

Étude de la gestion intégrée des risques d'inondation à Crupet

Auteur : Lambert, Emilien

Promoteur(s) : Degré, Aurore; 21062

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18034>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Étude de la gestion intégrée des risques d'inondation à Crupet

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE
L'OBTENTION DU DIPLOME DE BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT

Année académique 2022 - 2023

Promotrices :

Fonder Nathalie

Degré Aurore

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

Étude de la gestion intégrée des risques d'inondation à Crupet

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE
L'OBTENTION DU DIPLOME DE BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT

Année académique 2022 - 2023

Promotrices :

Fonder Nathalie

Degré Aurore

Organisme d'accueil

Ce travail a été réalisé au sein du Pôle de Gestion Intégrée des Cours d'Eau (PGICE) de l'administration de la province de Namur (Belgique). Avec une superficie de 3 666 km², la province de Namur est composée de 38 communes où résident un demi-million de personnes. À l'échelle du territoire wallon, les cours d'eau non navigables sont répartis en trois catégories en fonction des limites administratives et de la taille des bassins versants qu'ils drainent. En tant qu'entité provinciale, le PGICE est responsable de 1 350 km de cours d'eau de deuxième catégorie. Par ailleurs, il apporte son soutien aux communes pour 800 km de cours d'eau de troisième catégorie. L'ensemble de ces rivières abrite pas moins de 2 500 espèces protégées différentes.

Le PGICE est une équipe pluridisciplinaire composée de (bio)ingénieur·es, d'agents techniques, d'éco-cantonniers et de personnel administratif. Au quotidien, les missions attribuées au Pôle sont de (PÔLE PROVINCIAL DE GESTION INTÉGRÉE DES COURS D'EAU, 2022) :

- *« Maintenir et développer les actions limitant, dans la mesure du possible, les inondations de zones urbanisées et sensibles (protection des biens et des personnes). »*
- *Prendre des mesures favorisant l'hydromorphologie et la conservation (ou le développement) de la biodiversité en matière de gestion des cours d'eau non navigables.*
- *Renforcer le rôle de "conseiller technique" auprès des communes en matière d'appui technique à la gestion des cours d'eau non navigables. ».*

Remerciements

Lors de la réalisation d'un TFE, certains passages sont simples à rédiger, et d'autres sont plus complexes. S'il fallait la classer, la partie « remerciements » ferait partie du second groupe. Mais c'est le prix à payer lorsque l'on a la chance d'être bien entouré.

Je voudrais remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. C'était une réelle chance pour moi d'avoir intégré à deux reprises l'équipe « cours d'eau ». Je voudrais remercier Nathalie Fonder pour la confiance qu'elle m'a accordée, pour la relecture de ce travail et pour ses conseils. Mes remerciements vont également à Christophe Descamps qui a pris le temps de répondre à mes nombreuses questions, et qui m'a régulièrement partagé son savoir. Nos échanges ont été essentiels pour faire évoluer les réflexions présentées dans ce travail. Je remercie également Pascal Barbier de m'avoir accompagné à chaque reprise sur le terrain. Je suis également reconnaissant envers l'ensemble de mes collègues du ST³P, et spécialement le PGICE, pour leur accueil chaleureux. Merci à Clémentine Dor, Isuf Hoti, Laurence Matthews, Jean-Marc Porignaux, Fabrice Sonnet et Bénédicte Stouffs. Travailler dans votre équipe a été un réel plaisir pendant ces quelques mois. J'ai pu y découvrir l'envers de la gestion des rivières, et je n'oublierai pas l'ensemble des savoirs que vous m'avez dispensés.

Je remercie également ma co-promotrice, Aurore Degré, pour ses nombreux conseils avisés et ses relectures. Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à Pascal André qui a été pour moi une mine d'informations sur Crupet.

Ce travail est l'aboutissement de cinq belles années passées à Gembloux. En quittant « ces vieux murs de Gembloux », je me souviendrai de toutes ces belles rencontres et de ces nombreux souvenirs inoubliables. Merci à mes amis et amies de Gembloux, ils et elles se reconnaîtront !

Enfin, je ne remercierai jamais assez mes parents de m'avoir donné l'opportunité de faire ces études, et pour le soutien qu'ils m'ont apporté et qu'ils m'apportent encore aujourd'hui. Un grand merci également à Mathilde, ma sœur, pour son soutien indéfectible. Je souhaite lui exprimer ma reconnaissance, ainsi qu'à Antoine Williot, pour leur relecture soigneuse de ce travail. Enfin, je voudrais remercier ma copine, Anaïs Sion, pour sa relecture, mais surtout pour les quatre années que nous avons passées ensemble à Gembloux à se soutenir mutuellement.

Résumé

Depuis 1861, le village de Crupet (commune d'Assesse, Belgique) a été le siège d'une dizaine de crues et d'inondations. Avec une superficie de 36,2 km², le bassin versant est un territoire rural traversé par la rivière Crupet et ses cinq affluents. Ce travail, réalisé au sein du Pôle de Gestion Intégrée des Cours d'Eau (Province de Namur), tend à analyser la dynamique des inondations et à étudier le potentiel d'aménagements qui réduisent le risque d'inondation.

Un modèle hydrologique a permis l'obtention d'hydrogrammes de crue sur base d'une pluie simulée. Grâce au logiciel HEC-HMS, le bassin hydrographique a été segmenté en 48 sous-bassins connectés entre eux par 47 sections de rivières. Le modèle s'appuie sur la méthode SCS pour quantifier l'infiltration et le ruissellement de l'eau, et mime l'effet des rivières par la méthode de Muskingum-Cunge. Ensuite, des simulations hydrauliques d'inondations ont été développées avec le logiciel HEC-RAS. Une modélisation à deux dimensions a permis d'étudier les crues des ruisseaux de Crupet et de Vesse et de leurs plaines inondables. Le modèle, qui se base sur un relevé topographique, recouvre une zone de ± 8 ha discrétisée par des mailles de 3 m de côté en moyenne. Le bassin versant de Crupet n'étant pas jaugé, une calibration conjointe des modèles hydrologique et hydraulique a été menée au regard des données de l'inondation du 15 juillet 2021.

In fine, ce sont huit scénarios d'aménagement qui ont été testés dans le modèle HEC-RAS. Les résultats démontrent l'impact pernicieux de la reconstruction partielle ou totale du mur du château de Crupet sur les inondations. Certains aménagements s'avèrent être bénéfiques, comme la construction d'une zone d'immersion temporaire, la suppression d'un ancien seuil ou la modification de l'angle de confluence entre les ruisseaux de Vesse et de Crupet. En complément des considérations hydrauliques, le montant des dommages évités sur le bâti par l'implémentation de chaque aménagement a été estimé par le modèle INSYDE-BE. Pour la crue de juillet 2021, les mesures sélectionnées permettent d'éviter au total des dégâts allant de 1 600 € à 133 000 €.

Abstract

Since 1861, the village of Crupet (municipality of Assesse - Belgium) has been touched by about 10 overflows and inundations. The catchment basin is composed of a rural area of 36.2 km² where the river Crupet and its five tributaries flow. The present study was carried out by the *Pôle de Gestion Intégrée des Cours d'Eau*¹ of the Province of Namur. The aims of this work are the understanding of the flood dynamic and the study of some flood risk reduction measures.

A precipitation based hydrological model was developed in order to obtain hydrographs. Developed with the software HEC-HMS, the model is composed of 48 subbasins connected to each other by 47 rivers reaches. The SCS method was implemented to quantify the infiltration and the runoff processes, whereas the Muskingum-Cunge method is used to mimic the effect of river transportation. Then, some flood simulations were developed thanks to the software HEC-RAS. The two-dimensional model used simulates the overflow of the rivers Crupet and Vesce over the floodplains. The modelling, based on topographic data, is composed of three-meter-side meshes and covers an area of ± 8 ha. Since the catchment basin is ungauged, a joined calibration was done between the hydrological and hydraulic models for the flood event of 15th July 2021.

Eventually, eight scenarios of river modifications were implemented in the HEC-RAS model. The study showed the harmful effect of the total or partial wall reconstruction of the Crupet's castle wall. Some measures were beneficial to the flood risk reduction, like the construction of a temporary flooded area, the removal of a former threshold or the modification of the meeting angle of the rivers Crupet and Vesce. To go further than the hydraulic considerations, an economic estimation of the damages caused by floods to the buildings was conducted through the INSYDE-BE model. According to the event of July 2021, the implementation of flood reduction measures could lead to a total damage reduction, ranging from € 1,600 to € 133,000.

1. Team in charge of the river management.

Table des matières

Introduction	2
1 Enjeux de la gestion intégrée des risques	2
1.1 Contexte général	2
1.2 Définition du risque d'inondation	3
1.3 Cycle de gestion des risques d'inondation	4
2 Aménagement des cours d'eau	4
2.1 Principes directeurs	5
2.2 Panel de mesures	5
3 Analyse économique	6
4 Inondations à Crupet	7
4.1 Choix du site étudié	7
4.2 Historique des crues	7
Objectifs	10
Matériel et méthode	11
5 Description du bassin versant	11
6 Modèle hydrologique	15
6.1 Sous-bassins versants	16
6.1.1 Délimitation des sous-bassins versants	16
6.1.2 Fonction de production	16
6.1.3 Fonction de transfert	18
6.2 Routage	19
6.2.1 Méthode d'acheminement de l'écoulement	19
6.3 Précipitations	19
6.4 Transfert de bassin versant	20
6.5 Analyse de sensibilité	21
7 Modèle hydraulique	21
7.1 Choix du type de modèle	21
7.2 Données du modèle	23
7.2.1 Géométrie	23
7.2.2 Structures hydrauliques	25
7.2.3 Résistance à l'écoulement	25
7.2.4 Conditions limites	26
7.2.5 Équations de l'écoulement	27
7.3 Calibration	28
7.4 Modélisation des aménagements	28
7.4.1 Scénario 1 : situation actuelle	29
7.4.2 Scénario 2 : reconstruction du mur du château	29
7.4.3 Scénario 3 : reconstruction partielle du mur & émissaire de crue	30
7.4.4 Scénario 4 : reconstruction totale du mur & ouverture du gabarit	30
7.4.5 Scénario 4 bis (3 & 4 combinés) : reconstruction partielle du mur & ouverture du gabarit	31

7.4.6	Scénario 5 : modification de la confluence	31
7.4.7	Scénario 6 : zone d’immersion temporaire (ZIT)	31
7.4.8	Scénario 7 : suppression d’une chute	32
7.4.9	Scénario 8 : banquette végétalisée	33
8	Modèle économique	34
	Résultats	37
9	Modèle hydrologique	37
9.1	Délimitation des sous-bassins versants	37
9.2	Analyse de sensibilité	38
9.3	Hydrogrammes de crue	39
10	Calibration des modèles hydrologique et hydraulique	40
10.1	Ajustements conjoints des modèles	40
10.2	Méthode de transfert	41
10.2.1	Comparaison avec les débits estimés	42
11	Modèle hydraulique	43
11.1	Précipitations du 15 juillet 2021	43
11.1.1	Impacts des aménagements à l’échelle globale	43
11.1.2	Impacts des aménagements pour la section nord	46
11.2	Pluies synthétiques	46
12	Analyse économique	48
	Discussion	51
13	Limites des modèles hydrologique et hydraulique	51
13.1	Influence des données entrées	51
13.2	Calibration conjointe	52
13.3	Vérification des hydrogrammes	54
14	Pistes d’amélioration	54
15	Analyse des aménagements	55
15.1	Choix de l’évènement de référence	55
15.2	Analyse technico-économique des aménagements	55
15.3	Perspectives futures	57
	Conclusion	58
	Bibliographie	60
	Annexes	64
A	Modification des rivières depuis 1861	64
B	Schéma des fonctionnalités d’HEC-HMS	65
C	Tableau des fonctions de production	66

D	Tableau des fonctions de transfert	67
E	Tableau des méthodes de routage	69
F	Choix de la valeur de lambda	71
G	Données nécessaires pour la méthode de routage	71
H	Compléments sur la méthode de transfert	72
I	Explications sur les modèles 1D, 2D et 3D	75
J	Schéma de la modélisation Python de la ZIT	76
K	Carte des débits de plein bord	77
L	Informations complémentaires sur les zones d'immersion temporaires	78
M	Comparaison aux valeurs de CN de GISER	78
N	Précipitations et hydrogrammes des pluies synthétiques	79
O	Carte des répartitions des hauteurs d'eau pour chaque scénario	80
P	Carte de l'aléa d'inondation	89
Q	Coefficients d'écoulement du Leignon	90

