UCLouvain

École polytechnique de Louvain

Étude des inondations de Juillet 2021 dans la commune d'Aiseau-Presles

Auteur: **Martin Petitjean**
Promoteur: **Sandra Soares-Frazão**
Lecteurs: **Nathan Delpierre, João Saraiva Esteves Pacheco De Almeida**
Année académique 2023–2024
Master [120] : ingénieur civil des constructions

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma promotrice, Sandra Soares-Frazão pour la supervision de ce travail. Je la remercie également pour sa disponibilité et ses nombreux conseils avisés.

J'adresse également mes vifs remerciements à Nathan Delpierre pour son entière collaboration, sans laquelle je n'aurais pu mener ce projet à bout. Je le remercie pour ses réponses aux nombreuses questions que j'ai pu lui adresser, conseils informatiques et propositions d'améliorations qu'il a formulés tout au long de l'année.

Je souhaite également remercier le professeur João Saraiva Esteves Pacheco De Almeida pour le temps qu'il a passé à la lecture de ce travail.

Je veux aussi remercier la Commune d'Aiseau-Presles, à l'initiative de ce sujet d'étude, les équipes d'IGRETEC pour la visite de la station de démergement et le Professeur Yves Zech pour ses formations à l'utilisation des logiciels de modélisation.

Je tiens aussi à remercier tous les professeurs, les assistants, les chercheurs, les membres du laboratoire LEMSC, le personnel administratif, et tous ceux que j'oublie, pour les connaissances qu'ils nous ont partagées pendant ces 6 années de formation.

Enfin, Maxime Raison, qui m'a offert la possibilité d'approfondir son travail. Je te remercie pour ces années de travail à tes côtés, presque toujours dans la bonne humeur.

Résumé

Aujourd'hui, nul ne peut ignorer la pression exercée par le réchauffement climatique et les bouleversements liés à ce dernier. En effet, le comportement peu responsable des humains depuis plusieurs siècles engendre un réchauffement progressif de notre atmosphère, qui conduit à une augmentation des phénomènes climatiques extrêmes tels que les sécheresses ou les épisodes d'inondations. Depuis quelques années, nous observons une augmentation constante de la fréquence et de l'intensité des pluies, crues et inondations sur le globe terrestre.

Pour répondre à cette problématique spécifique, des études hydrologiques et hydrauliques sont effectuées de plus en plus couramment dans le but de modéliser les évènements passés et de prédire l'ampleur des futures inondations, afin de mettre en place des mesures de protection pour les populations locales.

Ce travail de fin d'étude proposera donc un approfondissement d'une précédente analyse d'inondations dans la commune d'Aiseau-Presles, menée par Maxime Raison, afin de comprendre les évènements de Juillet 2021 et de formuler une solution technique diminuant les risques encourus pour la zone de la confluence entre la Biesme et la Sambre.

Premièrement, une mise en contexte permettra au lecteur de se faire une idée des problématiques rencontrées dans la zone. Ensuite, un rappel théorique des méthodes de modélisation hydraulique sera fait, avant de décrire les résultats issus de la première étude. Une nouvelle application de ces méthodes de modélisation sera faite sur la zone d'étude et les résultats seront analysés, en vue de formuler une solution possible à ces inondations dévastatrices.

Table des matières

1 Contexte **8**
- 1.1 Le réchauffement climatique . . . 8
- 1.2 Le cas des inondations . . . 9
- 1.3 Les inondations de Juillet 2021 en Belgique . . . 10
  - 1.3.1 Et dans la commune d'Aiseau-Presles ? . . . 12
- 1.4 La configuration des lieux . . . 18
  - 1.4.1 La station de démergement . . . 19
  - 1.4.2 Les digues . . . 23
  - 1.4.3 Le rétrécissement à la confluence . . . 26
- 1.5 Les objectifs de l'étude . . . 27

2 Étude auprès de la population **29**

3 Résultats de l'étude précédente **32**
- 3.1 Étude hydrologique . . . 32
  - 3.1.1 Athys . . . 33
  - 3.1.2 Bassin versant . . . 33
  - 3.1.3 Polygones de Thiessen/Voronï . . . 34
  - 3.1.4 Hydrogramme . . . 35
- 3.2 Étude hydraulique . . . 39
  - 3.2.1 Hydroflow . . . 39
  - 3.2.2 Simulation de référence . . . 42
  - 3.2.3 Augmentation de la capacité de pompage . . . 47
  - 3.2.4 Élargissement de la section à la confluence . . . 48
  - 3.2.5 Réévaluation des digues . . . 49
- 3.3 Pistes d'amélioration . . . 50

4 Étude de sensibilité **52**
- 4.1 Maillage . . . 53
  - 4.1.1 Une taille optimale pour les mailles ? . . . 53
  - 4.1.2 Modélisation des bâtiments . . . 55

4.2 Modèle Numérique de Terrain 59
4.2.1 Comment est-il établi par le SPW ? 59
4.2.2 Vers une meilleure résolution ? 60
4.2.3 Peut-on mieux modéliser Juillet 2021 ? 62
4.3 Conclusion sur l'étude de sensibilité 64

5 Vérification de l'hydrogramme de la Biesme 65
5.1 Mise en évidence du débordement 65
5.2 Correction de l'hydrogramme 74
5.3 Correction du MNT 75
5.4 Nouvelle correction de l'hydrogramme 82
5.5 Encore des pistes d'amélioration ? 84
5.5.1 Niveaux limnimétriques 84
5.5.2 Étude probabiliste 84
5.5.3 Vérification sur site 86
5.6 Conclusion sur la vérification de l'hydrogramme 90

6 Proposition de solution 92
6.1 Paramètres de la modélisation 92
6.2 Élévation des digues 93
6.3 Résultats 95

Bibliographie 103

Chapitre 1

Contexte

1.1 Le réchauffement climatique

Les Nations Unies définissent les principales causes du réchauffement climatique, que nous observons depuis le 19e siècle, de la manière suivante : la production d'énergie, la production industrielle, la déforestation, l'utilisation des transports, la production alimentaire et la surconsommation. Combinés à d'autres facteurs d'une importance moindre, ces derniers engendrent une élévation croissante de la température terrestre et océanique depuis les années 1950.

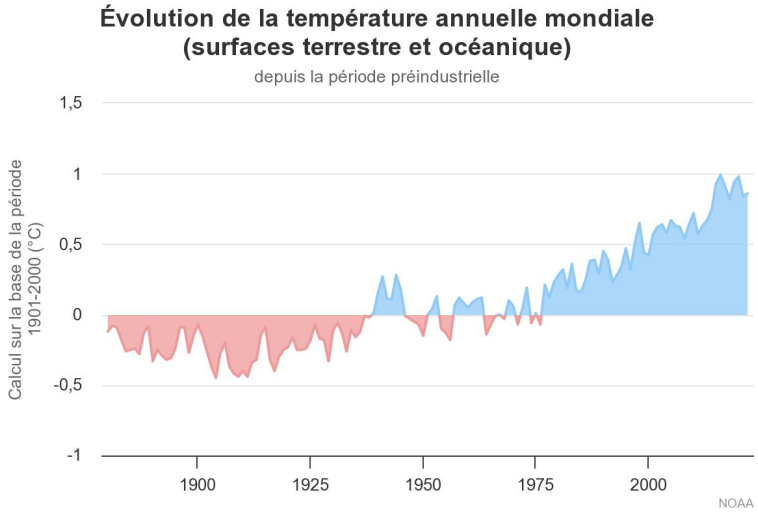


FIGURE 1.1 – Écart de température annuelle par rapport à la moyenne des températures du 20e siècle[1].

Ce phénomène d'élévation thermique engendre de nombreuses conséquences

néfastes, de plus en plus fréquemment et d'ampleur croissante. En effet, le graphique 1.2 indique clairement une augmentation de la fréquence des phénomènes climatiques extrêmes et le coût croissant de ces phénomènes est visible au graphique 1.3.

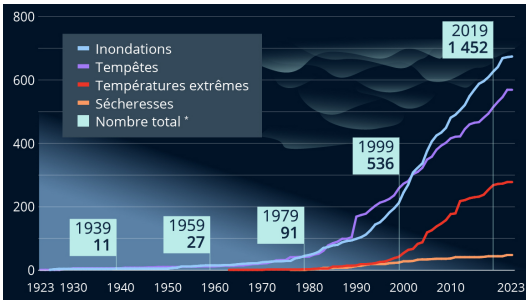


FIGURE 1.2 – Occurrences des évènements climatiques extrêmes en Europe [2].

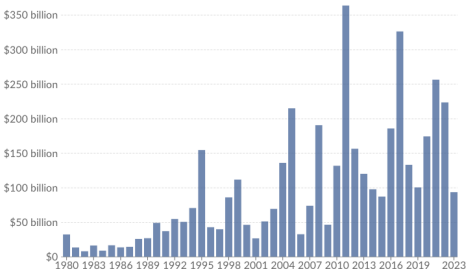


FIGURE 1.3 – Coût global des catastrophes naturelles de 1980 à 2023 [3].

1.2 Le cas des inondations

Les inondations sont les phénomènes extrêmes les plus courants en occurrence et malgré qu'elles ne font pas partie des catastrophes naturelles les plus meurtrières, elles affectent une importante partie de la population. Ce constat, combiné à la fréquence élevée et les impacts économiques importants des inondations, nous poussent à réviser les moyens de protection en place et à étudier la possibilité de nouvelles mesures d'atténuation des inondations.

Le réchauffement climatique est-il mis en cause ?

Il est possible d'exprimer un lien direct entre le réchauffement climatique et les fortes pluies qui engendrent des inondations. Si l'on s'intéresse à l'évolution de l'humidité absolue (quantité d'eau que l'air peut transporter) en fonction de la température de l'air, on observe une capacité de transport d'eau croissante avec la température. En effet, en considérant une humidité relative de 100% sur le graphique 1.4 et une température de l'air de 7°C on détermine la masse maximale d'eau qui peut être contenue par kilogramme d'air sec, à savoir 6 grammes. En doublant la température de l'air (14°C), le même kilogramme d'air sec pourra contenir 10 grammes d'eau.

A l'aide de cette simple explication, on expose ceci : plus le changement climatique augmente la température de l'atmosphère, plus elle peut se charger en eau,

plus le risque de fortes pluies augmente et donc le risque d'inondations liées à ces dernières aussi.

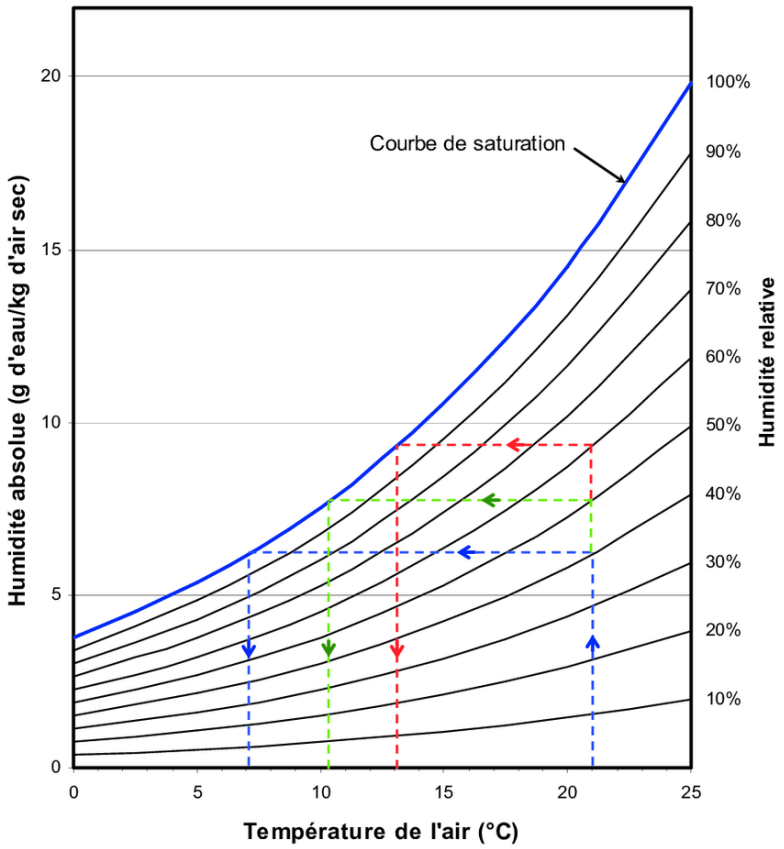


FIGURE 1.4 – Diagramme de Mollier [4].

1.3 Les inondations de Juillet 2021 en Belgique

Depuis la deuxième semaine de Juillet 2021, l'Europe occidentale est arrosée de pluies quasi continues et ces dernières s'intensifient le mardi 13 Juillet [5]. Ces averses ont saturé les sols en eau, augmentant donc la quantité de ruissellement lors de prochaines précipitations et provoquant des inondations non seulement des plaines alluviales mais aussi par ruissellement. En Belgique, la Wallonie et la région Bruxelles-Capitale furent particulièrement touchées par ces inondations, entrainant 39 décès, privant des milliers de personnes de leur logement et engendrant un coût estimé proche des 2 milliards d'euros [6].

Comment expliquer ces précipitations ?

Dès le 11 Juillet 2021, une poche d'air froid s'est glissée de l'Atlantique vers le Sud de la France avant de se déplacer vers l'Allemagne. Autour de cette goutte froide se sont enroulées des précipitations, qui furent abondantes puisque nous étions dans une situation de blocage anticyclonique exercé par une zone de haute pression située entre l'Écosse et les Açores, empêchant la goutte froide d'être évacuée par les vents d'Ouest.

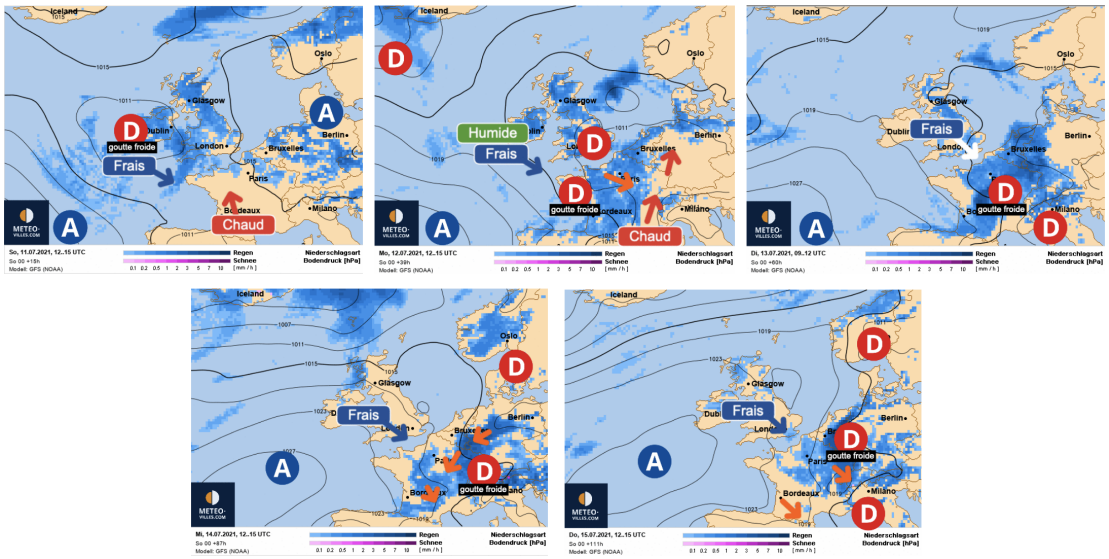


FIGURE 1.5 – Évolution de la goutte froide du 11 au 15/07/2021 [7].

Une phénomène d'une ampleur jamais rencontrée ?

Le sud de la Belgique fût particulièrement impacté par les inondations résultant de ces précipitations continues. Nous sommes donc en droit de nous demander si les précipitations de Juillet 2021 étaient exceptionnelles ou si une autre cause en est à l'origine.

Dans le bilan climatique mensuel de Juillet 2021, émis par l'Institut Royal Météorologique de Belgique, on retrouve les cartes reprises à la figure 1.6, indiquant un cumul des précipitations de 350$[mm]$ par endroit lors du seul mois de Juillet 2021 alors qu'en moyenne, les précipitations annuelles sont de l'ordre de 800$[mm]$ en Belgique. On observe bien que le rapport à la normale des quantités de précipitations par rapport à la période 1991-2020 est de l'ordre de 200% à 300% dans l'est et le sud-est du pays. Les pluies étant donc fortement concentrées dans ces zones, suite au blocage stationnaire de la goutte froide, et ce pendant plus de 48 heures. Le

météorologue de l'IRM, Pascal Mormal, parle de cumuls de précipitations de + de $200L/m^2$ sur 48 heures, ce qui correspond à une période de retour de plus de 200 ans [8].

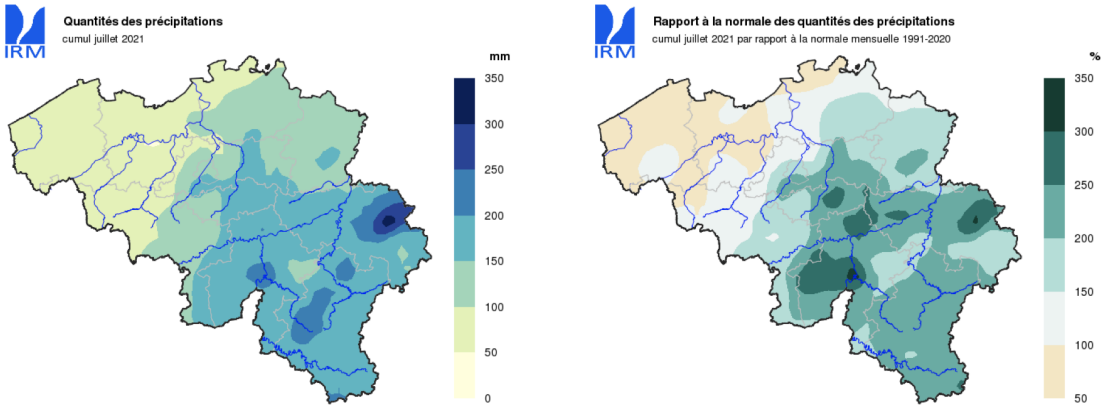


FIGURE 1.6 – Cumul des précipitations et rapport à la normale des quantités de précipitations en Juillet 2021 [9].

Nous pouvons donc en conclure que les précipitations de Juillet 2021 étaient exceptionnellement importantes. Cependant, il ne faut pas tomber dans le piège de la banalisation mais plutôt souligner la nécessité de comprendre les causes de ces inondations afin de mieux prévoir les conséquences des futurs évènements extrêmes. Pour ce faire, des études doivent être menées pour comprendre les différents mécanismes et prendre les mesures qui s'imposent.

1.3.1 Et dans la commune d'Aiseau-Presles ?

Aiseau-Presles est une commune du Hainaut qui compte 11000 habitants, située entre Charleroi et Namur et qui s'étend sur $22,5km^2$[10]. Dans cette étude, nous examinerons les inondations dans la commune d'Aiseau-Presles, en focalisant notre attention sur la zone de la confluence entre la Biesme et la Sambre, représentée en rouge sur la figure 1.8.

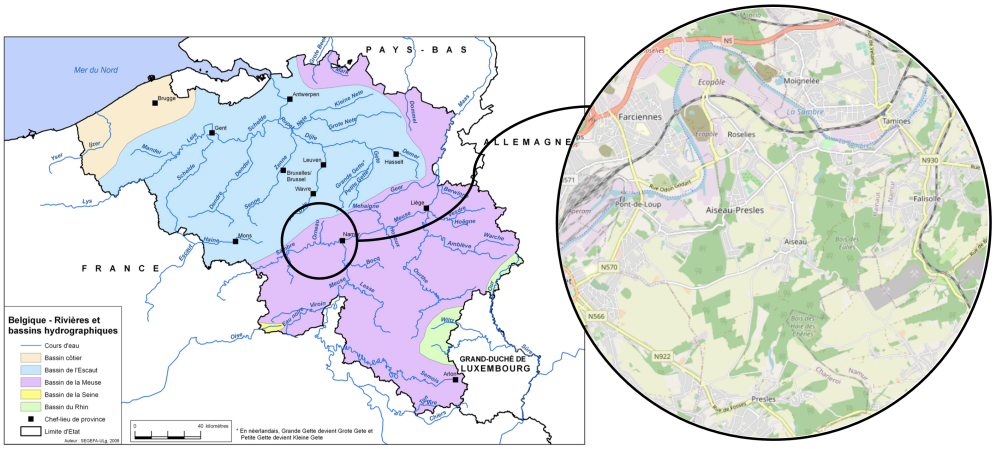


FIGURE 1.7 – Localisation de la commune d'Aiseau-Presles [11].

Les inondations de Juillet 2021 ont laissé de mauvais souvenirs aux habitants de cette zone, ils sont malheureusement habitués aux inondations mais pas à une montée des eaux aussi rapide et importante. Les photos reprises ci-après témoignent de l'ampleur de la montée des eaux en plusieurs endroits de la zone d'étude.

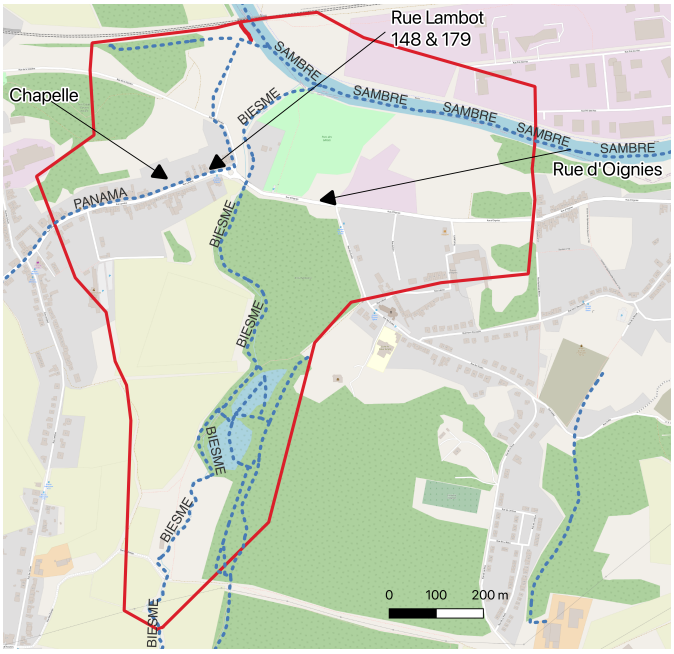


FIGURE 1.8 – Localisation des photos.



FIGURE 1.9 – Comparaison au niveau de la Chapelle [12].



FIGURE 1.10 – Photo au niveau de la rue d'Oignies [12].



FIGURE 1.11 – Comparaison au niveau de la rue Lambot 148 et 179 [12].

Déroulé temporel de la crise

Avant d'entrer dans une analyse technique des évènements de Juillet 2021 à Aiseau-Presles, nous allons retracer le déroulé des inondations à l'aide de quelques témoignages de riverains. De plus, la commune nous a fourni l'extrait du logiciel ICMS (Incident & Crisis Management System), qui est le portail de sécurité national pour les services belges impliqués dans la planification d'urgence et la gestion de crise [13].



FIGURE 1.12 – Évacuation des habitants rue Lambot par les services de secours [14].

La montée des eaux a été constatée par un riverain de la rue Lambot dès 08h00 le 15 Juillet 2021. À cette heure, le niveau dans la rue avoisinait les 15 à 20 centimètres, ce qui n'a pas impressionné l'habitant puisqu'ils ont déjà connu cette situation à deux reprises dans les 15 dernières années. Malheureusement, la montée des eaux s'est amplifiée, ce qui a poussé le local à partir vérifier le bon fonctionnement des pompes de la station de démergement, qui tournaient effectivement à plein régime.

À la mi-journée, la phase de crise provinciale est déclarée par le gouverneur et moins d'une heure après, la Biesme sort de son lit en amont de la rue Lambot et submerge la digue, déversant un torrent d'eau d'abord dans les jardins avant d'atteindre les habitations. La commune ouvre un centre d'accueil pour les personnes impactées à 14h16 dans le Hall omnisport de l'entité, s'en suit l'évacuation de la rue Lambot, immergée sous 2,50 mètres d'eau, par les services de secours (Figure 1.12). Durant les prochaines heures, d'autres rues de l'entité seront évacuées vers le centre d'accueil (Figure 1.13). La phase fédérale de crise est déclenchée à 17h04.

En prévision d'une réunion du centre de crise national le matin du 16/07, le gouverneur demande un état de la situation dans les différentes communes. Il n'y a pas eu de disparus, ni de décès dans la commune, seul 2 couples ont dû être relogés à l'hôtel la nuit du 15 au 16/07 avant de repartir dans leur famille.

Durant la journée du 16/07, une forte pollution aux hydrocarbures est constatée dans la rue Lambot et la commune, démunie face à l'étendue de la pollution, demande l'appui de la protection civile, qui n'a pas pu se rendre sur place par manque de moyens humains. Il fallut attendre la mi-journée du 17/07 pour qu'un officier de la zone de secours se rende sur place afin de constater le problème et envoie les moyens nécessaires.

Une dernière situation est dressée le 19/07 par le centre de crise communal, qui fait état du relogement d'un couple à l'hôtel et de 3 familles dans les logements communaux, de l'évacuation d'une habitation présentant des problèmes de stabilité, de l'opération de vérification du réseau électrique dans la rue Lambot par Ores avant sa remise en fonctionnement et de la réparation des lignes téléphoniques par les équipes de Proximus. Le hall omnisport reste ouvert pour l'accueil des dons et le déblaiement des habitations est en cours.

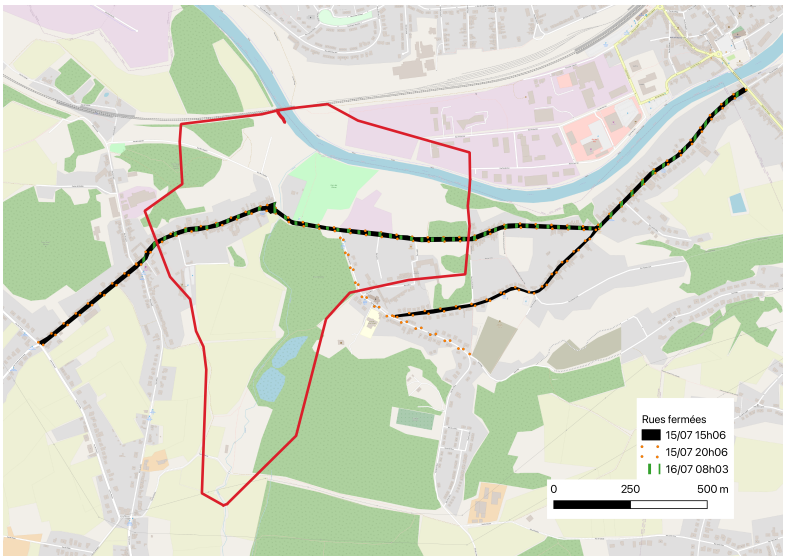


FIGURE 1.13 – Rues fermées pendant la crise.

Au vu des images témoignant de l'ampleur des inondations de Juillet 2021 (Figures 1.9 à 1.12) et des quelques témoignages récoltés auprès des riverains de la rue Lambot, nous comprenons aisément le besoin d'étudier les éléments déclencheurs avec comme objectif final la proposition d'une ou plusieurs solutions limitant l'impact de tels évènements à l'avenir. Dans la section suivante, nous allons décrire la configuration des lieux dans notre zone d'étude avant de préciser les objectifs de ce travail.

1.4 La configuration des lieux

La commune d'Aiseau-Presles est une relativement petite commune en superficie, puisqu'elle s'étend sur seulement $22,5km^2$ [10] tandis que 3 de ses 4 voisines couvrent des superficies plus grandes ($63,24km^2$ pour Fosses-la-Ville [15], $34,2km^2$ pour Sambreville [16] et $27,03km^2$ pour Châtelet [17]).
Elle n'est pas pour autant épargnée par les problématiques d'inondations. En effet, 3 zones de la commune présentent des problèmes lors de fortes précipitations : la confluence entre la Biesme et la Sambre (rue Lambot), la zone entourant le limnimètre (rue des Forges) et le centre de Presles. Comme on peut l'observer sur la figure 1.14, les 3 zones précitées qui ont été touchées lors des inondations de Juillet 2021 (rues fermées le 15/07/2021) correspondent bien à un aléa d'inondation plus élevé qu'ailleurs dans la commune. Afin de circonscrire l'objet de notre étude, nous avons décidé de commun accord avec l'administration communale de concentrer nos recherches sur la confluence entre la Biesme et la Sambre (zone rouge sur la figure 1.14). En parallèle de ce travail, une étude a été commandée par l'administration communale et IGRETEC sur la zone du limnimètre auprès du pôle d'hydraulique de l'UCLouvain et une étude de dimensionnement des pompes de la station de démergement auprès d'INASEP.

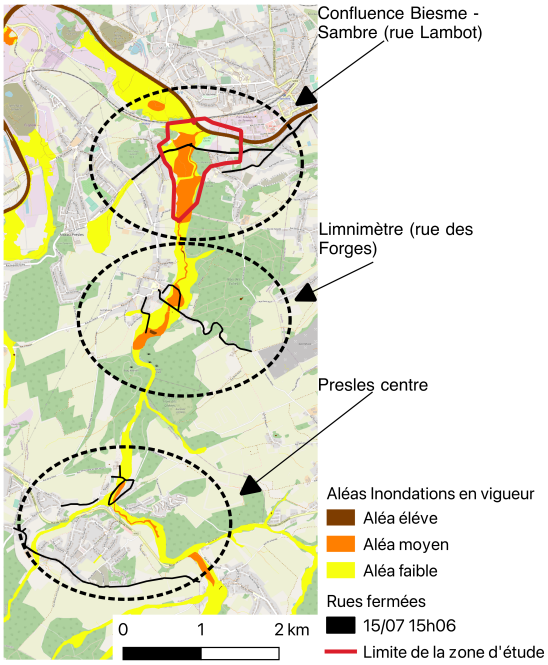


FIGURE 1.14 – Zones à risque d'inondation [18].

Notre zone d'étude est délimitée par des frontières bien marquantes :

— Nord : les voies du chemin de fer, surélevées par rapport aux environs comme on peut l'observer sur le modèle numérique de terrain (Figure 1.15) et la Sambre, protégée par 2 murs de quai.
— Ouest : terril Saint Gaston Ancien.
— Est : terril Menonry.

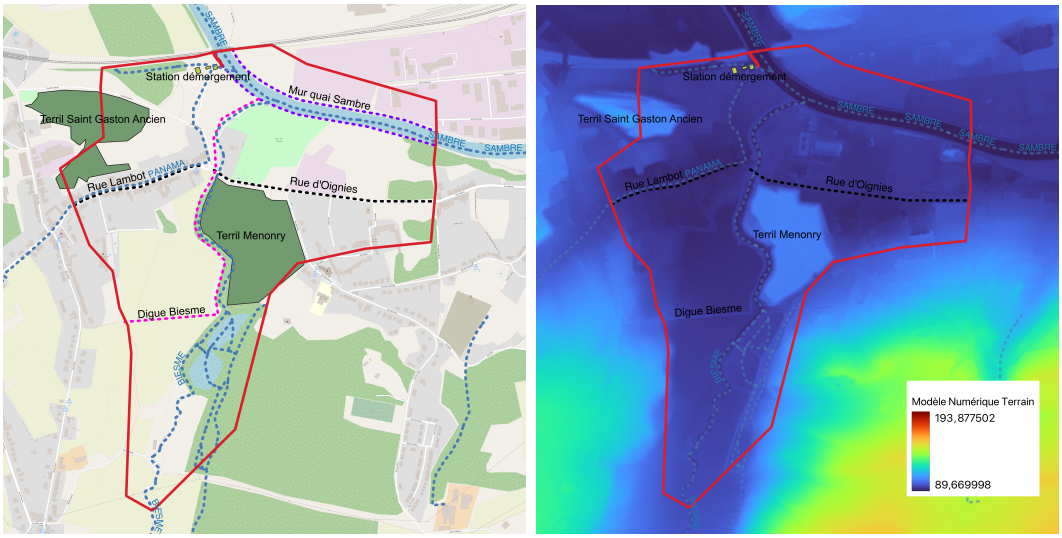


FIGURE 1.15 – Configuration des lieux dans la zone étudiée.

