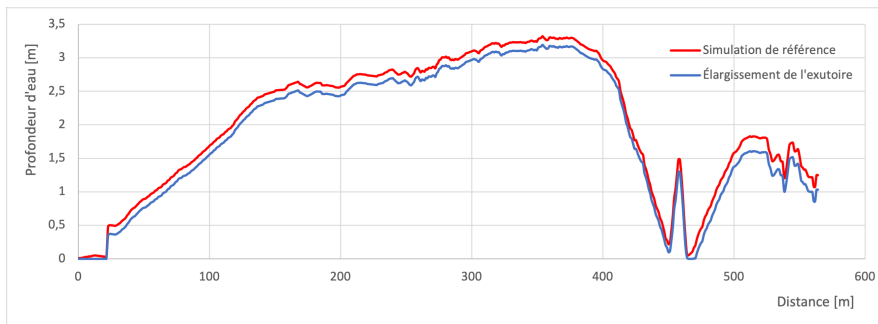


FIGURE 9.9 – Coupe le long de la rue Lambot après 200.000 secondes de simulation.

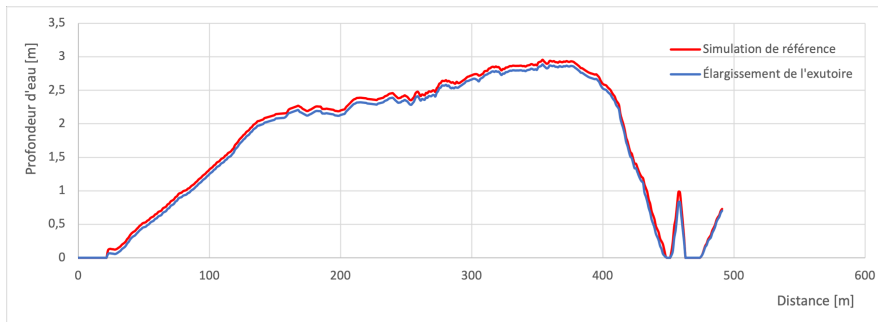


FIGURE 9.10 – Coupe le long de la rue Lambot à la fin de la simulation.

En conclusion, l'impact que cet élargissement a sur les inondations est assez faible et va à l'encontre de ce que j'avais pu imaginer. Cependant, l'impact n'est pas complètement inexistant et il pourrait être non négligeable pour des épisodes pluvieux moins graves. En effet, la différence de 15cm lors de plus petits épisodes

de pluies pourrait faire la différence entre la rue légèrement inondée et des maisons sous 5cm d'eau au rez-de-chaussée.

Chapitre 10

Réévaluation des digues

10.1 Méthode utilisée

La problématique liée aux digues a déjà été exposé précédemment et, en réponse à cette problématique, j'ai décidé d'étudier l'impact que les digues ont sur les inondations vécues.

Pour étudier cet impact, j'ai décidé d'augmenter localement la hauteur des digues de respectivement 1 et 2 mètres. Ceci permettra de voir comment la zone réagira avec cette différence et si ce changement pourrait être mis en place par la commune. Pour augmenter la hauteur des digues, j'ai d'abord polygonisé le MNT de référence. Ensuite, j'ai sélectionné tous les polygones qui constituaient la digue et j'ai augmenté la hauteur de ces polygones de respectivement 1 et 2 mètres. Enfin, j'ai interpolé entre tous ces points afin d'obtenir un modèle numérique de terrain adapté. On peut voir sur l'image 10.1 une coupe de la Biesme au niveau d'une des digues avec la hauteur initiale ainsi que les deux modifications effectuées.