Table des figures

1	Carte générale du centre de Crupet.	1
2	Cycle de gestion des inondations du PGRI (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023b).	4
3	Les 9 principes d'aménagement du programme <i>Ruimte voor de rivier</i> (ROSSANO & BORDES-PAGÈS, 2016).	6
4	Extrait de la carte présentant l'étendue des inondations de septembre 2014 (BERNIER, 2014).	8
5	Carte du réseau hydrographique du Crupet et de ses affluents.	11
6	Diagramme de l'occupation du sol basé sur la carte Walous 2018 (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).	12
7	Groupes d'occupation du sol basés sur la carte Walous 2018 (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).	12
8	Carte numérique des sols de Wallonie (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).	13
9	Carte de la géologie karstique (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).	14
10	Carte des pentes (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).	14
11	Liens entre le modèle hydrologique et hydraulique (HINGRAY et al., 2014).	15
12	Diagramme récapitulatif du modèle HEC-HMS réalisé.	16
13	Présentation des pluies synthétiques SCS type 1, 1A, 2 et 3 (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2022b).	20
14	Comparaison des modèles hydrodynamiques 1D, 2D et 3D (GLOCK et al., 2019).	21
15	Diagramme récapitulatif du modèle HEC-RAS.	22
16	Capture d'écran des données topographiques extraites du <i>3D Viewer</i> d'HEC-RAS.	23
17	Carte de la zone modélisée par le modèle HEC-RAS.	23
18	Capture d'écran du maillage 2D créé sur HEC-RAS.	24
19	Exemple de coupe de la face d'un pont.	25
20	Capture d'écran des classes d'occupation du sol dans HEC-RAS.	26
21	Schéma du scénario 1 : situation actuelle.	29
22	Schéma du scénario 2 : reconstruction du mur du château.	29
23	Schéma du scénario 3 : reconstruction partielle du mur & émissaire de crue.	30
24	Schéma du scénario 4 : reconstruction totale du mur & ouverture du gabarit.	30
25	Scénario 4 : coupe transversale du lit de la rivière (en bleu la topographie actuelle, en gris la topographie modifiée).	30
26	Schéma du scénario 5 : modification de la confluence - Largeur de fond 1,1 m – Pente en rive gauche 4/4 et droite 8/4.	31
27	Scénario 5 : coupe transversale dans le canal créé.	31
28	Emprise de la digue de la ZIT et étendue inondée (données fournies par C. Descamps).	32
29	Schéma du scénario 7 : suppression d'une chute à l'aval d'un pont.	33
30	Scénario 7 : coupe transversale dans le canal créé (en bleu la topographie actuelle, en gris la topographie modifiée).	33
31	Schéma du scénario 8 : banquettes végétalisées.	33
32	Scénario 8 : coupe transversale dans la banquettes (en bleu la topographie actuelle, en gris la topographie modifiée).	33
33	Capture d'écran du modèle HEC-HMS.	37
34	Carte des sous-bassins versants et des tronçons de rivière obtenus avec HEC-HMS.	38
35	Analyse de sensibilité du débit de pointe pour la pluie du 15 juillet 2021.	38
36	Analyse de sensibilité des volumes à l'exutoire pour la pluie du 15 juillet 2021.	38
37	Hydrogrammes associée à la pluie du 15 juillet 2021.	39

38	Hydrogrammes d'entrée et de sortie de la ZIT, et hydrogramme de crue à l'entrée du village.	40
39	Comparaison des hydrogrammes du ruisseau de Crupet (à l'entrée du village) avec et sans l'implémentation d'une ZIT.	40
40	Précipitations cumulées extraites du pluviomètre de Ciney pour quatre événements majeurs.	42
41	Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 2 - reconstruction totale du mur.	44
42	Carte des zones inondées pour diverses pluies de période de retour.	47
43	Exemple de fonctions de dommage (en considérant une vitesse d'écoulement de 0,5 m/s).	48
44	Répartition spatiale des précipitations cumulées du 13 au 16 juillet 2021 (INSTITUT ROYAL MÉTÉOROLOGIQUE, 2023b).	51
45	Schéma descriptif des phénomènes karstiques (BAKALOWICZ, 1999).	53
46	Capture d'écran de la répartition des hauteurs d'eau lors de la reconstruction totale du mur du château.	56
47	Schéma des méthodes implémentables dans HEC-HMS (DARBANDSARI & COULIBALY, 2020).	65
48	Carte du réseau hydrographique du Bocq (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).	72
49	Cartes de comparaison du karst dans la vallée du Crupet (à gauche) et du Leignon (à droite).	74
50	Diagramme du fonctionnement du code Python simulant l'effet d'une Zone d'Immersion Temporaire (ZIT).	76
51	Carte des débits de plein bord (débit maximal avant débordement).	77
52	Coupe transversale de la digue de la ZIT.	78
53	Précipitations cumulées des différentes pluies synthétiques.	79
54	Hydrogrammes de crue pour le ruisseau de Crupet pour diverses périodes de retour de pluies.	79
55	Hydrogrammes de crue pour le ruisseau de Vesse pour diverses périodes de retour de pluies.	79
56	Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 1 - situation actuelle.	80
57	Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 2 - reconstruction totale du mur.	81
58	Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 3 - reconstruction partielle du mur et émissaire de crue.	82
59	Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 4 - élargissement du gabarit de la rivière & émissaire de crue.	83
60	Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 4 bis - combinaison des scénarios 3 & 4.	84
61	Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 5 - modification de la confluence.	85
62	Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 6 - zone d'immersion temporaire.	86
63	Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 7 - suppression de la chute.	87
64	Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 8 - création d'une banquette.	88
65	Carte de l'aléa d'inondation par débordement des cours d'eau et par ruissellement en vigueur (MB : 24/03/2021)(SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).	89

Liste des tableaux

1	Valeur de Peak Rate Factor (PRF) en fonction de la pente (CAHYONO & ADIDARMA, 2019).	18
2	Résumé des paramètres à introduire dans le modèle INSUDE-BE.	35
2	Résumé des paramètres à introduire dans le modèle INSUDE-BE.	36
3	Estimation des débits du Crupet au pic de crue par la méthode de transfert sur base de quatre évènements mesurés sur le Leignon.	41
4	Résultats des débits au pic de crue avec et sans utilisation de la méthode de ratio.	42
5	Résultats des scénarios de 1 à 6.	45
6	Résultats des scénarios de 7 et 8.	45
7	Coûts des dommages totaux estimés avant et après la réalisation d'aménagements au regard de la crue du 15 juillet 2021.	49
8	Coûts de mise en œuvre des aménagements (HTVA) et Retour Sur Investissement (RSI).	50
9	Synthèse des fonctions de production (<i>Loss Method</i>) disponibles dans HEC-HMS.	66
10	Synthèse des fonctions de transfert (<i>Transform Method</i>) disponibles dans HEC-HMS.	67
11	Synthèse des méthodes de routage (<i>Routing Method</i>) disponibles dans HEC-HMS.	69
12	Comparaison des superficies relatives allouées à diverses classes d'occupation du sol pour le Leignon et le Crupet.	73
13	Comparaison des classes de répartition des pentes du Leignon et du Crupet.	73
14	Comparaison des groupes hydrologiques du Leignon et du Crupet.	74
15	Analyse de sensibilité du paramètre alpha.	75
16	Comparaison des valeurs moyennes de CN du modèle HEC-HMS et des cartes GISER.	79
17	Résultats des coefficients d'écoulement pour la crue du 15 juillet 2021.	90

Introduction

1 Enjeux de la gestion intégrée des risques

1.1 Contexte général

À l'image des vaisseaux sanguins chez les êtres humains, les cours d'eau sont les « artères de notre territoire ». Les plaines alluviales sont des endroits privilégiés pour l'établissement des activités humaines. Au cours de l'histoire, les hommes et les femmes ont pu tirer profit de la rivière pour se nourrir, circuler ou encore marchander. Mais les êtres humains ont également dû se protéger contre les « méfaits de l'eau » (LÉVÊQUE, 2019). C'est dans ce contexte de relation « duelle » que s'inscrit la gestion des risques d'inondation.

Les crues, malgré leur caractère initialement naturel, restent souvent dommageables pour les activités humaines. Depuis 1980, pas moins de 1 500 événements d'inondations se sont déroulés en Europe, causant la mort d'environ 4 300 personnes (EUROPEAN COMMISSION, 2023). Annuellement, 166 000 Européen·nes sont victimes d'inondations, ce qui engendre une facture de 7,6 milliards d'euros. Dans le contexte du dérèglement climatique, si les températures augmentent de 3 °C, les dégâts pourraient atteindre 44 milliards d'euros par an en Europe (DOTTORI et al., 2023).

Depuis plusieurs décennies, la vulnérabilité des êtres humains face aux inondations s'est accrue pour diverses raisons. À l'échelle de la rivière, elle est la conséquence de la rectification du tracé des cours d'eau et de la réduction de leur gabarit (HABERSACK et al., 2015). Dans ces zones, l'urbanisation s'est largement développée puisque les terrains s'y vendent à un moindre coût. Les rivières, qui transportent l'eau dans le paysage, ne constituent qu'une facette de l'adversité. En effet, la problématique des inondations concerne l'ensemble des bassins versants comme ils sont le siège de la « production » de l'eau (DEGOUTTE, 2012). Les bassins hydrographiques sont principalement impactés par les modifications de l'occupation du sol et les changements climatiques (HABERSACK et al., 2015). Le remplacement des prairies par des zones agricoles représente l'une des plus grandes transformations (DEGOUTTE, 2012).

Par définition, la gestion intégrée des risques d'inondation a pour objectif de « *réduire les nuisances des inondations en combinant des mesures de protection structurelles et non structurelles* ». Les mesures dites « structurelles », comme les digues, n'offrent qu'une protection partielle et insuffisante contre les inondations. Depuis quelques années, la gestion intégrée des inondations s'est également inspirée des mesures « non structurelles », voire de solutions qualifiées de « mixtes ». Les mesures non structurelles s'inspirent de la protection et/ou de la restauration des plaines alluviales. Selon cette approche, les améliorations hydromorphologiques ne sont pas simplement appréciées pour leurs propriétés hydrauliques et hydrologiques, mais également pour leurs considérations écologiques, économiques, sociales et paysagères (HABERSACK et al., 2015 ; ERNST et al., 2010). L'implémentation de mesures variées requiert une vision holistique afin de tirer profit des bénéfices qu'elles peuvent apporter. À cet égard, la publication de la directive européenne « Inondation » a été un tremplin pour la gestion intégrée et durable des bassins versants (HABERSACK et al., 2015).

Dans une majorité de cas, les enjeux liés aux rivières sont complexes, variés, et parfois antagonistes. Une approche intégrée des risques d'inondation appelle à la connaissance des propriétés du bassin versant et des caractéristiques hydrauliques (hauteurs d'eau, vitesse d'écoulement) (HABERSACK et al., 2015). Les simulations numériques sont un outil sur lequel il est possible de se baser afin d'atteindre un équilibre entre les parties prenantes. Les aménagements sont préalablement testés afin de connaître leurs impacts. Les modélisations sont intéressantes pour « *la prévention des crues, la réalisation de cartes des dangers, la régulation des cours d'eau et des lacs et le dimensionnement des cours d'eau* » (ROUSSELOT et al., 2012). Certains modèles² permettent également de comprendre les interactions hydrodynamiques entre les plaines alluviales et le lit mineur³ (ERNST et al., 2010).

1.2 Définition du risque d'inondation

Selon la Directive européenne relative à l'évaluation et la gestion des risques d'inondation, une inondation est la « *submersion temporaire par l'eau de terres qui ne sont pas submergées en temps normal* ». Parmi les cas de figure s'y référant, il y a les « *crues des rivières, des torrents de montagne et des cours d'eau intermittents méditerranéens ainsi que les inondations dues à la mer* »⁴ (PARLEMENT EUROPÉEN & CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE, 2007). Dans le contexte fluvial, une inondation correspond donc au débordement de la rivière hors de son lit mineur (HINGRAY et al., 2014).

Par définition, le **risque d'inondation est à la conjoncture, d'une part, de la probabilité d'une inondation et, d'autre part, des impacts potentiels sur la santé humaine, l'environnement, le patrimoine culturel et l'activité économique**. Il est dès lors nécessaire de distinguer les inondations, qui sont des phénomènes naturels, du risque d'inondation, qui lui dépend des potentielles conséquences d'une inondation sur les humains et sur leurs activités (PARLEMENT EUROPÉEN & CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE, 2007).

Du point de vue des probabilités d'occurrence, les changements climatiques tendent à augmenter la probabilité des événements de crue en Europe (PARLEMENT EUROPÉEN & CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE, 2007). Postérieurement aux importantes inondations de juillet 2021 subies en Belgique et en Allemagne, le groupe de travail *World Weather Attribution* a distingué différentes conséquences des changements climatiques en Europe de l'Ouest. Pour des précipitations estivales d'une durée maximale de deux jours, l'intensité croît de 3 à 19 % dans les conditions actuelles par rapport à un climat 1,2 °C plus froid. Dans les mêmes conditions, la fréquence des événements tels que vécus en juillet 2021 est multipliée par un facteur allant de 1,9 à 9 (WORLD WEATHER ATTRIBUTION, 2021).

Concernant le risque d'inondation, il est accru notamment à cause de l'implantation d'activités humaines dans les plaines inondables. Il en résulte une réduction de leur capacité de rétention (PARLEMENT EUROPÉEN & CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE, 2007). L'exemple des inondations de juillet 2021 souligne la vulnérabilité à laquelle la population riveraine de la Meuse et de certains de ses affluents est exposée. En Europe de l'Ouest, plus de 200 personnes y ont laissé leur vie (WORLD WEATHER ATTRIBUTION, 2021), dont 39 en Belgique (BIARD, 2022). Toujours en Belgique, environ 100 000 personnes ont été sinistrées, dont 31 564

2. Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité, du moins de certains processus, sous forme d'équations mathématiques.

3. Le lit mineur est la partie comprise entre les berges où l'écoulement se fait la plupart du temps. Le lit majeur est la zone occupée par le cours d'eau lorsqu'il déborde (OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU & OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ, 2023).

4. Les inondations dues au débordement des réseaux d'égouttage sont exclues de cette définition.

logements, 2 624 bâtiments d'entreprises, 185 installations sportives, 119 écoles, 58 bâtiments administratifs communaux et 96 kilomètres de voiries (BIARD, 2022). Sans compter l'ensemble des pertes intangibles telles que les traumatismes psychologiques vécus par la population locale, les pertes irremplaçables, l'appauvrissement de quartiers touchés, etc. (ERNST et al., 2009).