1.4.1 La station de démergement

Le premier constat que l'on peut poser sur base du modèle numérique de terrain, qui n'est autre qu'une représentation de la topographie, est la faible altimétrie dans notre zone et plus particulièrement dans la rue Lambot.
Ce faible niveau du sol peut s'expliquer par un affaissement suite à l'exploitation minière présente depuis 1801, dont les deux terrils précités sont aussi des témoins. L'activité minière dans la commune d'Aiseau-Presles s'est établie pendant plusieurs siècles, engendrant un réseau de galeries conséquent en sous-sol. Ce dernier a été comblé lors de la fermeture des sociétés minières à la fin des années 1980. Malgré ce remblai, un tassement du sol est souvent observé dans les 10 années suivantes puisque le remblai ne comble pas l'ensemble des vides.

Afin de confirmer ce constat, la figure 1.16 représente une coupe le long de la rue Lambot et de la rue d'Oignies (trait en pointillés noir sur la figure 1.15). On observe une diminution du niveau de l'ordre de 3 mètres dans la rue Lambot avant une remontée jusqu'à $96m$, la hauteur de la digue à cet endroit. Une petite

cuvette peut aussi être observée dans la rue d'Oignies mais d'une profondeur moins importante.

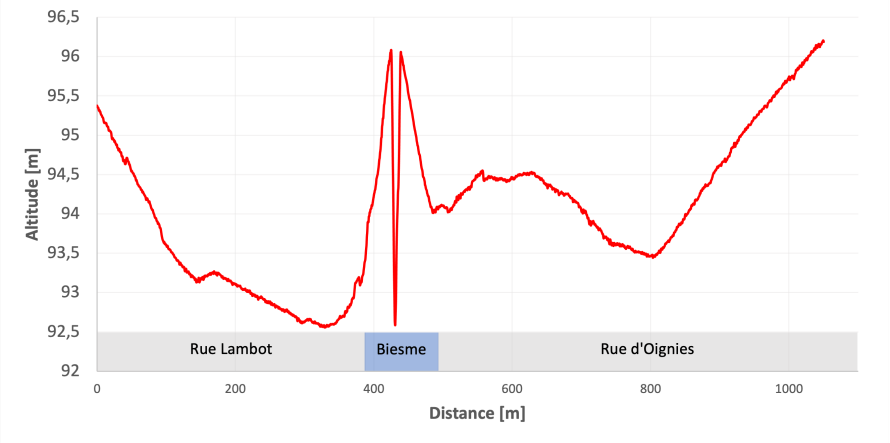


FIGURE 1.16 – Coupe de niveau dans la rue Lambot et la rue d'Oignies.

Cette configuration altimétrique est non seulement défavorable en cas de débordement du cours d'eau mais aussi lors de fortes pluies. En effet, si la Biesme sort de son lit, la zone en cuvette se verra inondée mais ne disposera pas d'un chemin naturel d'évacuation des eaux lors de la décrue. Cette constatation est aussi valable lors de fortes précipitations sans débordement du cours d'eau. En effet, le niveau du terrain naturel étant inférieur au niveau de la Biesme et au niveau des digues la bordant, l'eau de ruissellement ne dispose d'aucun moyen pour s'évacuer vers la Biesme ou la Sambre. Elle va donc se concentrer au point le plus bas de la rue Lambot et sans une intervention technique, elle engendrerait une inondation à chaque épisode pluvieux.

Pour pallier à ce problème, une station de démergement a été construite en aval de la Biesme (Figure 1.15) et est gérée depuis 2003 par IGRETEC. L'intercommunale exploite 8 autres ouvrages de démergement "mixtes" dans la région de Charleroi. Ils sont dits "mixtes" car par temps sec ils renvoient les eaux usées vers une station d'épuration et par temps de pluie évacuent le surplus des eaux vers le milieu naturel [19].

La station d'Aiseau se compose de deux réseaux de collecteurs acheminant l'eau des points bas de la cuvette vers la station. Par temps sec, seul le réseau d'assainissement est fonctionnel et renvoie les eaux usées vers la station d'épuration de Roselies. Pendant les épisodes pluvieux, les pompes de la station de démergement permettent de remonter l'eau acheminée par les pertuis de démergement vers un

canal l'évacuant ensuite dans la Sambre. Les pompes de la station de démergement ont une capacité de $4000m^3/h$ chacune. Elles ne sont pas prévues pour fonctionner en parallèle mais la deuxième pompe est une réserve pour ne pas affecter le bon fonctionnement de l'ouvrage lors des entretiens ou réparations. Cette capacité est théorique puisqu'au moment des inondations aucun appareil de mesure de débit n'était présent sur site.

Lors des inondations de Juillet 2021, la station de démergement a fonctionné à plein régime pendant plus de 40 heures, rejetant $4000m^3/h$ dans la Sambre. Le réseau d'assainissement a aussi été utilisé en continu afin de renvoyer $1200m^3/h$ en amont vers la station d'épuration de Roselies. Lors de la visite d'un ouvrier pendant la matinée du 15/07/2021, il a été constaté une incapacité de pomper l'entièreté de l'eau par les deux stations. Il a donc été décidé de faire fonctionner les 2 pompes de la station de démergement en parallèle afin d'augmenter la capacité de pompage à $8000m^3/h$. Cependant, le chenal d'évacuation débordait dans la station elle-même, ce qui a obligé les équipes à abandonner cette solution. Une deuxième tentative d'augmentation de la capacité de pompage a été effectuée via la pompe présente dans la station d'assainissement pouvant renvoyer $2850m^3/h$ directement vers la Sambre. Les sorties des canalisations de cette pompe et de la station de démergement étant trop rapprochées, un "tourbillon" s'est créé dans la Sambre et renvoyait l'eau directement vers la cuvette. Il a donc été décidé de conserver la situation de départ, permettant l'évacuation de $4000m^3/h$ dans la Sambre et $1250m^3/h$ vers Roselies.

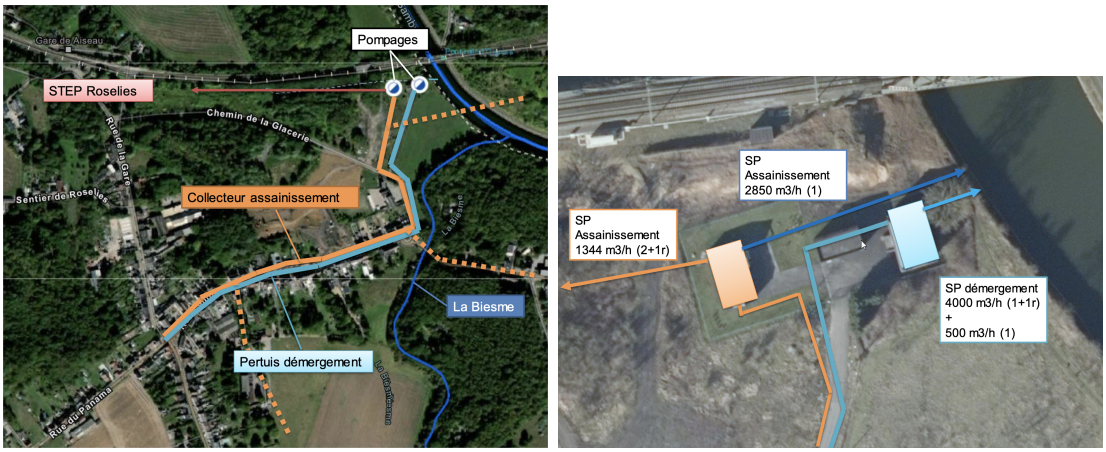


FIGURE 1.17 – Réseau d'assainissement et de démergement [20].

Après chaque épisode d'inondations, de nombreux riverains émettent des critiques sur le fonctionnement de la station de démergement. L'intercommunale nous

a fourni les graphiques de la consommation électrique de la station, qui témoignent du fonctionnement en continu des pompes pendant toute la durée de la crise. Les équipes techniques ne connaissent cependant pas le type de pluies pour lequel la station a été dimensionnée lors de sa construction et ont donc commandé une étude auprès d'INASEP (Intercommunale Namuroise de Services Publics) pour un redimensionnement éventuel des pompes.

Deuxièmement, on sait qu'à la mi-journée du 15/07/2021, la digue présente en amont de la Biesme a été submergée par les eaux, engendrant un débit d'eau supplémentaire à évacuer. Or la station de démergement n'est pas prévue pour évacuer un débordement du cours d'eau mais simplement l'eau de ruissellement.

En conclusion, nous savons que la station de pompage et de démergement a fonctionné correctement en Juillet 2021, que son dimensionnement est probablement à revoir mais qu'il n'est pas la cause principale des dégâts engendrés.



FIGURE 1.18 – Conduites dans la station de démergement.

1.4.2 Les digues

Sambre - Murs de quai

La Sambre n'a pas toujours été telle qu'on la connaît aujourd'hui. Elle semble avoir été naviguée depuis le Moyen Âge mais elle connaissait alors un régime de navigation très difficile. Les "eaux moyennes", période favorable à la navigation, ne duraient que 5 à 6 mois par an, obligeant les navires à utiliser la technique des bonds d'eau ou aiwées. Il s'agissait de retenir une quantité d'eau en amont d'un barrage et à la libérer au moment du passage du bateau pour lui permettre d'atteindre l'obstacle suivant.
Ce n'est qu'en 1823 que l'ingénieur De Behr souligna la nécessité d'artificialiser le cours d'eau pour le développement industriel. La partie belge de la rivière fût canalisée entre 1825 et 1829 tandis que la partie française le fût de 1832 à 1836. Ces grands travaux permirent une uniformisation de la largeur de la rivière et de son tirant d'eau ainsi qu'une réduction du nombre de méandres. Les berges furent aussi réaménagées et surélevées par endroit pour éviter tout débordement sur les terres avoisinantes.



FIGURE 1.19 – Digues le long de la Sambre [12].

À l'aide du Modèle Numérique de Terrain dont nous disposons, une coupe transversale a été réalisée dans la Sambre juste en amont de la station de démergement. Le niveau du mur de quai en rive droite (côté station de démergement) à $95,5m$ est approximativement $1m$ plus élevé que celui en rive gauche (côté Tamines). Il y a donc une probabilité quasi nulle de débordement de la Sambre en rive droite, ce

qui conforte l'hypothèse d'un débordement de la Biesme dans la rue Lambot. On peut noter l'efficacité de cet élément de protection mais il faut aussi prendre en compte l'effet négatif de ce dernier. Lors d'une inondation dans la "cuvette", l'eau n'aura pas la possibilité de s'écouler vers la Sambre avant que le niveau ne dépasse $95,5m$ dans l'ensemble de la cuvette, ce qui représentera une hauteur de $4m$ d'eau à certains endroits.

Lors d'une réunion avec les équipes en charge de la station de démergement, l'hypothèse d'un abaissement du niveau de ce mur de quai a été émise. Il faudrait pour cela définir le niveau maximal de crue dans la Sambre et décider si un ajustement serait envisageable ou non.

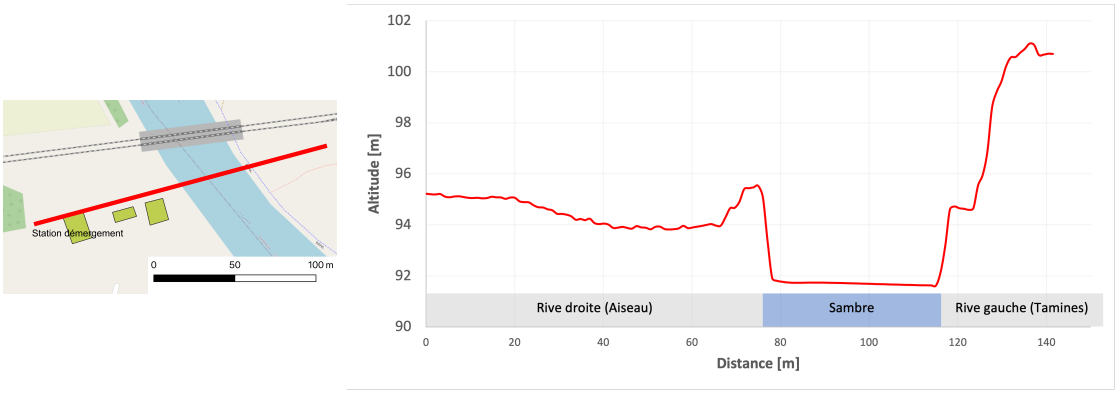


FIGURE 1.20 – Coupe transversale dans la Sambre au niveau de la station de démergement.

Biesme - Digue en terre

La Biesme est bordée d'une digue en terre d'un kilomètre de long afin de protéger la zone affaissée en cas de crue. On observe sur la Figure 1.21 que la zone affaissée au niveau de la rue Lambot est bien délimitée par la digue. Le placement de la digue n'est pas anodin, il permet une protection supposée optimale des zones peuplées à l'aval en utilisant les champs comme plaine inondable lors du pic de crue.

Il est important de souligner que la terre, matériau constituant la digue, est moins résistante que le béton qui constitue les murs de quai le long de la Sambre. Lors d'une submersion de digue, une brèche peut se créer et s'agrandir, laissant s'écouler de plus en plus d'eau dans la zone affaissée.

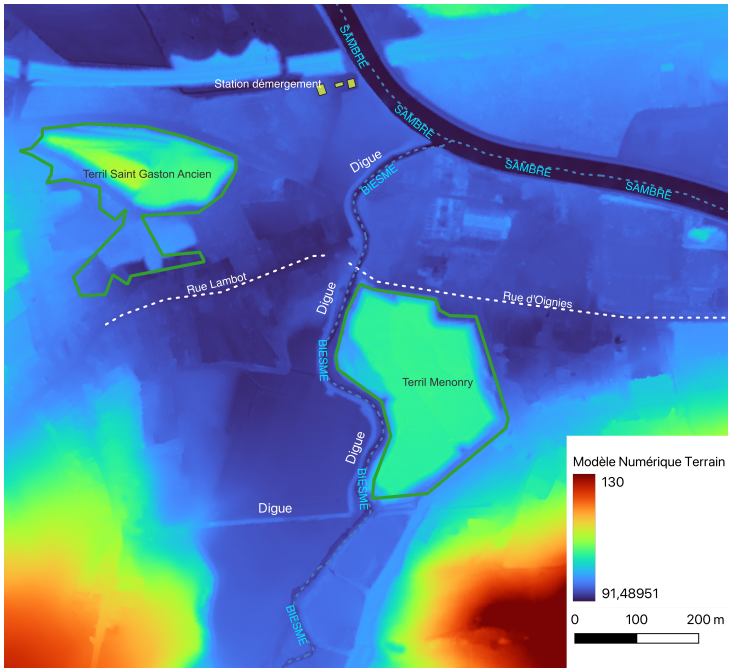


FIGURE 1.21 – Digue le long de la Biesme protégeant la zone affaissée.

En effectuant une coupe dans la digue, on observe un niveau qui n'est pas constant. Il semble que la digue ait été érodée par le passé, à un endroit précis, diminuant son niveau de $96,7m$ à $95,5m$. Cette diminution de niveau de plus d'1 mètre entraîne une augmentation du risque de submersion.

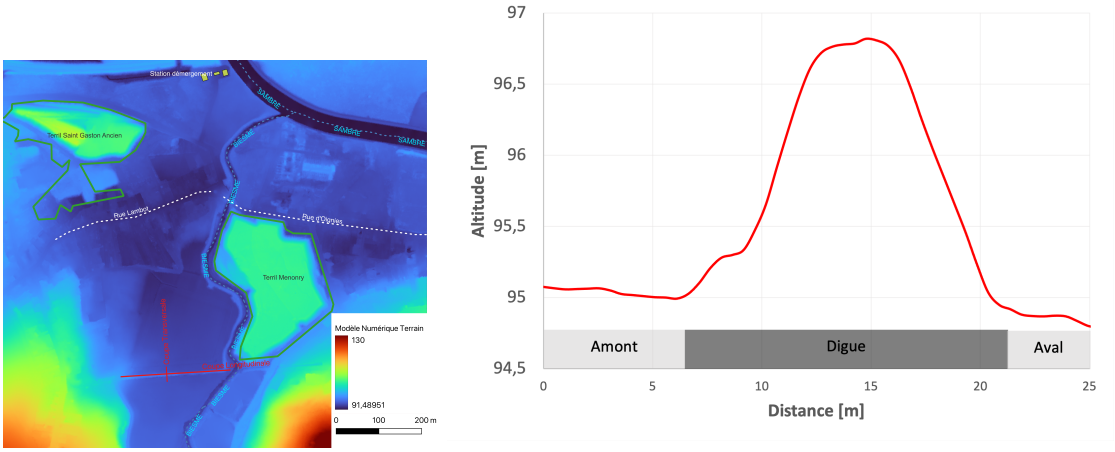


FIGURE 1.22 – Coupe transversale dans la digue.

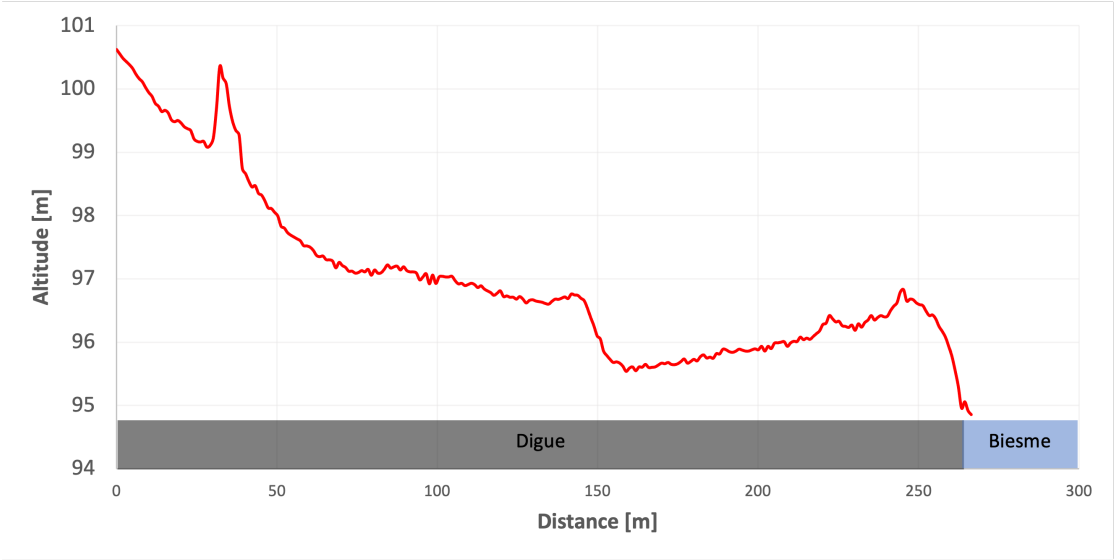


FIGURE 1.23 – Coupe longitudinale dans la digue.

Comme précédemment, ces digues peuvent avoir un effet néfaste une fois qu'elles sont submergées : empêcher l'eau de s'évacuer vers la Biesme lors de la décrue.

1.4.3 Le rétrécissement à la confluence

Une question qui est revenue souvent, aussi bien de la part des habitants que de la part de la commune, est le rétrécissement de la section de la Biesme au niveau de la confluence. La section naturelle de la Biesme transitionne vers une section bétonnée, plus étroite et présentant une courbure. Il semblerait que cet aménagement ait été réalisé dans le but de rediriger le flux d'eau de la Biesme, arrivant perpendiculairement à la Sambre, pour faciliter son déversement et éviter de trop grandes turbulences entre les deux cours d'eau.

Sans rentrer dans l'entièreté des développements d'hydraulique appliquée, on sait que lors d'un rétrécissement de section, la hauteur d'eau va augmenter. L'énergie spécifique $E(h)$ augmente lorsque la largeur se réduit et il en est de même pour la hauteur uniforme ou la hauteur critique. L'entièreté des développements peut être retrouvé dans le cours d'Hydraulique appliquée (LGCIV2051 [21]) enseigné à l'UCLouvain.



FIGURE 1.24 – Rétrécissement de la section à la confluence [12]

.

1.5 Les objectifs de l'étude

La configuration des lieux détaillée dans la section précédente peut se résumer en 3 points :

- Affaissements miniers créant une zone "cuvette"
- Digues présentes le long de la Biesme et de la Sambre pour protéger cette zone affaissée des crues
- Rétrécissement de la section de la Biesme à la confluence

Sur base de cette description et des évènements qui se sont déroulés en Juillet 2021, nous savons que les éléments de protection ne sont pas suffisants.
L'objectif de cette étude sera de déterminer les facteurs engendrant une inondation importante de la rue Lambot afin d'établir une solution permettant de sécuriser la zone lors des crues futures.

Pour ce faire, nous allons tout d'abord détailler les méthodes et résultats précédemment obtenus par Maxime Raison, qui a travaillé sur cette problématique par le passé. Ensuite, nous effectuerons une analyse de sensibilité à partir du modèle

précédemment utilisé par Maxime Raison, ainsi qu'une vérification des données utilisées pour les modélisations. L'objectif final sera atteint lorsque l'ensemble des paramètres seront vérifiés et qu'un moyen d'atténuation, idéalement même de suppression, des inondations sera trouvé. L'idée générale pour mener à bien cette tâche sera de partir des moyens de protection existants, de vérifier leur efficacité et éventuellement de les modifier avant de proposer de nouvelles solutions imposant des aménagements plus conséquents.

Chapitre 2

Étude auprès de la population

Lors de la première réunion avec les services communaux d'Aiseau-Presles, il nous ont signalé un nombre croissant de questions de la part des riverains sur les causes des inondations de Juillet 2021. Ce n'est en effet pas la première fois que la rue Lambot est inondée et une certaine impatience pour des aménagements supplémentaires se fait sentir auprès de la population. C'est en partie pour répondre à ces questions que l'administration a proposé ce sujet de travail de fin d'études.

La commune d'Aiseau-Presles nous a donc demandé d'effectuer une enquête auprès des riverains touchés afin de récolter les informations qu'ils pourraient nous transmettre sur les épisodes d'inondations ainsi que de prendre conscience du niveau de connaissance qu'ils ont sur les moyens de lutte déjà présents. Cette enquête à été réalisée par Maxime Raison l'année précédente mais n'a malheureusement pas connu un grand nombre de réponses.

Les informations récoltées peuvent se synthétiser de la manière suivante :

- Premier épisode aussi conséquent en Juillet 2021 depuis les années 1960.
- Petites inondations assez récurrentes dans les caves $(15 - 20cm)$.
- Connaissance de la station de pompage et de démergement ainsi que des digues.
- Reproches de mauvais entretien de la digue et du cours de la Biesme. Ils soulignent que depuis Juillet 2021 le cours d'eau a été nettoyé et que la digue aurait été rehaussée d'une hauteur approximative de $50cm$.
- Propositions de pistes à étudier pour lutter contre les inondations : rétrécissement à la confluence et capacité de pompage de la station de démergement.

À la suite de ces réponses, on observe bien qu'il y a une connaissance des mesures déjà en place mais aussi un constat d'inefficacité de celles-ci pendant l'épisode de Juillet 2021. Les objectifs de ce mémoire répondront donc aussi bien à la demande

de la commune qu'aux interrogations des citoyens.

En parallèle de cette enquête auprès de la population, le centre culturel nous a contacté pour mettre en commun nos informations dans le cadre des subsides obtenus auprès de la fondation Roi Baudouin pour un projet sur la thématique de l'eau. Ce projet avait pour but de recréer du lien dans les zones sinistrées et d'"exorciser" la peur de l'eau qui pouvait exister à la suite des inondations à travers une série d'interviews que le centre culturel a pu réaliser. En conclusion de ce projet, une journée thématique a été organisée le 23 septembre 2023 présentant les résultats des ateliers socio-artistiques et les paroles récoltées. Cette journée thématique s'est déroulée à la Papinière, salle qui borde la Biesme et rentrait donc parfaitement dans le thème. Les quelques photos ci-dessous permettent d'illustrer le travail présenté lors de cette journée.

La combinaison de l'enquête réalisée par Maxime Raison auprès de la population lors de son travail et les différents ateliers organisés par le centre culturel ont permis de créer du lien social autour d'une thématique qui a traumatisé bon nombre de citoyens. Afin de compléter ceci, il me semblerait intéressant d'écrire un petit résumé des deux travaux de fin d'études portant sur les inondations et de proposer à la commune de le publier sur leurs réseaux sociaux afin d'en informer la population.



FIGURE 2.1 – Résultats de l'atelier 'méduses'.



FIGURE 2.2 – Exposition extérieure lors de la journée de l'eau.



FIGURE 2.3 – Exposition extérieure lors de la journée de l'eau.



FIGURE 2.4 – Exposition de photos prises lors des inondations.

Chapitre 3

Résultats de l'étude précédente

Ce chapitre a pour objectif de synthétiser les résultats de la première étude menée par Maxime Raison. Les résultats qui seront présentés ci-dessous sont issus de son mémoire [12], qui peut être retrouvé en intégralité sur la bibliothèque en ligne UCLouvain à l'adresse `https://dial.uclouvain.be`.

3.1 Étude hydrologique

Afin de modéliser l'évènement tragique de Juillet 2021, il était nécessaire de disposer de données hydrologiques à entrer dans le modèle. Pour ce faire, une première partie de l'étude s'est concentrée sur la détermination du débit écoulé dans la Biesme, à l'aide du logiciel Athys. Le SPW dispose d'un limnimètre, fournissant le débit dans la Biesme à partir de l'interprétation des mesure de hauteurs d'eau par des courbes de tarage. Cet appareil de mesure est implanté à la rue des Forges (Figure 3.1), en amont de la zone d'étude que nous avons définie précédemment. Il était donc intéressant de modéliser le débit à l'entrée de notre zone d'étude pour tenir compte des écoulements qui se produisent entre le limnimètre et l'entrée de notre zone. Nous disposons également des données issues des pluviomètres présents dans la zone, permettant de réaliser une modélisation d'hydrogramme à partir de données de pluies.

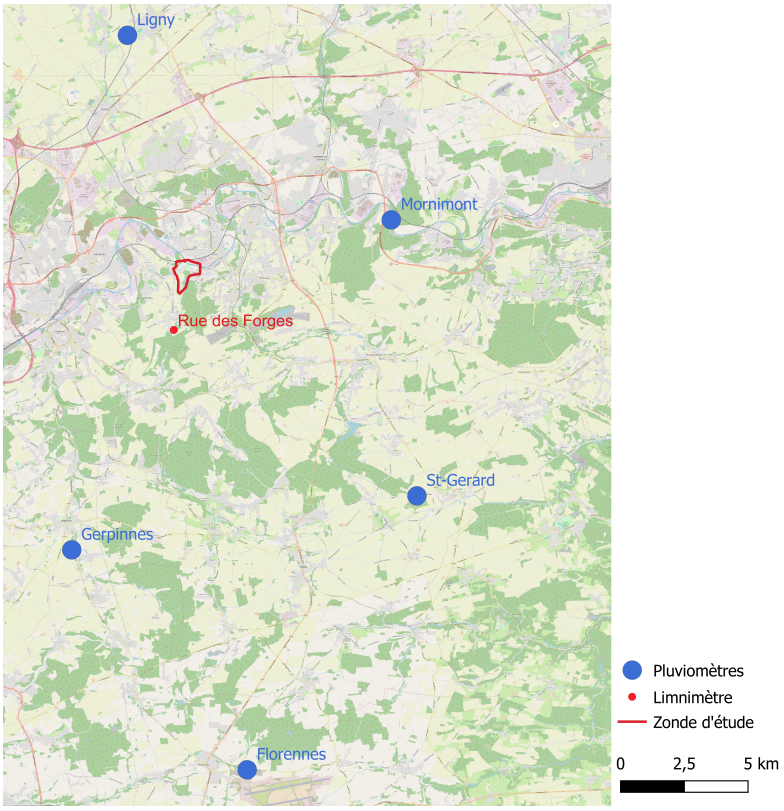


FIGURE 3.1 – Position du limnimètre et des pluviomètres.

3.1.1 Athys

L'ATelier HYdrologique Spatialisé (ATHYS) est un logiciel de modélisation hydrologique traitant des données hydro-climatiques et géographiques [22]. Il est divisé en 4 modules :

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

L'étude hydrologique a été réalisée à partir de ce logiciel et les résultats sont repris dans les sections suivantes.

3.1.2 Bassin versant

La première étape de cette modélisation hydrologique résultait en la détermination du bassin versant de la Biesme pour deux points précis : le limnimètre et l'entrée de notre zone d'étude.

Le module VICAIR a été utilisé afin de calculer les directions d'écoulement à partir du Modèle Numérique de Terrain , c'est à dire la direction dans laquelle l'eau va ruisseler en chaque point de la zone lors des précipitations. A partir de ces directions d'écoulement il est possible de déterminer le bassin versant de la Biesme pour nos deux zones.

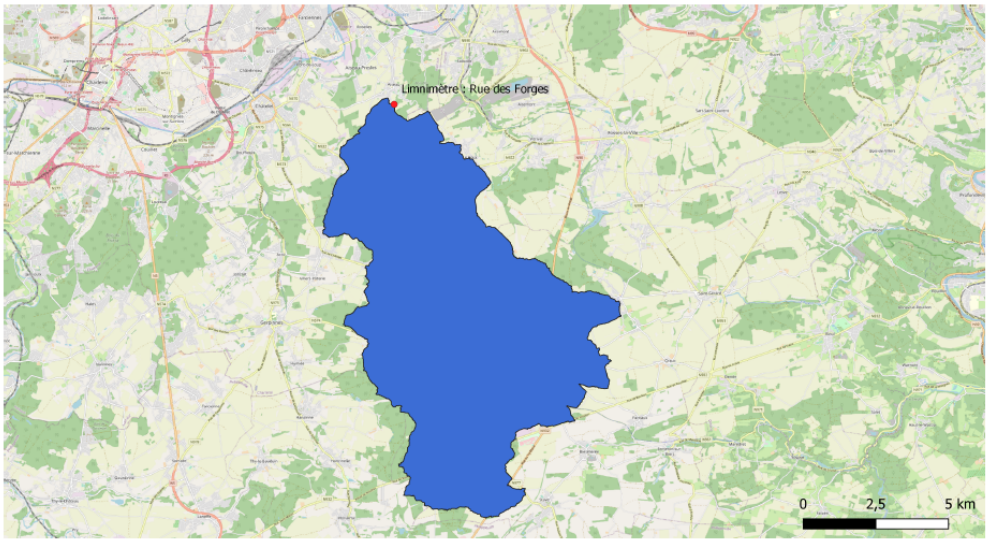


FIGURE 3.2 – Bassin versant du limnimètre [12].