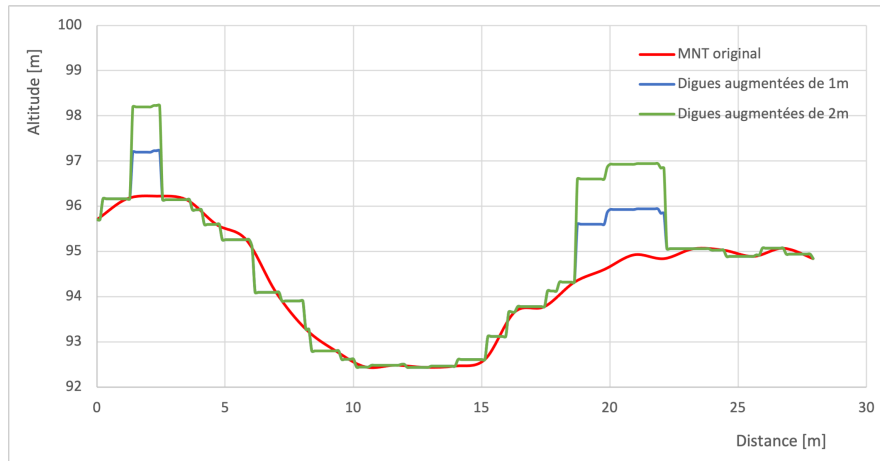


FIGURE 10.1 – Coupe dans une digue avec les différentes modifications effectuées.

On peut voir que la forme des digues et du reste du terrain n'est plus une jolie courbe continue mais plutôt des montées et descentes abruptes. Ce n'est évidemment pas parfait car on modifie légèrement le terrain et donc les résultats que l'on va obtenir ne seront simplifiés. Cependant, l'objectif de ces simulations est de voir si la modification envisagée peut être une solution sur le long terme. Si c'est le cas, une étude plus approfondie devra être réalisée et il sera alors nécessaire de trouver un moyen de conserver parfaitement la géométrie du terrain.

10.2 Analyse des résultats

10.2.1 Digues augmentées de 1m

Les simulations ont donné des informations intéressantes. En effet, on remarque que l'inondation est retardée dans le temps par rapport à la simulation de référence. Ceci peut être vu dans les images ci-dessous où j'expose les situations aux mêmes instants que pour la simulation de référence.

On se rend compte que l'eau commence à quitter le champ environ 2 heures après la référence. On peut voir une image de la simulation après 47000 secondes sur le figure 10.6.

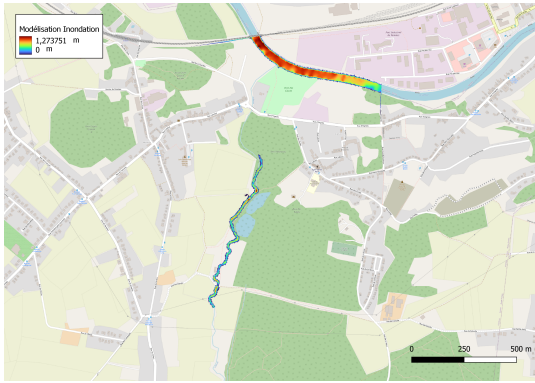


FIGURE 10.2 – Simulation de 7000 sec.

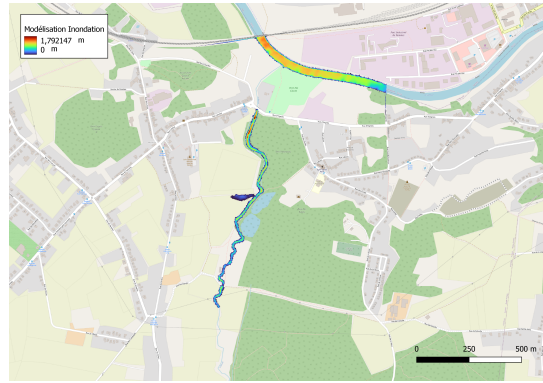


FIGURE 10.3 – Simulation de 11000 sec.

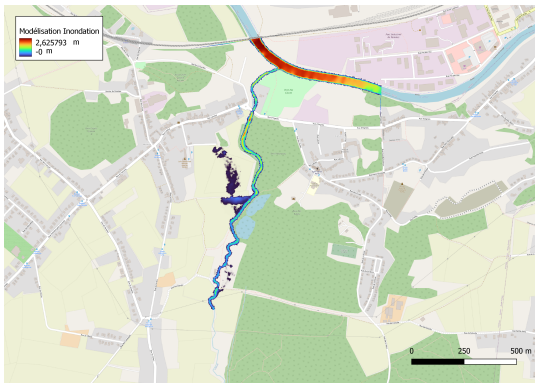


FIGURE 10.4 – Simulation de 40000 sec.

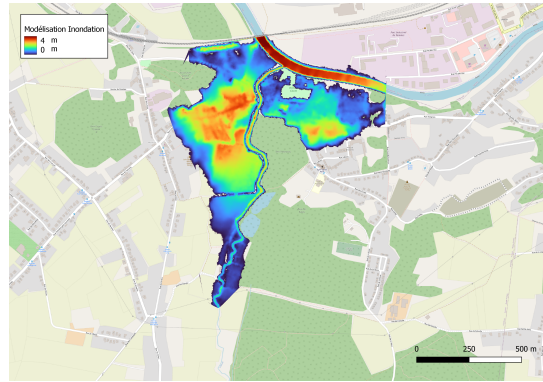


FIGURE 10.5 – Simulation de 200000 sec.