1.3 Cycle de gestion des risques d'inondation

Au niveau européen, l'évaluation et la gestion des risques d'inondation est coordonnée par la Directive « Inondation » (2007/60/CE). Chaque État membre implémente la Directive en trois phases basées sur un cycle de six ans. Les étapes consistent à (PARLEMENT EUROPÉEN & CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE, 2007) :

- Évaluer le risque d'inondation sur le territoire (grâce aux historiques, aux études préalablement menées).
- Cartographier le risque (pour des scénarios de faibles, moyennes et hautes probabilités).
- Mettre en place les Plans de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) pour lesquels sont définies des mesures appropriées.

La Wallonie avait pris les devants dès 2003 avec le plan « Pluies », quelques années avant la publication de la Directive inondation (en 2007). La Wallonie comporte 4 districts hydrographiques internationaux qui sont la Meuse, l'Escaut, la Seine et le Rhin. L'élaboration des Plans de Gestion de Risques d'Inondation (PGRI) s'articule autour de quatre phases qui sont décrites en Figure 2 (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023b).

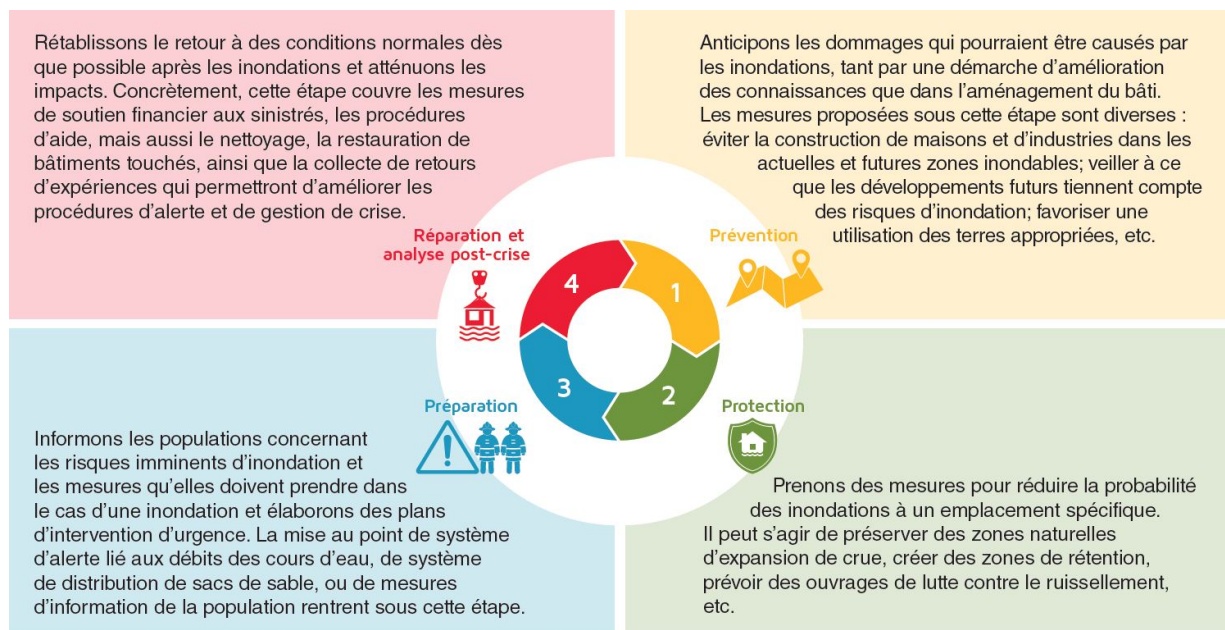


FIGURE 2 – Cycle de gestion des inondations du PGRI (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023b).

2 Aménagement des cours d'eau

La réduction des impacts liés aux inondations peut être approchée selon trois axes. Le premier consiste à atténuer les caractéristiques des inondations à l'aide d'aménagements. Ces ajustements impliquent la construction de digues, de murs, de zones d'expansion de crue (artificielles ou naturelles), etc. qui sont généralement installés par le gestionnaire du cours d'eau. La deuxième stratégie est une réduction de l'exposition au risque. Pour ce faire, une planification

spatiale permet de gérer l'occupation du sol du bassin versant. Une troisième tactique vise à accroître la capacité d'adaptation de la société. Dans ce cas, les mesures sont nombreuses et variées, telles que la création de plans d'urgence, la sensibilisation au risque d'inondation, la mise en place d'outils de support financier aux personnes sinistrées, etc. (ERNST et al., 2009). Dans le présent travail, seule l'approche d'atténuation des caractéristiques des inondations est abordée.

2.1 Principes directeurs

La gestion des risques d'inondation consiste en la réduction des risques, ce qui implique de travailler autant sur la probabilité que sur leurs potentielles conséquences (ERNST et al., 2009). Les aménagements visant à réduire le risque s'implémentent tout aussi bien à l'échelle du lit de la rivière qu'à l'entièreté du bassin versant, mais ce dernier aspect sort du champ d'action attribué au PGICE.

Les principes clés pour l'aménagement du lit des cours d'eau se basent sur deux approches totalement antagonistes :

- **Augmenter la capacité d'écoulement** : cette stratégie consiste à « calibrer » le lit mineur du cours d'eau, c'est-à-dire à accroître sa taille. La rivière a la capacité de contenir davantage d'eau avant de dépasser le niveau de plein bord. Dans des milieux urbanisés, un endiguement peut être prodigué en dressant des digues le long des parcelles riveraines. Une autre approche, la restauration du lit mineur, favorise la gestion de l'environnement. Pour ce faire, la végétation et les arbres qui font obstacle à l'écoulement sont retirés. Il est important de remarquer que les actions ici-discutées réduisent le risque d'inondation sur le tronçon, mais peuvent cependant aggraver la situation à l'aval (DEGOUTTE, 2012).
- **Ralentir l'écoulement dans les lits mineurs et majeurs** : le ralentissement dynamique de la crue permet de décaler les pics de crue (entre plusieurs ruisseaux par exemple) et d'éviter qu'ils ne se combinent. Cet objectif peut être atteint en augmentant la rugosité du lit du cours d'eau, en aménageant des seuils, en supprimant localement des digues, en plaçant des haies perpendiculairement à l'écoulement, etc. L'optique ici-visée se prête à des endroits où l'accroissement des inondations (en hauteur et en durée) sera moins préjudiciable (DEGOUTTE, 2012).

Dans tous les cas, il est important de garder en tête que « *pour inonder moins quelque part, il faut inonder plus ailleurs* » (DEGOUTTE, 2012).

2.2 Panel de mesures

Du point de vue pratique, les mesures mises en place par les gestionnaires de rivières pour réduire le risque d'inondation sont multiples, variées, et dépendantes du contexte local. De 2007 à 2016, le programme néerlandais *Ruimte voor de rivier (RVR)*⁵ a identifié neuf mesures clés, à utiliser individuellement ou à combiner (cf. Figure 3). Ces mesures visent à diminuer le risque tout en garantissant la qualité des projets au niveau écologique, économique, social et paysagé. L'angle pris par le projet RVR n'était pas simplement hydraulique, mais plutôt multifonctionnel puisque les terres sont rares et précieuses. Les exigences de protection s'allient avec l'amélioration du cadre de vie, la renaturation des rivières, l'intégration des loisirs, de l'agriculture, de l'urbanisme, etc. (ROSSANO & BORDES-PAGÈS, 2016).

5. « De l'espace pour la rivière » (traduction libre).

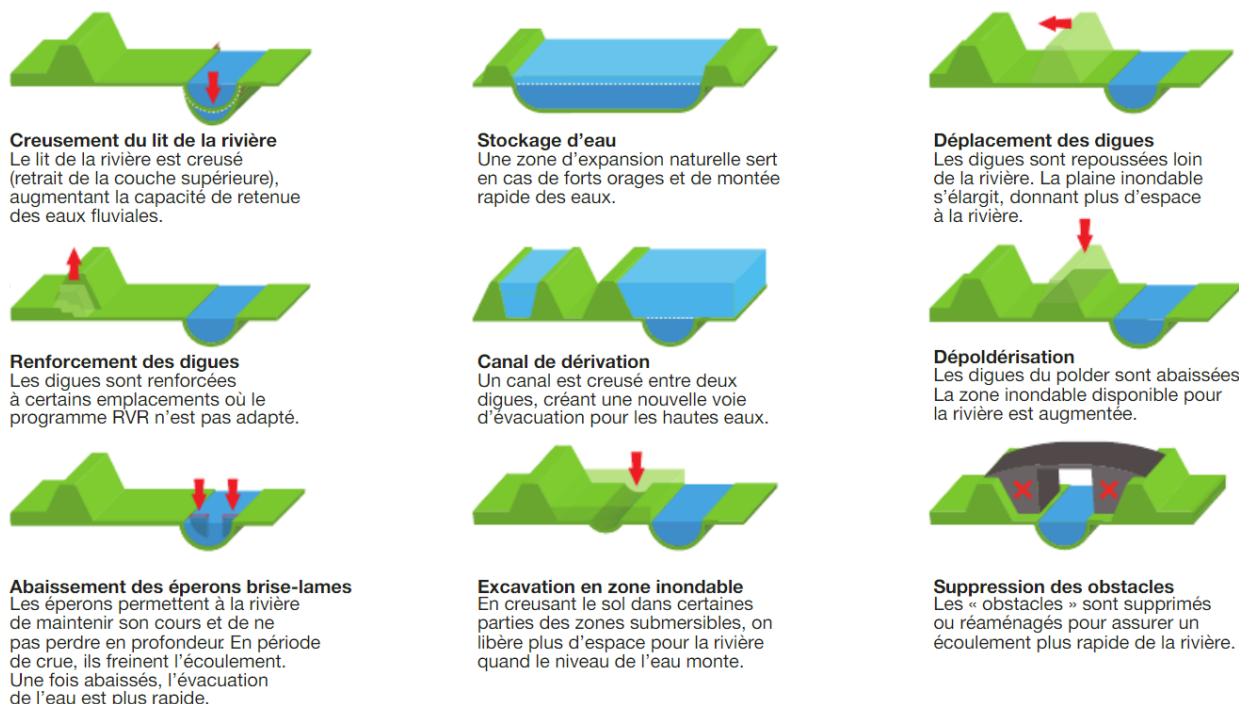


FIGURE 3 – Les 9 principes d'aménagement du programme *Ruimte voor de rivier* (ROSSANO & BORDES-PAGÈS, 2016).

3 Analyse économique

En tant que gestionnaire de cours d'eau, le PGICE est amené à mettre en place des mesures visant à réduire le risque d'inondation. Comme les ressources sont limitées, la question des bénéfices retirés par rapport aux coûts des aménagements investis reste primordiale. Dans la pratique, le coût des dommages évités est une donnée inconnue par la Province. Dans ce contexte, le PGICE est demandeur d'outils qui permettraient de mener une analyse économique de leurs projets.

Dans la littérature, la quantification des coûts liés aux inondations a fait l'objet de nombreuses recherches, et particulièrement du point de vue domestique. Le développement de tels modèles reste complexe, soit à cause du manque de données qualitatives caractérisant les inondations, soit à cause de la difficulté de transposer un modèle d'une région à une autre (SCORZINI et al., 2022). Dans son article « *INSYDE-BE : adaptation of the INSYDE model to the Walloon region (Belgium)* », Scorzini et al. (2022) présentent le modèle INSYDE-BE, qui estime les coûts des dommages domestiques liés aux inondations. Adapté à la Wallonie, ce modèle synthétique et multivariable détaille les dommages selon diverses composantes :

- Le nettoyage (pompage, nettoyage, déshumidification, élimination des déchets).
- L'enlèvement (pavement, sol, plinthes, plaques de plâtre, finitions extérieures, portes, fenêtres, chaudière).
- Les travaux non structurels (remplacement du revêtement de sol et des plaques de plâtre).
- Les travaux structurels (consolidation du sol, réparations locales, réparation des piliers).
- Les finitions (finitions extérieures, plâtre intérieur, peinture extérieure et intérieure, pavement, remplacement des plinthes).
- Les portes et fenêtres (remplacement).

- Les équipements (remplacement de la chaudière, du système électrique, de la plomberie et peinture des radiateurs).

Le coût associé à chaque composante est calculé comme suit :

$$C_{ij} = ext_{ij} \cdot up_{ij} \cdot r_{ds} \quad (1)$$

Avec :

- ext_{ij} , l'étendue des dommages (en m² par exemple).
- up_{ij} , le prix unitaire du matériau concerné (prix/m²).
- r_{ds} , un facteur associé au mécanisme de dommage modélisé. Un choix doit être posé entre (1) des données statistiques, (2) des données virtuelles et enquêtes (3) des analyses synthétiques (4) de la littérature grise.

Les fonctions de dommage se basent sur 23 variables explicatives, dont 6 sont liées aux aléas (hauteur d'eau interne et externe, vitesse du fluide, durée de l'inondation, présence de sédiments, contamination de l'eau) et 17 aux caractéristiques propres aux bâtiments (surface extérieure et intérieure, périmètre extérieur, type de bâtiment, niveau de maintenance, etc.). Pour chaque bâtiment, les dommages totaux sont la somme des différentes composantes :

$$D = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} \quad (2)$$

4 Inondations à Crupet

4.1 Choix du site étudié

Au travers de ses missions, le PGICE a été interpellé à plusieurs reprises concernant des crues et inondations sur la rivière Crupet et ses affluents (voir Sous-section 4.2). Des actions d'entretien y sont menées régulièrement, ainsi que certaines améliorations (notamment concernant des ponts). La Province reste toutefois demandeuse d'une étude générale et transversale afin d'aller plus loin dans la gestion des inondations. L'envergure du projet, qui est relativement localisée, permet de mener cette étude en interne. De plus, la situation du village de Crupet offre une marge de manœuvre assez large, qui permet d'envisager différents aménagements à la portée du PGICE. Toutes ces raisons ont mené à l'élaboration de la présente étude.