3.1.3 Polygones de Thiessen/Voronï

"Les polygones de Thiessen sont générés à partir d'un ensemble de points d'échantillonnage. Chaque polygone de Thiessen définit une zone d'influence autour de son point d'échantillonnage, de telle sorte que n'importe quelle localisation à l'intérieur du polygone est plus proche de ce point que de tout autre point d'échantillonnage" [23]. Les points d'échantillonnages sont, dans notre cas, les pluviomètres et les polygones de Thiessen permettront de déterminer la zone d'influence de chaque pluviomètre dans le bassin versant lors de la modélisation de l'hydrogramme.

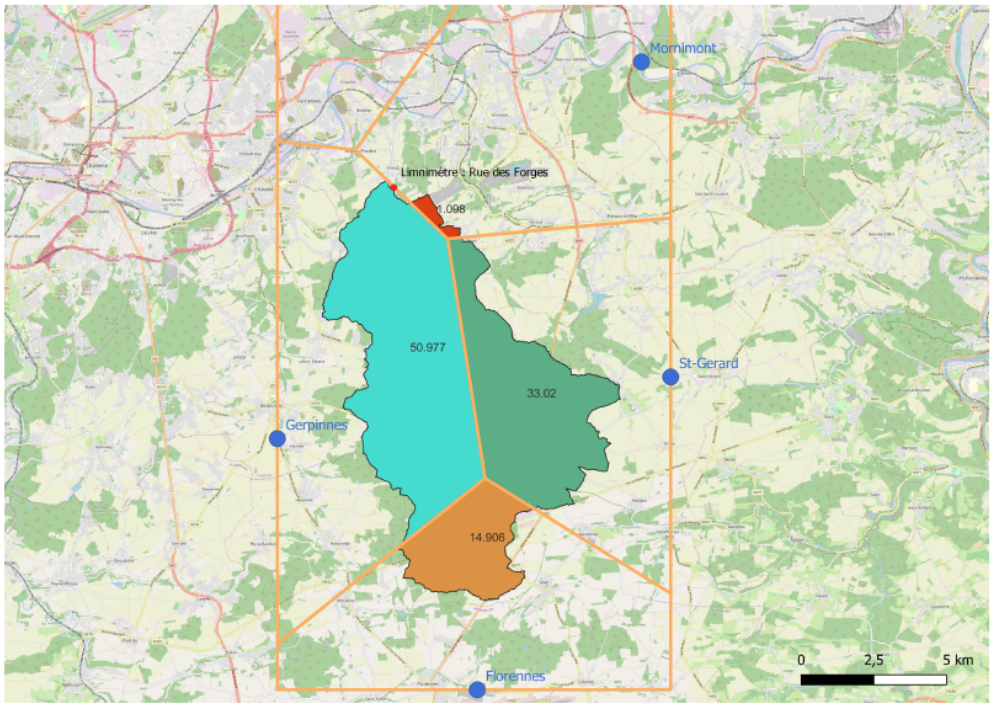


FIGURE 3.3 – Polygones de Thiessen - Limnimètre [12].

3.1.4 Hydrogramme

La première étape pour modéliser l'hydrogramme à partir des données de pluies est de créer un fichier regroupant l'ensemble des données : précipitations, localisation des pluviomètres et débit observé au limnimètre à l'aide du module VISHYR.

La simulation de l'hydrogramme est réalisée à partir du module MERCEDES d'Athys, qui utilise des fonctions de production et de transfert. Nous allons brièvement détailler le modèle de ces deux types fonctions.

Fonction de production

La fonction de production permet de calculer le débit de ruissellement à partir des données pluviométriques. Elle permet en réalité de calculer la pluie efficace $P_e(t)$, qui ne s'infiltre pas et qui va donc ruisseler vers le cours d'eau, à partir de la pluie brute $P_b(t)$.

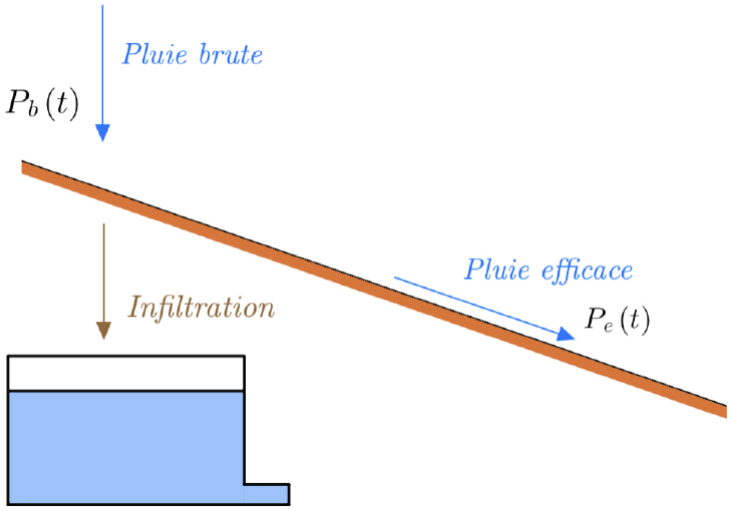


FIGURE 3.4 – Différentiation de la pluie brute et efficace [12].

Il existe plusieurs modèles pour passer de la pluie brute à la pluie efficace mais celui utilisé par Maxime Raison est le modèle SCS explicité dans l'équation ci-dessous.

$$P_e(t) = C(t) \cdot P_b(t) \text{ avec } C(t) \text{ le coefficient de ruissellement} \tag{3.1}$$

Le coefficient de ruissellement $C(t)$ évolue dans le temps, ce qui représente au mieux la réalité. En effet, au début de l'épisode pluvieux, l'infiltration d'eau dans les terres est plus conséquente. Une fois que les sols sont saturés d'eau, le ruissellement sera donc plus conséquent. Il est possible d'exprimer $C(t)$ selon différentes variables supplémentaires mais la description complète du modèle n'étant pas nécessaire pour ce travail, il sera laissé au lecteur le loisir d'approfondir cette description disponible dans le mémoire de Maxime Raison [12].

Fonction de transfert

La figure 3.5 représente la direction de l'écoulement de chaque maille. La fonction de transfert permettra de calculer le débit écoulé en chaque maille, provenant des mailles en amont, à partir de deux paramètres : la vitesse de propagation de l'eau et le temps de propagation.

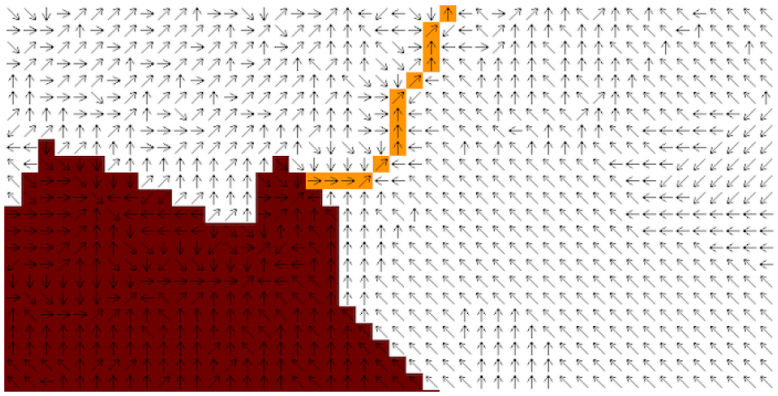


FIGURE 3.5 – Direction d'écoulement des mailles [12].

La vitesse de propagation de l'eau entre deux mailles est fonction de vitesse initiale de l'eau qui arrive dans la première maille, de la pente de la maille et de la superficie du bassin drainé par la maille.
Le temps de propagation est quand à lui fonction de la distance parcourue par l'eau jusqu'à l'exutoire et de la vitesse d'écoulement dans chaque maille.
Il est maintenant possible de calculer l'hydrogramme à l'exutoire, qui n'est rien d'autre que la somme des hydrogrammes unitaires de chaque maille, en tenant compte du temps de propagation de chaque maille, comme le suggère la Figure 3.6.

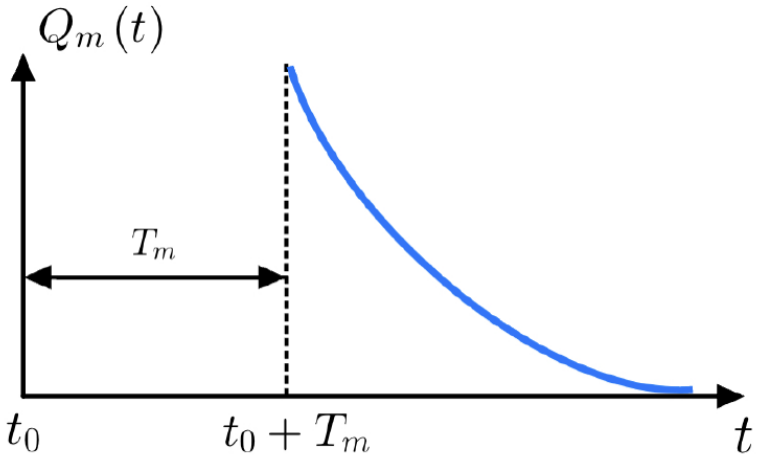


FIGURE 3.6 – Exemple hydrogramme unitaire [12].

Les détails mathématiques sur les fonctions de transfert sont disponibles dans le mémoire de Maxime Raison[12].

Maintenant que le principe des fonctions de production et de transfert sont précisés, nous pouvons exposer les résultats obtenus par la simulation MERCEDES.

La figure 3.7 représente les différents hydrogrammes, avec en bleu l'hydrogramme observé par le limnimètre (données SPW) et en vert l'hydrogramme calculé par Athys à ce même endroit. Ce dernier a été obtenu après optimisation des paramètres pour se rapprocher le plus possible de celui mesuré par le Service Public de Wallonie. Une fois que les paramètres étaient optimisés, ils ont été réutilisés pour simuler le débit à l'entrée de la zone d'étude, située en aval du limnimètre. Cet hydrogramme est représenté en rouge sur la figure.
On observe que la différence entre l'hydrogramme simulé au limnimètre et l'hydrogramme simulé à l'entrée de la zone d'étude est tellement minime qu'il n'est pas intéressant d'utiliser les résultats de la simulation. En effet, on introduit plus d'erreurs en utilisant l'hydrogramme simulé qu'en utilisant celui mesuré par le SPW, même si on sait qu'il a été mesuré en amont de notre zone d'étude.
Il a donc été décidé d'utiliser les données du SPW mesurées à la rue des Forges pour les simulations hydrauliques.

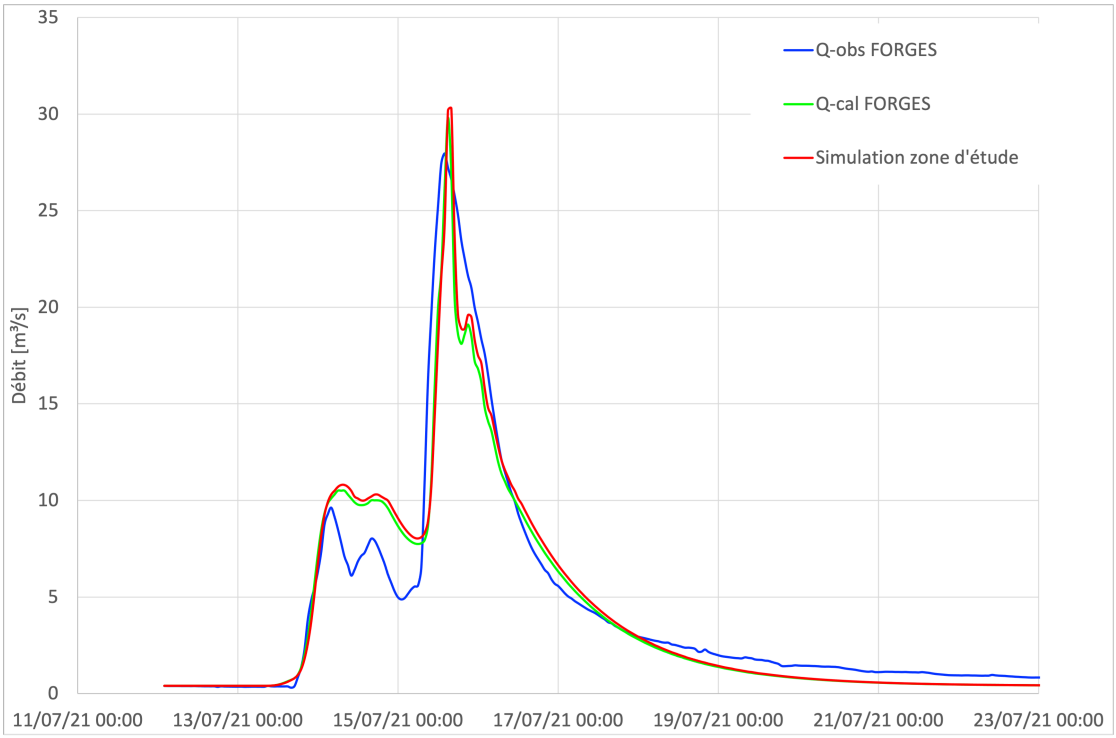


FIGURE 3.7 – Hydrogrammes mesurés et simulés.

3.2 Étude hydraulique

3.2.1 Hydroflow

Hydroflow est un programme de calcul hydraulique développé par S. Soares-Frazão pendant son doctorat et qui est en évolution continuelle sous l'impulsion de l'équipe d'hydraulique à l'UCLouvain. Il s'articule sur 2 langages de programmation : C++ et Python. Le code de calcul est écrit en C++ tandis que l'interface entre l'utilisateur et le code de calcul est codée en Python afin de la rendre la plus intuitive possible.
Le principe mathématique du code est basé sur la résolution des équations en eaux peu profondes par la méthode des volumes finis. Nous allons brièvement décrire les équations avant de présenter la méthode de résolution puisque les simulations de ce mémoire, comme celles de Maxime Raison [12], ont été réalisées sur Hydroflow. Il nous semble donc intéressant d'avoir une brève introduction au fonctionnement de ce programme.

Équations de Saint-Venant [24]

Les équations de Saint-Venant ne sont rien d'autre que l'expression des équations en eaux peu profondes (shallow water equations) en 1D. Il a été décidé de les présenter sous cette forme pour simplifier la compréhension au maximum. Elles représentent un écoulement à surface libre dans un canal en décrivant la profondeur moyennée.

Hypothèses

Les hypothèses pour obtenir les équations de Saint-Venant sont les suivantes [24] :
— Fluide incompressible
— Pente du lit assez faible
— Pression hydrostatique
— Pertes de charge calculées avec la formule de Manning
— Écoulement unidimensionnel
— Canal prismatique

Conservation de la masse

La première équation, de conservation de la masse, est obtenue en effectuant un bilan de masse sur un élément infinitésimal de l'écoulement de longueur dx.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

avec
— $A[m^2]$ l'aire de la section
— $Q[m^3/s]$ le débit

Conservation de la quantité de mouvement

La deuxième équation, de conservation de la quantité de mouvement, est obtenue à partir de la relation de base de dynamique qui nous dit que la somme des actions extérieures est égale à la variation de la quantité de mouvement. Il faut donc exprimer les différentes forces extérieures, à savoir la gravité, le frottement, les pression latérales et hydrostatiques et d'égaler leur somme à la variation de la quantité de mouvement ($\frac{D(m\vec{V})}{Dt}$). Elle est exprimée ci-dessous pour un canal rectangulaire sans variation de largeur.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta\frac{Q^2}{A} + gA\frac{h}{2}) = gA(S_0 - S_f)$$

avec
— $A[m^2]$ l'aire de la section
— $Q[m^3/s]$ le débit
— β le coefficient de Boussinesq
— h la profondeur d'eau maximale
— S_0 la pente de fond
— S_f la pente de frottement
— $g = 9,81[m/s^2]$ l'accélération gravitationnelle

Nous pouvons maintenant écrire les équations de Saint-Venant, pour un cas général, de la manière suivante :

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

Elles peuvent aussi s'exprimer sous forme matricielle :

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

avec

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

Méthode des volumes finis [24]

Pour simplifier la compréhension de cette méthode, nous allons décrire son application en 1D, le principe en 2D étant le même, ajusté de quelques adaptations pour prendre en compte la dimension supplémentaire.

La méthode des volumes finis permet de résoudre les équations différentielles (Saint-Venant en 1D ou équations en eaux peu profondes en 2D) sur des volumes finis. Elle permet d'exprimer une équation algébrique sur ce volume en discrétisant le domaine en mailles d'une certaine taille. L'équation 3.2 est ensuite intégrée sur un volume espace-temps $\omega = \Delta x \Delta t$ (Figure 3.8), ce qui permet d'exprimer la relation algébrique 3.3.

$$\iiint_{\Omega} \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} \right) d\Omega = \iiint_{\Omega} \mathbf{S}(\mathbf{U}) d\Omega \tag{3.2}$$

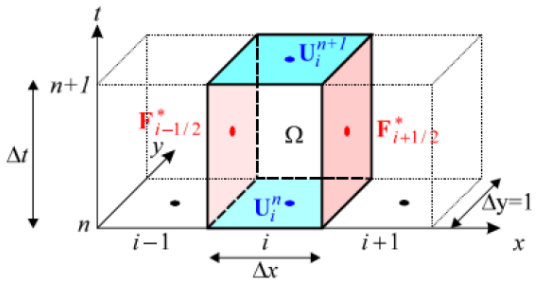


FIGURE 3.8 – Volume de contrôle [24]

$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\mathbf{F}^*_{i+1/2} - \mathbf{F}^*_{i-1/2} \right) + \overline{\mathbf{S}}_i \Delta t \tag{3.3}$$

avec

- n : l'exponentielle temporelle
- i : l'indice spatial
- Δt : le pas de temps
- Δx : la longueur de l'élément
- F^* : le flux à l'arête
- $\overline{S}_i$: la moyenne du terme source sur l'élément i

Solver HLLC

Nous disposons maintenant d'une équation algébrique (Equation 3.3) exprimant la mise à jour de la valeur de nos variables (débit et aire de la section) en fonction de ces mêmes variables au temps précédent, de termes sources et de flux. Il nous reste donc à exprimer ces flux, ce que nous allons faire à l'aide du solver HLLC.
La vitesse de propagation peut être estimée, à partir des caractéristiques, qui sont les chemins de propagation de l'information dans notre système (les dérivées partielles deviennent des dérivées totales le long des caractéristiques). Une fois les vitesses obtenues, il est possible de calculer les flux aux interfaces.

Les développements mathématiques complets permettant d'obtenir les équations de Saint-Venant, la méthode des volumes finis et les différents solveurs sont disponibles dans le mémoire de Nathan Delpierre [25] ou dans le cours de simulation numérique des écoulements transitoires, enseigné par S. Soares-Frazão à l'UCLouvain [24]. L'objet de ce mémoire ne traitant pas du fondement physique de ces équations, les détails sont laissés au loisir du lecteur.

3.2.2 Simulation de référence

La méthodologie appliquée par Maxime Raison lors de son étude reposait sur l'établissement d'un modèle permettant de représenter au mieux les inondations de Juillet 2021 avant d'étudier des propositions d'aménagements. La simulation de inondations de Juillet 2021 sera présentée dans cette section avant de présenter les 3 aménagements possibles qu'il a étudiés.

Débits d'entrée

À la suite de l'étude hydrologique qu'il a menée avec le logiciel Athys, telle que présentée dans la section précédente, il disposait d'informations sur le débit écoulé dans la Biesme. Pour rappel, il a utilisé l'hydrogramme mesuré par le Service Public de Wallonie à la rue des Forges.
Concernant le débit de la Sambre, dont la Biesme est un affluent, il a obtenu un hydrogramme mesuré à Châtelet par le Département Expertises Hydrauliques et Environnement du SPW. Au vu de la faible distance séparant Châtelet et Aiseau-Presles, ainsi que de la faible influence de la Sambre dans les inondations, la décision de négliger les apports d'eau dans la Sambre entre ces deux points a été adoptée.



FIGURE 3.9 – Position de la station de mesure de Châtelet et de l'entrée du domaine de simulation [12].

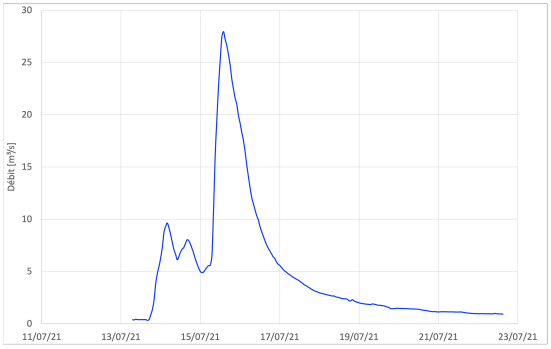


FIGURE 3.10 – Hydrogramme Biesme.

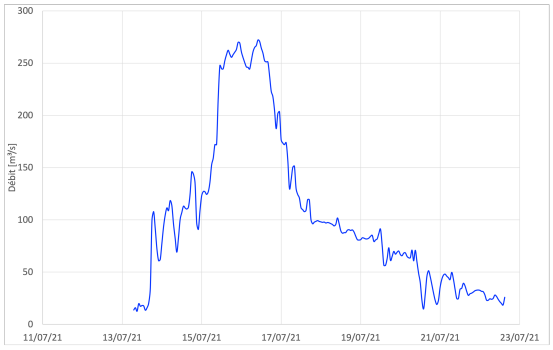


FIGURE 3.11 – Hydrogramme Sambre.

Maillage

Le maillage utilisé pour toutes les simulations du TFE de Maxime Raison est un maillage triangulaire. Il présente un gradient dans la taille de ses mailles, c'est à dire que les mailles proches du lit majeur de la Biesme ont une taille de 15$[m]$ tandis que celles proches du lit mineur mesurent 5$[m]$. On peut observer sur la figure 3.12 que plus on se rapproche des cours d'eau, plus les mailles sont petites. Un tel maillage permet d'accroître la précision dans les régions où l'écoulement nous intéresse, tout en limitant le temps de calcul. La question de la taille des mailles sera discutée lors de l'étude de sensibilité.

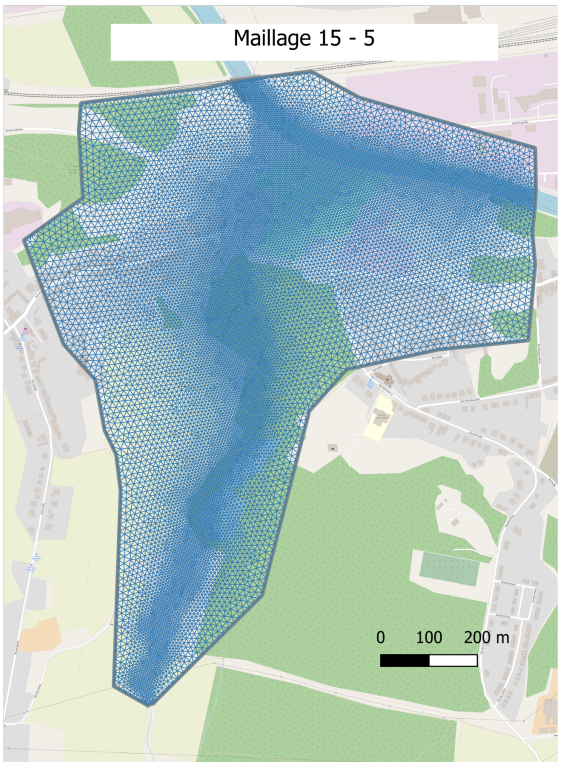


FIGURE 3.12 – Maillage gradient 15-5.

Modélisation de la station de démergement

Comme précisé dans la section relative à la configuration des lieux, la zone d'étude présente 3 spécificités. Deux d'entre elles, à savoir les digues et le rétrécissement à la confluence, sont représentées "naturellement" dans la modélisation Hydroflow lorsque le programme attribue une hauteur aux cellules à partir du modèle numérique de terrain.
Pour modéliser le comportement de la station de démergement, il a été nécessaire de créer une entaille dans le domaine. La localisation de cette modification dans le domaine n'est pas anodine. En effet, elle a été faite sur le mur de quai bordant la Sambre puisqu'on sait que cette zone n'est pas inondable au vu de sa hauteur. Le comportement de la station de démergement a été modélisé de la manière suivante :

- Extraction d'un débit constant de $5250[m^3/h]$ du domaine afin de représenter les $4000[m^3/h]$ pompés par la station de démergement et les $1250[m^3/h]$ pompés vers la station d'épuration de Roselies.
- Injection de $4000[m^3/h]$ dans la Sambre, représentant l'eau pompée par la station de démergement.

Cette modélisation est représentée schématiquement sur la Figure 3.13.

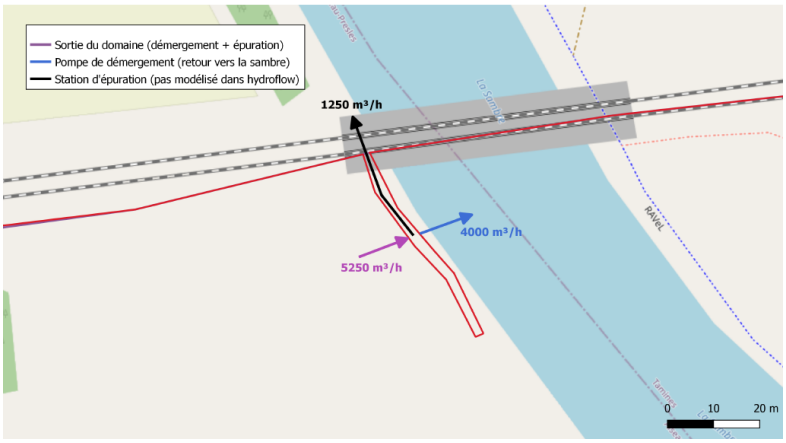


FIGURE 3.13 – Implémentation de la station de démergement dans Hydroflow [12].

Résultats de la simulation de référence

Les résultats de cette simulation de référence peuvent être observés à la Figure 3.14. La zone impactée par les inondations de Juillet 2021 correspond bien à celle qui ressort de la simulation.

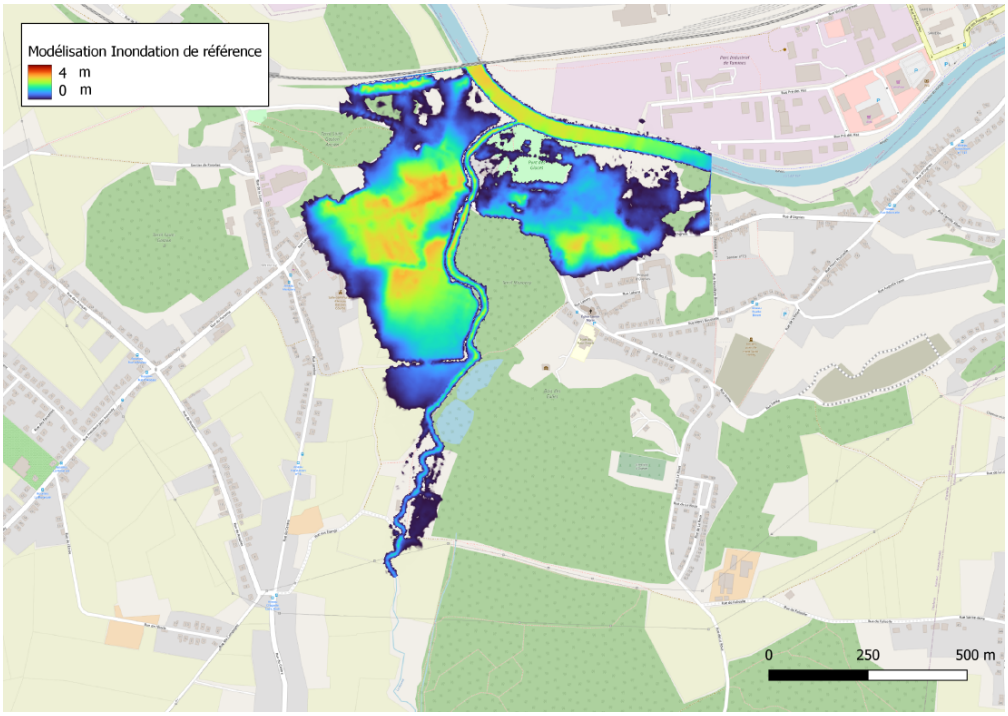


FIGURE 3.14 – Résultats de la simulation de référence [12].

Une comparaison a ensuite été effectuée avec des données résultant de l'enquête SURVEY Géomatique menée par SPW entre le 09/08/2021 et le 03/09/2021. Ces données ont permis la modélisation des hauteurs d'eau lors des inondations avec une pondération des mesures par l'inverse de la distance. Les niveaux d'eau issus de cette donnée SPW sont représentés en bleu sur la figure suivante tandis que les résultats de la simulation de référence sont représentés en rouge. On observe aisément que les données du Service Public Wallonie ne représentent pas exactement la réalité. L'eau inondant la rue Lambot présente un profil en "dents de scie" alors qu'on devrait observer un plan d'eau parfaitement horizontal. Cependant, les deux niveaux d'eau sont du même ordre de grandeur, ce qui conforte l'idée de la bonne qualité de la simulation de référence.

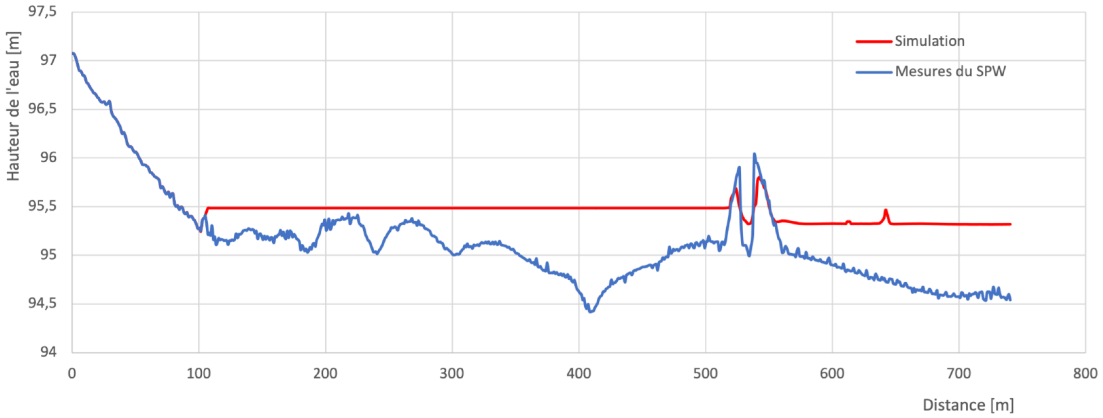


FIGURE 3.15 – Niveaux d'eau dans la rue Lambot [12].

Ensuite, une analyse temporelle des résultats de cette simulation de référence a été réalisée, afin d'avoir des points de comparaison pour les propositions d'aménagement qui seront simulées par la suite :

- Débordement de la Biesme après 7000 secondes (13/07 à 09h00 - Débit Biesme = $0,4[m^3/s]$)
- Niveau d'eau approximatif de 30 centimètres dans le champ en amont de la digue et débordement au dessus de cette dernière après 11000 secondes (13/07 à 10h30 - Débit Biesme = $0,38[m^3/s]$)
- Déversement de l'eau dans la rue Lambot après 40000 secondes (13/07 à 18h00 - Débit Biesme = $0,84[m^3/s]$)
- Le 15/07 à 14h, la hauteur d'eau dans la rue Lambot atteint jusqu'à 3,2 mètres (Débit Biesme = $27,95[m^3/s]$)

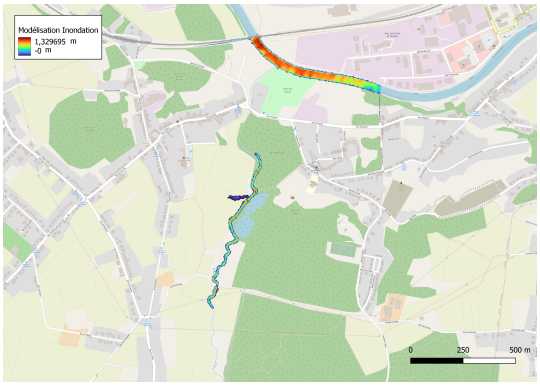


FIGURE 3.16 – Résultats de la simulation à 7000 sec [12].