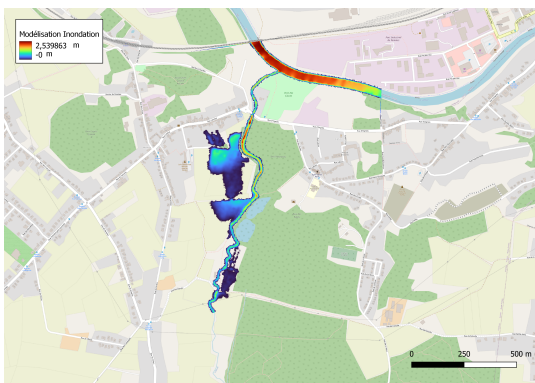


FIGURE 10.6 – Simulation de 47000 sec.

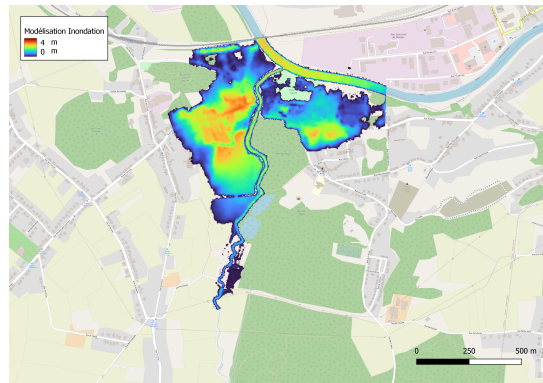


FIGURE 10.7 – Fin de la simulation (503000 sec).

Par contre on se rend compte que le niveau d'eau maximum est plus élevé quand on met en place une digue comme sur la figure 10.8. Mais aussi que le niveau d'eau reste plus élevé lors de la décrue comme on le voit dans la figure 10.9.

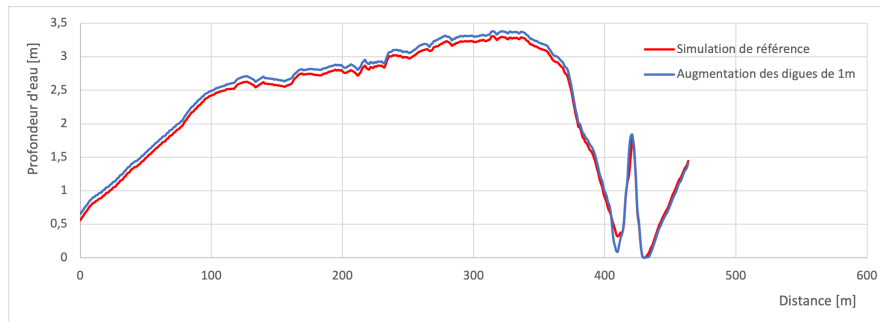


FIGURE 10.8 – Coupe le long de la rue Lambot après 200.000 secondes de simulation.

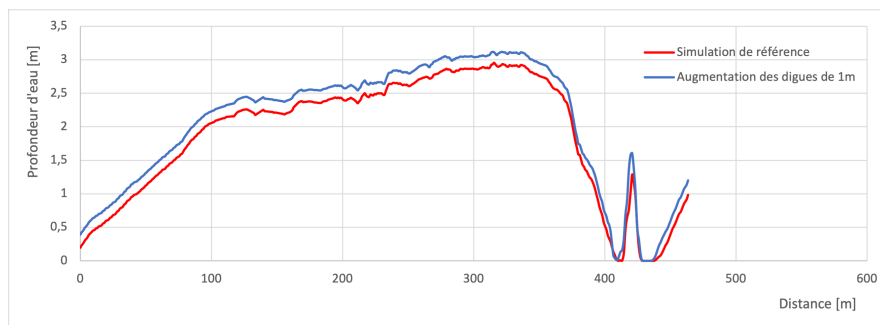


FIGURE 10.9 – Coupe le long de la rue Lambot à la fin de la simulation.