4.2 Historique des crues

Le premier document évoquant des inondations à Crupet date de 1861, avec « 1861 l'année du grand orage » (COLLOT, 1920). Le 10 juin de ladite année, le fond du village est ravagé par les eaux, et de nombreuses personnes, fermes et moulins sont touchés. Postérieurement, en 1910, un courrier provincial fait référence à des subsides octroyés des suites d'une inondation, sans toutefois décrire son ampleur. Le village de Crupet est une nouvelle fois touché par les eaux en 1961 et en 1980. Le lâcher des eaux par l'Intercommunale des Eaux aurait mené aux inondations du 31 janvier 1961 (BERNIER, 2014).

En 1993, 1995 et 2011, la rivière est une nouvelle fois sortie de son lit, mais le débordement s'est limité à recouvrir les routes. Il est probable que ces crues hivernales soient la résultante de pluies qui se sont combinées à la fonte des glaces. En juin 2006, des débordements sont provenus uniquement du Ry de Vesse.

Ensuite, le 20 septembre 2014, la station de mesure de Vivaqua⁶ enregistre une précipitation de 57,2 mm⁷ en deux heures. Cette pluie correspond à une période de retour⁸ de 130 ans. La zone de captage de Vivaqua se retrouve sous eaux après que le pertuis canalisant les eaux du Crupet a atteint son niveau de saturation. Dans diverses habitations de la rue Basse (voir Figure 4), l'eau massivement chargée en sédiments s'est engouffrée sur une hauteur de plusieurs dizaines de centimètres. Au niveau de la confluence entre le ruisseau de Crupet et de Vesse⁹, l'eau a pratiquement atteint la tête du mur du château, son niveau étant entre 1,8 m et 2 m supérieur à la hauteur d'eau habituelle (BERNIER, 2014).

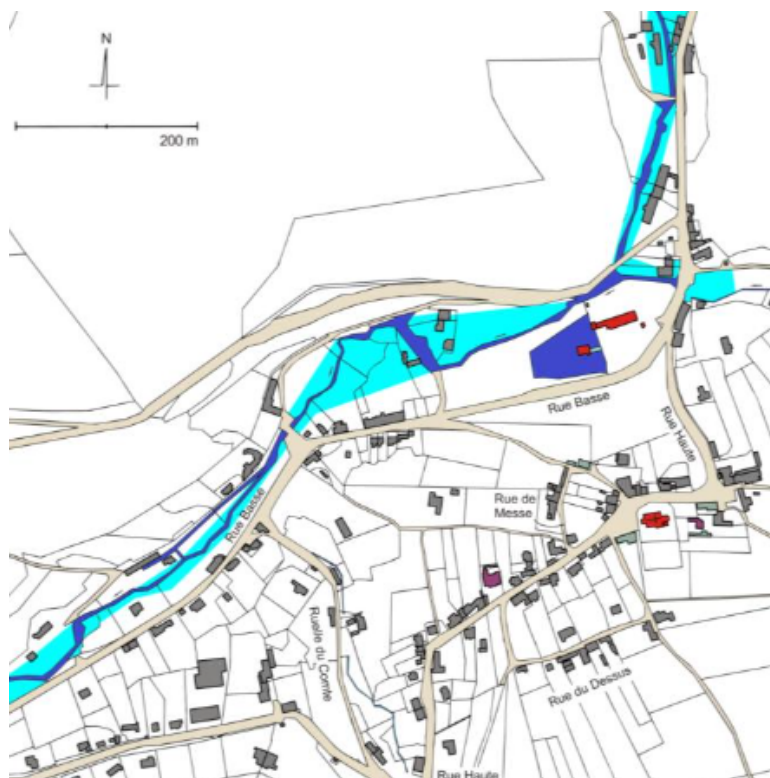


FIGURE 4 – Extrait de la carte présentant l'étendue des inondations de septembre 2014 (BERNIER, 2014).

La dernière inondation en date a touché Crupet le 15 juillet 2021 au matin. Du 13 juillet 12h jusqu'au 17 juillet 12h, les précipitations mesurées ont été de l'ordre de 139 mm (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023c)¹⁰. En comparaison à la table Intensité-Durée-Fréquence (IDF) établie pour la commune d'Assesse, la période de retour associée est supérieure à 200 ans (INSTITUT ROYAL MÉTÉOROLOGIQUE, 2023a).

Le 15 juillet, entre 4 et 5 heure du matin, la crue est telle que les premières maisons sont touchées. En amont du château, les hauteurs d'eau dans le rez-de-chaussée des habitations montent à 70-80 cm, voire jusqu'à 120 cm à certains endroits. Vers 6h40, une partie du mur encerclant le château est submergée et cède sur un linéaire de dix mètres. L'eau s'engouffre ensuite par la brèche et rejoint la plaine où se trouvent les étangs du château. Quelques minutes après la

6. Vivaqua est une société coopérative de distribution d'eau potable dans la Région de Bruxelles.

7. 1 mm précipité correspond à 1 l/m².

8. « Moyenne à long terme du temps ou du nombre d'années séparant une crue [ou une précipitation] de grandeur donnée d'une seconde d'une grandeur égale ou supérieure » (OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU & OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ, 2023). Du point de vue des statistiques, un événement d'une période de retour de 100 ans à 1 chance sur 100 de se produire chaque année.

9. La localisation des éléments est présentée dans la carte en page 1.

10. Données provenant de la station de mesures (8 138) située sur le site de Vivaqua à Crupet.

rupture du mur, le niveau d'eau amont décroît de 50 à 60 cm. En aval du château, l'onde de crue s'est propagée et a inondé quelques maisons (BERNIER, 2021).

L'ensemble des modifications anthropiques constatées sur les cours d'eau de Crupet depuis 1861 sont synthétisées en Annexe A.

Objectifs

La présente étude s'inscrit dans la mission de gestion des risques d'inondation du Pôle de Gestion Intégrée des Cours d'Eau. L'objectif général poursuivi par ce travail est de comprendre la dynamique des inondations à Crupet et d'étudier la mise en place d'aménagements sur les rivières du village afin de réduire le risque d'inondation.

Ce mémoire implique de rassembler, informer, sensibiliser tous les intervenants concernés (administration communale, population locale, Vivaqua, etc.). Il est également nécessaire d'évaluer les débits de crue (et leur hydrogramme correspondant) pour le bassin versant de Crupet avec une méthode applicable à des superficies comprises entre 100 et 5 000 ha. Ensuite, les zones inondées sont déterminées par une modélisation à deux dimensions développée sur HEC-RAS, dont la calibration sur base de données disponibles.

Après, des aménagements potentiels visant à réduire le risque d'inondation sont proposés. Leur pertinence est vérifiée au travers du modèle HEC-RAS. En complément, une analyse coûts-bénéfices est menée pour chaque aménagement envisagé. Enfin, des instructions sont fournies pour dresser les plans, les métrés et les cahiers de charges nécessaires aux marchés publics.

Matériel et méthode

5 Description du bassin versant

L'étude réalisée dans le cadre du présent travail porte sur les rivières du village de Crupet, qui se trouve dans l'entité d'Assesse (province de Namur - Belgique). Les cours d'eau considérés sont le Crupet et ses cinq affluents majeurs qui sont présentés en Figure 5. Le Crupet est lui-même un affluent du Bocq (cours d'eau de 1^{ère} catégorie), ce dernier fait partie du bassin hydrographique de la Meuse (sous-bassin de la Meuse Amont). Le bassin versant de Crupet, jusqu'à sa rencontre avec le Bocq, a une superficie de 36,17 km².

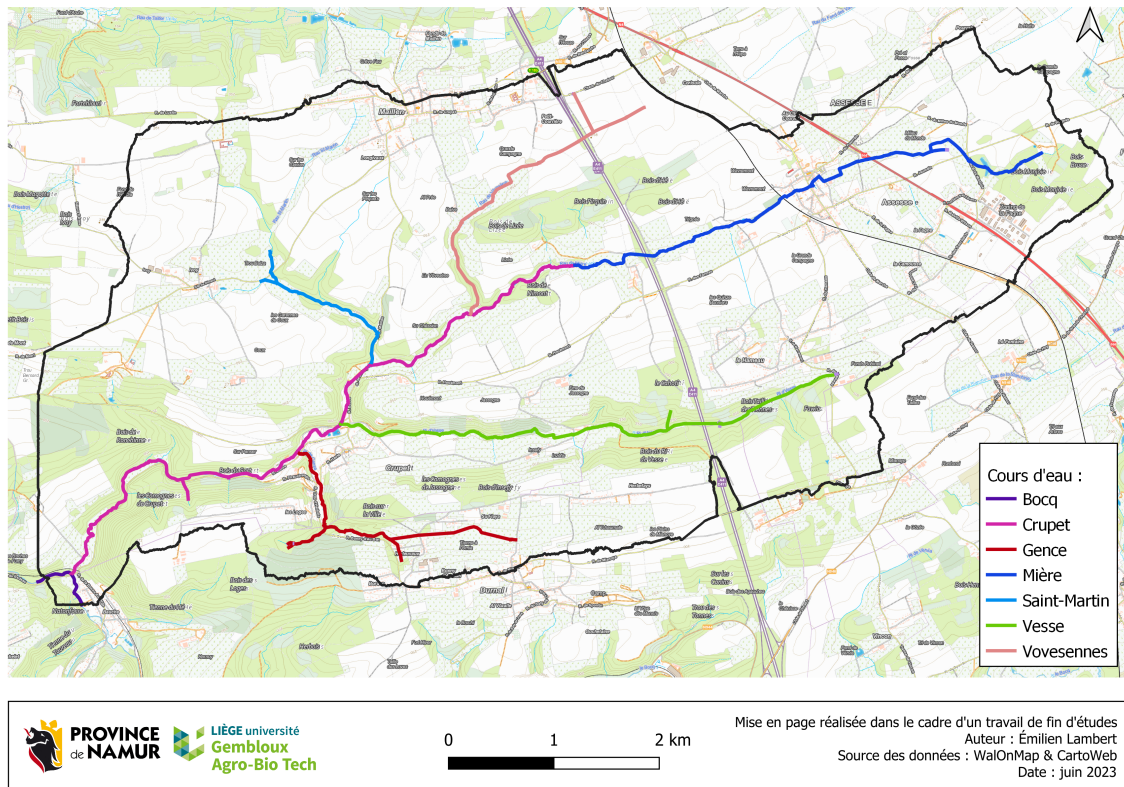


FIGURE 5 – Carte du réseau hydrographique du Crupet et de ses affluents.

Dans la localité de Crupet, l'agriculture occupe 41 % des terres et les prairies 27 %. Les forêts, pour leur part, représentent 18 % du territoire. Les parcelles bâties occupent moins de 10 % du bassin versant. Les autres classes d'occupation sont consultables en Figure 6 et 7. Ces quelques chiffres illustrent le caractère rural de Crupet.

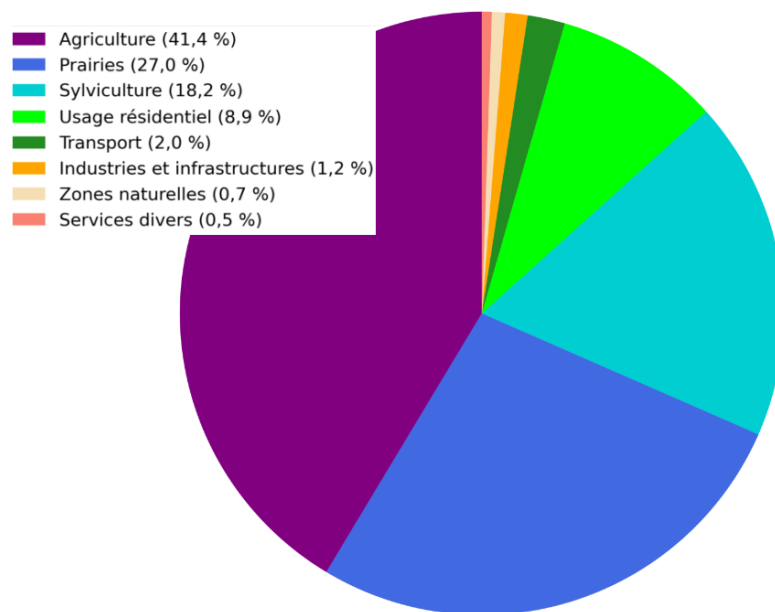


FIGURE 6 – Diagramme de l’occupation du sol basé sur la carte Walous 2018 (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).