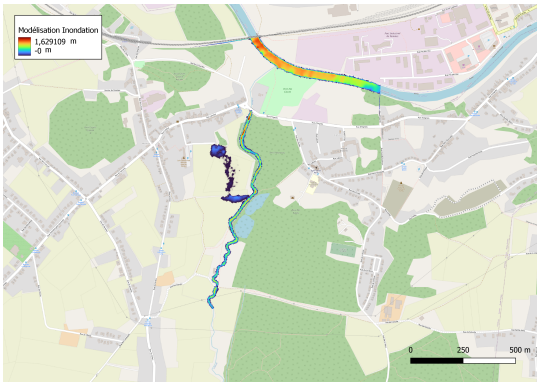


FIGURE 3.17 – Résultats de la simulation à 11000 sec [12].

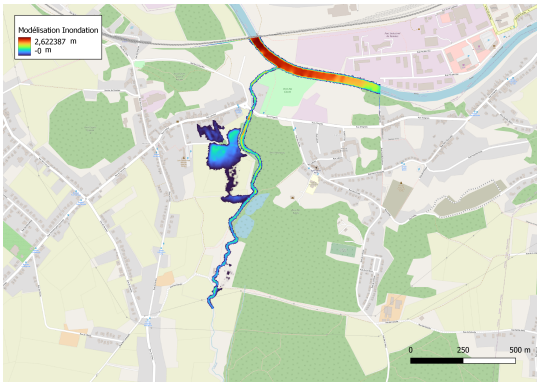


FIGURE 3.18 – Résultats de la simulation à 40000 sec [12].

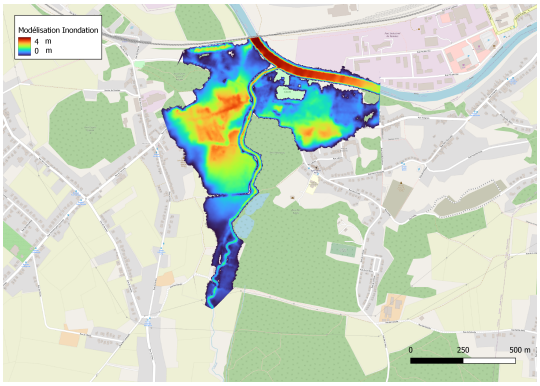


FIGURE 3.19 – Résultats de la simulation à 200000 sec [12].

Maintenant qu'une simulation de référence est établie et que les résultats de cette dernière ont été analysés, Maxime Raison a décidé de mettre en place plusieurs aménagements différents qui pourraient impacter la montée des eaux. Les résultats de ceux-ci seront synthétisés dans les 3 prochaines sections. Les détails de méthodologie et des informations approfondies sont disponibles dans le travail de fin d'études de Maxime Raison [12].

3.2.3 Augmentation de la capacité de pompage

Afin de répondre aux interrogations des citoyens sur la station de démergement, une augmentation de la capacité de pompage a été testée. Les pompes actuelles permettent d'extraire $4000[m^3/h]$ vers la Sambre et $1250[m^3/h]$ vers la station

d'épuration de Roselies. Le scénario testé doublait la capacité de la pompe de démergement afin d'atteindre un total de 9250$[m^3/h]$.

Le comportement temporel des résultats est identique à celui de la simulation de référence ainsi que l'étendue de la zone touchée. L'unique différence se trouve dans les hauteurs d'eau à la fin de la simulation. Une diminution de la profondeur d'eau finale, de l'ordre de 10$[cm]$ est observée dans la rue Lambot.

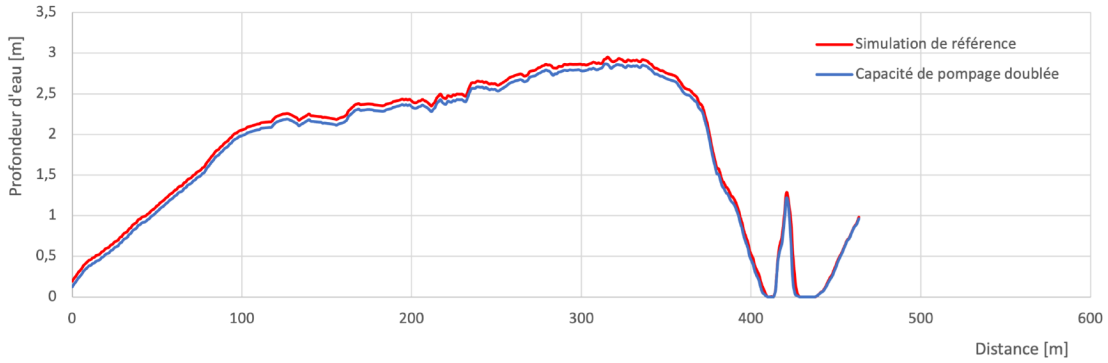


FIGURE 3.20 – Hauteur d'eau dans la rue Lambot à la fin de la simulation [12].

3.2.4 Élargissement de la section à la confluence

L'objectif de ce scénario était d'étudier le comportement de la Biesme pour un exutoire élargi. La section à la confluence a été élargie, pour atteindre jusqu'à 50 mètres de large, ce qui représente plus de 15x la largeur originale du lit de la Biesme dans cette zone.

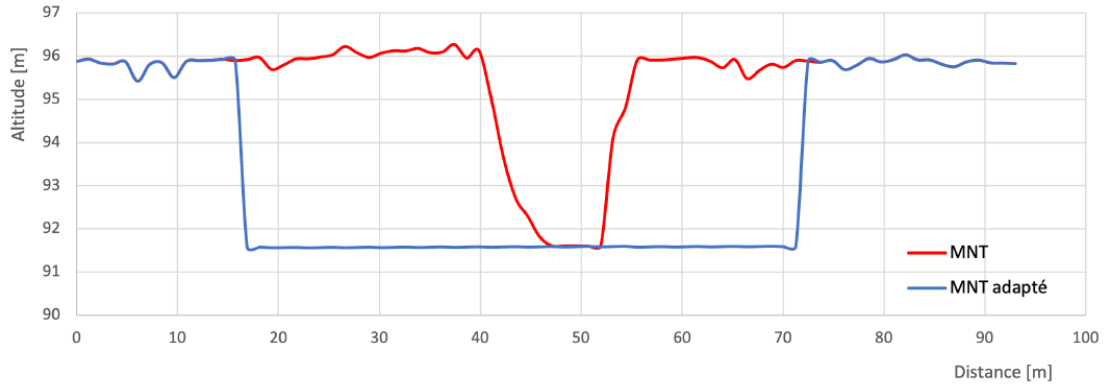


FIGURE 3.21 – Coupe au niveau de la confluence [12].

Le comportement temporel des résultats est à nouveau inchangé, tout comme la superficie de la zone impactée. Identiquement à l'augmentation de la capacité de pompage, une diminution de la hauteur d'eau maximale est constatée mais d'une amplitude plus forte, de l'ordre de 15$[cm]$.

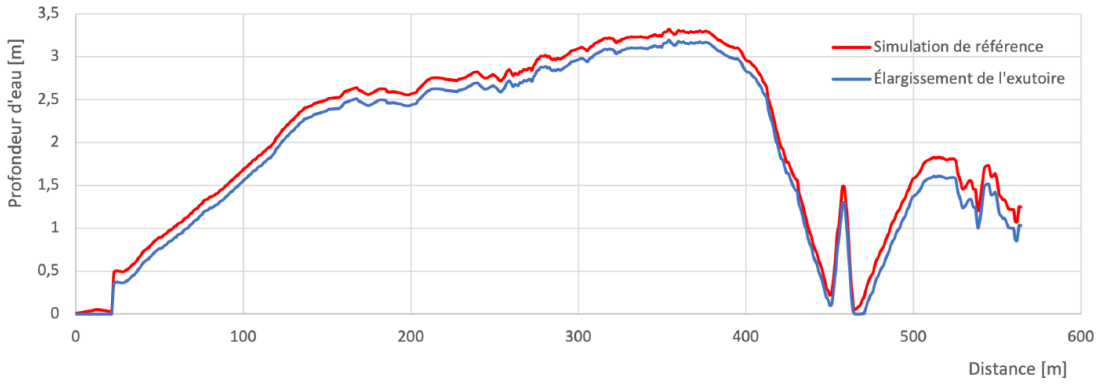


FIGURE 3.22 – Hauteur d'eau dans la rue Lambot après 200 000 secondes [12].

L'impact de cet élargissement sur les inondations est assez faible mais il pourrait être non négligeable pour des épisodes pluvieux moins conséquents. Combiné à une augmentation de la capacité de pompage, l'aménagement élargi de la confluence pourrait éviter la faible montée des eaux dans les maisons de la rue Lambot pendant ces épisodes moins conséquents.

3.2.5 Réévaluation des digues

Le troisième aménagement étudié par Maxime Raison est une augmentation de la hauteur des digues d'1 mètre et de 2 mètres. Pour ce faire, il a polygonisé le modèle numérique de terrain, augmenté la hauteur des polygones représentant les digues et ensuite interpolé sur l'ensemble de la zone afin d'obtenir un MNT modifié. La Figure 3.23 représente cette augmentation de hauteur au niveau des digues. On peut noter que le modèle numérique de terrain modifié présente un nombre non négligeable de discontinuités, qui entraîneront une modification de l'écoulement, notamment dû à un frottement supplémentaire.

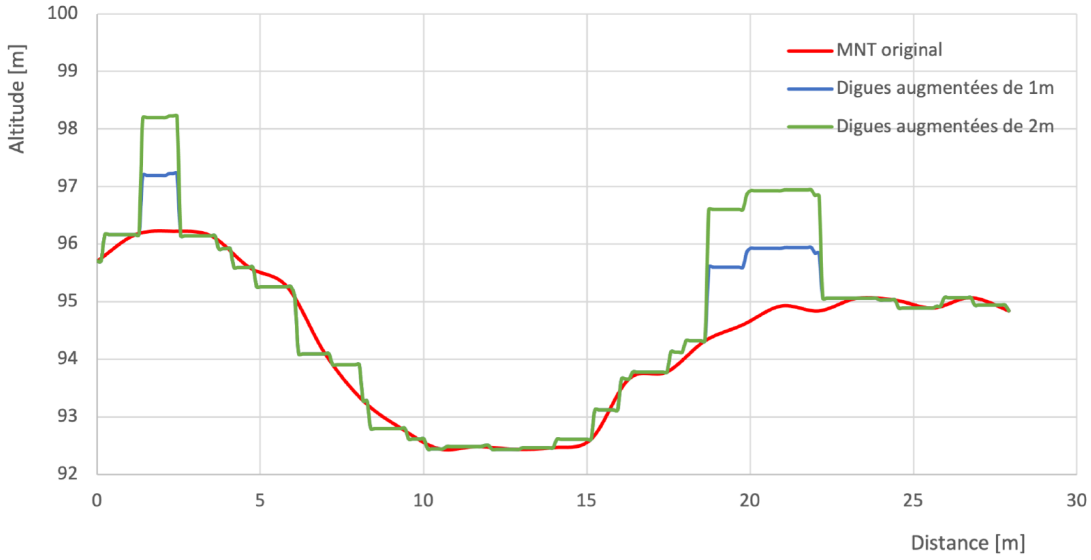


FIGURE 3.23 – Coupe dans une digue avec les deux modifications effectuées [12].

Contrairement aux deux scénarios testés précédemment, la modification de la hauteur des digues d'un mètre a changé le déroulé temporel des inondations. En effet, la digue est submergée après 40 000 secondes mais la rue Lambot n'est inondée qu'après 47 000 secondes. On observe donc que l'écoulement au-dessus de la digue se produit toujours mais plus lentement.
Pour une augmentation de 2 mètres, l'écoulement dans la rue Lambot est encore retardé de 15 minutes par rapport à l'augmentation de hauteur des digues d'un mètre.

Il est aussi important de souligner que cette augmentation de hauteur des digues présente un effet néfaste lorsque celles-ci sont submergées. En effet, l'inondation est retardée mais la décrue est beaucoup plus lente. L'eau accumulée dans la zone affaissée présente une hauteur plus conséquente et est piégée par des digues plus hautes, empêchant l'eau de retourner vers le cours d'eau.

3.3 Pistes d'amélioration

Dans la première partie de ce travail, nous nous sommes attardés à décrire le plus précisément possible la problématique des inondations dans la commune d'Aiseau-Presles. Une description de la configuration des lieux nous a permis de poser les bases avant de synthétiser les résultats de la première étude, menée par Maxime Raison lors de son travail de fin d'études.

Les solutions envisagées lors de ce travail n'ont malheureusement pas donné de résultats probants. En effet, aucune des 3 solutions modélisées n'a empêché l'inondation de la zone affaissée entourant la rue Lambot. L'idée de ce travail de fin d'études est donc de partir des bases posées par Maxime Raison et d'étudier les différents facteurs qui pourraient influencer les résultats. A cette fin, nous allons effectuer une analyse de sensibilité pour la simulation de référence, dans le but de mieux représenter les évènements de Juillet 2021. Les niveaux d'eau obtenus lors des premières simulations sont satisfaisants mais le déroulé temporel ne correspond pas à la réalité.

Ensuite, une vérification de l'hydrogramme utilisé pour la Biesme sera effectué. Cette vérification fait suite à l'étude commandée par la commune d'Aiseau et l'intercommunale IGRETEC auprès de l'UCLouvain, qui a mis en lumière une certaine incertitude dans les mesures fournies par le Service Public Wallon.

Dernièrement, une recherche de solution pour contenir l'eau débordant de la Biesme hors de la zone affaissée sera détaillée. L'idée étant d'exploiter les premiers résultats de Maxime Raison pour aiguiller au mieux les recherches.

Chapitre 4

Étude de sensibilité

Dans ce chapitre, il vous sera présenté l'étude de sensibilité du modèle, réalisée à partir de la simulation de référence décrite en section 3.2.2. Une étude de sensibilité permet la quantification de l'influence d'une entrée du modèle sur la sortie de ce dernier. Les différents paramètres d'entrée caractérisant le modèle sont les suivants :

— Un maillage triangulaire
— Un Modèle Numérique de Terrain (MNT)
— Un coefficient de frottement (Manning)
— Un nombre de courant

Les paramètres de sortie que nous analyserons sont la hauteur d'eau et la temporalité des faits.

Comme on a pu l'observer dans les précédents résultats, la temporalité issue des simulations n'est pas correcte. En effet, le débordement de l'eau au dessus de la digue se produit aux alentours du 13 Juillet à 10h00 selon les premiers résultats alors qu'on sait, notamment grâce à l'extrait du logiciel de gestion de crise, qu'il s'est produit dans la matinée du 15/07. Cet aspect temporel est important puisqu'en réalité il s'agit de déterminer le débit pour lequel la Biesme sort de son lit et submerge la digue, grâce à l'hydrogramme horodaté dont nous disposons.

Lors de cette analyse de sensibilité, seul deux des quatre paramètres ont été étudiés : le maillage et le modèle numérique de terrain.

Le nombre de courant est un nombre adimensionnel, utilisé dans le langage informatique pour exprimer une condition de convergence des résultats. Il sert a donner un seuil sous lequel on risque d'observer une instabilité numérique. Si ce seuil est atteint, il empêchera le code de s'exécuter plus longtemps. Ce paramètre était fixé à 0,95 et n'a pas été modifié.

Le coefficient de frottement permet de représenter la résistance qui s'opposera à l'écoulement par son milieu. Il permet notamment de tenir compte de la rugosité du milieu ou de la sinuosité de la rivière. Actuellement, l'implémentation d'Hydroflow ne permet pas de définir différents coefficients de frottements pour différentes zones (lit mineur, lit majeur, prairies, zones d'habitat, ...). Un seul et unique coefficient peut être attribué au domaine, ce qui engendre inévitablement des erreurs dans la modélisation. En partant du constat que l'on désire modéliser au mieux l'écoulement dans la Biesme, pour observer la crue de Juillet 2021, le coefficient de frottement utilisé est fixé à 0,03 pour toutes les simulations réalisées. Sa valeur est identique à celle utilisée par Maxime Raison dans son TFE et correspond à celle d'un cours d'eau naturel avec des méandres, quelques étangs et endroits peu profonds ainsi que quelques herbes et pierres comme l'atteste l'annexe A (Figure 6.3). Cette description correspondant plutôt bien à la Biesme, sa valeur n'a pas été modifiée.

4.1 Maillage

Le maillage utilisé dans la simulation de référence (section 3.2.2) est un maillage gradient 15 - 5. Autrement dit, les mailles à l'extrémité du domaine présentent une longueur de 15$[m]$ tandis que celles du lit mineur des deux cours d'eau ont une longueur de 5$[m]$. Entre ces deux longueurs, les dimensions des mailles ont été interpolées linéairement.

Deux scénarios ont été analysés pour le maillage : un raffinement du maillage existant, c'est à dire une diminution de la dimension des mailles, et la modélisation des bâtiments présents dans la zone.

La modification de la taille des mailles devrait permettre une meilleur représentation du terrain. En effet, lors de la simulation, un niveau de sol est attribué à chaque maille. Plus les mailles sont grandes, plus elles peuvent présenter des discontinuités dans le niveau du terrain et donc plus l'erreur de modélisation peut être conséquente.

L'inclusion des bâtiments dans le domaine étudié devrait avoir un effet sur l'écoulement. La simulation de référence existante ne tient pas compte des zones bâties, qui empêchent l'eau de circuler librement. On peut donc s'attendre à observer un retardement dans l'écoulement au niveau de la rue Lambot.

4.1.1 Une taille optimale pour les mailles ?

Dans cette section, nous tenterons de déterminer une taille optimale pour les mailles. Ces dimensions seront choisies en fonction de la qualité des résultats obtenus mais aussi du temps de calcul nécessaire. Les trois maillages analysés

sont présentés à la figure 4.1. Le premier est identique à celui de la simulation de référence, le second est un gradient 10 - 5, qui devrait mieux représenter la zone à l'extrémité du domaine, et le dernier un gradient 15 - 3, qui lui devrait mieux représenter l'écoulement dans la Biesme et la Sambre. On observe bien que plus la dimension des mailles du lit mineur est petite, plus la densité de mailles est forte dans ce dernier (Maillage 15-3) et à contrario plus les mailles extérieures sont petites, moins le gradient sera marqué (Maillage 10-5).

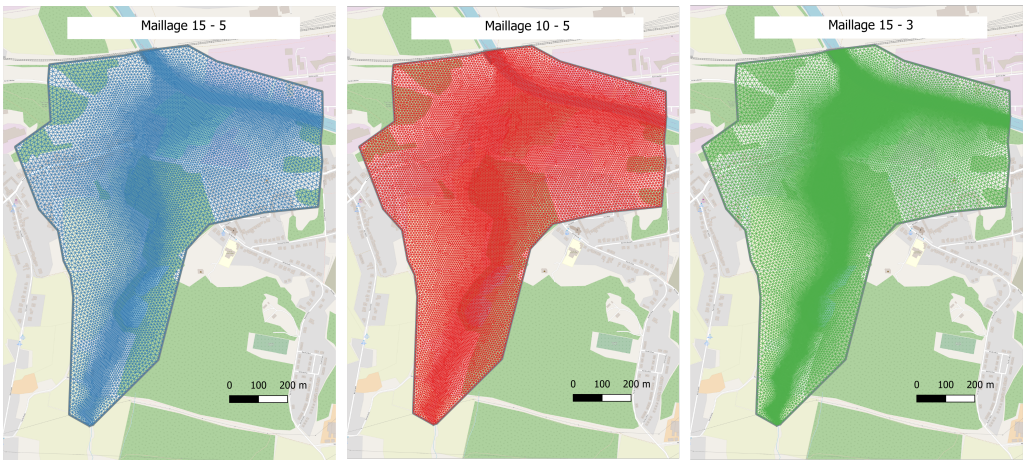


FIGURE 4.1 – Maillages étudiées.

Les résultats vont comparer les temps du premier débordement ainsi que le temps à partir duquel la digue est submergée. On analysera aussi le moment où la rue Lambot commence à être inondée. À partir de ces derniers on peut exprimer les débits dans la Biesme pour lesquels ces évènements se déroulent.

	Maillage 15-5	Maillage 10-5	Maillage 15-3
1^{er} débordement	7000 sec 13/07 à 09h00 $0,359[m^3/s]$	38 000 sec 13/07 à 17h30 $0,39[m^3/s]$	38 000 sec 13/07 à 17h30 $0,39[m^3/s]$
Digue submergée	11 000 sec 13/07 à 10h00 $0,383[m^3/s]$	46 000 sec 13/07 à 20h00 $1,363[m^3/s]$	52 000 sec 13/07 à 21h30 $3,844[m^3/s]$
Inondation Rue Lambot	17 000 sec 13/07 à 12h00 $0,38[m^3/s]$	62 000 sec 14/07 à 00h30 $6,298[m^3/s]$	70 000 sec 14/07 à 02h30 $8,761[m^3/s]$
Temps de calcul	20 heures	25 heures	43 heures

TABLE 4.1 – Résultats étude sensibilité - maillage.

Une vidéo présentant schématiquement les résultats est disponible à l'adresse suivante : `https://youtu.be/8OwZ-IHEH2A`.

On peut retenir de cette première série de résultats que le maillage 15-3 se rapproche le plus de la date réelle du débordement au dessus de la digue et dans la rue Lambot. Malgré cette amélioration, la simulation ne représente toujours pas correctement la temporalité des évènements de Juillet 2021.
De plus, le débit pour lequel la Biesme submerge la digue est plus conséquent pour le maillage 15-3. On ne connait malheureusement pas le débit réel qui engendre un débordement au-dessus de la digue mais on sait qu'un débit inférieur à une dizaine de mètres cubes par seconde ne permet pas un tel évènement catastrophique.

Si l'on devait, dans l'état actuel de l'étude, déterminer un maillage 'idéal', on choisirait donc d'utiliser le gradient 15-3.

4.1.2 Modélisation des bâtiments

A la suite des premières améliorations, les bâtiments présents dans la zone ont été inclus dans les 3 maillages étudiés. Ceux-ci sont représentés par des murs virtuels, qui empêchent totalement l'eau de circuler. En réalité, le bâti présente une certaine perméabilité lors d'inondations. L'eau s'infiltre dans le bâtiment et peut même dans certains cas extrêmes s'écouler à travers ceux-ci. Il n'est cependant pas possible de modéliser un tel écoulement dans Hydroflow. De plus, le sujet de ce travail n'imposait pas de représenter parfaitement l'écoulement autour et dans le bâti. L'idée étant plutôt d'observer l'effet de la modélisation de ceux-ci sur les résultats et de déterminer s'il était nécessaire de les inclure dans les modélisations.

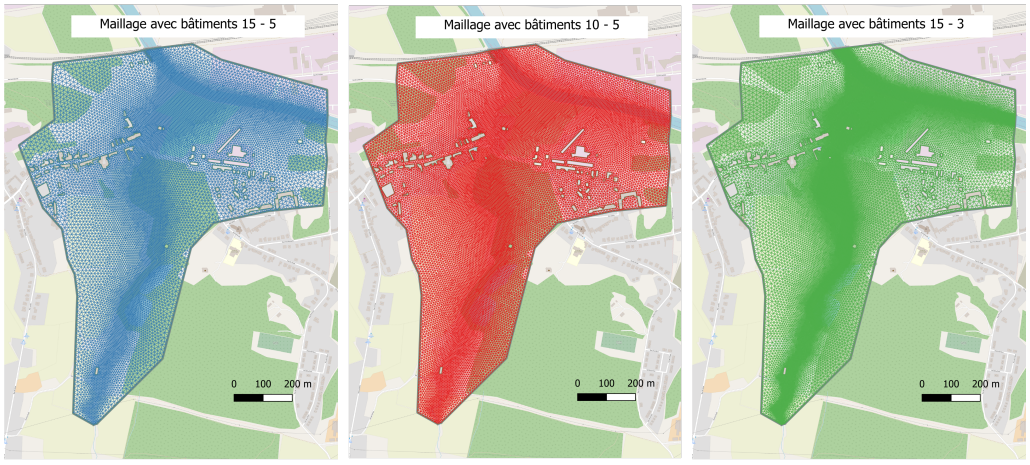


FIGURE 4.2 – Maillages avec bâtiments étudiées.

Les résultats de ces 3 simulations sont détaillés de manière semblable dans le tableau suivant :

	Maillage 15-5 - Bâtiments	Maillage 10-5 - Bâtiments	Maillage 15-3 - Bâtiments
1^{er} débordement	39 000 sec 13/07 à 18h00 $0,843[m^3/s]$	12 000 sec 13/07 à 10h30 $0,382[m^3/s]$	39 000 sec 13/07 à 18h00 $0,843[m^3/s]$
Digue submergée	49 000 sec 13/07 à 21h00 $3,844[m^3/s]$	44 000 sec 13/07 à 19h00 $1,363[m^3/s]$	52 000 sec 13/07 à 21h30 $3,844[m^3/s]$
Inondation Rue Lambot	59 000 sec 13/07 à 23h30 $5,491[m^3/s]$	59 000 sec 13/07 à 23h30 $5,491[m^3/s]$	70 000 sec 14/07 à 02h30 $8,761[m^3/s]$
Temps de calcul	20 heures	25 heures	47 heures

TABLE 4.2 – Résultats étude sensibilité - maillage avec bâtiments.

Si l'on compare ces résultats à ceux obtenus sur les maillages sans les bâtiments, on peut retenir plusieurs points :

— Les résultats issus du maillage 15-5 avec bâtiments présentent une grande différence temporelle avec ceux du maillage 15-5 sans habitations. En effet, le premier débordement se produit aux alentours du 13/07 à 18h00, comme c'est le cas pour le maillage plus fin (15-3). La digue est submergée pour un débit dans la Biesme de $3,844[m^3/s]$, ce qui se rapproche des résultats obtenus sur le maillage plus fin (15-3). L'inondation de la rue Lambot se produit, quant à elle, plus tôt que lors des simulations sur le maillage 10-5 ou le maillage 15-3. On peut en tirer comme conclusion que le maillage 15-5 avec habitations se rapproche des résultats des autres simulations. Cependant, on ne peut pas attribuer cette amélioration spécifiquement aux habitations. En effet, une seule habitation se trouve en amont de la digue et peut donc influencer l'écoulement. Il semblerait plutôt que ce soit la disposition spatiale des mailles qui joue un rôle. La figure 4.3 nous indique que l'alignement des mailles dans le cas du maillage 15-5 avec bâtiments suit le cours de la Biesme au droit du 1er débordement. L'écoulement sera donc mieux représenté à cet endroit.

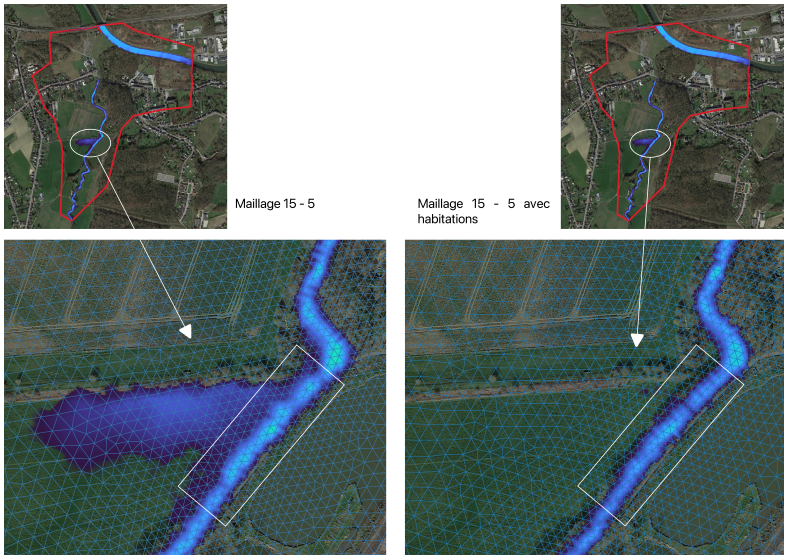


FIGURE 4.3 – Disposition des mailles pour les maillages 15-5.

— Le maillage 10-5 avec bâtiments représente moins bien la temporalité des faits que le même maillage 10-5 sans bâtiments. On peut expliquer cette différence par la conception du maillage. En effet, pour créer le maillage, on a utilisé le logiciel gmsh [26]. Ce dernier exploite un fichier de contours, qui détermine les zones où les mailles doivent être créées ainsi qu'un fichier indiquant la dimension désirée des mailles. Cette dimension est, comme expliqué précédemment, un gradient 10 - 5 de l'extrémité du maillage vers le lit mineur du cours d'eau. Une fois ces données fournies au logiciel, il décide du placement des mailles pour satisfaire au mieux les conditions imposées. Les mailles du maillage 10-5 avec bâtiments ne correspondent donc pas à celles du maillage de même résolution mais sans bâtiments.
La représentation de la hauteur, issue du modèle numérique de terrain, n'est donc pas identique pour ces deux maillages, ce qui explique les différences constatées. On se retrouve donc dans la configuration inverse du maillage 15-5, on a une perte de précision bien que la cause soit identique.
— Le maillage 15-3 avec bâtiments n'apporte pas de plus-value sur la représentation temporelle des faits par rapport au maillage de même résolution sans bâtiments. Une légère différence est observée pour le temps du premier débordement mais d'une ampleur très faible. D'autre part, le temps de calcul supplémentaire est de l'ordre de 4 heures, ce qui ne justifie pas l'inclusion des bâtiments pour le but que nous poursuivons.

La création du maillage incluant les bâtiments a aussi soulevé quelques interrogations. On observe sur la figure 4.4 que le maillage n'est pas parfait. À certains

endroits exigus, les mailles traversent le bâti existant tandis qu'à d'autres endroits, où on devrait retrouver une maille, elle est inexistante. Ceci s'explique de nouveau par la conception en gradient du maillage, imposant une taille de maille dans chaque zone. Si l'on désirait, par exemple, déterminer les efforts qui s'appliquent sur les murs, les vitesses ou les débits écoulés entre deux bâtiments, il faudrait diminuer la taille des mailles pour accroître la précision. Ce n'est évidemment pas l'objectif de ce mémoire mais il était important de souligner cet aspect pour justifier la précision relative du modèle.

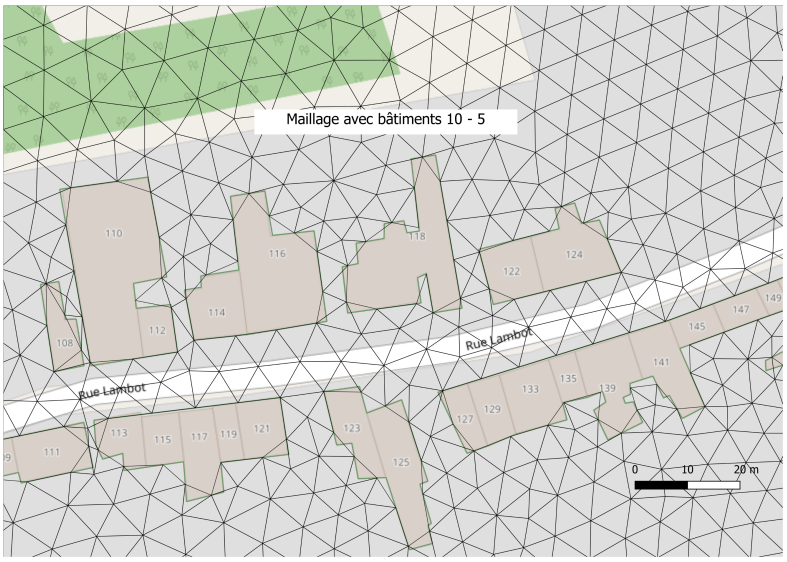


FIGURE 4.4 – Zoom sur le maillage au niveau des bâtiments.