Ceci est dû au fait que puisque les digues sont en place et que l'eau est passée par dessus, l'eau va avoir plus de mal à naturellement ressortir de la zone entourée par les digues.

10.2.2 Digues augmentées de 2m

Le même phénomène peut être observé pour l'augmentation de hauteur des digues de 2m. On observe que le temps de l'inondation est un peu retardé par rapport au scénario précédent. Cependant, cette différence n'est pas significative et elle peut être observée en comparant les cartes vues dans le dernier scénario et celle que l'on retrouve ci-dessous. On se rend compte que la différence pour l'eau qui dépasse le champ et entre dans la ville est seulement d'environ 1000sec, autrement

dit un peu plus de 15min.

La différence de 15min ne me semble donc pas justifier le fait d'augmenter la taille des digues d'un mètre supplémentaire.

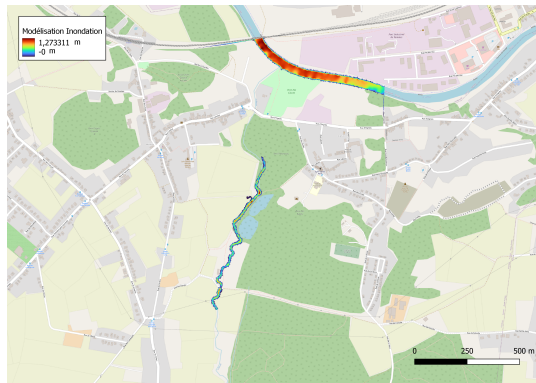


FIGURE 10.10 – Simulation de 7000 sec.

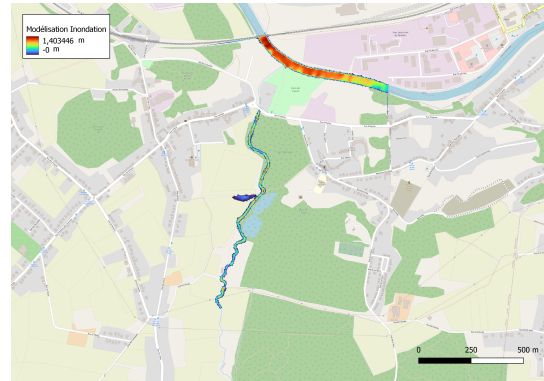


FIGURE 10.11 – Simulation de 11000 sec.

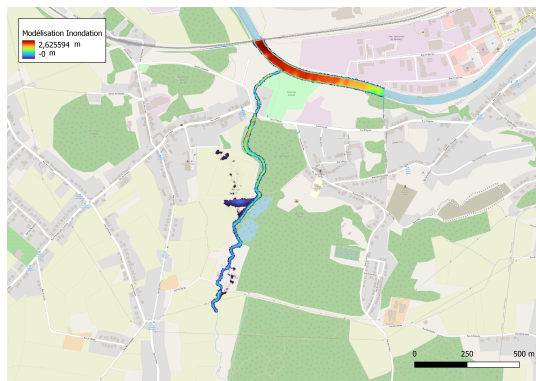


FIGURE 10.12 – Simulation de 40000 sec.

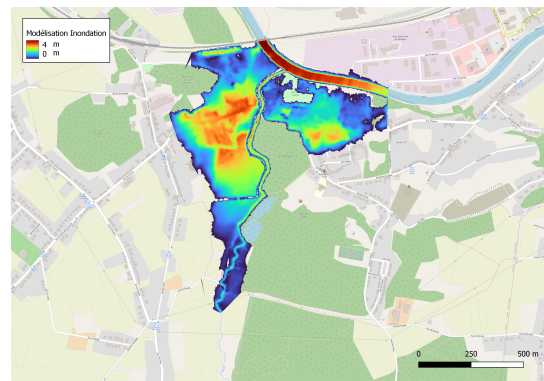


FIGURE 10.13 – Simulation de 200000 sec.

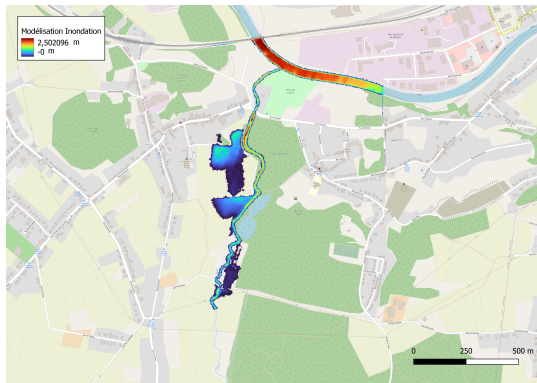


FIGURE 10.14 – Simulation de 48000 sec.