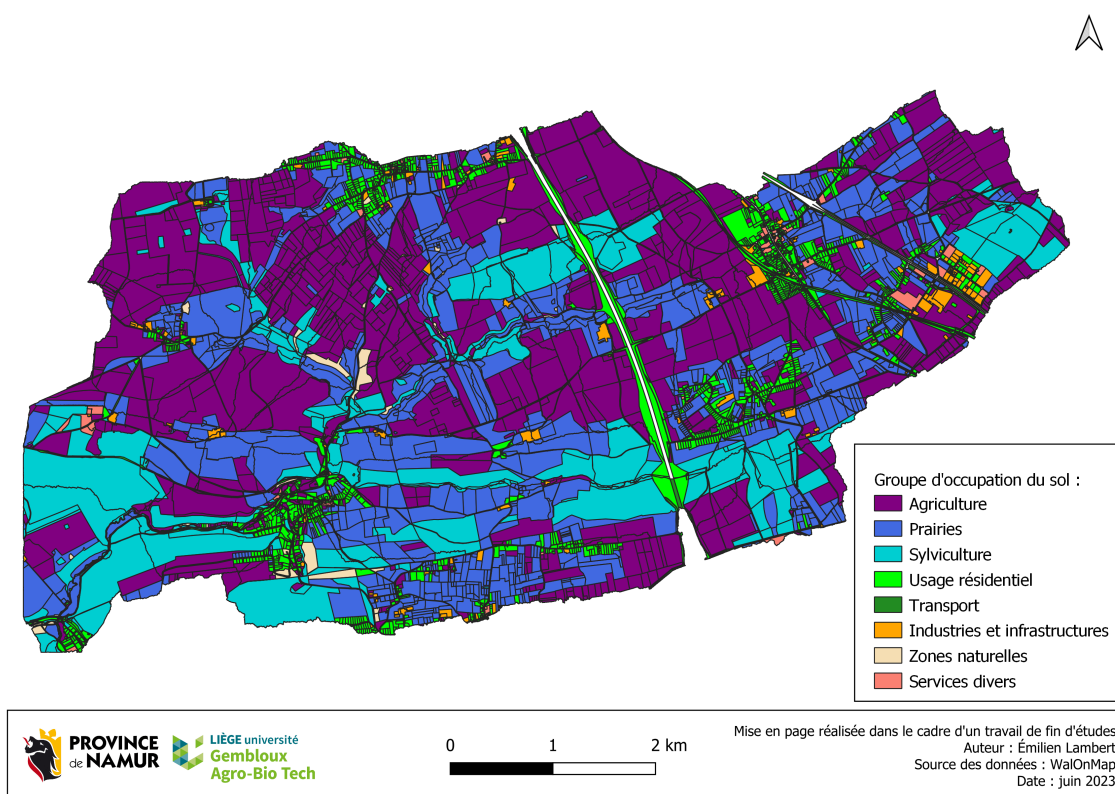


FIGURE 7 – Groupes d’occupation du sol basés sur la carte Walous 2018 (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).

Selon la carte numérique des sols de Wallonie (Figure 8), le bassin versant de Crupet se compose majoritairement de limons à drainage favorable et principalement favorable. Du point de vue de sa géologie, 51,9 % de sa superficie se trouve en milieu karstique¹¹. Les roches calcaires du Carbonifère, qui sont dominantes, occupent 45,2 % du territoire contre 6,7 % pour celles datant du Dévonien. Comme l'illustre la Figure 9, de nombreux phénomènes karstiques ont été répertoriés : des cavités, effondrements, ravinements, pertes, chantoirs, etc. L'atlas du karst wallon identifie notamment 13 phénomènes le long des cours d'eau majeurs du bassin versant, sans toutefois qualifier leur impact sur l'écoulement (MICHEL et al., 2011). À ce titre, la société Vivaqua possède un captage gravitaire à Crupet dont la production varie entre 12 000 et 18 000 m³ par jour.

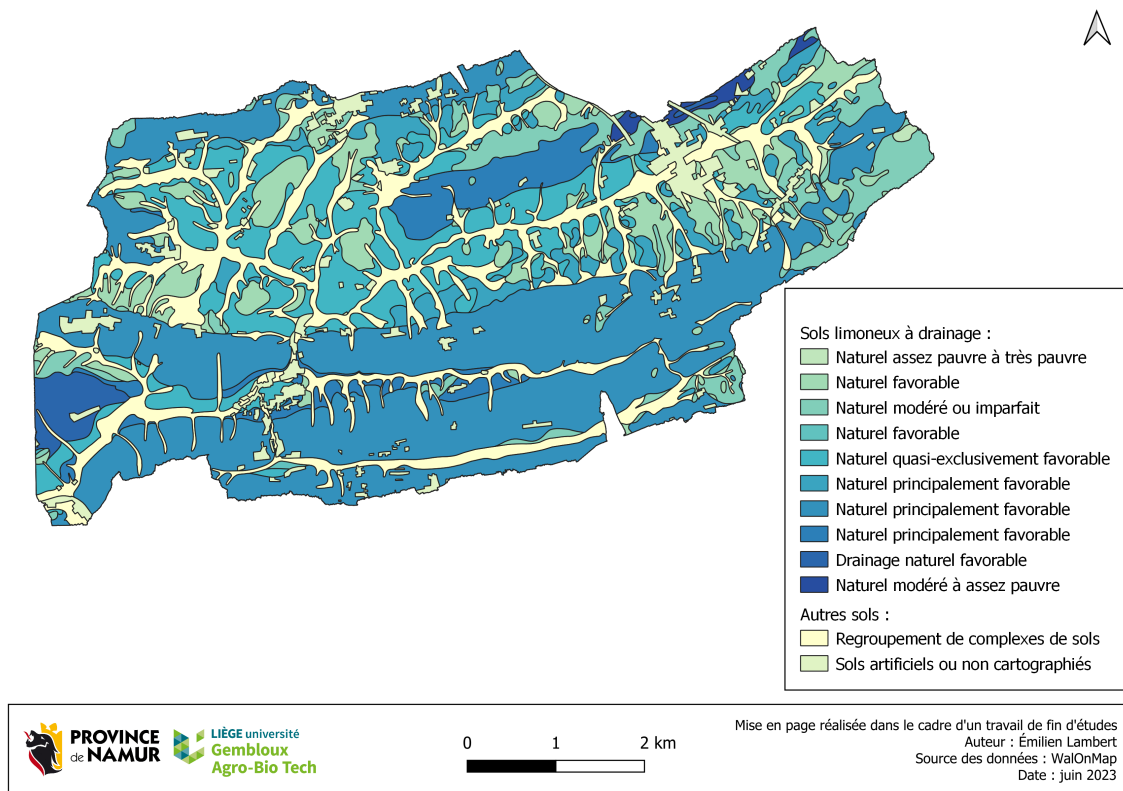


FIGURE 8 – Carte numérique des sols de Wallonie (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).

Le village de Crupet se situe dans une vallée encaissée caractérisée par de fortes pentes, notamment le long des cours d'eau où les dénivelés sont généralement prononcés (voir Figure 10). L'indice de sinuosité, défini par le ratio entre la longueur du tracé du cours d'eau et la longueur de la vallée¹², s'élève en moyenne à 1,29 dans le bassin versant. Sur la base de ce paramètre, les cours d'eau sont considérés comme sinueux (indice compris entre 1,05 et 1.3), et à méandration modérée (1,3 à 1,5) (HORACIO, 2014).

11. Le karst se caractérise par des roches calcaires sujettes à de l'érosion chimique (OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU & OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ, 2023).

12. La longueur de la vallée représente une ligne droite passant par les points aux extrémités du tronçon étudié. Cet indice a été obtenu par le modèle HEC-HMS qui sera expliqué ci-après.

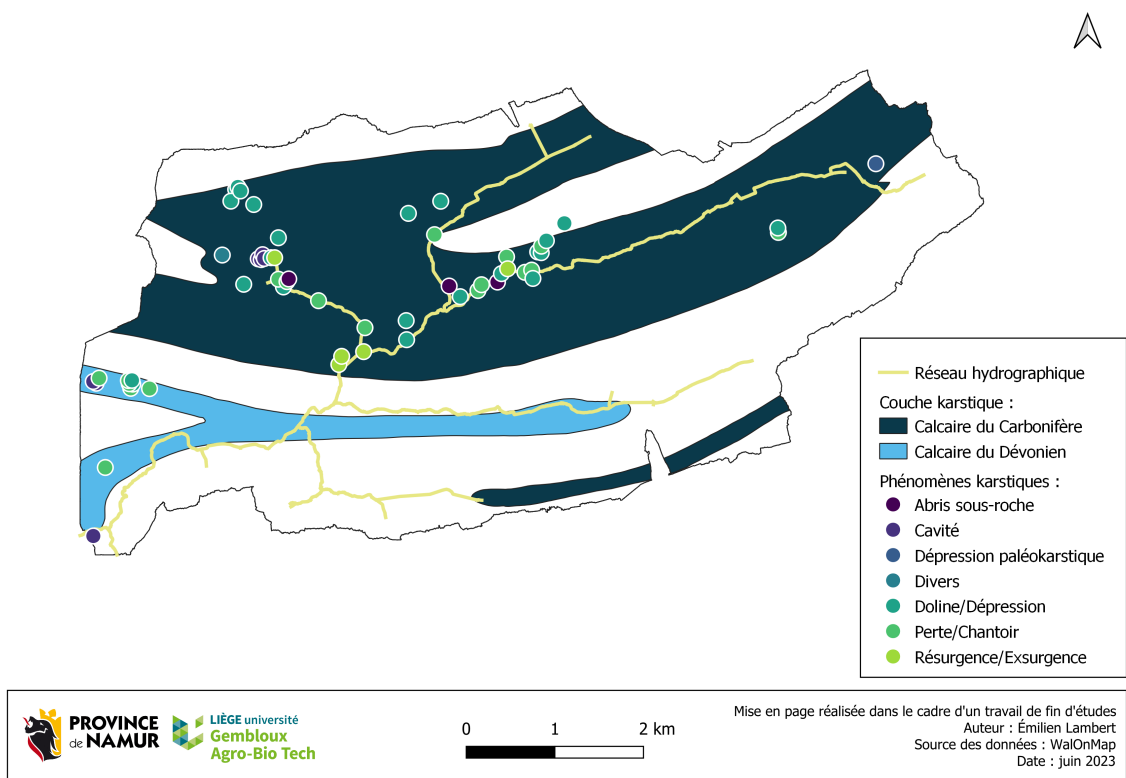


FIGURE 9 – Carte de la géologie karstique (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).

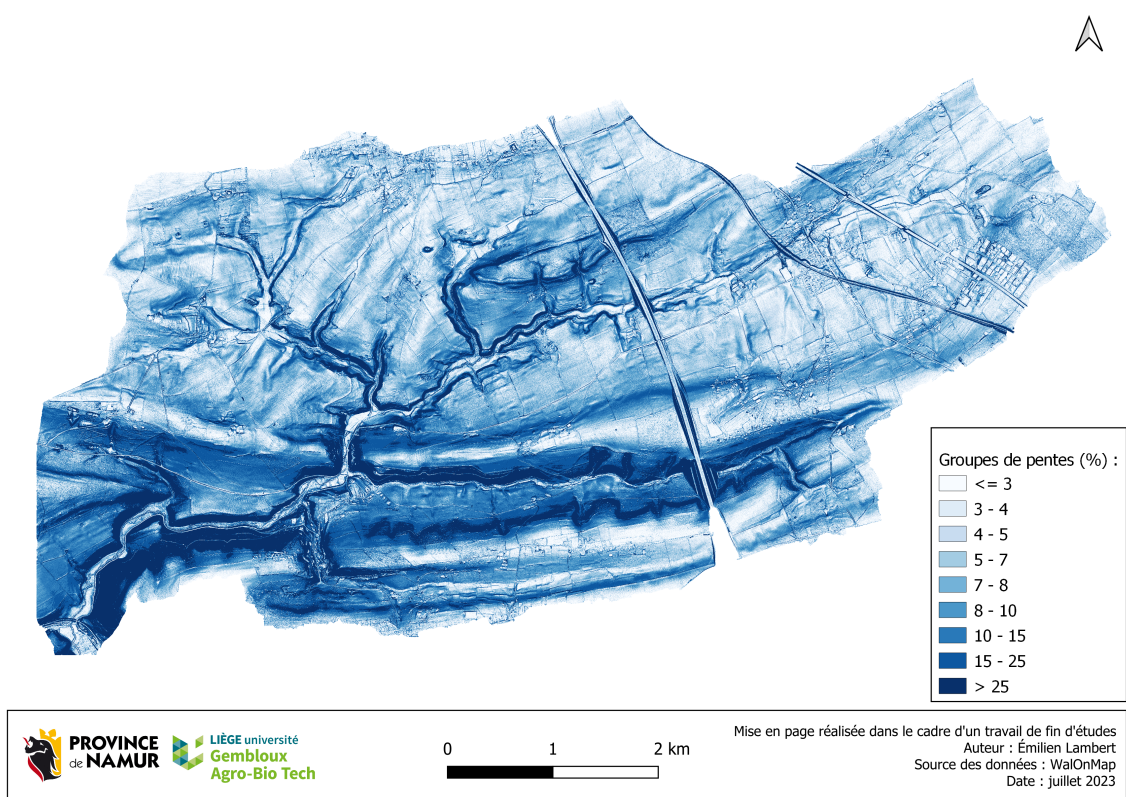


FIGURE 10 – Carte des pentes (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).

6 Modèle hydrologique

Afin de créer un modèle de simulation des inondations, des données relatives aux écoulements de l'eau à l'échelle du bassin versant sont nécessaires (cf. Figure 11). Une modélisation hydrologique peut être utilisée pour obtenir des informations sur les débits de la rivière en différents points et pour différentes pluies simulées. La représentation du débit au cours du temps est communément appelée hydrogramme.

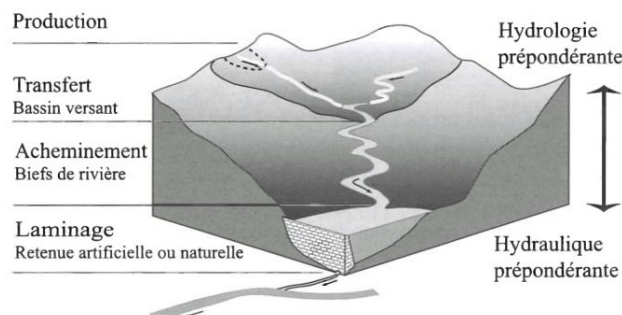


FIGURE 11 – Liens entre le modèle hydrologique et hydraulique (HINGRAY et al., 2014).