En conclusion, pour le but poursuivi dans ce travail, à savoir modéliser les inondations de Juillet 2021 en vue de formuler une solution empêchant un nouveau débordement à l'avenir, le maillage gradient 15 -3 sans bâtiments semble être le plus représentatif. Il est certain que le modèle ne représente pas parfaitement la réalité et il en sera tenu compte lors de la formulation des solutions possibles. Afin de représenter parfaitement les évènements de Juillet 2021, il faudrait, si une étude complémentaire est réalisée, modéliser celles-ci sur un maillage présentant des mailles encore plus fines. Une deuxième manière d'améliorer la représentation serait d'imposer aux mailles de suivre le cours de la rivière.

4.2 Modèle Numérique de Terrain

Le modèle numérique de terrain est une représentation spatialisée du niveau naturel du sol. Il exclut tous les éléments situés à la surface du sol tels que les bâtiments, les ponts, la végétation, les véhicules [27]. Dans le cadre des simulations hydrauliques, il permet d'attribuer un niveau à chaque cellule du maillage et donc de déterminer les pentes, qui dirigent l'écoulement dans une direction bien précise.

4.2.1 Comment est-il établi par le SPW ?

Le modèle numérique de terrain du Service Public de Wallonie est issu d'acquisitions réalisées avec la technologie Lidar (Laser Imaging Detection And Ranging). Il s'agit d'un capteur d'ondes électromagnétiques proches de la lumière qui émet une impulsion d'onde et calcule la distance à partir du temps de vol (time of flight). Ce temps de vol correspond au délai entre l'impulsion de l'onde et la réception de l'onde réfléchie par le sol. A partir de ce dernier, connaissant la vitesse de propagation de l'onde, il est aisé de déterminer la distance séparant le sol du lidar :

$$d = \frac{c\Delta t}{2}$$

avec

- d : distance entre le sol et le capteur lidar
- c : célérité de l'onde
- Δt : temps de vol

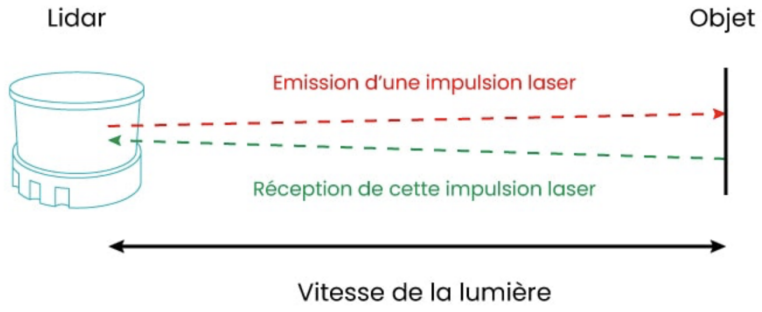


FIGURE 4.5 – Schéma du fonctionnement d'un LIDAR [28].

Le principe est donc semblable au sonar, qui utilise des ondes acoustiques ou encore au radar qui utilise des ondes électromagnétiques à plus basse fréquence.

L'avantage principal de cette technique par rapport aux autres techniques de télémétrie est sa précision de l'ordre de quelques centimètres seulement.

À contrario, le capteur lidar ne tient pas compte des zones couvertes d'eau. Malheureusement, la surface mesurée est celle de l'eau et non pas la surface du sol. Le niveau qui sera fourni dans les cours d'eau ou les lacs ne correspond donc pas au lit du cours d'eau mais bien à la surface de ce dernier.

4.2.2 Vers une meilleure résolution ?

Le modèle numérique de terrain utilisé jusqu'ici est le MNT 2013-2014 qui possède une précision planimétrique inférieure à 1 mètre et une précision altimétrique de l'ordre de 0,12 m en absolu sur l'ensemble du territoire. Entre le 19 février 2021 et le 5 mars 2022, le service public de wallonie a effectué une nouvelle campagne d'acquisition LIDAR aéroportée. La précision spatiale de cette nouvelle campagne est de 0,5 mètre, la précision altimétrique est identique au modèle précédent.

La première question qui s'est posée était d'analyser les différences entre ces deux MNT. Pour ce faire, un fichier qui représente la différence absolue entre ces deux modélisations du terrain a été réalisé à l'aide de QGIS (logiciel SIG). La figure 4.6 représente cette différence dans l'altimétrie entre les deux modèles du SPW.

On note des altimétries différentes dans les cours d'eau (Sambre et Biesme), qui peuvent s'expliquer lors de l'acquisition même de la donnée. Comme précisé auparavant, le LIDAR mesure la distance entre le capteur et la surface. Lorsque la mesure est effectuée au niveau de plans d'eau, c'est bien la surface d'eau qui est mesurée. Les deux MNT n'étant pas réalisés à la même période, la surface de l'eau dans les cours d'eau n'est évidemment pas identique, ce qui induit inévitablement cette différence. Idéalement, nous devrions disposer de la bathymétrie de la Biesme pour modifier le modèle numérique de terrain et modéliser au mieux l'écoulement. Cette donnée n'étant malheureusement pas disponible, nous utiliserons l'altitude fournie dans le MNT.

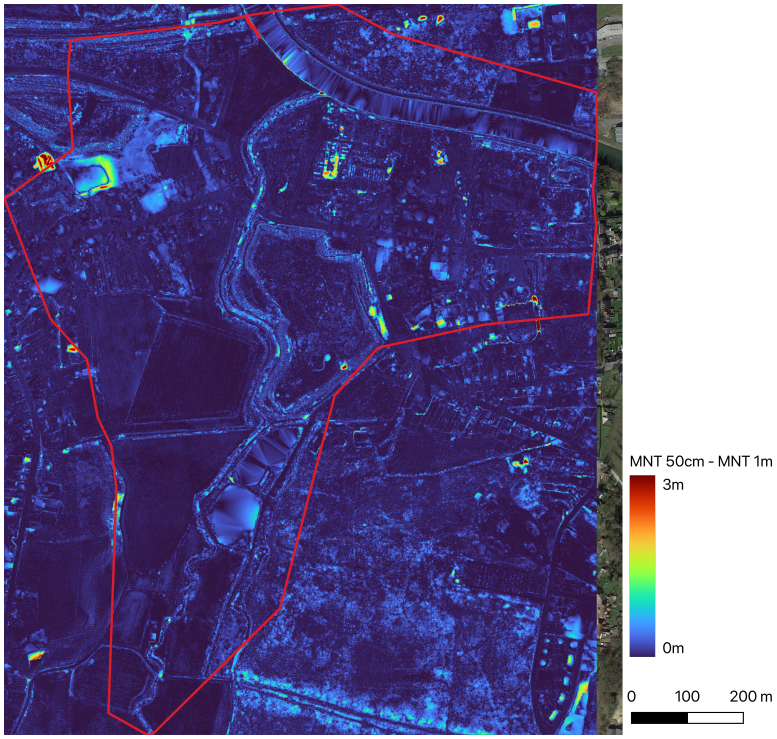


FIGURE 4.6 – MNT 50 cm - MNT 1m

Une attention particulière doit aussi être portée aux digues puisqu'elles doivent, en théorie, empêcher un débordement de la Biesme dans la zone affaissée. Une différence d'altimétrie est aussi présente sur les digues bordant la Biesme. Cependant, il est difficile de juger de la pertinence de cette information puisqu'une nouvelle fois, les données ne sont pas acquises à la même période. Le MNT 1m date de 2013-2014 tandis que les données du MNT 50cm ont été acquises entre février 2021 et mars 2022. Nous ne disposons pas de la date exacte d'acquisition des données dans la commune d'Aiseau-Presles. Celle-ci aurait pu expliquer, en partie, les différences constatées. En effet, les inondations de Juillet 2021 ont certainement eu un impact sur l'altimétrie. La vitesse de l'eau a pu entraîner des parties de sol et les déposer à d'autres endroits de la zone (érosion - sédimentation).
Lors de l'étude des solutions possibles, on aura tendance à préférer les données plus récentes, puisqu'on étudiera un scénario futur.

La zone affaissée présente, quant à elle, peu de différence d'altitude, à l'exception de la zone bien localisée à l'extrême nord-ouest.

4.2.3 Peut-on mieux modéliser Juillet 2021 ?

Cette section traitera de la modélisation des inondations de Juillet 2021. L'objectif est d'analyser les apports de ce "MNT 2021-2022" par rapport à la version précédente, datant de 2013-2014. Pour ce faire, la simulation de référence a été reproduite sur le maillage 15-3 sans bâtiments étudié précédemment. L'unique différence se situant dans le MNT utilisé.

Les résultats se basent sur les mêmes critères de comparaison temporels que précédemment.

	MNT 2013 - 2014 Résolution 1m	MNT 2021 - 2022 Résolution 0,5 m
1^{er} débordement	38 000 sec 13/07 à 17h30 $0,39[m^3/s]$	48 000 sec 13/07 à 20h20 $2,27[m^3/s]$
Digue submergée	52 000 sec 13/07 à 21h30 $3,844[m^3/s]$	59 000 sec 13/07 à 23h23 $5,491[m^3/s]$
Inondation Rue Lambot	70 000 sec 14/07 à 02h30 $8,761[m^3/s]$	76 000 sec 14/07 à 04h06 $9,629[m^3/s]$

TABLE 4.3 – Comparaison de la modélisation des inondations de Juillet 2021 sur les 2 MNT.

Les résultats issus du MNT 2021 - 2022 se rapprochent temporellement du déroulé réel des inondations de Juillet 2021. Cependant, ils ne correspondent toujours pas entièrement.

Ensuite, les hauteurs d'eau ont été comparées, 5 heures après le pic de débit à $27,953[m^3/s]$ observé dans la Biesme le 15 Juillet à 14 heures. La figure 4.8 représente ces hauteurs d'eau dans la rue Lambot.

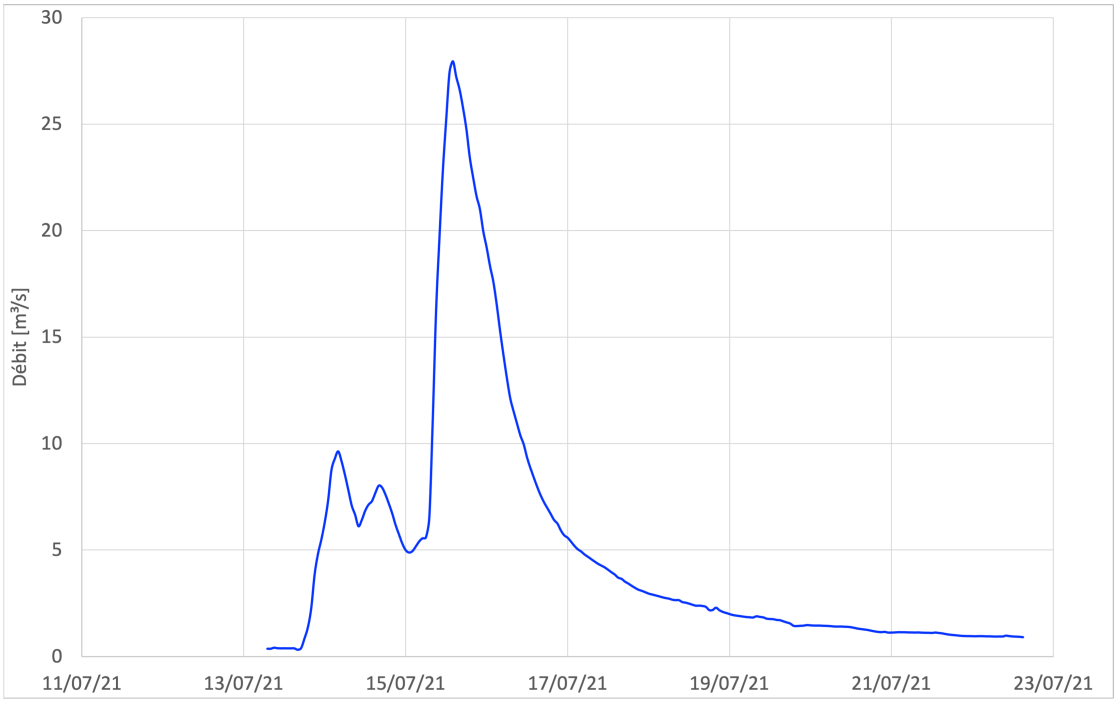


FIGURE 4.7 – Hydrogramme de la Biesme

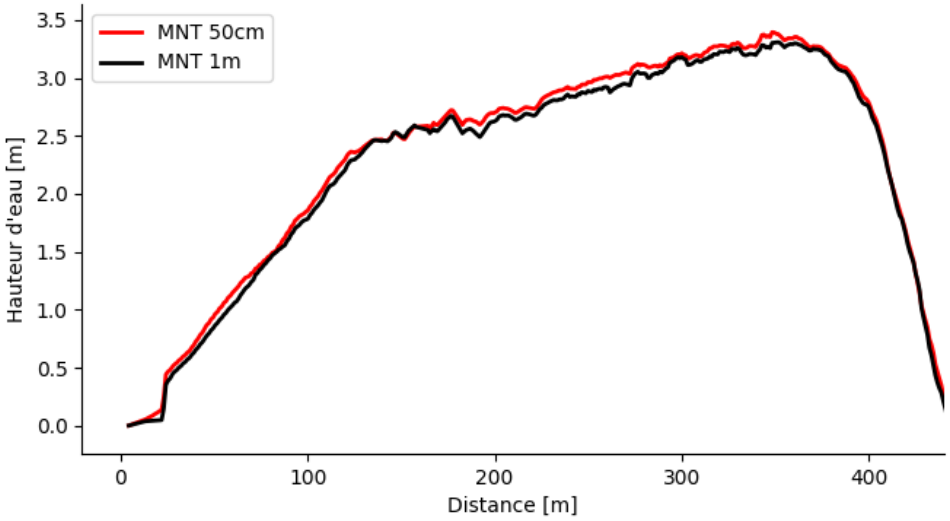


FIGURE 4.8 – Comparaison des hauteurs d'eau dans la rue Lambot le 15/07 à 19 heures

4.3 Conclusion sur l'étude de sensibilité

À la suite de cette étude de sensibilité, nous pouvons retenir plusieurs informations.
Premièrement, le maillage gradient 15-3 est celui qui représente le mieux les inondations de Juillet 2021, malgré les erreurs de représentation temporelle encore présentes.
Le MNT réalisé en 2021-2022 par le SPW permet d'accroître la qualité temporelle de la modélisation. Cette conclusion est assez évidente puisque la résolution spatiale entre le MNT 2013 et les MNT 2021 est doublée.
Enfin, on peut conclure que nos simulations représentent bien l'épisode de Juillet 2021 en terme de hauteur d'eau mais qu'une amélioration devrait être apportée pour le déroulé temporel. Cette dernière pourrait très probablement se faire par un raffinement du maillage mais le temps de calcul deviendrait alors trop conséquent.

Chapitre 5

Vérification de l'hydrogramme de la Biesme

Comme nous avons pu l'observer, la modélisation des inondations sur le maillage gradient 15-3 représente correctement les niveaux d'eau mais pas la temporalité des faits. Dans le chapitre précédent, nous avons étudié différents maillages ainsi que le modèle numérique de terrain dans l'optique d'améliorer ce modèle.
Le présent chapitre étudiera une nouvelle variable de la simulation : l'hydrogramme de la Biesme. Pour rappel, cet hydrogramme est issu de mesures limnimétriques à la rue des Forges, en amont de notre zone d'étude. À partir de ces mesures de hauteur d'eau, le service public wallon produit un hydrogramme à l'aide des courbes de tarage. La courbe de tarage est une relation hauteur-débit qui permet, par lecture d'un niveau d'eau sur une échelle limnimétrique, d'estimer le débit d'un cours d'eau à un instant donné [29].

5.1 Mise en évidence du débordement

Lors de l'étude menée par l'UCLouvain sur la zone autour du limnimètre (Figure 1.14), un débordement de la Biesme a été mis en évidence à cet endroit. Afin de comprendre ce qui s'était passé dans cette zone, le comportement de la Biesme a été simulé et les résultats ont été comparés à ceux de l'étude réalisée par le pôle hydraulique UCLouvain pour le compte d'IGRETEC et de la commune d'Aiseau-Presles.

Simulation de Juillet 2021

La zone étudiée autour du limnimètre, situé rue des Forges, est plus petite que notre première zone d'étude. Elle ne représente que $0,5[km^2]$. Le tracé sinueux de

la Biesme, ainsi que la position du limnimètre, peuvent être observés à la figure 5.1.

Les paramètres utilisés sont identiques à ceux de la zone de la confluence, à savoir un coefficient de frottement de $0,03$ et un nombre CFL de 0,95, ainsi que l'hydrogramme de la Biesme mesuré par le SPW. Le maillage utilisé est un maillage gradient, dont les plus grandes mailles mesurent 10 mètres et les plus petites 1,5 mètres. De plus, 4 sections ont été ajoutées au maillage, pour mesurer le débit qui s'écoule à travers ces dernières. Une représentation graphique du maillage et de ces sections de mesure (lignes intérieures rouges) est visible sur la figure 5.2. Les sections de mesure du débit sont les suivantes : "1", "DébitHorsSonde", "DébitRivière" au niveau du limnimètre et "4". Leur présence sera justifiée dans l'analyse des résultats ci-dessous.

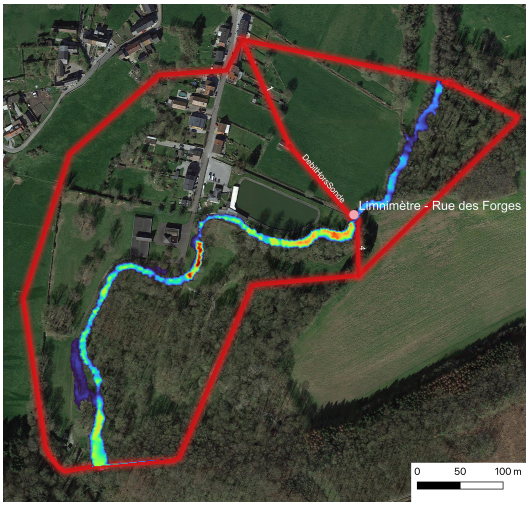


FIGURE 5.1 – Zone d'étude autour du limnimètre.

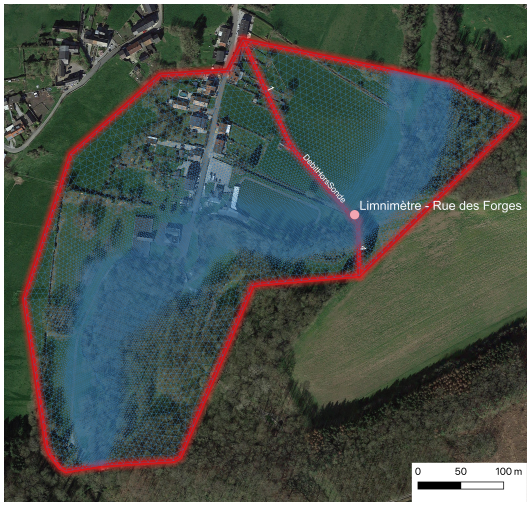


FIGURE 5.2 – Maillage et sections de mesure du débit.

Les résultats de cette simulation seront analysés à deux moments précis : le 15 Juillet 2021 à 07h00 et le 15 Juillet 2021 à 17h00. Ces horaires correspondant au début du pic observé dans l'hydrogramme ainsi que 3 heures après le débit maximum, repérés sur la figure 5.3.

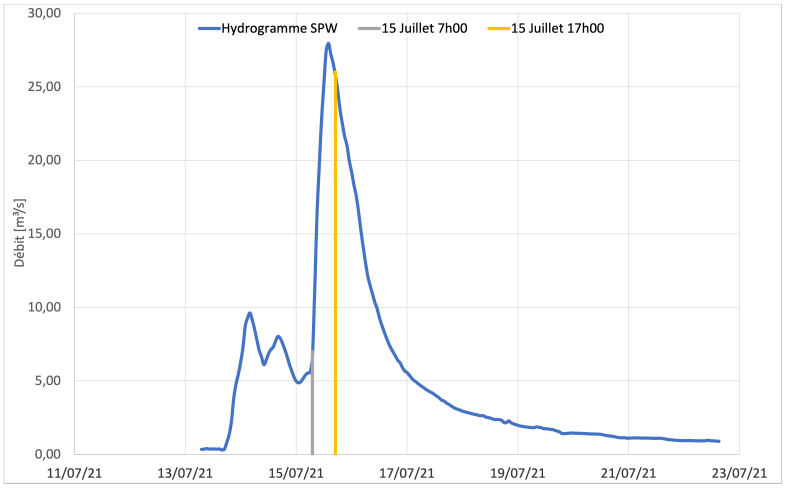


FIGURE 5.3 – Hydrogramme Biesme (données SPW).

La figure 5.4 représente les résultats de la simulation, en terme de hauteur d'eau, pour les deux temps précités.
Dès le matin du 15/07 on observe des débordements de la Biesme, engendrés par les débits conséquents déjà écoulés. Ces débordements se produisent en amont et en aval du limnimètre. La zone impactée est relativement restreinte et les hauteurs d'eau au niveau des habitations restent limitées.

La situation à 17 heures est toute autre. En effet, l'eau a débordé de manière plus conséquente, impactant une zone plus élargie et de manière plus sévère. Les hauteurs d'eau observées au niveau des habitations de la rue des Forges sont supérieures à 1,5 mètres par endroit. De plus, on peut observer qu'une partie de l'eau contourne le limnimètre. L'eau sortie du lit de la Biesme en amont du limnimètre s'écoule dans la rue des Forges avant de traverser les jardins et le champ situés en rive gauche de la Biesme.
Cette situation est problématique puisqu'elle induit une incertitude sur l'hydrogramme mesuré au droit du limnimètre. En effet, le limnimètre mesure la hauteur d'eau dans la Biesme pour une section bien définie de la rivière. Si un débordement est observé en amont de l'appareil de mesure et qu'une partie de l'eau s'écoule à côté de la section de mesure du limnimètre, le débit total réel est sous-estimé lors de la mesure. On peut donc penser que le débit total réellement écoulé est supérieur à celui mesuré par le Service Public de Wallonie.
À la suite de cette constatation, nous allons chercher à comprendre pourquoi ces débordements se produisent avant d'effectuer une recherche du débit total écoulé en tenant compte du contournement de la section de mesure.

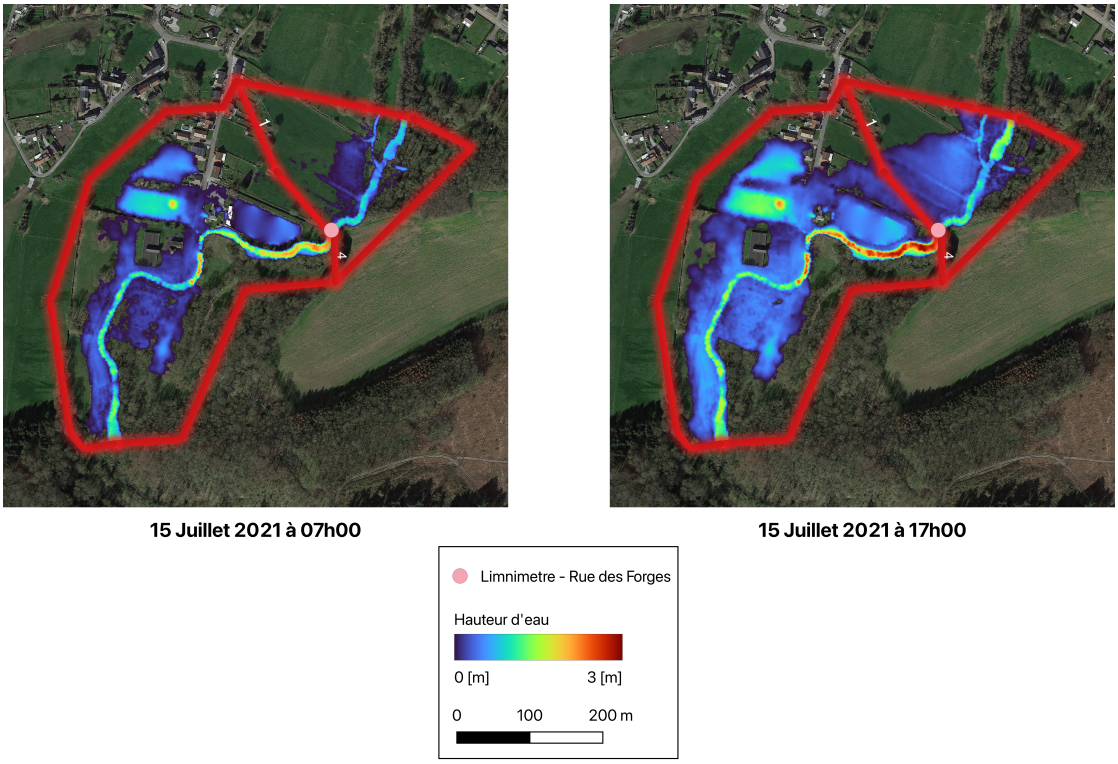


FIGURE 5.4 – Hauteurs d'eau le 15/07 à 07h00 et 17h00.

Les résultats de la simulation à 17 heures le 15/07 indiquent 3 zones intéressantes à analyser (Figure 5.5). On observe une variation importante de la hauteur d'eau dans la Biesme pour ces 3 zones, ce qui nous indique des points particuliers à approfondir.

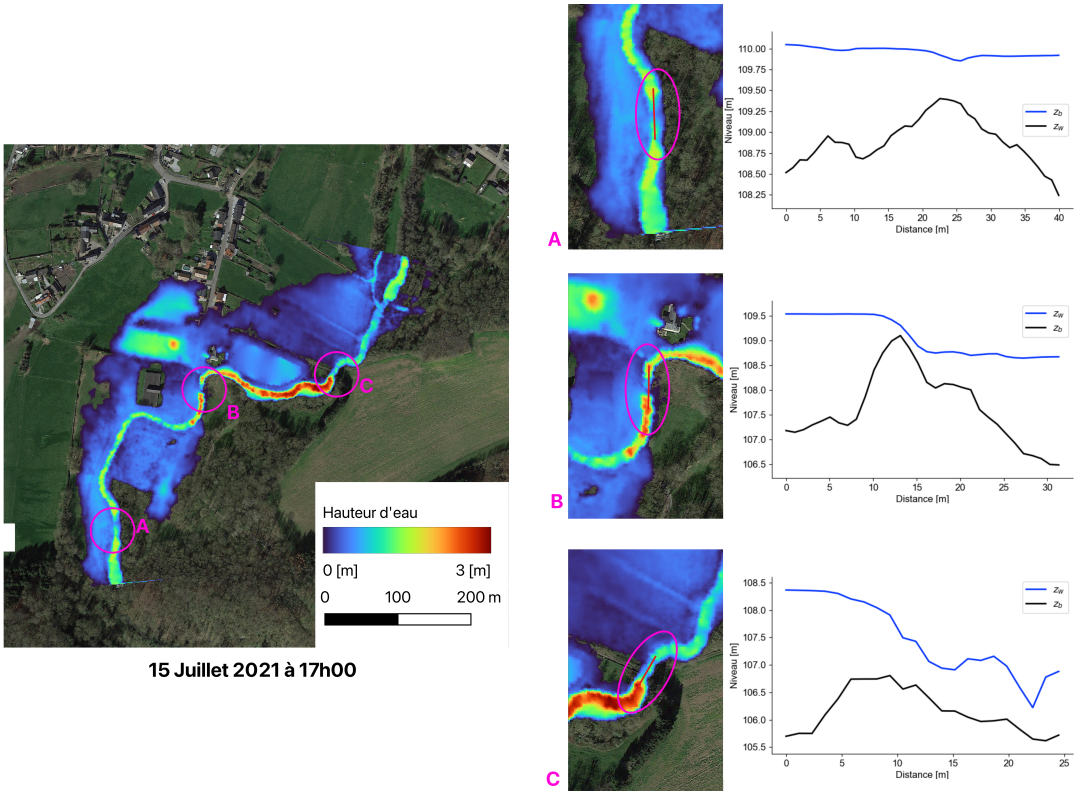


FIGURE 5.5 – Mise en évidence de 3 seuils.

La zone A est l'endroit du débordement amont de la Biesme. Lorsqu'on effectue une coupe longitudinale dans le cours d'eau, on observe un seuil à $109,4[m]$. La présence d'un seuil crée une section de contrôle hydraulique au niveau même du seuil et une élévation du niveau d'eau en amont de celui-ci. Pour ce cas bien précis, la surélévation du niveau d'eau amont est faiblement marquée mais elle engendre tout de même le débordement du cours d'eau, qui est représenté sur les figures ci-dessous. Les flèches sur la figure 5.6 représentent la direction de l'écoulement.

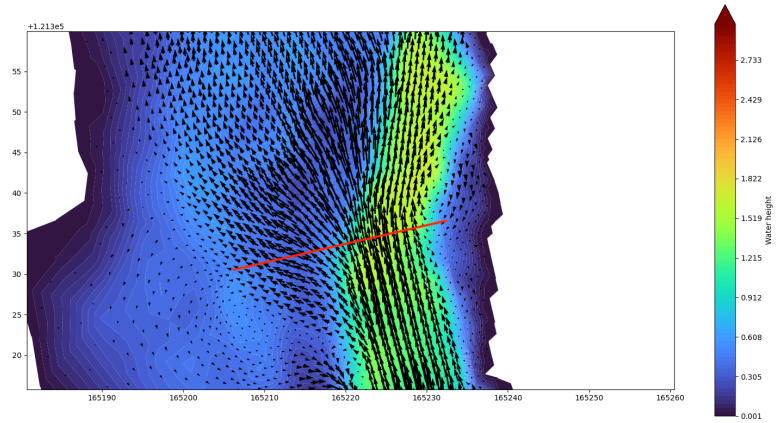


FIGURE 5.6 – Mise en évidence du débordement de la Biesme.

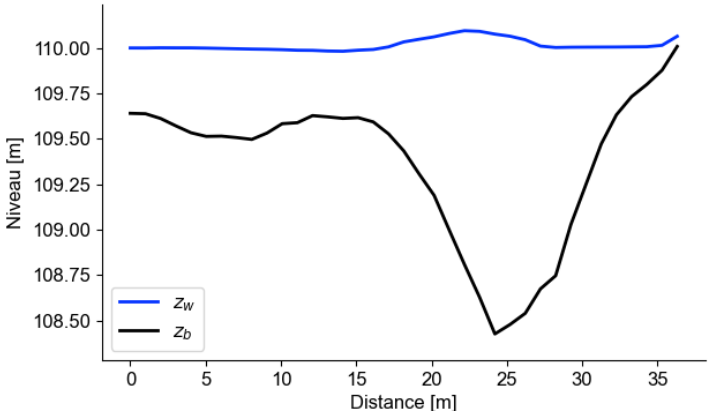


FIGURE 5.7 – Coupe au niveau du débordement.

Au niveau de la zone B, on observe un deuxième seuil, plus conséquent que le premier. La surélévation du niveau d'eau est plus conséquente et lorsqu'on effectue une coupe longitudinale dans le cours de la Biesme, la section de contrôle se définit clairement.