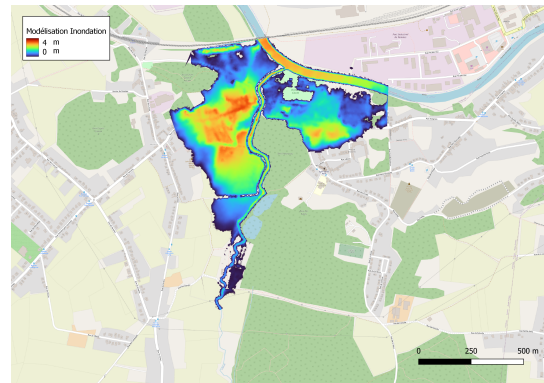


FIGURE 10.15 – Fin de la simulation (503000 sec).

On peut à présent se concentrer sur la hauteur d'eau dans la rue Lambot à son maximum mais aussi à la fin de la simulation, comme je l'ai fait pour toutes les propositions d'aménagement jusqu'à présent. Ces deux coupes peuvent être trouvées aux figures 10.16 et 10.17.

On peut y remarquer que, comparé au scénario précédent, la hauteur de l'eau maximale n'est pas très différente. Par contre, elle reste beaucoup plus haute lors de la décrue comme on peut le voir sur la coupe de fin de simulation.

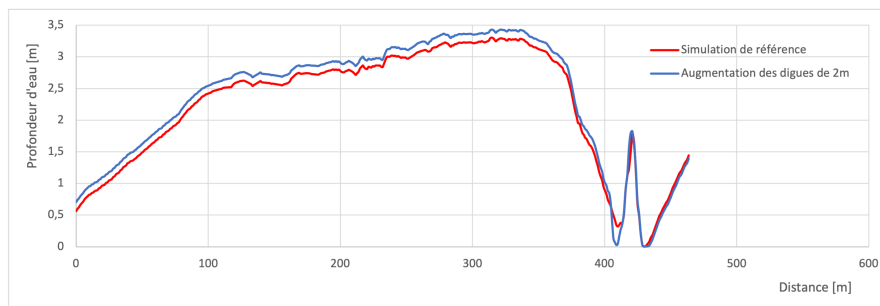


FIGURE 10.16 – Coupe le long de la rue Lambot après 200.000 secondes de simulation.

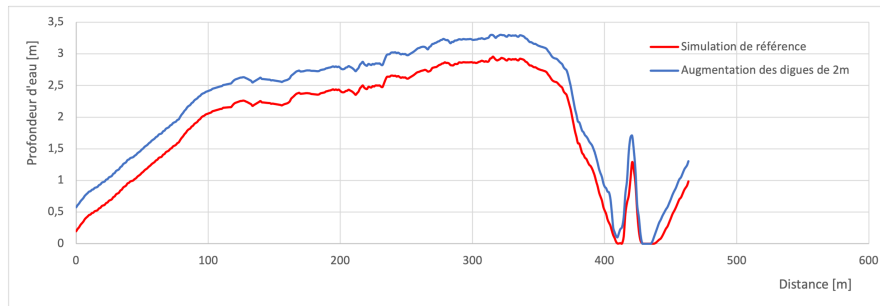


FIGURE 10.17 – Coupe le long de la rue Lambot à la fin de la simulation.

Afin de conclure la proposition d'augmentation des digues, on se rend compte que les digues peuvent être utiles dans certains cas mais malheureusement, les événements de 2021 étaient bien trop importants pour que ces dernières aient un réel impact à grande échelle. En effet, on a observé un retardement de l'inondation d'environ deux heures. Lors d'épisodes moins extrêmes que celui étudié dans le cadre de ce mémoire, cette différence de deux heures pourrait empêcher complètement une inondation.

On se rend également compte qu'il n'est pas utile d'augmenter la taille des digues de façon exagérée. En effet, l'augmentation de la taille de la digue de $2m$ n'aide pas davantage que l'augmentation de la digue d' $1m$ et, à grande échelle, elle implique potentiellement plus de dégâts.

Conclusion

Après plusieurs mois de recherches, de discussions, de modélisations et finalement d'écriture, tout mon travail a été exposé dans le document que vous venez de lire. A présent, il ne reste plus qu'à conclure sur tout ce que j'ai appris de la problématique hydraulique à Aiseau-Presles.