Dans le cas de Crupet, l'étude hydrologique est menée à l'aide du logiciel *Hydrologic Modeling System* (HMS) développé par l'*Hydrologic Engineering Center* (HEC), sous sa version 4.10. HEC-HMS permet de « *simuler des processus précipitation-ruissellement de bassin versant dendritique* » (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2022a). Le logiciel permet de modéliser une multitude de situations, qu'il s'agisse de bassins versants ruraux ou urbains en se basant sur un large choix de méthodes disponibles. Le schéma présenté en Annexe B illustre les différents processus qui peuvent être simulés.

Comme l'objectif poursuivi est l'obtention des hydrogrammes de crue, la simulation est de type événementiel. Par conséquent, l'étude se focalise sur le comportement du bassin versant à une pluie de projet donnée. *De facto*, certains paramètres doivent être négligés, à l'instar des rayonnements, de la température, de la vitesse du vent, de la pression atmosphérique, etc. Les effets de ces processus, à l'échelle de temps considérée, sont minimes vis-à-vis des volumes précipités. Les données nécessaires à l'élaboration de certains modèles ne sont pas disponibles, ou difficilement accessibles. Par ailleurs, dans certains cas, le modèle n'est nullement pertinent pour l'étude menée. Un schéma synthétique du modèle est présenté en Figure 12.

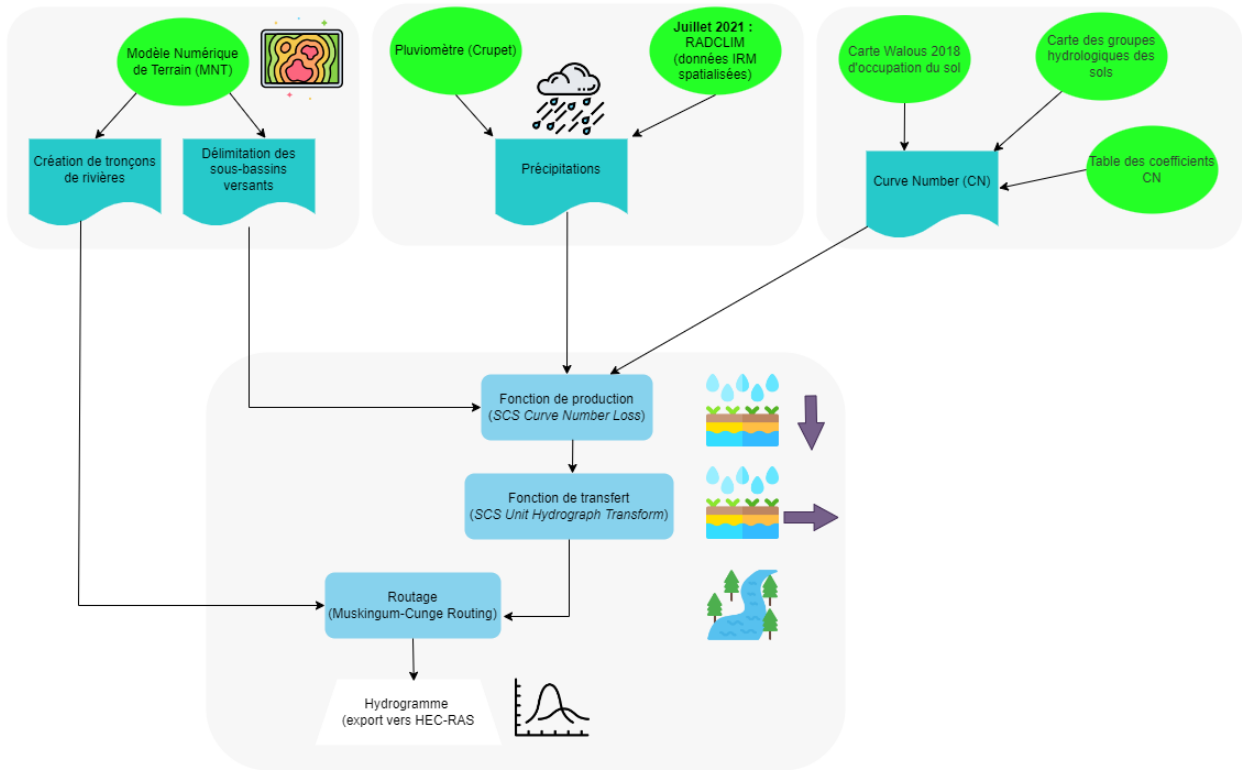


FIGURE 12 – Diagramme récapitulatif du modèle HEC-HMS réalisé.

6.1 Sous-bassins versants

6.1.1 Délimitation des sous-bassins versants

Le bassin hydrographique de Crupet est découpé en sous-bassins versants à l'aide des outils SIG (*GIS*). Cette étape nécessite l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) (2013-2014), obtenu sur WalOnMap (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a). Le MNT est modifié avec l'outil Serval sur QGIS afin de prévoir le passage de l'eau sous la voirie de l'autoroute.

Sur HEC-HMS, la manipulation commence avec l'emploi du *Preprocess Sinks*, qui génère un nouveau MNT ainsi qu'une carte raster de localisation et de profondeur des puits localisés. Ensuite, l'outil *Preprocess Drainage* génère des cartes de direction et d'accumulation des flux (respectivement *Flow Direction* et *Flow Accumulation*). Concernant la position des rivières, elle est délimitée à l'aide de la méthode *Identify Streams* dès lors que la zone drainée est supérieure à $0,4 \text{ km}^2$. La dernière étape précédant la délimitation des sous-bassins consiste au positionnement de points de rupture (*Break Points*). Ceux-ci forcent le logiciel à créer des sous-régions dont l'exutoire se trouve en ces points. Enfin, l'outil *Delineate Elements* délimite les sous-bassins versants, les sections de rivière et la jonction où elles convergent.

6.1.2 Fonction de production

La quantification des pertes d'eau par infiltration lors d'un événement pluvieux est modélisée par la fonction de production. Sept des douze méthodes disponibles s'appliquent à une simulation événementielle et sont comparées dans le tableau en Annexe C.

Après analyse du tableau, le choix de la méthode des pertes s'est porté le *SCS Curve Number*. En comparaison, l'*Initial and Constant Loss* n'est pas privilégiée puisque que l'utilisation de données existantes peut offrir un modèle plus précis. Pour les autres méthodes, les données nécessaires ne sont pas disponibles ou demandent des mesures qui ne peuvent être prodiguées par le PGICE (teneur en eau des sols, distribution des pores, etc.). Il est dès lors pertinent de remarquer que l'utilisation des caractéristiques propres aux sols permet d'obtenir un modèle avec des paramètres interprétables au sens physique. Dans ce cas, une hypothèse quant à l'homogénéité des sols doit être posée pour chaque sous-bassin versant puisqu'une seule valeur de chaque paramètre doit y être encodée. Cette approche engendre un nombre élevé d'incertitudes, d'hypothèses et de simplifications difficilement vérifiables. La méthode SCS, qui est un modèle empirique, est largement et mondialement utilisée.

Pour appliquer la méthode du *SCS Curve Number*, diverses données doivent être récoltées :

- **Curve Number (CN)** : pour assigner un coefficient CN, il est indispensable de connaître l'occupation et le type du sol rencontré. Pour commencer, la carte d'utilisation des sols Walous 2018 (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a) assigne à chaque polygone l'une des 80 classes disponibles. Sur la base de cette carte, le bassin versant de Crupet est découpé en $\pm 6\ 800$ polygones différents. Le groupe hydrologique du sol¹³ est extrait de la carte de Demarcin et al. (2011). Des traitements cartographiques avec QGIS permettent d'assigner une valeur CN extraite de l'*Hydrologic Engineering Center* (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2022b) à chaque polygone.

Force est de constater que le choix du *Curve Number* n'est pas univoque puisqu'il dépend de l'occupation du sol à un moment donné. Une proportion non négligeable de la superficie du bassin hydrographique de Crupet se compose de cultures, de prairies et de forêts (cf. Figure 7). L'utilisation des terres agricoles évolue au fil de l'année, et d'année en année. Pour s'affranchir de cette variabilité, un intervalle de confiance de CN a été dressé pour deux situations opposées : l'une considère des terres agricoles nues, des pâtures et des forêts peu denses ; l'autre illustre la plantation de légumineuses, avec des prairies permanentes non pâturées et des forêts denses. Ces deux cas extrêmes permettent de borner la valeur de CN entre ces deux limites. À l'échelle de chaque sous-bassin versant, une valeur unique de CN est calculée avec la formule suivante :

$$CN_{Sous-bassin} = \frac{\sum_{i=1}^k CN_i * A_i}{\sum_{i=1}^k A_i} \quad (3)$$

Où A représente l'aire d'un sous-bassin i.

- **Impervious (%)** : ce coefficient caractérise les surfaces considérées comme imperméables (avec un coefficient CN supérieur ou égal à 95).
- **Initial Abstraction (mm)** : ce paramètre représente la part des précipitations qui est initialement interceptée, infiltrée, évaporée ou retenue dans les dépressions de surface. Il se calcule comme suit¹⁴ :

$$S = 25,4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4)$$

$$I_a = \lambda * S \quad (5)$$

13. Les sols sont catégorisés en fonction de leur infiltrabilité en quatre classes (A, B, C, D) qui se distinguent par leur texture, leur drainage, leur substrat et leur charge caillouteuse (DEMARCIN et al., 2011).

14. Le choix de la valeur de lambda est discuté en Annexe F.

6.1.3 Fonction de transfert

Afin de calculer la quantité d'eau effectivement ruisselée, huit méthodes de transfert (*Transform Method*) sont proposées par HEC-HMS. Elles sont comparées dans le tableau en Annexe D. Tout d'abord, aucune mesure propre au ruissellement n'existe, ce qui ne permet pas l'utilisation de la méthode *User-Specified Unit Hydrogram Transform*. Ensuite, la *Kinematic Wave Transform* ne s'applique pas au bassin versant de Crupet, qui est rural. Les méthodes de transformation de *ModClark* et *SCS Unit Hydrograph* sont pour leur part employables à partir des données disponibles par le PGICE.

Le choix final s'est porté sur la méthode SCS, puisqu'elle rentre dans la continuité de la méthode utilisée pour modéliser les pertes. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître la part de l'eau ruisselée avant l'arrivée du pic de crue. Ce paramètre est appelé *Peak Rate Factor (PRF)*. Dans la littérature, une courbe PRF 484 est usuellement choisie en considérant que 37,5 % de l'eau ruisselle avant le pic. Le PRF dépend néanmoins de la longueur de l'écoulement, de la pente du sous-bassin versant, et d'autres propriétés propres au bassin versant (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2022b). Une étude menée par Cahyono et Adidarma (2019) démontre que l'utilisation de PRF adaptés à la pente rend le modèle plus complet, sans toutefois améliorer significativement sa qualité. Dans cette optique, un *Peak Rate Factor* a été assigné à chaque sous-bassin versant au regard de sa pente (voir Tableau 1).

TABLE 1 – Valeur de Peak Rate Factor (PRF) en fonction de la pente (CAHYONO & ADIDARMA, 2019).

Pente (%)	PRF
0 - 1,5	100
1,5 - 4,5	200
4,5 - 10	300
10 - 20	400
20 - 25	500
> 25	600

Ensuite, le temps de montée (*Lagtime*) doit être déterminé. Ce dernier exprime la durée entre le commencement du ruissellement et le pic de l'hydrogramme. Le temps de montée peut être calculé comme suit (WOODWARD et al., 2010) :

$$L = \frac{l^{0,8} * (S + 1)^{0,7}}{1900 * Y^{0,5}} \quad (6)$$

Avec :

- L : le temps de montée [h].
- l : la longueur d'écoulement [ft].
- Y : la pente moyenne du sous-bassin [%].
- S : le potentiel de rétention maximal, qui est obtenu comme suit :

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (7)$$

- CN : le *Curve Number*

6.2 Routage

6.2.1 Méthode d'acheminement de l'écoulement

Les sous-bassins précédemment présentés sont reliés entre eux par une méthode d'acheminement qui simule le transport de l'eau au sein des tronçons de rivière. Les neuf méthodes de routage proposées dans HEC-HMS sont introduites dans le tableau en Annexe E.

Afin de choisir la méthode d'acheminement la plus appropriée à la situation actuelle, il est important de s'intéresser aux hypothèses formulées par ces modèles. De prime abord, les méthodes *Lag Routing* et *Straddle Stragger Routing* ont l'avantage d'utiliser peu de paramètres en entrée, mais elles risquent de fournir des résultats moins précis. Concernant le *Lag and K Routing*, la méthode émet l'hypothèse que les vagues de crue évoluent lentement et elle ne s'applique pas en présence de structures hydrauliques. Or, le Crupet est un bassin versant au temps de concentration faible où la rivière se trouve à l'interface du ruissellement agricole et des écoulements souterrains. Ensuite, la méthode *Kinematic Wave Routing* s'applique davantage à des tronçons de rivière avec une géométrie régulière (comme en milieu urbain) et ne s'applique donc pas à une partie significative du tracé du Crupet et de ses affluents. Dans le cas de simulations de pluies événementielles, une partie de l'eau transportée par la rivière se fait dans son lit majeur, c'est-à-dire au niveau des plaines inondables. Il est dès lors opportun de modéliser ce phénomène à l'aide de coefficients de rugosité (appelé coefficients de Manning) qui prennent en compte l'effet de l'occupation du sol. Enfin, la distinction majeure entre les techniques *Muskingum-Cunge Routing* et *Normal Depth Routing* est que cette dernière technique pose l'hypothèse d'une profondeur normale.¹⁵ Le choix se pose sur la méthode *Muskingum-Cunge Routing*, qui calcule la profondeur de l'écoulement à chaque pas de temps. L'obtention des données nécessaires à l'implémentation de la méthode de routage est détaillée en Annexe G.