La zone C est l'endroit d'implantation du limnimètre. A nouveau, une augmentation du niveau du fond de la Biesme à $106,8[m]$ est mise en évidence. L'élévation de la ligne d'eau en amont est encore plus conséquente. De plus, un rétrécissement de la section est observé au droit du limnimètre, ce qui augmente d'autant plus la hauteur de la ligne d'eau en amont. Le lit de la Biesme passant d'une section quasi

rectangulaire de 5 mètres de large à une section triangulaire beaucoup plus étroite avant de revenir à une section rectangulaire plus large.

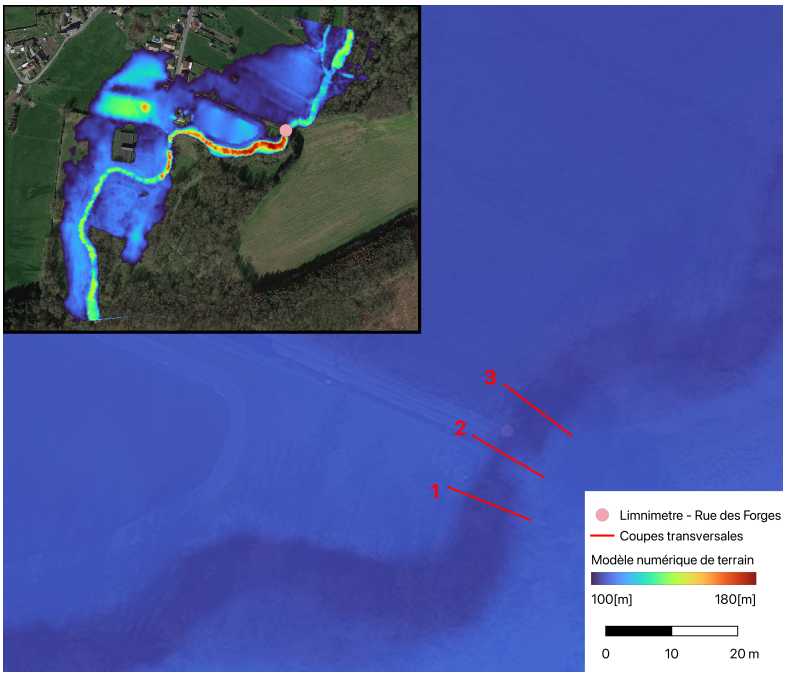


FIGURE 5.8 – Localisation des coupes.

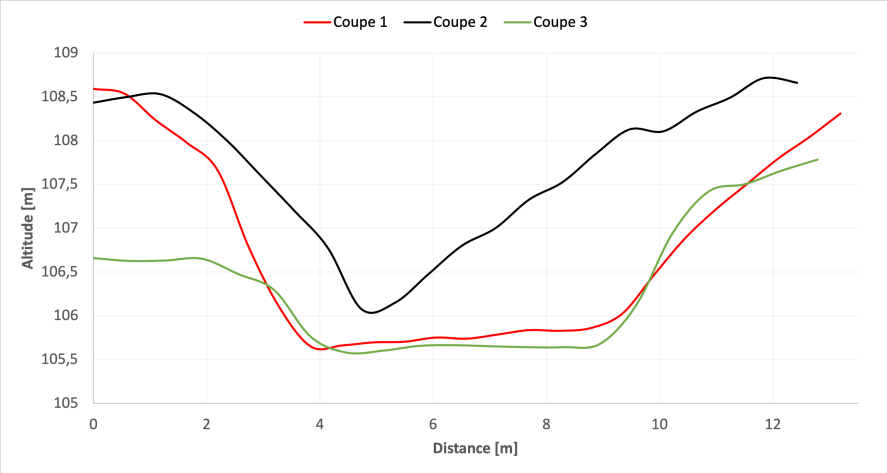


FIGURE 5.9 – Coupes transversales au niveau du limnimètre.

Enfin, on peut mettre en évidence l'existence d'un débit non mesuré par le limnimètre. L'eau débordant en amont s'écoule dans la rue des Forges et puis

dans les jardins avant de rejoindre la Biesme en aval de l'appareil de mesure. Ce dernier est visible sur la figure 5.10, qui indique bien qu'un écoulement contourne le limnimètre ainsi que sur la coupe, nous indiquant les hauteurs d'eau au droit de ce contournement (figure 5.11).

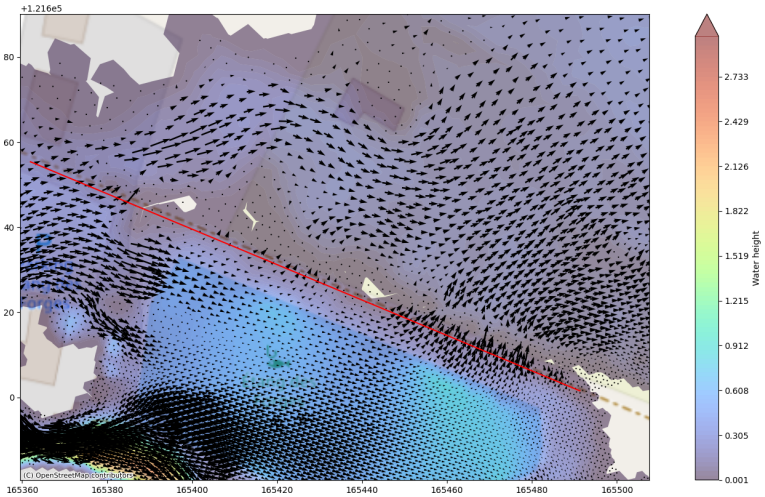


FIGURE 5.10 – Écoulement contournant le limnimètre

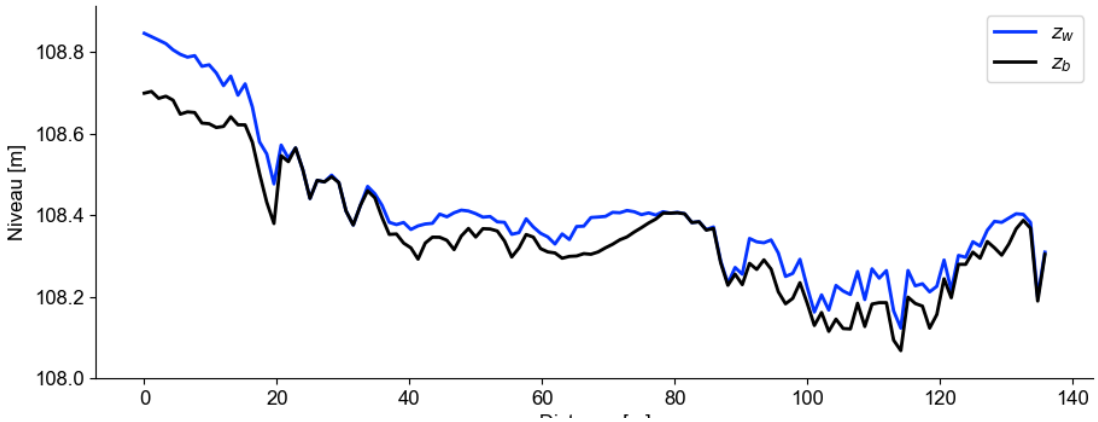


FIGURE 5.11 – Coupe dans l'écoulement contournant le limnimètre

Une représentation graphique du débit écoulé (figure 5.12) pour chaque section de mesure confirme bien ce contournement du limnimètre. La courbe rouge représente l'hydrogramme mesuré par le SPW, la courbe bleue représente le débit mesuré dans la rivière lors de la simulation et la courbe orange indique le débit de contournement,

qui n'a pas été mesuré par le limnimètre. La cumulée numérique approche très fortement les mesures du Service Public de Wallonie.

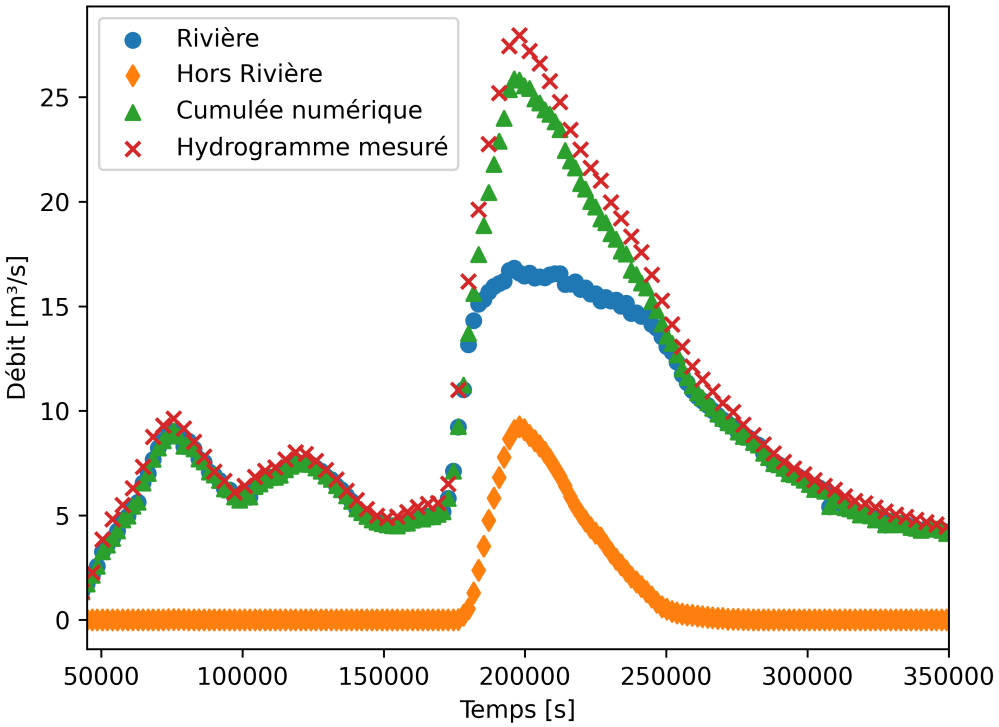


FIGURE 5.12 – Mise en évidence du débit non mesuré par le limnimètre.

La petite différence est expliquée par une section de mesure du débit dans la rivière qui manque un peu de précision. Une partie de la rivière a été omise dans la simulation. Comme le montre la figure 5.13, la section de mesure utilisée dans le maillage ne couvre pas la totalité de la rivière. Pour la suite des simulations, un second maillage a donc été réalisé pour rectifier cette erreur.

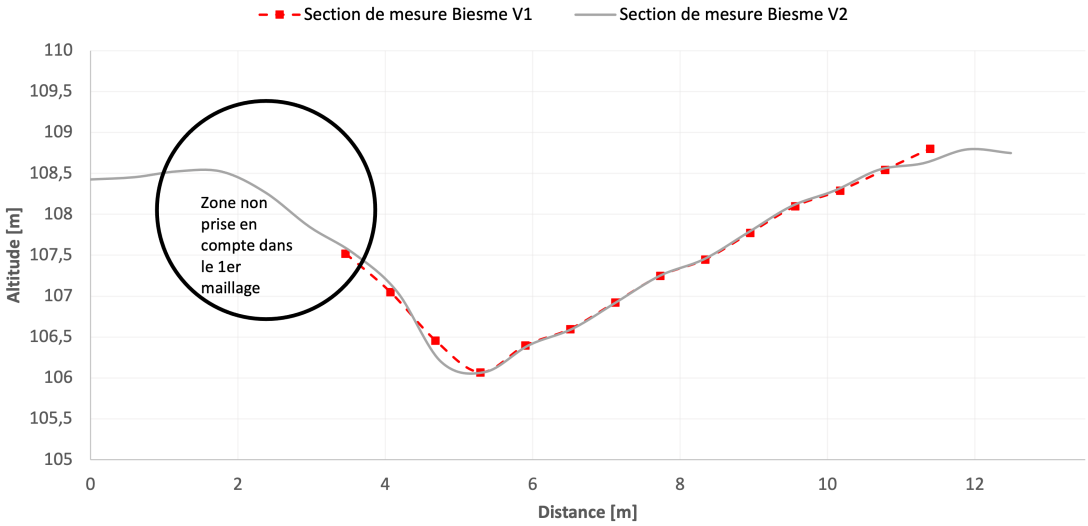


FIGURE 5.13 – Sections de mesure du débit de la Biesme.

5.2 Correction de l'hydrogramme

Partant du constat que le limnimètre n'a pas mesuré la totalité du débit mais uniquement celui qui s'est écoulé dans la Biesme, nous cherchons à déterminer le débit qui a contourné le limnimètre afin de retrouver le débit total à l'entrée de notre zone d'étude principale (rue Lambot).

L'idée étant d'établir une relation entre le débit d'entrée et le débit mesuré dans la rivière, un hydrogramme évolutif a tout d'abord été créé. Il s'agit d'un hydrogramme en palier, où le débit débute à $30[m^3/s]$ et augmente de $0,5[m^3/s]$ chaque heure, jusqu'à atteindre $60[m^3/s]$.

La réponse en terme de débit de la modélisation est graphiquement représentée à la figure 5.14. Le débit maximal dans la rivière n'atteint pas la cible, à savoir $27,953[m^3/s]$ mesurée par le SPW lors de l'épisode de Juillet 2021.
Le débit maximal mesuré dans la rivière, pour un débit injecté de $60[m^3/s]$, n'est que de $25,2[m^3/s]$ tandis qu'on a alors plus de $34[m^3/s]$ qui contournent le limnimètre. La courbe du débit mesuré dans la rivière possède une pente beaucoup plus faible que celle du débit mesuré hors sonde. Autrement dit, plus le débit injecté augmente, plus le pourcentage de débit qui n'est pas mesuré par le limnimètre augmente.

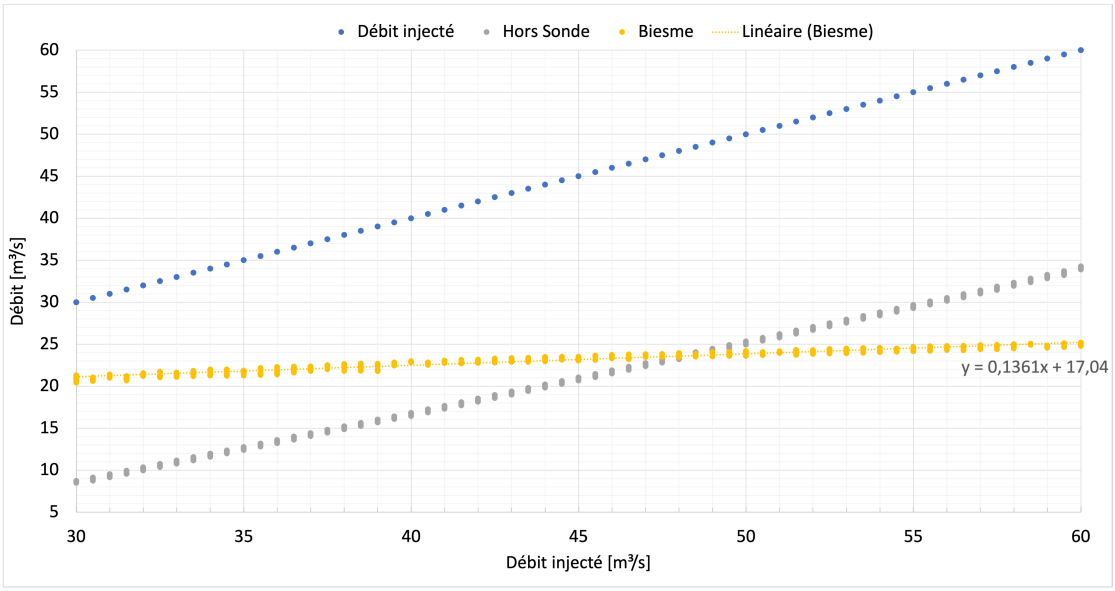


FIGURE 5.14 – Réponse de la modélisation à l'hydrogramme évolutif.

L'équation de la régression linéaire du débit mesuré dans la Biesme (y) en fonction du débit injecté en amont (x) est la suivante :

$$y = 0,1361x + 17,04$$

À partir cette équation, nous déterminons le débit injecté x pour lequel le débit mesuré dans la Biesme sera égal aux données du SPW, c'est-à-dire $y = 27,953[m^3/s]$. Nous déterminons donc un débit injecté $x = 80,18[m^3/s]$. Ce dernier est presque 3 fois plus conséquent que le débit mesuré par le limnimètre lors des inondations de Juillet 2021. Étant donné l'importance de cette grande divergence entre les mesures sur terrain et les résultats de la simulation, une étude complémentaire a été effectuée au niveau du Modèle Numérique de Terrain. Celle-ci sera décrite dans la section suivante.

5.3 Correction du MNT

Comme déjà mentionné dans ce travail, lors de l'acquisition des données par le capteur LIDAR aéroporté, les mesures prises au dessus de surfaces d'eau ne représentent pas le fond des cours d'eau ou des lacs mais bien la surface de l'eau. De plus, le débit déterminé dans la section précédente divergeant d'une ampleur non négligeable des mesures de terrain, nous avons approfondi la question du modèle numérique de terrain. L'idée de cette analyse étant de modifier l'altimétrie du cours

de la Biesme pour représenter, le mieux possible, le fond de celle-ci.

Dans le cadre de l'étude menée par le pôle hydraulique de l'UCLouvain, des mesures de niveau ont été effectuées dans le lit de la Biesme. Le professeur émérite Yves Zech a pu nous transmettre ces données pour réaliser une modélisation améliorée.

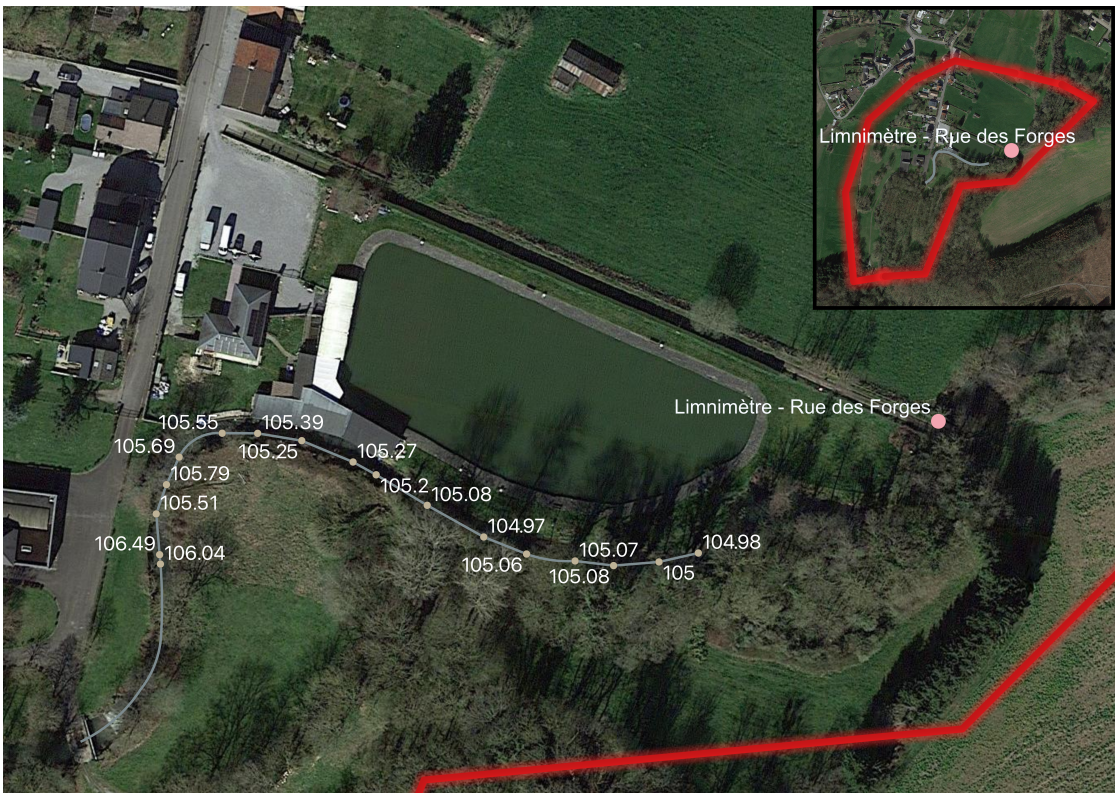


FIGURE 5.15 – Points de mesures disponibles.

On peut tracer le profil en long de la Biesme à partir du MNT 50cm produit par le SPW en 2021 et le comparer au profil en long des mesures prises sur terrain. Les mesures suivent une allure semblable aux données MNT mais se situent globalement 80$[cm]$ plus bas. L'étape suivant dans l'amélioration de la modélisation de l'épisode de Juillet 2021 consistait donc en une modification du MNT pour tenir compte des mesures. Nous avons donc décidé de descendre virtuellement le niveau de la Biesme de 80$[cm]$ sur tout son parcours dans la zone d'étude entourant le limnimètre.

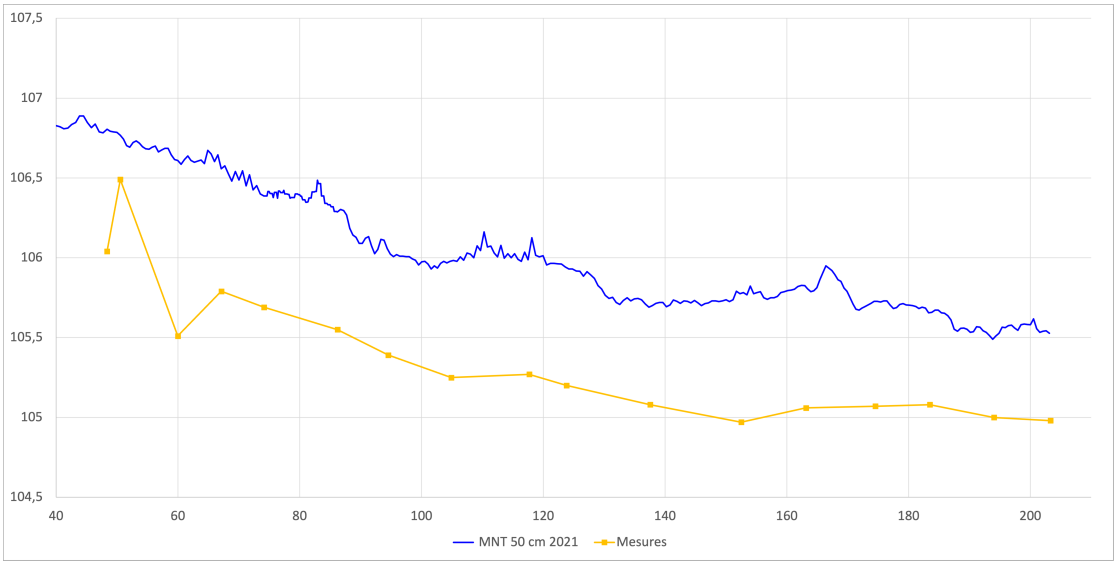


FIGURE 5.16 – Profils en long de la Biesme

Détermination du lit mineur de la Biesme

La première étape pour modifier le MNT consistait en la détermination du lit mineur de la Biesme. En effet, pour certaines sections, le fond était clairement défini tandis que pour d'autres la délimitation entre le fond et les berges était plus compliquée.

En première approche, le lit mineur a été dessiné en observant l'altimétrie fournie par le MNT. L'ajustement de l'échelle de couleur aux bornes de l'altimétrie de la Biesme permettent de mettre en évidence le lit et les berges plus aisément. Ceci ne peut se faire que par petites zones et il n'est donc pas possible de représenter chaque zone dans ce travail. Ensuite, la réalisation de coupes transversales tout au long du cours d'eau a permis d'ajuster ce tracé.

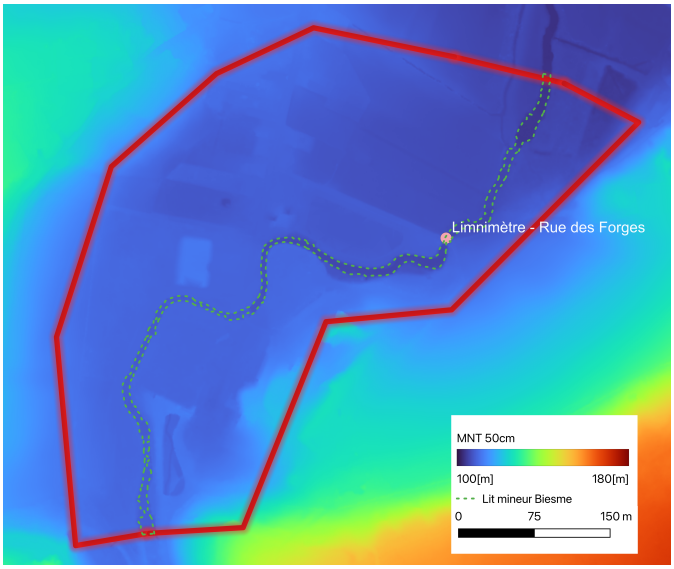


FIGURE 5.17 – Lit mineur déterminé à partir du MNT.

Création du fichier raster

Une fois le tracé du lit mineur effectué, un fichier raster (fichier image par point géoréférencé) couvrant le lit mineur a été créé avec comme attribut une valeur de $-0,8[m]$ dans le lit de la Biesme et nulle partout ailleurs.

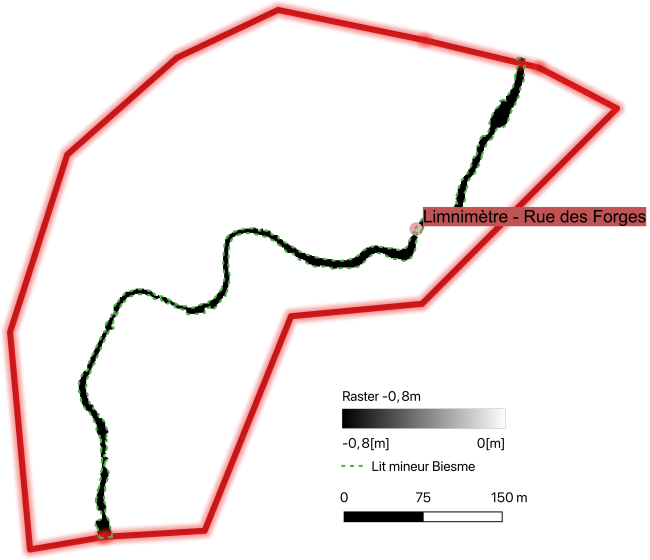


FIGURE 5.18 – Fichier raster lit mineur.

Modification du MNT

Enfin, le modèle numérique de terrain est modifié par l'outil calculatrice raster intégré à QGIS. Ce dernier permet d'effectuer différentes opérations sur les fichiers rasters. La somme du modèle numérique de terrain du SPW et du fichier raster $-0,8[m]$ permet donc de descendre le niveau du lit de la Biesme des $80[cm]$ de différence observés entre les mesures et les données du MNT.

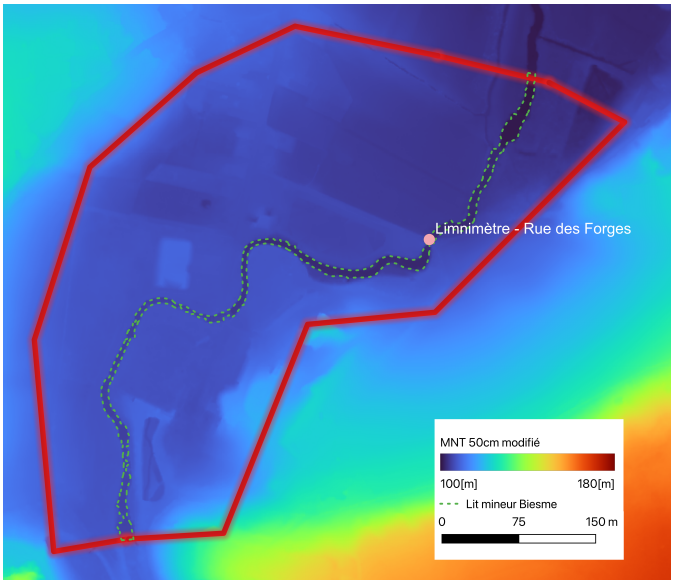


FIGURE 5.19 – MNT modifié dans le lit mineur de la Biesme.

Profil en long modifié

Nous pouvons maintenant retracer le profil en long du lit de la Biesme à partir du MNT modifié et le comparer aux mesures.

Le profil en long issu du MNT modifié se rapproche des mesures mais on observe 2 zones pour lesquelles il n'est pas encore correct, à 70 et 100 mètres de distance. Après inspection des causes engendrant ces deux 'pics' dans le profil en long modifié, nous avons pu mettre en évidence une largeur trop faible lors de la détermination du lit de la Biesme.

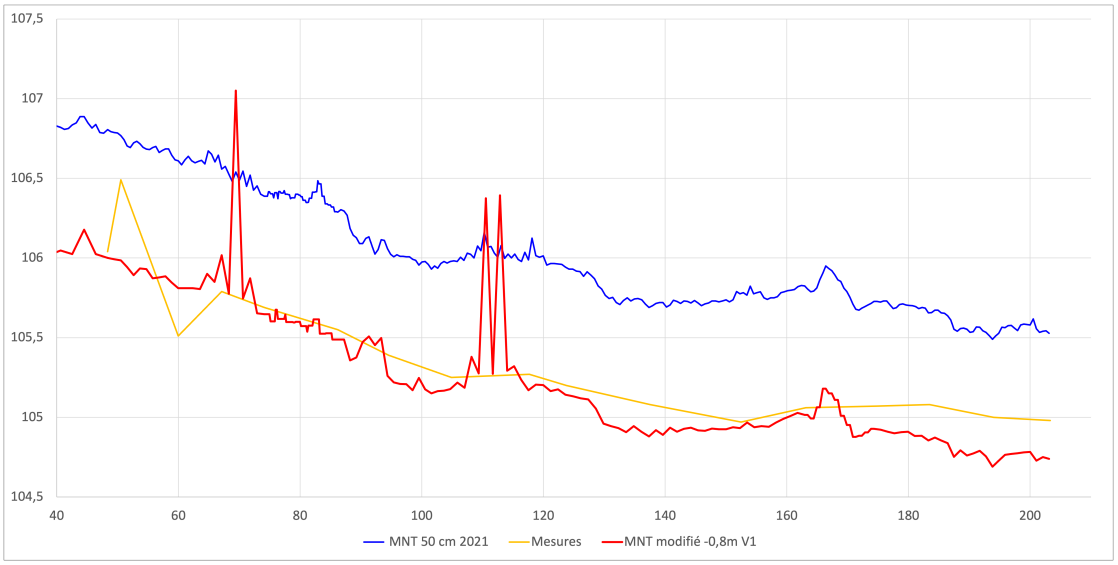


FIGURE 5.20 – Profil en long de la Biesme - MNT modifié.

Version élargie

La mise en évidence des deux 'pics' dans le profil en long modifié de la Biesme nous oblige à réviser notre méthode. Lors de la détermination du lit mineur de la Biesme, nous avons utilisé une méthode visuelle basée sur la représentation graphique du MNT. Pour améliorer cette étape, un fichier de pentes a été calculé à partir du MNT 50cm fourni par le SPW. L'hypothèse que les berges de la Biesme présentent une pente assez raide a été prise et le tracé du lit a été revu sur cette base.

La figure 5.21 représente non seulement le fichier de pentes, calculé avec le logiciel QGIS, mais aussi les adaptations qui ont été faites. Il s'agit uniquement d'élargissements localisés de la première version du lit de la Biesme pour améliorer les résultats.