Tout d'abord, dans la première partie du travail, on a découvert la commune et plus précisément, la zone sur laquelle le mémoire se concentre. On a pu se rendre compte de l'activité minière présente dans la région, qui a eu comme conséquence l'abaissement du niveau du sol sous le niveau de la Biesme.

On a aussi vu que les inondations dans la région ne sont pas de l'ordre de l'extraordinaire et que, sur les soixante dernières années, il y a eu plus de dix gros événements marquants de la sorte le long de la Sambre.

De plus, la localisation géographique de la commune et plus précisément, de la zone autour de la confluence présente toutes les caractéristiques favorables aux inondations. En effet, il n'y a pas que le fait que le sol se soit affaissé, on y retrouve également des terrils ainsi que des voies de chemin de fer, des éléments servant de frontière naturelle pour l'eau. On trouve également une rivière qui se termine en un rétrécissement ainsi que des digues qui une fois submergées empêchent l'eau de ressortir vers cette rivière.

Dans la deuxième partie, avec tous ces éléments en tête, une étude hydrologique pour déterminer un hydrogramme à l'entrée du domaine a été menée, suivie d'une série de simulations à l'aide du logiciel HydroFlow afin de modéliser au mieux la zone et l'inondation de juillet 2021.

Dans la dernière partie de ce travail, plusieurs propositions d'aménagements ont été abordées afin de voir si l'une d'entre elles, voire plusieurs, pourrait amoindrir l'impact de l'inondation sur la zone de la confluence.

La première proposition a été d'augmenter la taille de la pompe de démergement. Cette proposition était prometteuse et a permis de diminuer le niveau d'eau plus rapidement lors de la décrue mais n'a pas eu d'impact sur le niveau d'eau maximal. Une des limitations de la modélisation est qu'aucun système de collecteur et d'égoutage n'est modélisé. Par conséquent, la pompe n'a pas été mise en service durant toute la durée de l'inondation puisqu'elle se situe à une altitude plus élevée que le bas de la cuvette. Ainsi, une étude plus approfondie et moins simplifiée de la pompe pourrait être envisagée afin d'observer son impact de façon plus précise.

La deuxième proposition a été celle d'élargir l'exutoire de la Biesme. En effet, on peut observer un rétrécissement au niveau de la confluence, ce qui pourrait avoir un impact négatif sur la hauteur d'eau. Après l'élargissement de la confluence, on a pu observer une diminution du niveau maximal de l'eau d'environ 15cm , diminution assez négligeable pour l'épisode vécu en 2021 mais qui pourrait être important lors de plus petits épisodes.

Enfin la dernière proposition a été d'augmenter la taille des digues. La grosse différence que l'on a pu remarquer est le retardement de l'inondation. En effet, la rue Lambot n'a commencé à être inondée que deux heures après la simulation de référence. Cette différence n'aurait malheureusement pas été suffisante pour les événements de juillet 2021 mais cette piste reste prometteuse.

Il ne faut par contre pas oublier qu'on a remarqué une augmentation du niveau d'eau avec la présence de digues ainsi qu'une difficulté accrue de vider l'eau emprisonnée dans les digues lors de la décrue.

En conclusion, au vu des événements qui se sont produits en 2021, aucune proposition n'est suffisante à elle seule pour déjouer les inondations. Cependant, l'espoir est permis car on a pu remarquer un impact positif de chacune des trois propositions.

Sur un point de vue personnel, au terme de ce travail, je ressens un peu de frustration due au fait qu'aucune solution n'ait été trouvée. Ce sentiment est contrebalancé par le fait que j'ai tout de même posé les bases de l'étude et amené de futures pistes de réflexion.

Il serait donc intéressant de lancer une étude complémentaire afin d'expérimenter la combinaison des trois aménagements ainsi que de leur apporter les modifications nécessaires dans le but de les rendre moins simplifiés.

En plus de ceci, une réflexion sur la faisabilité économique et sur le financement du projet pourrait être intéressante. En effet, la question monétaire n'a pas été abordée dans le cadre de ce travail mais elle joue toujours un rôle majeur dans la mise en place d'infrastructures publiques.