6.3 Précipitations

Du point de vue des précipitations, il faut distinguer les pluies réelles (associées à un événement pluvieux remarquable) des pluies synthétiques. Ces dernières, qui sont créées artificiellement, correspondent à une durée et à une période de retour donnée.

Concernant les pluies réelles, une station pluviométrique (n°8 138) du Service public de Wallonie a été installée à Crupet sur le site de Vivaqua en 2002 (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023c). Dans le modèle HEC-HMS, une seule pluie est appliquée communément sur l'ensemble du bassin versant. En ce qui concerne juillet 2021, l'IRM met à disposition des données sous format raster à une résolution d'un km² pour un pas de temps horaire. Ces informations proviennent du modèle RADCLIM, qui se base sur une compilation des prévisions radar et des mesures issues de 152 stations pluviométriques réparties sur le territoire belge (INSTITUT ROYAL MÉTÉOROLOGIQUE, 2023b). La résolution associée permet de spécifier le hyétogramme¹⁶ de la pluie pour chaque sous-bassin versant modélisé.

Au sujet des pluies synthétiques, l'Institut Royal Météorologique (IRM) publie les statistiques de précipitations extrêmes (courbes Intensité-Durée-Fréquence - IDF-) pour la commune d'Assesse (INSTITUT ROYAL MÉTÉOROLOGIQUE, 2023a). Le hyétogramme synthétique est

15. La profondeur normale correspond à un écoulement qualifié d'uniforme, c'est-à-dire que la profondeur de l'eau et la vitesse du fluide sont constantes tout au long du tronçon. La condition pour obtenir une telle situation est que la rivière soit de longueur infinie, et que les sections transversales et la pente de fond ne varient pas (CHAUDHRY, 2008)

16. Graphique décrivant l'intensité de la pluie au cours du temps.

obtenu par la méthode *Hypothetical Storm*, et un choix doit être posé sur la durée de la précipitation, l'aire de réduction, la surface de l'orage et la disposition temporelle. Parmi les formes de courbes proposées, il y a notamment les SCS type 1, 1A, 2 et 3¹⁷ (voir Figure 13). Pour la Belgique, le climat rencontré s'apparente davantage à une courbe de type 2 (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2022b).

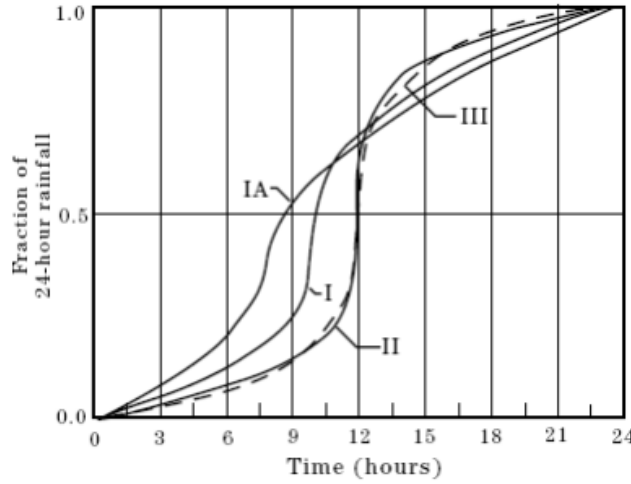


FIGURE 13 – Présentation des pluies synthétiques SCS type 1, 1A, 2 et 3 (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2022b).

6.4 Transfert de bassin versant

Le bassin versant du Bocq¹⁸ comporte plusieurs stations limnimétriques¹⁹, mais aucune ne se trouve sur le bassin hydrographique de Crupet (cf. Figure 48). Afin de s'affranchir de l'absence de données de débit, la méthode de transfert de bassin est utilisée dans le but de comparer le Crupet à un autre bassin versant qui présente des caractéristiques proches. Cet outil permet ainsi de comparer qualitativement les pics de crue issus du modèle HEC-HMS avec ceux approchés par la méthode de transfert. Cette dernière est exprimée par la formule empirique de Myer (PITON, 2017) :

$$Q_{BV1,crue} = Q_{BV2,crue} * \left(\frac{S_{BV1}}{S_{BV2}}\right)^\alpha \quad (8)$$

Avec :

- Q , le débit de crue pour le bassin versant jaugé (BV2) et celui à estimer (BV1) [m^3/s].
- S , la superficie du bassin versant jaugé (BV2) et de celui à estimer (BV1) [m^2].
- α , un coefficient dont la valeur pour une situation de crue est estimée à 0,75.

Des compléments d'information sont donnés sur la méthode en Annexe H (les hypothèses propres à la méthode, la vérification de l'homogénéité entre le Leignon et le Crupet, le choix du coefficient α et son analyse de sensibilité).

17. Les types de courbes ont été développés pour les climats des États-Unis. Les types I et IA correspondent à un climat océanique pacifique (été chaud et hiver humide). Le type III s'applique à un climat tropical. Dans tous les autres cas, le type II est d'application (comme au centre des États-Unis où le climat est continental)(HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2022b).

18. Pour rappel, le ruisseau de Crupet est un affluent du Bocq.

19. Un limnimètre est un capteur qui mesure la hauteur d'eau d'un cours d'eau. La hauteur est ensuite transformée en débit à l'aide d'une relation appelée « courbe de tarage ».

6.5 Analyse de sensibilité

Après que l'ensemble des paramètres de la modélisation ont été générés, l'étape de calibration permet de comparer les résultats issus du modèle aux données de terrain observées ou estimées. Cette étape permet de vérifier la concordance des résultats, et d'ajuster les paramètres du modèle au besoin. Comme le bassin versant est non jaugé, il n'est pas possible de calibrer le modèle. Néanmoins, une calibration par l'intermédiaire du modèle HEC-RAS est prodiguée. Ce procédé n'offre pas la possibilité d'ajuster directement le modèle HEC-HMS, mais il permet de choisir l'hydrogramme le plus pertinent au regard des effets qu'il engendre dans les simulations d'inondations.

Une dernière étape dans la mise en place du modèle hydrologique est l'étude de l'impact des différents paramètres du modèle. Dans ce cadre, chaque paramètre est modifié de ± 5 , ± 10 , ± 15 et ± 30 % en gardant les autres données constantes. La sensibilité du modèle est quantifiée par la formule suivante :

$$S = |(\frac{\delta O}{O_i}) * 100| \quad (9)$$

Avec :

- S, la variation sur le résultat obtenu [%]
- O, le paramètre de sortie du modèle ($[m^3/s]$ pour les débits ; $[m^3]$ pour les volumes)

7 Modèle hydraulique

7.1 Choix du type de modèle

Le modèle hydraulique, plus précisément appelé modèle hydrodynamique, a pour objectif de simuler des événements de crue et d'inondation. Il existe différents types de modèles qui se distinguent par le nombre de dimensions spatiales qu'ils possèdent (une, deux ou trois). Dans une situation donnée, le choix du modèle dépend de nombreux paramètres, comme les caractéristiques de l'écoulement, les dimensions de la situation à représenter et les propriétés d'intérêt. Un descriptif de différents types de modèle est fourni en Annexe I.

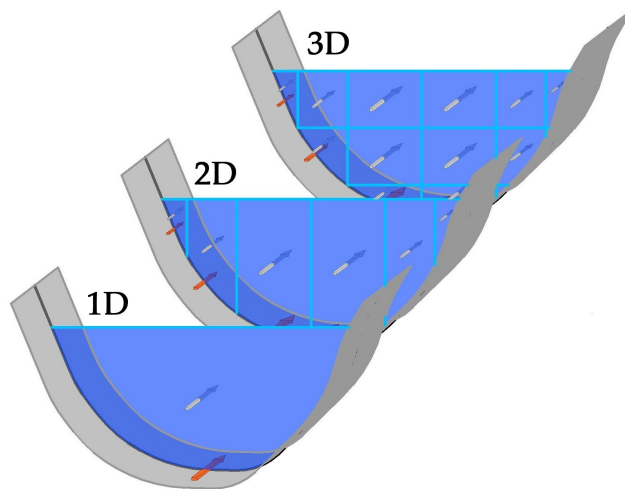


FIGURE 14 – Comparaison des modèles hydrodynamiques 1D, 2D et 3D (GLOCK et al., 2019).

Dans le cas de Crupet, l'étude porte sur les inondations par débordement, et il est donc nécessaire de connaître les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement dans les plaines inondables. La superficie de la zone à étudier²⁰ est relativement faible puisqu'elle se limite au centre du village. À la confluence entre le ruisseau de Crupet et le ruisseau de Vesse, les échanges d'eau horizontaux impliquent de nombreuses interactions. Pour ces raisons, un modèle à deux dimensions est créé à l'aide du logiciel HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*). Ce programme permet de modéliser des écoulements 1D, 2D et 1D-2D combinés, ainsi que le transport de sédiments. Cette dernière application ne sera pas utilisée dans le cadre de ce travail. Un schéma synthétique du modèle est présenté en Figure 15.

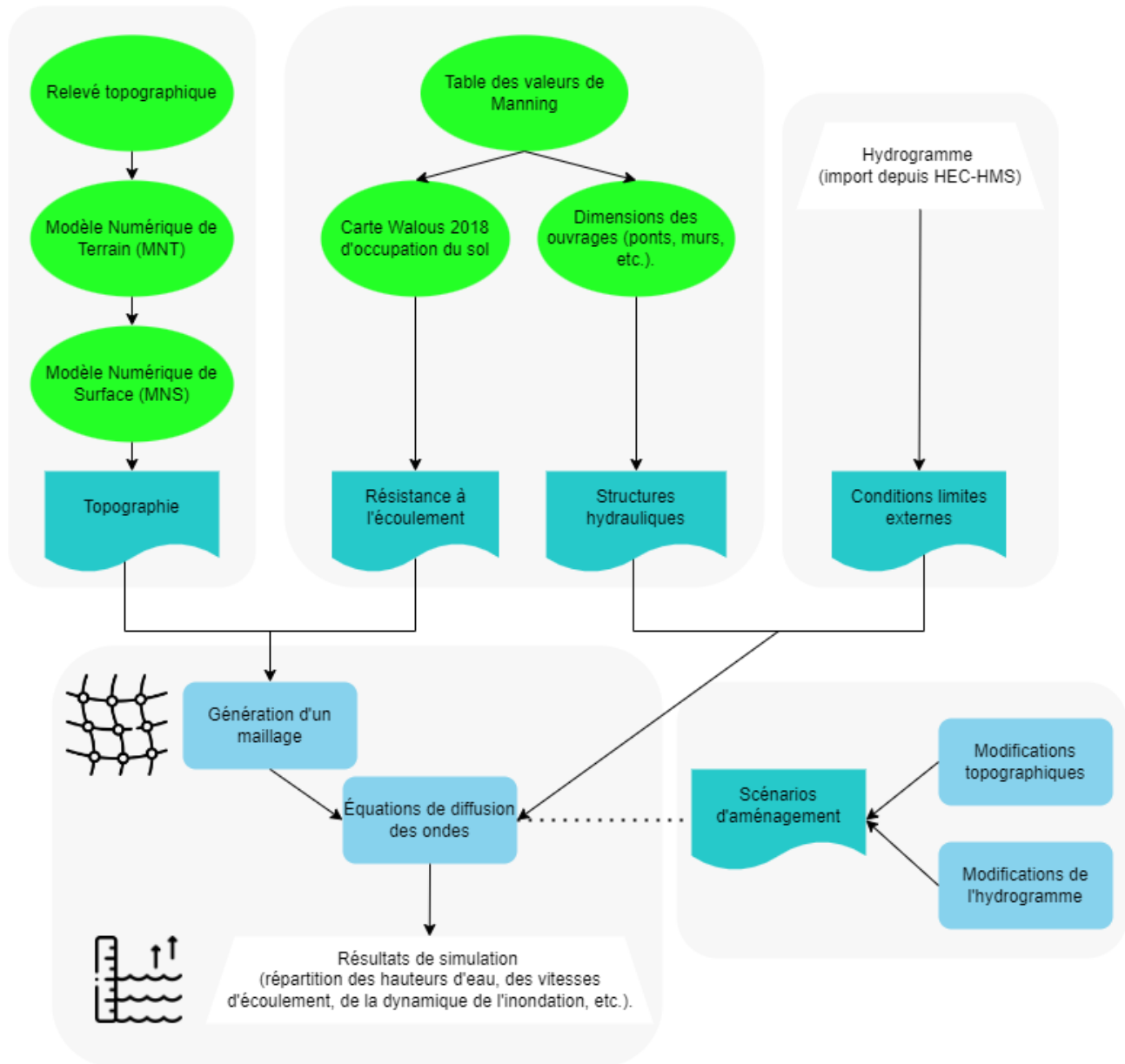


FIGURE 15 – Diagramme récapitulatif du modèle HEC-RAS.

20. Dans la modélisation présentée, la superficie de la zone étudiée est de 8,16 ha.

7.2 Données du modèle

7.2.1 Géométrie

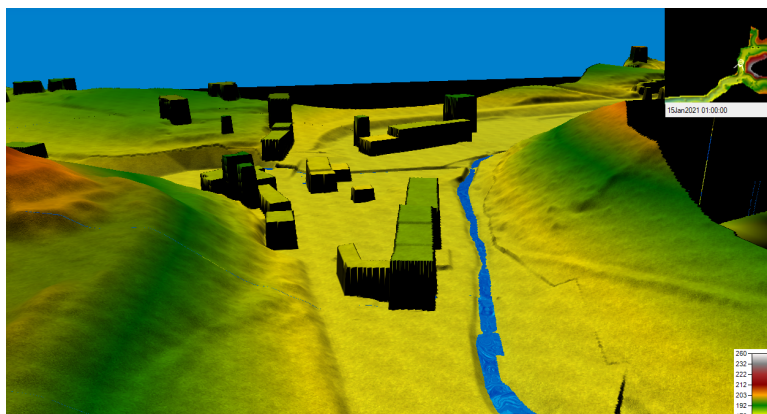


FIGURE 16 – Capture d’écran des données topographiques extraites du *3D Viewer* d’HEC-RAS.