Ensuite, la procédure décrite précédemment a été appliquée avec ce nouveau tracé du lit mineur pour aboutir à une deuxième version du MNT modifié. Le tracé du profil en long issu de cette deuxième version est représenté à la figure 5.22 et ne présente plus les deux imperfections soulignées. Cependant, on observe une différence au début du profil en long par rapport aux mesures. Il s'agit en réalité d'un seuil mesuré sur place, suivi d'un affouillement du lit de la Biesme. Nous avons décidé de ne pas modifier à nouveau, localement, le modèle numérique de terrain puisque nous ne disposons des relevés de niveau que sur une longueur de 200$[m]$. Il est probable que d'autres seuils existent dans la zone et ne soient pas

modélisés par le MNT, il a donc été décidé de descendre globalement le niveau de 80[cm] mais de ne pas intervenir localement sur des particularités du lit.



FIGURE 5.21 – Lit mineur déterminé à partir des pentes.

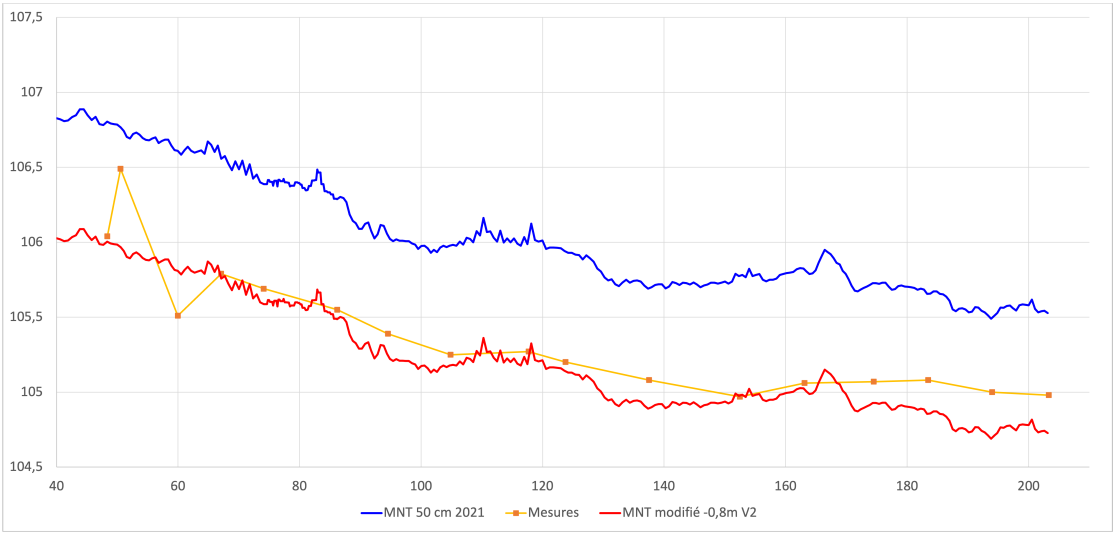


FIGURE 5.22 – Profil en long de la Biesme - MNT modifié deuxième version.

5.4 Nouvelle correction de l'hydrogramme

Maintenant que nous disposons d'un modèle numérique de terrain qui représente mieux le lit de la Biesme, nous pouvons effectuer une nouvelle correction de l'hydrogramme en appliquant identiquement la méthode de la première correction. Pour rappel, on cherche à déterminer la relation entre le débit d'entrée (injecté) et le débit mesuré dans la rivière en modélisant le comportement de la zone pour un hydrogramme évolutif. L'hydrogramme évolue entre $30[m^3/s]$ et $60[m^3/s]$ avec une augmentation d'$1[m^3/s]$ chaque heure.

La réponse en terme de débit de la modélisation sur le MNT modifié est représentée à la figure 5.23. Le débit maximal dans la rivière atteint la cible cherchée ($27,953[m^3/s]$) pour un débit injecté de $60[m^3/s]$).

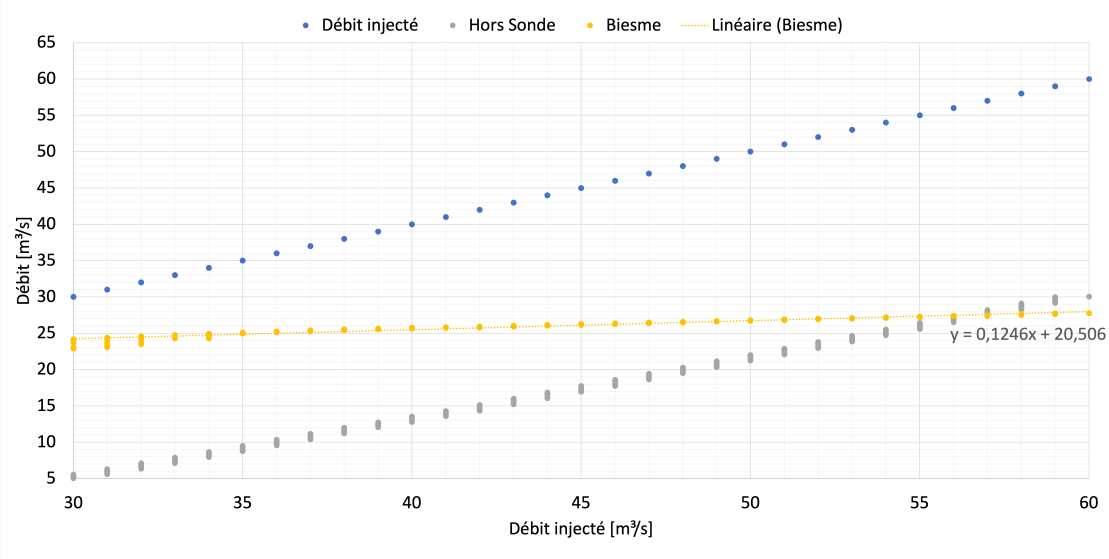


FIGURE 5.23 – Réponse de la modélisation à l'hydrogramme évolutif.

À l'aide de la relation mathématique entre le débit injecté et le débit mesuré dans la Biesme, nous pouvons modifier l'hydrogramme du SPW pour tenir compte de la proportion de débit qui a débordé et contourné le limnimètre. Ensuite, une dernière simulation permet de vérifier la démarche effectuée jusqu'ici. Cette dernière utilisera le MNT modifié pour tenir compte des mesures de niveau ainsi que l'hydrogramme modifié. On s'attend à mesurer des débits semblables à ceux fournis par l'hydrogramme du SPW au niveau de la section de mesure de la Biesme, le reste du débit contournant le limnimètre. La cumulée numérique du débit mesuré dans la Biesme et celui hors sonde doit théoriquement être identique à l'hydrogramme modifié.

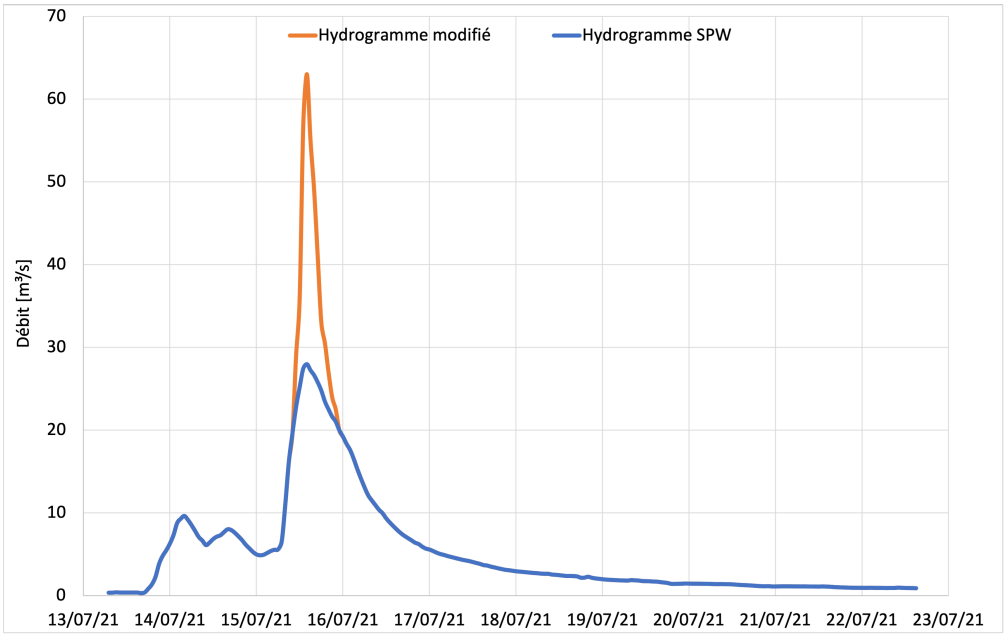


FIGURE 5.24 – Hydrogramme mesuré par le SPW et modifié.

Les résultats de cette simulation de vérification sont représentés à la figure 5.25. Ils sont conformes à ce qui était attendu : le débit mesuré au droit du limnimètre lors de la simulation correspond aux mesures du SPW.

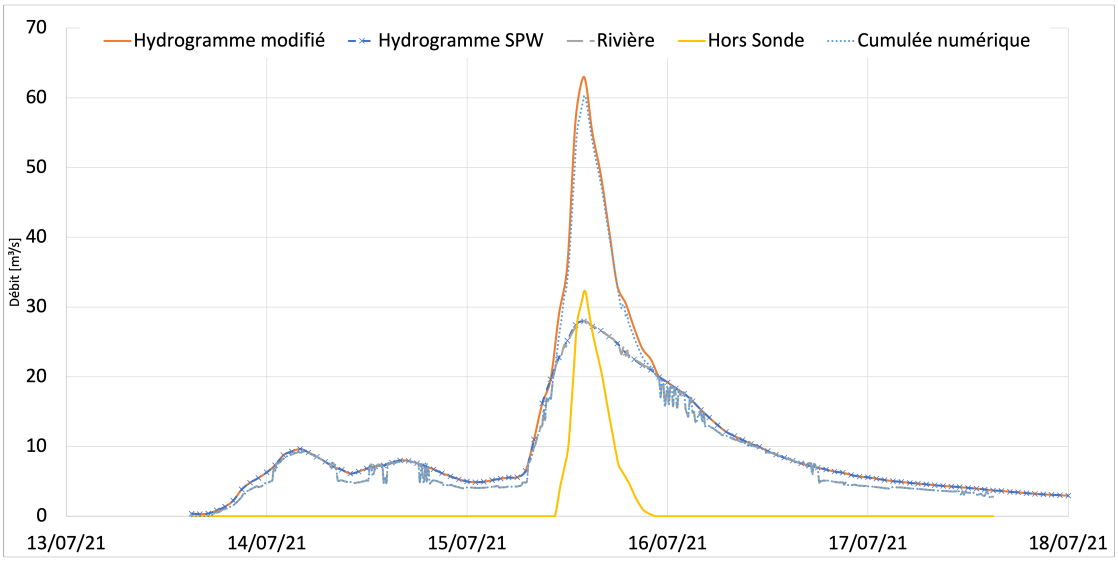


FIGURE 5.25 – Résultats de la simulation.

5.5 Encore des pistes d'amélioration ?

5.5.1 Niveaux limnimétriques

L'une des fonctionnalités du code de calcul Hydroflow offre la possibilité d'installer une jauge de mesure de la hauteur d'eau. Afin de comparer les niveaux simulés lors de la dernière simulation de vérification, qui utilise le MNT modifié de $0,8[m]$ dans le lit de la Biesme et l'hydrogramme modifié avec un pic à $60[m^3/s]$, aux données du SPW, une jauge a été programmée. Elle est placée au droit du limnimètre, aux coordonnées Lambert suivantes : [X,Y] = [165526,121590].

On observe une différence de l'ordre de $40[cm]$ entre les niveaux issus de la simulation et ceux du SPW. On a donc une correspondance dans les débits mais une discordance dans les niveaux limnimétriques. Il est possible que le placement de la jauge dans la simulation soit la cause de cette différence. Il serait donc intéressant d'étudier cette piste dans un prochain travail pour éclaircir ce point.

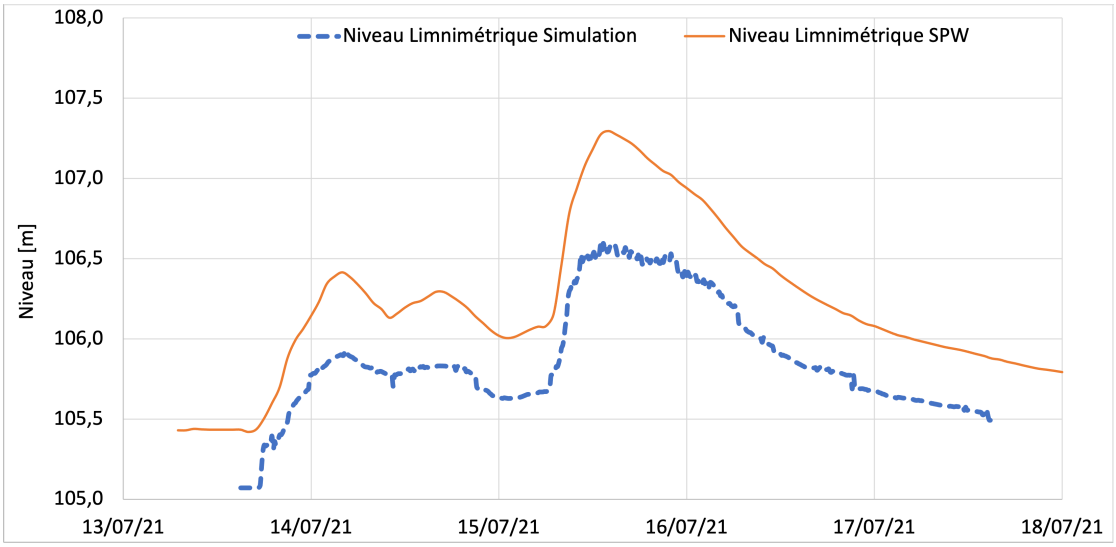


FIGURE 5.26 – Niveaux au limnimètre

5.5.2 Étude probabiliste

La station de mesure limnimétrique d'Aiseau-Presles est en service depuis le 11/01/1972. Nous disposons donc d'un grand nombre de données de hauteurs d'eau et de débits.

La réalisation d'une étude probabiliste des débits maximums permet de mettre en

évidence le caractère exceptionnel du débit observé et de calculer le temps de retour.

La distribution utilisée pour représenter ces débits extrêmes est la distribution log-normale. Elle se base sur le constat que le débit observé dans un cours d'eau n'est pas un phénomène additif mais plutôt multiplicatif. Autrement dit, l'influence des facteurs (pluie, couverture du sol, aménagements du paysage, ...) agissant sur le débit ne peut pas s'additionner mais doit plutôt se multiplier.
Si l'on définit Y comme le produit d'une série de variable W, nous obtenons :

$$Y = W_0 \cdot W_1 \cdot W_2...$$

Pour détourner le problème de multiplication, on définit la variable aléatoire X

$$X = ln(Y) = ln(W_0 \cdot W_1 \cdot W_2...) = ln(W_0) + ln(W_1) + ln(W_2) + ...$$

Le théorème central limite, qui s'exprime de la manière suivante : "soit une série de variables aléatoires qui ont la même distribution, si on fait la somme de ces variables, cette somme sera aussi une variable aléatoire dont la distribution tendra vers une distribution normale" [30] peut maintenant être utilisé. À partir des relations valables lors d'une transformation de variable on définit la fonction de probabilité log-normale qui dépend de deux paramètres : $m_{ln(y)}$ et $\sigma_{ln(y)}$. La détermination de ces deux paramètres peut s'effectuer selon deux méthodes : la méthode des moments et la méthode du maximum de vraisemblance. La première consistant en une égalisation du moment théorique avec son équivalent empirique tandis que la deuxième repose sur la détermination d'un estimateur à partir d'un problème d'optimisation d'une fonction de vraisemblance. Le cours d'analyse et atténuation des inondations enseigné par S.Soares-Frazão traite plus en profondeur ces questions (LGCIV2055 [31]) de modélisation.

Une deuxième distribution probabiliste a été utilisée. Il s'agit de la distribution Gumbel, qui est un cas particulier de la loi d'extremum généralisée. Elle est souvent utilisée en hydrologie pour prévoir les débits de crue. Nous n'effectuerons pas de démonstration détaillée du modèle mathématique de cette distribution, elle est aussi disponible dans le cours d'analyse et atténuation des inondations enseigné à l'UCLouvain.

Les résultats repris dans la figure 5.27 sont basés sur le débit maximum observé par année calendrier. Les années pour lesquelles des données de débit sont manquantes n'ont pas été prises en considération, tout comme l'année 2021.

Avant d'analyser ces résultats, nous définissons la notion de temps de retour T_r tel que le temps moyen au cours duquel, statistiquement, un évènement de même

WITHOUT 2021						
	LN Moments		LN MLE		Gumbel moments	
Parameters	$\widehat{m}_{\ln Y}$	2,079884617	$\widehat{m}_{\ln Y}$	2,078510801	$\hat{u}$	6,963477409
	$\hat{\sigma}_{\ln Y}$	0,452931228	$\hat{\sigma}_{\ln Y}$	0,459983701	$\hat{\alpha}$	0,302950828
Extreme discharges	[m^3/s]		[m^3/s]		[m^3/s]	
T_r = 10 years	14,30114125		14,41117048		14,39163775	
T_r = 100 years	22,95556102		23,30325166		22,14795225	
T_r = 1000 years	32,4450319		33,11436895		29,76339881	
T_r = 10000 years	43,13537051		44,22091068		37,36540906	
T_r	[years]		[years]		[years]	
Q = 28 m^3/s	351,268412		311,5072866		586,3165828	
Q = 60 m^3/s	230324,6961		170393,3857		9507205,205	

FIGURE 5.27 – Résultats de l'étude statistique.

intensité se reproduit [32]. Il est très souvent utilisé dans l'étude des débits de crue. On peut définir, par exemple, la probabilité d'avoir un débit plus petit que le débit de crue y_r pendant T années (Delpierre, Ryckmans [30]) :

$$P\left[(Y \leq y_r)_T\right] = \left(1 - \frac{T}{T}\frac{1}{T_r}\right)^T = e^{-T/T_r}$$

On peut observer que le temps de retour du débit mesuré par le SPW ($28[m^3/s]$) se situe aux alentours des 300 ans pour la distribution log-normale et des 600 ans pour la distribution de Gumbel. De plus, le débit recalculé à la suite de la vérification de l'hydrogramme, à savoir $60[m^3/s]$ présente une période de retour comprise entre 170 000 et 230 000 ans pour la distribution log-normale. Les valeurs de temps de retour pour le débit recalculé ($60[m^3/s]$) sont tellement importantes qu'une analyse complémentaire devrait être effectuée avant de considérer cette valeur pour l'étude de zone affaissée comprenant la rue Lambot.

5.5.3 Vérification sur site

Après avoir mis en évidence le temps de retour considérablement élevé, nous avons examiné plus en profondeur la section de mesure au droit du limnimètre. Comme nous l'avons démontré dans la figure 5.9, le modèle numérique de terrain présente un rétrécissement conséquent sous le pont couvrant le limnimètre. Pour vérifier cette représentation, une visite de terrain a été effectuée et a mis en évidence une forte probabilité d'erreur dans le MNT. Les photos ci-dessous témoignent de la situation au niveau du pont surplombant le limnimètre. On peut observer que la section ne semble pas se rétrécir, les berges étant verticales sous le pont. Malheureusement, le niveau d'eau lors de cette visite n'a pas permis d'observer

le fond de la rivière pour repérer d'éventuels changements de niveau du lit de la rivière ou un rétrécissement sous l'eau. Ces photos ont été réalisées le 13 décembre 2023 à 16h10 et selon les relevés du SPW, le niveau d'eau était de $48[cm]$ pour un débit de $0,96[m^3/s]$.



FIGURE 5.28 – Photos au niveau du limnimètre - Amont



FIGURE 5.29 – Photos au niveau du limnimètre - Aval

Élargissement du MNT sous le pont

Constatant une possible discordance entre le modèle numérique de terrain et la réalité, une dernière vérification a été faite avant de conclure sur l'hydrogramme à utiliser pour notre recherche de solution contre les inondations de la rue Lambot.

Tout d'abord, nous effectuons une modification du MNT au niveau du limnimètre pour élargir la section de la Biesme à 5 mètres, comme estimé lors de la visite de site. La méthode appliquée pour réaliser cette modification est identique à celle utilisée pour approfondir le lit de la Biesme.

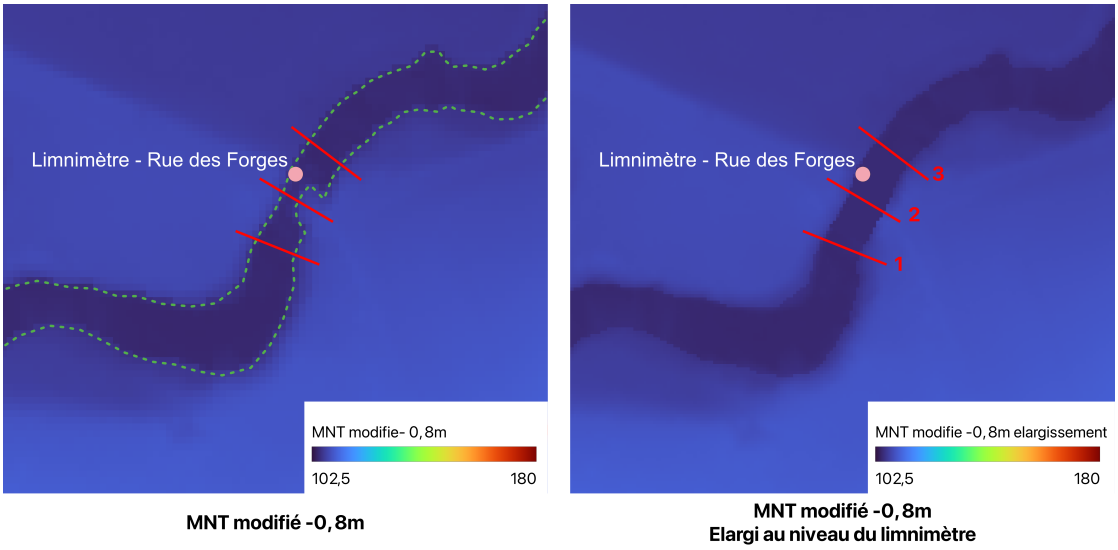


FIGURE 5.30 – Élargissement au niveau du limnimètre.

Les sections 1,2 et 3 sont représentées dans la figure suivante. Le niveau du lit de la Biesme a été fixé à $105[m]$, identique au niveau juste en amont et en aval de l'élargissement.

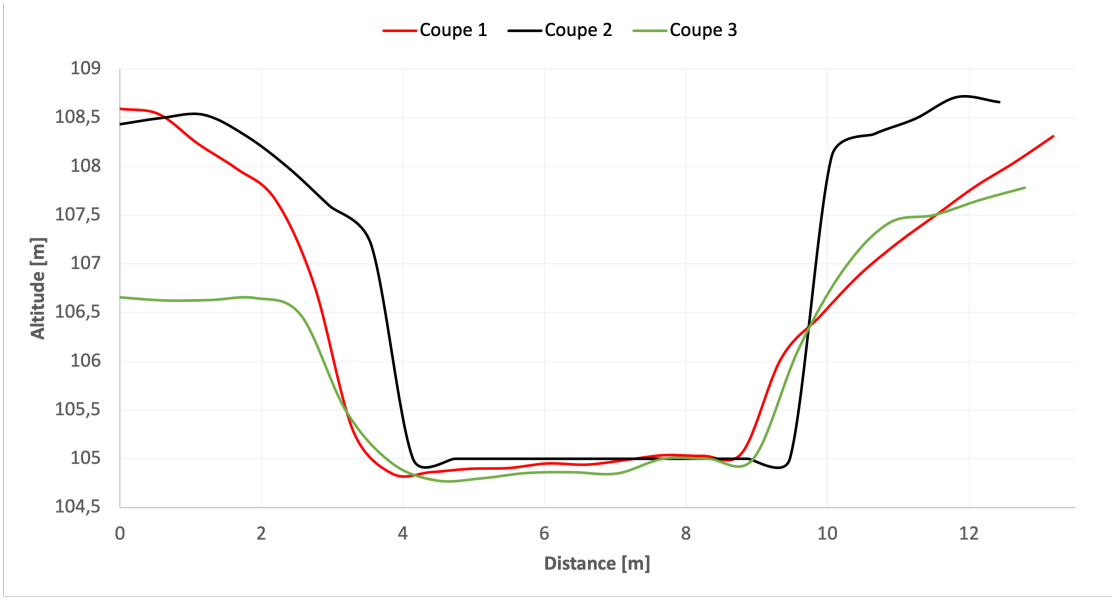


FIGURE 5.31 – Sections de la Biesme au niveau du limnimètre après élargissement.

Ensuite, une simulation a été recalculée, avec l'hydrogramme mesuré par le SPW ($Q_{max} = 28[m^3/s]$) pour déterminer le comportement avec une section élargie.

On observe qu'avec cet élargissement, le débit écoulé dans la Biesme est total. On n'a plus de contournement du limnimètre par la rue des Forges et les jardins.

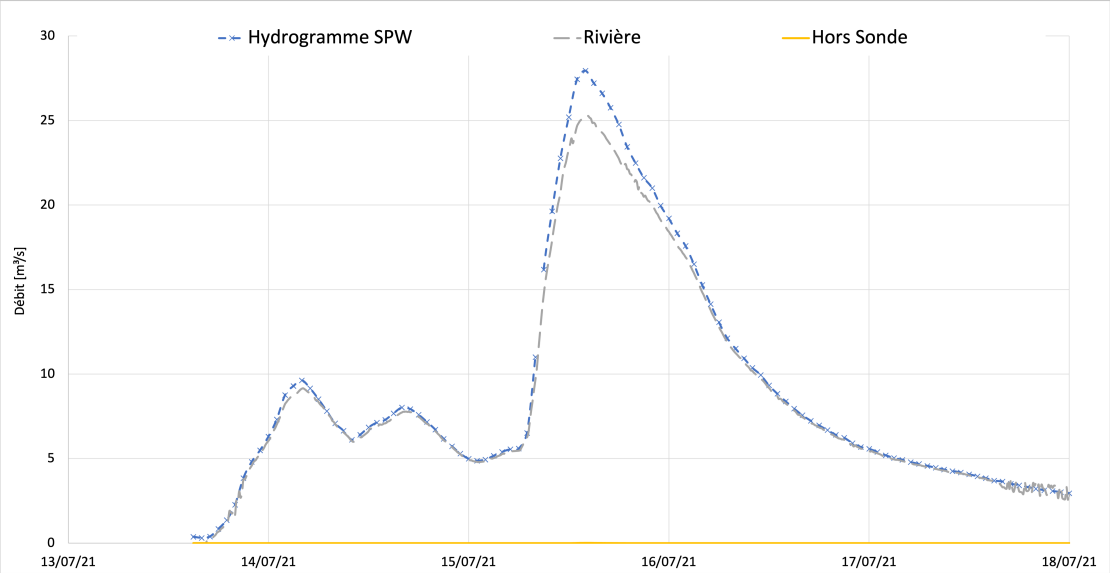


FIGURE 5.32 – Résultats de la simulation avec un élargissement au droit du limnimètre.

5.6 Conclusion sur la vérification de l'hydrogramme

Dans ce chapitre, nous devions vérifier l'hydrogramme mesuré par le SPW avant de l'utiliser pour la simulation de la rue Lambot.

Nous avons commencé par mettre en évidence un débordement de la Biesme en amont du limnimètre, soulignant une incertitude au niveau du débit mesuré par l'appareil de mesure. En effet, l'eau s'écoulait dans la rue des Forges avant de rejoindre la Biesme par les jardins tout en évitant le limnimètre.
À la suite de ce constat, notre objectif était de retrouver le débit total qui s'était écoulé, autrement dit obtenir une mesure du débit qui contourne le limnimètre ainsi qu'une relation entre le débit injecté en amont et celui mesuré par le limnimètre pour reconstruire un hydrogramme modifié. Une fois cet hydrogramme produit, une analyse statistique a déterminé les temps de retour pour le nouveau débit de pointe déterminé. Cette analyse suggère que ce débit est trop élevé.
Enfin, une visite du site du limnimètre, rue des Forges, a souligné une possible erreur de modélisation dans le modèle numérique de terrain. La largeur de la section à cet endroit semblait sous-estimée. Une dernière modification du MNT, à savoir un

élargissement de la section au niveau du limnimètre, indique que la mesure du débit fournie par le SPW est correcte, pour autant que l'hypothèse de l'élargissement de la section à $5[m]$ soit correcte.

Dans le chapitre suivant, nous proposerons une solution pour endiguer les inondations qui se produisent dans la rue Lambot. À cette fin, nous utiliserons donc l'hydrogramme mesuré par le Service Public Wallon ($Q_{max} = 28[m^3/s]$) et le MNT 50cm produit en 2021-2022.

Chapitre 6

Proposition de solution

Ce chapitre sera dédié à la recherche d'une solution technique permettant d'atténuer l'ampleur des inondations dans zone de la confluence entre la Biesme et la Sambre. Nous étudierons une élévation des digues puisqu'il s'agit d'un élément technique déjà en place et qu'il nous semble qu'une augmentation de la hauteur est plus aisément réalisable qu'un élargissement de la confluence ou qu'une modification de la station de pompage et démergement.

6.1 Paramètres de la modélisation

Pour modéliser au mieux le comportement de la zone affaissée entourant la confluence, nous avons étudié les différents paramètres utilisés par la première étude de Maxime Raison.

À la suite de cette étude de sensibilité et de la vérification de l'hydrogramme de la Biesme, nous avons décidé d'utiliser le modèle numérique de terrain d'une résolution spatiale de 50$[cm]$. Ce choix s'explique aisément par le caractère récent de la donnée, acquise entre 2021 et 2022, ainsi que par la meilleure résolution spatiale par rapport au modèle précédent. Il est rappelé que lors de l'acquisition des données, le capteur LIDAR mesure les surfaces d'eau et pas le fond du cours d'eau. Nous ne disposions d'aucune mesure du lit de la Biesme dans la zone de la confluence. Nous étions donc dans l'impossibilité de modifier localement le MNT comme on a pu le faire pour la zone autour du limnimètre. L'objectif de ce chapitre étant de formuler une solution contre l'inondation de la rue Lambot, cette particularité du MNT est sécuritaire lors des simulations. En effet, le niveau dans la Biesme est sur-évalué dans le MNT, ce qui nous indique que si une solution est validée pour ce niveau, elle doit aussi l'être pour le niveau réel du lit.

L'étude détaillée de la zone du limnimètre a mis en évidence un débordement de la Biesme dans la rue des Forges, qui engendrait un contournement de la station de mesure limnimétrique. Après des recherches pour calculer le débit total, une analyse probabiliste a mis en évidence des temps de retour extrêmes pour le débit total calculé. De plus, une visite sur le site de la station de mesure indique une possible erreur de modélisation de la section du limnimètre dans le MNT. Une fois cette section élargie, on n'observe plus de contournement du limnimètre, ce qui remet donc en cause le débit recalculé. En conclusion, pour la recherche de solution au niveau de la confluence, nous utiliserons l'hydrogramme mesuré par le SPW, qui présente un débit de pointe à $28[m^3/s]$.

Dans la première étude présentée par Maxime Raison, la station de démergement était modélisée. Ce n'est plus le cas pour la simulation que nous allons décrire. Ce choix s'est imposé à nous pour deux raisons : la station de démergement est présente pour pomper l'eau de pluie qui ruisselle dans la zone affaissée et non pas pour évacuer l'eau qui submerge une digue ainsi que la non prise en compte de l'eau de pluie dans la zone. En effet, dans la simulation, seuls les débits dans les cours d'eau sont introduits. L'eau de pluie qui tombe sur la zone drainée par les collecteurs menant à la station de démergement n'est pas prise en considération. Il ne serait donc pas correct de modéliser un système de pompage de cette eau si on ne l'introduit pas dans la simulation.