Bibliographie

- [1] *Carte du bassin houiller belge*. URL : http://www.numeriques.be/index.php?id=1&no_cache=1&tx_portailnumeriques_pi1%5Bview%5D=item_detail&tx_portailnumeriques_pi1%5Bid%5D=peps%3AARC-IHOE-CPL-dpt2-011 (visité le 27/05/2023).
- [2] *Plan de la concession d'Aiseau-Presles dépendant des communes de Roselies, Farciennes, Aiseau, Pont de Loup et Presles avec indication de la partie de concession que la société anonyme des charbonnages réunis de Roton-Farciennes et Oignies-Aiseau à Tamines, cède à la société anonyme du charbonnage d'Aiseau-Presles à Farciennes*. URL : <https://archives.wallonie.be/ark:/44119/21z7dp54g3sc> (visité le 27/05/2023).
- [3] *Actualités météo : Inondations de la mi-juillet 2021 : une catastrophe climatique en Allemagne et Belgique 17/07/2021*. URL : <https://www.meteo-paris.com/actualites/inondations-de-la-mi-juillet-2021-une-catastrophe-climatique-en-allemande-et-belgique> (visité le 27/05/2023).
- [4] *Athys - Accueil*. URL : <http://www.athys-soft.org/> (visité le 27/05/2023).
- [5] Zech Y. *Hydrologie des bassins versant - Deuxième partie*. 2022.
- [6] Sandra SOARES FRAZÃO. « Dam-break induced flows in complex topographies. Theoretical, numerical and experimental approaches ». Thèse de doct. UCL - Université Catholique de Louvain, 2002. URL : <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/en/object/boreal%3A206214> (visité le 27/05/2023).
- [7] Nathan DELPIERRE. « Modélisation numérique de l'écoulement à travers et sur une digue ». Thèse de doct. 2022.
- [8] *Acoustic Doppler Current Profiler — Water Solutions*. URL : <https://www.water-solutions.com/acoustic-doppler-current-profiler> (visité le 27/05/2023).
- [9] *Zones inondées IDW - Hauteur d'eau - juillet 2021*. URL : <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/59f97c7e-c501-4e92-8c47-047d000f4c13.html> (visité le 27/05/2023).

- [10] *Roton (Belgique)*. In : *Wikipédia*. Page Version ID : 189891372. 14 jan. 2022. URL : [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Roton_\(Belgique\)&oldid=189891372](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Roton_(Belgique)&oldid=189891372) (visité le 27/05/2023).
- [11] *Liste des charbonnages belges*. In : *Wikipédia*. Page Version ID : 203604597. 23 avr. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Liste_des_charbonnages_belges&oldid=203604597 (visité le 27/05/2023).
- [12] *La S.A. de Roton-Farciennes et Oignies-Aiseau*. URL : <http://www.nicau.be/roton.html> (visité le 27/05/2023).
- [13] *Les puits de la société*. URL : <http://www.nicau.be/galleries/roton/puits/1.html> (visité le 27/05/2023).
- [14] *concessionroton.jpg (2873×1365)*. URL : <http://www.nicau.be/images/charleroi/concessionroton.jpg> (visité le 27/05/2023).
- [15] Éric GEERKENS, René LEBOUTTE et Arnaud PÉTERS. « Le travail des ouvriers mineurs en Belgique (ca 1830-1930) ». In : *Revue du Nord* 435.2 (2020). Publisher : Association Revue du Nord, p. 289-309. ISSN : 0035-2624. DOI : 10.3917/rdn.435.0289. URL : <https://www.cairn.info/revue-du-nord-2020-2-page-289.htm> (visité le 27/05/2023).
- [16] *Exploitation du charbon*. URL : <https://gr-atlas.uni.lu/index.php/fr/articles/wi55/st71> (visité le 27/05/2023).
- [17] *Société Anonyme des Charbonnages d'Aiseau-Presles, à Farciennes. Plan relatif à une demande de rectification des limites des concessions de "Tergnée-Aiseau-Presles", "Ormont" et "Aiseau-Oignies"*. - - *Archives régionales de Wallonie*. URL : <https://archives.wallonie.be/ark:/44119/z5j83bqktcdr/e341a9eb-2a28-4b2a-953d-167bfaac6602> (visité le 27/05/2023).
- [18] *Risques*. URL : <https://geologie.wallonie.be/home/thematiques-sous-sol/exploitations-souterraines/mines-concedees/risques.html> (visité le 27/05/2023).
- [19] *Accueil*. URL : <http://geoportail.wallonie.be/home.html> (visité le 27/05/2023).
- [20] *Discover QGIS*. URL : <https://www.qgis.org/en/site/about/index.html> (visité le 27/05/2023).
- [21] *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) - Woods Hole Oceanographic Institution*. URL : <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/instruments/instruments-sensors-samplers/acoustic-doppler-current-profiler-adcp/> (visité le 27/05/2023).
- [22] *IDEA - Démergement*. URL : <https://www.idea.be/fr/cycle-eau/demergement.html> (visité le 27/05/2023).

- [23] *Gestion des ouvrages de démergement*. IGRETEC. URL : <https://www.igretec.com/fr/acteur-public/eau/gestion-ouvrages-demergement/> (visité le 27/05/2023).
- [24] *Dispositif de démergement*. URL : <https://www.aide.be/demergement/dispositif-de-demergement> (visité le 27/05/2023).
- [25] *Société Publique de la Gestion de l'Eau*. URL : <http://www.spge.be/fr/index.html?IDC=1> (visité le 27/05/2023).
- [26] *1825 : canalisation de la Sambre | Connaître la Wallonie*. URL : <https://connaitrelawallonie.wallonie.be/fr/histoire/timeline/1825-canalisation-de-la-sambre#.ZFZbhK1Bwcg> (visité le 27/05/2023).
- [27] *charleroi-decouverte.be | Quand Tirou s'appelait Sambre*. URL : <https://www.charleroi-decouverte.be/pages/index.php?id=61> (visité le 27/05/2023).
- [28] *Finite volume methods - ScienceDirect*. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1570865900070058> (visité le 27/05/2023).
- [29] Enrique D. FERNÁNDEZ-NIETO, Didier BRESCH et Jérôme MONNIER. « A consistent intermediate wave speed for a well-balanced HLLC solver ». In : *Comptes Rendus Mathématique* 346.13 (1^{er} juill. 2008), p. 795-800. ISSN : 1631-073X. DOI : 10.1016/j.crma.2008.05.012. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631073X08001696> (visité le 27/05/2023).
- [30] F. MOUKALLED, L. MANGANI et M. DARWISH. « The Finite Volume Method ». In : *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics : An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab*. Sous la dir. de F. MOUKALLED, L. MANGANI et M. DARWISH. Fluid Mechanics and Its Applications. Cham : Springer International Publishing, 2016, p. 103-135. ISBN : 978-3-319-16874-6. DOI : 10.1007/978-3-319-16874-6_5. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6_5 (visité le 27/05/2023).
- [31] Enrique D. FERNÁNDEZ-NIETO, Didier BRESCH et Jérôme MONNIER. « A consistent intermediate wave speed for a well-balanced HLLC solver ». In : *Comptes Rendus Mathématique* 346.13 (1^{er} juill. 2008), p. 795-800. ISSN : 1631-073X. DOI : 10.1016/j.crma.2008.05.012. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631073X08001696> (visité le 27/05/2023).
- [32] Ngoc Tuoi Vo THI. « One dimensional Saint-Venant system ». In : () .

- [33] « Les inondations de juillet en Allemagne et en Belgique sont bien liées au réchauffement climatique ». In : *Le Monde.fr* (24 août 2021). URL : https://www.lemonde.fr/planete/article/2021/08/24/les-inondations-de-juillet-en-allemande-et-en-belgique-sont-bien-liees-au-rechauffement-climatique_6092170_3244.html (visité le 27/05/2023).
- [34] *IRM - Observations historiques d'inondations (troisième partie)*. KMI. URL : <https://www.meteo.be/fr/infos/actualite/observations-historiques-dinondations-troisieme-partie> (visité le 27/05/2023).
- [35] *8 février 1984 : inondations à partir du sud de la vallée mosane | Connaître la Wallonie*. URL : <https://connaitrelawallonie.wallonie.be/fr/histoire/timeline/8-fevrier-1984-inondations-partir-du-sud-de-la-vallee-mosane#.ZGON4LpBwcg> (visité le 27/05/2023).
- [36] *IRM - Inondations*. KMI. URL : <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/evenements-remarquables-depuis-1901/evenements-remarquables/evenements/inondations> (visité le 27/05/2023).
- [37] Olivier DECK, Alheib MARWAN et Homand FRANÇOISE. « Etude de la vulnérabilité du bâti soumis aux conséquences des affaissements miniers ». In : (fév. 2003).

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

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