Les paramètres liés au frottement (coefficient de frottement) et à la stabilité numérique (nombre de courant) sont inchangés.

6.2 Élévation des digues

Pour modéliser une augmentation de la hauteur des digues, nous avons dû intervenir dans la modèle numérique de terrain. Les digues de la Biesme ont été relevées selon 2 niveaux : la digue longeant la Biesme a un niveau de $96,7[m]$ tandis que la digue transversale, qui retient l'eau au niveau du premier débordement, a été relevée pour atteindre $97[m]$. La technique utilisée pour modifier le MNT est identique à celle présentée dans le chapitre relatif à la vérification de l'hydrogramme, à savoir la création d'un fichier raster possédant un argument égal à la hauteur désirée et la fusion de ce fichier avec le MNT 50cm. La largeur de la digue modélisée est plus grande que dans la réalité puisque nous avons mis en évidence des erreurs de représentation altimétrique pour le maillage gradient 15-3. Il était donc important que la digue soit entièrement recouverte par, au minimum, une cellule du maillage. Nous aurions pu raffiner le maillage au niveau des digues mais le temps de calcul

nécessaire devenait alors trop important.

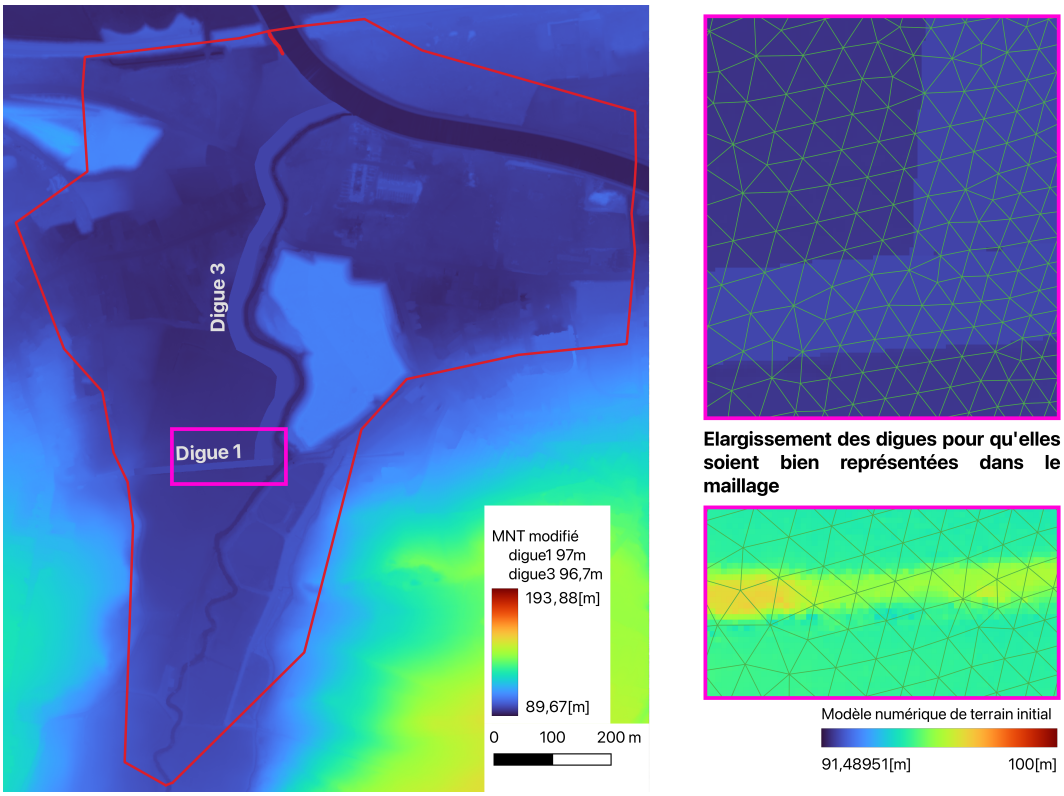


FIGURE 6.1 – MNT modifié au niveau des digues.

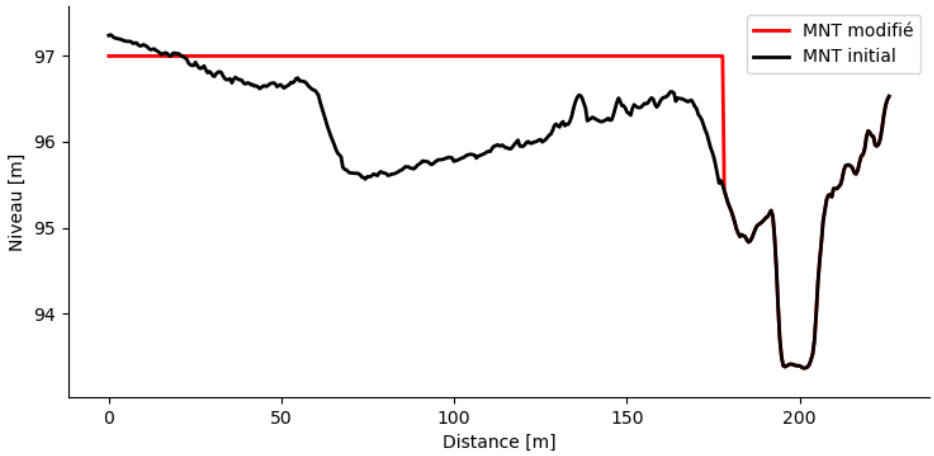


FIGURE 6.2 – Coupe longitudinale dans la digue 1.

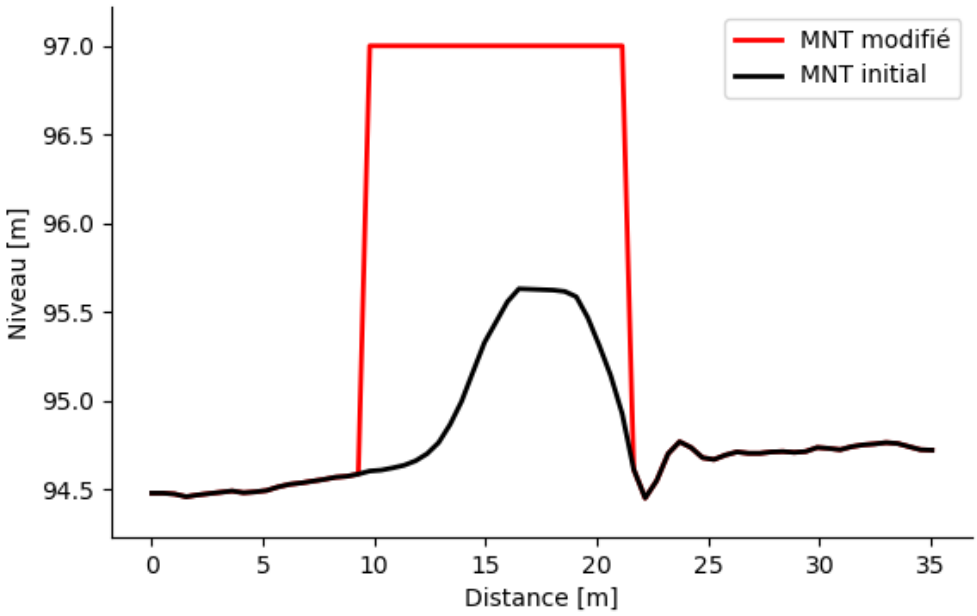


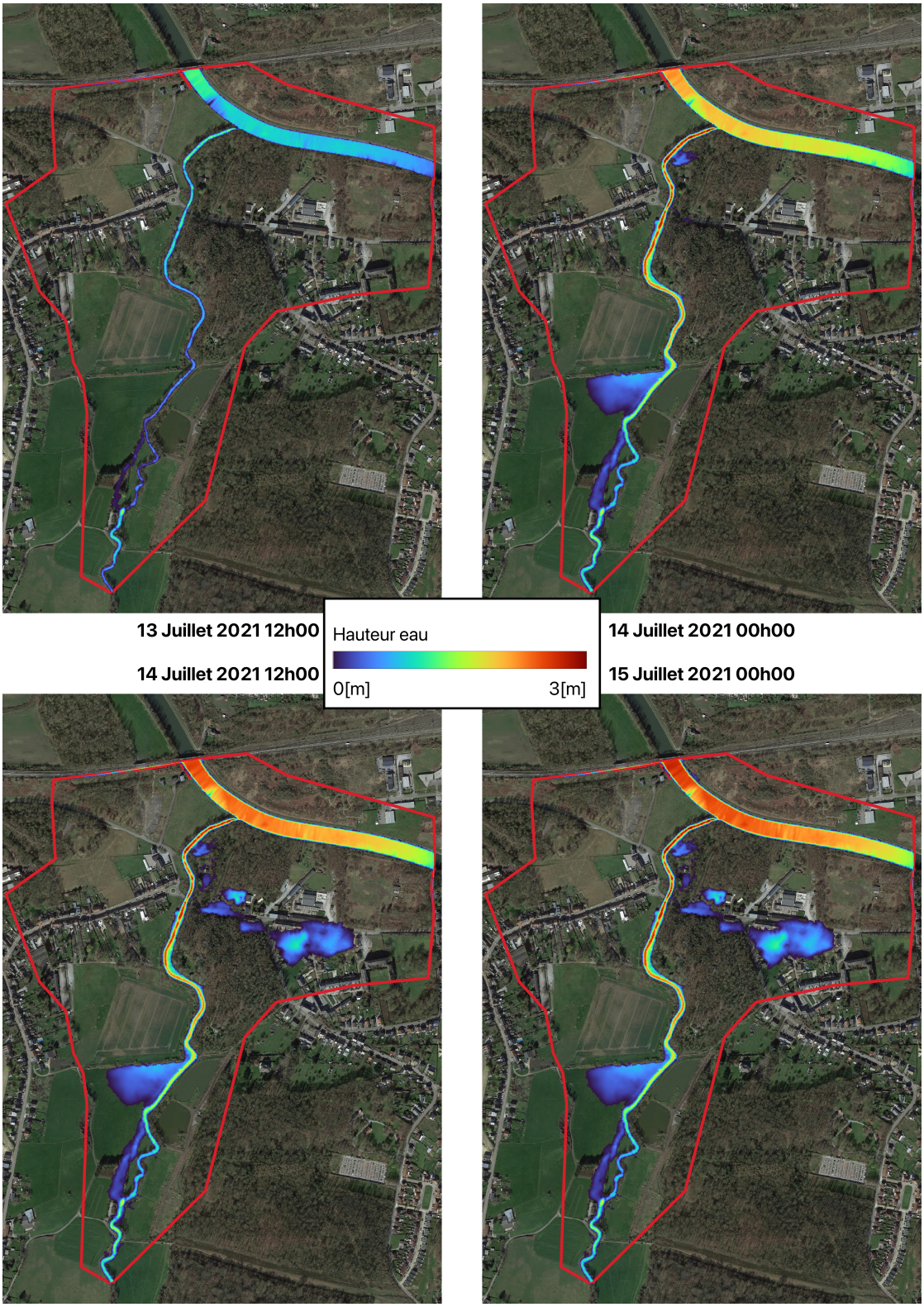
FIGURE 6.3 – Coupe transversale dans la digue 1.

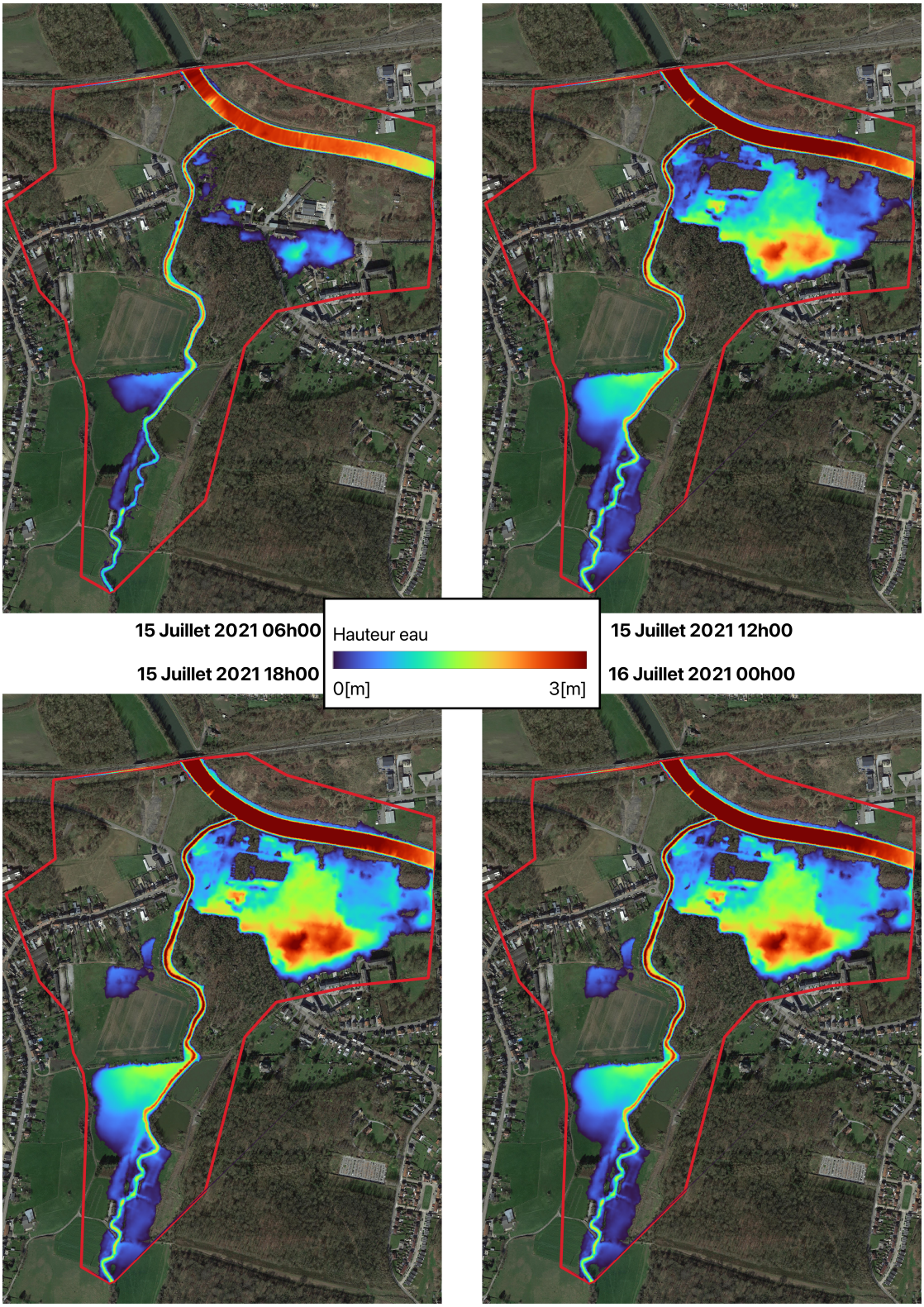
6.3 Résultats

Les résultats de cette simulation sont disponibles pour différents temps dans les figures ci-dessous. On observe que l'augmentation des hauteurs au niveau des digues permet d'éviter une inondation de la rue Lambot.

Un petit débordement se produit entre le 15 Juillet 2021 06h00 et le 15 Juillet 2021 12h00 au niveau de la digue bordant la Biesme. La zone impactée par ce léger débordement est très limitée, se situe dans un champ à l'arrière des jardins et les hauteurs d'eau observées sont de l'ordre de $40[cm]$ seulement. Il a donc été décidé de ne pas augmenter de nouveau la hauteur des digues pour une si petite zone touchée.

Malheureusement, le débordement qui se produit en rive droite de la Biesme est légèrement plus important. Les niveaux d'eau atteints sont de l'ordre de 3 mètres par endroit alors qu'ils n'étaient que de $2,8$ mètres dans la simulation de référence. Il reste donc, pour une étude future, à formuler une solution contre les inondations dans la rue d'Oignies, en rive droite de la Biesme. On pourrait, par exemple, étudier la création d'une plaine inondable approfondie en amont de la digue pour écrêter le pic de crue.


13 Juillet 2021 12h00
14 Juillet 2021 00h00
Hauteur eau
0[m]
3[m]
14 Juillet 2021 12h00
15 Juillet 2021 00h00


15 Juillet 2021 06h00
15 Juillet 2021 12h00
Hauteur eau
0[m]
3[m]
15 Juillet 2021 18h00
16 Juillet 2021 00h00

Conclusion

Ce travail fait partie d'une réflexion globale autour de la problématique de l'eau dans la commune d'Aiseau-Presles, initiée à la suite des inondations de Juillet 2021. Il s'intéresse à la zone de la confluence entre la Biesme et la Sambre et poursuit une première étude, menée dans le cadre d'un TFE, par Maxime Raison en 2023.

En premier lieu, nous nous sommes attardés sur le contexte dans lequel s'inscrivent les études des phénomènes d'inondations. Le réchauffement climatique, lié à d'autres facteurs, engendrera à l'avenir de plus en plus de phénomènes climatiques extrêmes. Il est donc important d'étudier le comportement de nos lieux de vie face à ces catastrophes avec pour objectif final l'aménagement résilient du territoire.

Ensuite, une description du phénomène climatique extrême rencontré pendant le mois de Juillet 2021 a été réalisée ainsi qu'une illustration des conséquences observées dans la commune d'Aiseau-Presles. La configuration des lieux nous fait prendre conscience non seulement des facteurs de risque, tels que l'affaissement ou le rétrécissement de la section à la confluence, mais aussi des installations réalisées au cours de l'histoire pour limiter les inondations dans la rue Lambot.

En second lieu, les résultats issus du travail de fin d'études de Maxime Raison sur la même thématique sont synthétisés. La poursuite du travail social mené par le centre culturel de l'entité est brièvement décrit, avant d'exposer les différentes simulations réalisées par M. Raison. Cette première étude n'ayant pas permis la mise en évidence d'une solution fonctionnelle, un approfondissement des modèles était nécessaire. À la suite de ce travail de synthèse, des pistes d'amélioration sont formulées. Elles seront l'objet de notre étude complémentaire.

Ensuite, toujours dans l'objectif d'améliorer les modèles et de formuler une solution luttant contre les inondations, une étude de sensibilité a été menée sur différents paramètres. Cette dernière a mis en évidence la nécessité d'utiliser un maillage plus fin et un modèle numérique de terrain le plus précis possible.

Notons également qu'une vérification des données de débit mesurées par le Service Public Wallon a engendré un grand questionnement. En effet, la mise en évidence d'un débordement de la Biesme en amont de la station de mesure limnimétrique imposait une étude détaillée de cette zone. Après quelques ajustements du

modèle numérique de terrain basés sur des mesures récentes et l'analyse probabiliste des débits maximums, nous étions en mesure de confirmer la validité des mesures du SPW.

Enfin, une proposition de solution limitant les inondations a été formulée. Cette solution consiste en une augmentation de la hauteur des digues de la Biesme. La digue perpendiculaire à la Biesme doit être relevée pour atteindre un niveau de $97[m]$ tandis que la digue bordant la Biesme doit être relevée jusqu'à $96,7[m]$. Cette solution n'empêche pas totalement les inondations de se produire, puisqu'un débordement légèrement plus conséquent qu'auparavant se produit en rive droite. Une piste d'amélioration est ouverte sur ce point précis et serait même souhaitable pour les habitants de la rue d'Oignies. Cependant, la zone affaissée de la rue Lambot est épargnée, ce qui n'est pas négligeable et répond donc en partie à l'objectif fixé au début de ce travail.

En conclusion, malgré le caractère extrême des évènements qui se sont produits en Juillet 2021, une solution a pu être formulée après révision de la première étude menée par M. Raison. Cette solution est-elle optimale ? Résiliente ? Durable ? Ces nombreuses questions restent ouvertes et se retrouveront tôt ou tard au coeur des recherches dans un monde luttant continuellement contre les effets néfastes d'une nature qui se déchaîne.

D'un point de vue personnel, je suis partiellement satisfait des résultats de ce travail. Tout d'abord parce qu'une solution a été trouvée pour empêcher les inondations telles que celles connues en Juillet 2021 mais aussi par la nature même du sujet. Connaissant quelques habitants de la zone, le sujet me tenait particulièrement à coeur. Cette satisfaction n'est pas totale car seule la rive gauche de la Biesme est épargnée. Cependant, toute une partie de l'étude ayant permis l'approbation des données utilisées, la porte reste ouverte pour un prolongement du travail avec comme objectif la protection des zones inondées en rive droite.

Annexe

Annexe A : Coefficients de Manning

Tableau des rugosités de Manning

Valeurs du coefficient n de Manning

Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
A) Canaux artificiels				
Ciment lissé	0,01	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,01	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moëllons bruts	0,017	0,02	0,025	0,03
Pierres sèches	0,025	0,03	0.033	0.035
Moëllons dressés	0.013	0.014	0.015	0.017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisse	0.011	0.012	0.013	0.015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0.0225	0.025	0.0275	0.030
Canaux en terre droits et uniformes	0.017	0.020	0.0225	0.025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0.025	0.030	0.033	0.035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0.035	0.040	0.045	-
Canaux en terre à larges méandres	0.0225	0.025	0.0275	0.030
Canaux en terre dragués	0.025	0.0275	0.030	0.033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0.028	0.030	0.033	0.035
B) Cours d'eau naturels				
1) Propres, rives en ligne droite	0.025	0.0275	0.030	0.033
2) Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0.030	0.033	0.035	0.040
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0.035	0.040	0.045	0.050
4) Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0.040	0.045	0.050	0.055
5) Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0.033	0.035	0.040	0.045
6) Idem 4, avec pierres	0.045	0.050	0.055	0.060
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0.050	0.060	0.070	0.080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0.075	0.100	0.125	0.150

FIGURE 6.4 – Tableau des coefficients de Manning [33].

Références

[1] Santé publique SPF. *Réchauffement planétaire*. Klimaat | Climat. URL : https://climat.be/changements-climatiques/changements-observes/rechauffement-planetaire (visité le 19/12/2023).

[2] Claire Villiers. *Infographie: De plus en plus de tempêtes et d'inondations au 21e siècle*. Statista Daily Data. 22 juin 2023. URL : https://fr.statista.com/infographie/30249/evolution-nombre-catastrophes-naturelles-evenements-meteo-extremes-europe-depuis-1923-par-type (visité le 19/12/2023).

[3] *Global damage costs from natural disasters*. Our World in Data. URL : https://ourworldindata.org/grapher/damage-costs-from-natural-disasters (visité le 19/12/2023).

[4] Amor Ben Labri. *Fig. 2. Diagramme de Mollier -Température de rosée en fonction de la...* ResearchGate. Jan. 2007. URL : https://www.researchgate.net/figure/Diagramme-de-Mollier-Temperature-de-rosee-en-fonction-de-la-temperature-de-lair_fig1_339337430 (visité le 19/12/2023).

[5] *Inondations de juillet 2021 en Belgique*. In : *Wikipédia*. Page Version ID: 209334931. 4 nov. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Inondations_de_juillet_2021_en_Belgique&oldid=209334931 (visité le 20/12/2023).

[6] Aliou Prins. *Voici ce qu'ont coûté les inondations de juillet 2021 en Wallonie*. Moustique. 28 jan. 2023. URL : https://moustique.lalibre.be/actu/belgique/2023/01/28/voici-ce-quont-coute-les-inondations-de-juillet-2021-en-wallonie-255675 (visité le 20/12/2023).

[7] Meteo Paris. *Actualités météo: Météo d'été maussade: nouvelle goutte froide pour cette mi-juillet 2021 12/07/2021*. URL : https://www.meteo-paris.com/actualites/meteo-d-ete-maussade-nouvelle-goutte-froide-pour-cette-mi-juillet-2021 (visité le 20/12/2023).

[8] RTBF Info. *Comprendre les inondations qui ont frappé la Belgique en 6 questions - Quel Temps !* 15 oct. 2021. URL : https://www.youtube.com/watch?v=cyDYvnk6piA (visité le 20/12/2023).

[9] IRM. *Bilan climatique mensuel Juillet 2021*. IRM. Juill. 2023. URL : https://www.meteo.be/resources/climatology/pdf/bilan_climatique_mensuel_202107.pdf (visité le 20/12/2023).

[10] *Aiseau-Presles*. In : *Wikipédia*. Page Version ID: 210695823. 19 déc. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Aiseau-Presles&oldid=210695823 (visité le 20/12/2023).

[11] *Carte complète : Belgique, rivières et bassins hydrographiques*. Enseignement.be. URL : http://www.enseignement.be//index.php?page=23827&do_id=3161 (visité le 20/12/2023).

[12]Maxime Raison. *Étude d'inondations dans la commune d'Aiseau-Presles, TFE.* 2022-2023.
[13]SPF Intérieur. *ICMS.* URL : https://icmsystem.be/cobrafr-BE/Account/LogOn?ReturnUrl=%2Fcobrafr-BE%2F (visité le 22/12/2023).
[14]*Les habitants de 6250 AISEAU-PRESLES 2.0 (Belgique) | Facebook.* URL : https://www.facebook.com/groups/645478125637521 (visité le 25/12/2023).
[15]*Fosses-la-Ville.* In : *Wikipédia.* Page Version ID: 210134651. 30 nov. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fosses-la-Ville&oldid=210134651 (visité le 26/12/2023).
[16]*Sambreville.* In : *Wikipédia.* Page Version ID: 209293258. 3 nov. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Sambreville&oldid=209293258 (visité le 26/12/2023).
[17]*Châtelet (Belgique).* In : *Wikipédia.* Page Version ID: 210718475. 20 déc. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Ch%C3%A2telet_(Belgique)&oldid=210718475 (visité le 26/12/2023).
[18]*Géoportail de la wallonie.* URL : http://geoportail.wallonie.be/home.html (visité le 26/12/2023).
[19]*Gestion des ouvrages de démergement.* IGRETEC. URL : https://www.igretec.com/fr/citoyen/eau/gestion-ouvrages-de-demergement/ (visité le 27/12/2023).
[20]O.Lienard L.Colinet (IGRETEC). *Inondations Juillet 2021 rue Lambot Aiseau-Presles.* 28/10/2021.
[21]S. Soares-Frazão. *LGCIV2051 Applied hydraulics : open-channel flows, Notes de cours.* 2021.
[22]*Athys - Accueil.* URL : http://www.athys-soft.org/ (visité le 01/01/2024).
[23]*Définition de Polygones De Thiessen | Dictionnaire SIG.* URL : https://support.esri.com/fr-fr/gis-dictionary/thiessen-polygons (visité le 01/01/2024).
[24]S. Soares-Frazão. *LGCIV2054 Numerical simulation of transient flows, Notes de cours.* 2021.
[25]Nathan Delpierre. *Modélisation numérique de l'écoulement à travers et sur une digue, TFE.* Université Catholique de Louvain, EPL, 2021-2022.
[26]*Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities.* URL : https://gmsh.info/ (visité le 02/01/2024).
[27]*Relief de la Wallonie - Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2013-2014.* URL : http://geoportail.wallonie.be/catalogue/6029e738-f828-438b-b10a-85e67f77af92.html (visité le 02/01/2024).
[28]*Lidar - comment fonctionne la technologie ?* Section: Zoom sur. 15 nov. 2021. URL : https://www.cadden.fr/fonctionnement-technologie-lidar/ (visité le 02/01/2024).

[29]Département des Landes. *Courbe de tarage*. URL : https://www.landes.fr/files/cg40/eau/ressources_eau15/fr_vivre_eau_cours_courbe_de_tarage.htm#:~:text=Une%20courbe%20de%20tarage%20permet,eau%20%C3%A0%20un%20instant%20donn%C3%A9. (visité le 02/01/2024).
[30]Nathan Delpierre et Charles Ryckmans. *LGCIV2055:Possible answers for possible questions for the oral examination*. Université Catholique de Louvain, EPL, 2020.
[31]S. Soares-Frazão. *LGCIV2055 Analysis and mitigation of floods, Notes de cours*. 2021.
[32]*Période de retour*. In : *Wikipédia*. Page Version ID: 209270000. 2 nov. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=P%C3%A9riode_de_retour&oldid=209270000 (visité le 02/01/2024).
[33]*Hydraulique appliquée - Tableau des rugosités de Manning*. URL : https://sites.uclouvain.be/didacticiel-hydraulique/Lecons/Lecon_II_1/Tableau_n.htm (visité le 02/01/2024).
[34]Jean-François Viot. *Les inondations ont-elles un lien avec le réchauffement climatique ?* RTBF. 17 août 2023. URL : https://www.rtbf.be/article/les-inondations-ont-elles-un-lien-avec-le-rechauffement-climatique-11241239 (visité le 19/12/2023).
[35]Unies Nations. *Principales constatations | Nations Unies*. United Nations. Publisher: United Nations. URL : https://www.un.org/fr/climatechange/science/key-findings (visité le 19/12/2023).
[36]*Dispositif de démergement*. URL : https://www.aide.be/demergement/dispositif-de-demergement (visité le 27/12/2023).
[37]*Sambre*. In : *Wikipédia*. Page Version ID: 209613017. 13 nov. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Sambre&oldid=209613017 (visité le 27/12/2023).
[38]Robert Eymard, Thierry Gallouët et Raphaèle Herbin. "Finite volume methods". In : *Handbook of Numerical Analysis*. T. 7. Solution of Equation in (Part 3), Techniques of Scientific Computing (Part 3). Elsevier, 1er jan. 2000, p. 713-1018. DOI : 10.1016/S1570-8659(00)07005-8. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570865900070058 (visité le 01/01/2024).
[39]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 01/01/2024).

[40] *Shallow water equations*. In : *Wikipedia*. Page Version ID: 1189353856. 11 déc. 2023. URL : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Shallow_water_equations&oldid=1189353856 (visité le 01/01/2024).

[41] *Analyse de sensibilité*. In : *Wikipédia*. Page Version ID: 196585274. 31 août 2022. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Analyse_de_sensibilit%C3%A9&oldid=196585274 (visité le 02/01/2024).

[42] *Lidar*. In : *Wikipédia*. Page Version ID: 208286166. 29 sept. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Lidar&oldid=208286166 (visité le 02/01/2024).

[43] *Capteurs LiDAR : définition, technologie, applications et solutions SICK | SICK*. URL : https://www.sick.com/fr/fr/sick-sensor-blog/capteurs-lidar-definition-technologie-applications-et-solutions-sick/w/blog-capteurs-LiDAR/#:~:text=Le%20LiDAR%20%C3%A9met%20des%20centaines,x%20Temps%20%C3%A9coul%C3%A9)%2F2. (visité le 02/01/2024).

[44] *Loi de Gumbel*. In : *Wikipédia*. Page Version ID: 205330944. 20 juin 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Loi_de_Gumbel&oldid=205330944 (visité le 02/01/2024).

[45] *Maximum de vraisemblance*. In : *Wikipédia*. Page Version ID: 207810951. 13 sept. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Maximum_de_vraisemblance&oldid=207810951 (visité le 02/01/2024).

[46] *Méthode des moments (statistiques)*. In : *Wikipédia*. Page Version ID: 207149560. 22 août 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%A9thode_des_moments_(statistiques)&oldid=207149560 (visité le 02/01/2024).

[47] *Loi log-normale*. In : *Wikipédia*. Page Version ID: 206439402. 28 juill. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Loi_log-normale&oldid=206439402 (visité le 02/01/2024).

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain
Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/epl**