L’obtention de la géométrie de la zone étudiée constitue une première étape essentielle dans l’établissement d’un modèle 2D. Pour commencer, un relevé topographique de 4 300 points a été mené par le Pôle de Géomatique et expertise foncière de la Province. Pour les zones qui n’ont pas été couvertes par les mesures de terrain, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2021-2022 (résolution 0,5 m) est extrait de WalOnMap (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a). Enfin, le Modèle Numérique de Surface (2013-2014) (résolution 1 m) (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a) a été modifié de telle sorte qu’il représente fictivement les bâtiments par des polygones de hauteur égale à la hauteur maximale de chaque habitation. La topographie finale du modèle, illustrée en Figure 16, se situe à la conjoncture de ces trois sources d’informations.

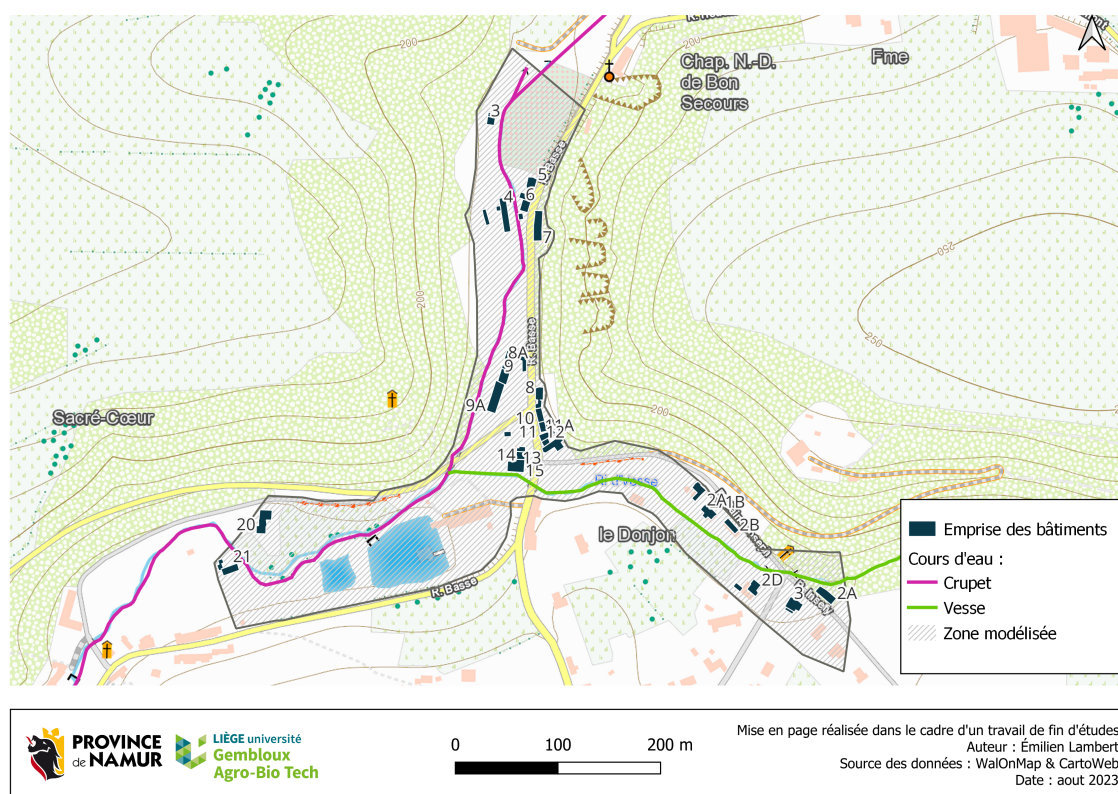


FIGURE 17 – Carte de la zone modélisée par le modèle HEC-RAS.

Les limites spatiales de la modélisation sont définies par un périmètre tracé le long de la courbe de niveau élevée de quatre à cinq mètres au-dessus du lit mineur de la rivière. La zone englobe le ruisseau de Crupet au départ de l’aval du captage de Vivaqua jusqu’à l’aval du château (cf. Figure 17). Elle s’étend également au ruisseau de Vesse dès son entrée dans le village (à l’est) jusqu’à sa confluence avec le Crupet. Au sein de ce périmètre, une discrétisation spatiale²¹ à l’aide d’un quadrillage 2D est générée afin de diriger le transport de l’eau. Dans son algorithme, HEC-RAS se base de la méthode des Volumes Finis qui s’applique à des écoulements irréguliers. Sa simplicité d’utilisation et sa capacité à représenter de fortes variations de la surface de l’eau soulignent son intérêt dans les modélisations hydrodynamiques. La méthode des Volumes Finis conserve également la masse et la quantité de mouvement en chaque cellule du maillage (CHAUDHRY, 2008). Dans HEC-RAS, chaque cellule se caractérise par un ensemble de relations, telles que des courbes hauteur - volume, hauteur - périmètre mouillé, hauteur - aire et hauteur - rugosité.

Les mailles sont non structurées et se composent de trois à huit faces maximum. Leur taille doit être d’autant plus petite que la dynamique de l’écoulement évolue rapidement. Dans la pratique, un maillage fin est nécessaire lorsque la topographie est escarpée ou en présence d’obstacles à l’écoulement. L’objectif sous-jacent est de rendre compte adéquatement des caractéristiques du milieu afin de capturer les variations de vitesse ou de pente de la surface de l’eau (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2021). Un exemple de maillage est illustré en Figure 18, où il est possible de visualiser des cellules de plus petite taille dans le lit mineur et d’autres plus grandes dans les plaines inondables. Le maillage compte $\pm 9\,000$ cellules dont les faces font en moyenne 3 m de côté.



FIGURE 18 – Capture d’écran du maillage 2D créé sur HEC-RAS.

21. L’espace, qui représente un domaine continu, est découpé en un quadrillage afin de le rendre discontinu. Cette étape permet ensuite à un ordinateur de traiter les informations spatialement.

7.2.2 Structures hydrauliques

Qu'il s'agisse de ponts, de digues, de murs de protection ou de pertuis, il existe une multitude de structures hydrauliques influençant l'écoulement de l'eau dans son lit mineur et majeur. Concernant les ponts, la coupe amont et aval de chaque ouvrage est entrée dans le logiciel. Pour ce faire, il est essentiel de posséder les coordonnées de la partie supérieure et inférieure du tablier en fonction de la distance horizontale par rapport à un point de référence. Une illustration d'une coupe d'un pont est présentée en Figure 19. Si nécessaire, il est également possible d'ajouter des piliers et un radier. Pour certains ouvrages, un ponceau (rectangulaire ou en arche) est ajouté afin de modéliser l'ouverture libre. Les données des sept ponts présents dans la zone modélisée ont été collectées par le Pôle de Géomatique et expertise foncière.

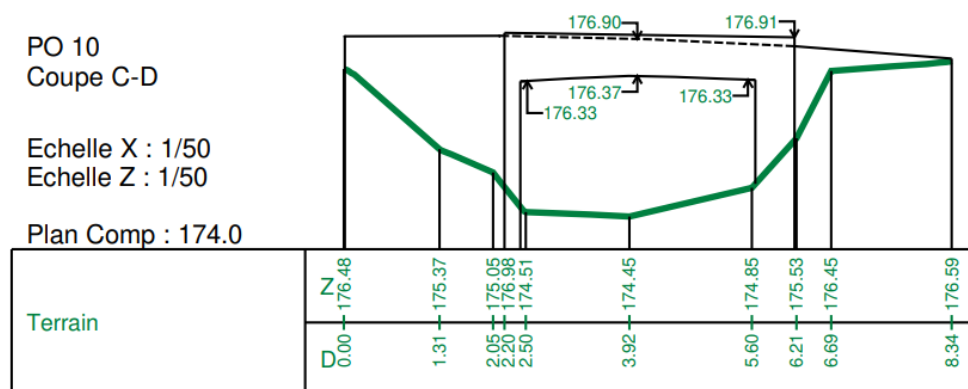


FIGURE 19 – Exemple de coupe de la face d'un pont.

À chaque point constitutif de la face d'un pont est assigné un coefficient de Manning extrait des tables de Chow (1988). Un coefficient de seuil (*Weir Coefficient*) est également utilisé pour certains ponts et certaines structures latérales (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2020). Ce paramètre modélise l'écoulement lorsqu'il surplombe les ouvrages et que ceux-ci jouent un rôle de déversoir. En termes de modélisation du profil de l'eau dans les ponts, celle-ci se base sur l'équation d'énergie.

Pour forcer les mailles à s'aligner avec les structures afin que ces dernières soient prises en compte par le modèle, des lignes de rupture (*Break Lines*) sont ajoutées. La taille des cellules autour de ces lignes de rupture peut être affinée au besoin. De plus, l'emprise des bâtiments est extraite du PICC²² disponible sur WalOnMap (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a). Les murs proches du cours d'eau (comme ceux protégeant certaines maisons de la rue Basse ou celui du château) et les escaliers de la passe à poisson au niveau du château sont définis par des seuils ajoutés manuellement.

7.2.3 Résistance à l'écoulement

Dans un écoulement de surface libre, les forces de gravité et les forces de friction s'équilibrent mutuellement. La résistance à l'écoulement est caractérisée dans HEC-RAS par le coefficient de Manning. Ce paramètre illustre les effets de la rugosité des grains, des irrégularités de la

22. Projet Informatique de Cartographie Continue.

paroi de la rivière et des interactions de la rivière avec les plaines inondables (CHAUDHRY, 2008). La carte Walous (2018) de l'occupation du sol (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a) est modifiée dans QGIS afin d'ajouter une classe propre au lit mineur de la rivière. La carte obtenue est importée dans HEC-RAS, et elle est conjuguée à une table contenant les valeurs de Manning (issues de JANSSEN, 2016) pour chaque classe d'occupation. Ainsi, des valeurs de Manning sont assignées aussi bien au lit mineur du cours d'eau qu'aux différentes classes d'occupation se trouvant dans les plaines alluviales (cf. Figure 20).

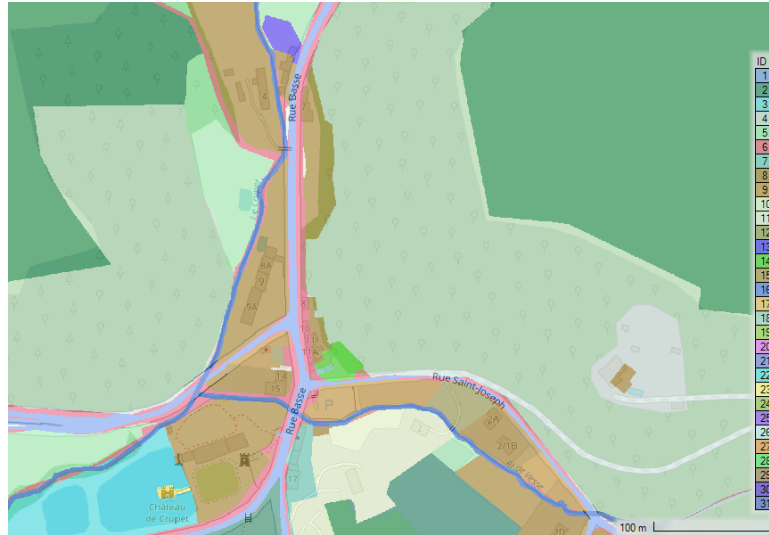


FIGURE 20 – Capture d'écran des classes d'occupation du sol dans HEC-RAS.

7.2.4 Conditions limites

Dans HEC-RAS, seules les conditions aux limites externes²³ ont été définies et aucune condition limite interne n'a été nécessaire. Les conditions limites externes ont été placées dans des tronçons de rivière rectilignes dépourvus de structures hydrauliques. Ces conditions permettent de caractériser l'écoulement comme y étant uniforme et stable. Parmi les quatre conditions limites externes disponibles, deux ont été appliquées :

- L'hydrogramme de crue, c'est-à-dire la courbe qui décrit le débit de l'écoulement au cours du temps. Une telle condition a été définie sur le ruisseau de Crupet, à l'aval du captage Vivaqua (Figure 17). Un second hydrogramme est positionné sur le ruisseau de Vesle, à l'entrée est du village. Les données relatives à ces hydrogrammes sont issues du modèle hydrologique HEC-HMS précédemment présenté. Concernant la pente de la ligne d'énergie, elle est supposée parallèle à la pente de fond (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2021). Comme le débit d'entrée varie temporellement, l'écoulement est transitoire. À noter que lorsque le captage de Vivaqua est mis en décharge, l'eau est envoyée vers le Crupet. Néanmoins, les débits moyens sont inférieurs à $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$, et l'effet du captage est donc négligé pour cette étude²⁴.
- La profondeur normale, qui se base sur la formule de Manning pour déterminer la hauteur d'eau à partir du débit. Dans un écoulement de surface, deux forces s'opposent : la composante liée au poids de l'eau tend à accélérer le fluide le long de la pente de fond ; les contraintes de cisaillement de la paroi et du fond du cours d'eau offrent une résistance au

23. Une condition aux limites externes est une condition qui se situe sur les frontières de la zone modélisée, à l'extérieur du périmètre délimité.

24. Selon les gestionnaires, le captage a été mis en décharge le 15 juillet entre 5h et 6h du matin. $\pm 48\,500 \text{ m}^3$ ont été déversés jusqu'au 21 juillet 2021, et $\pm 51\,700 \text{ m}^3$ jusqu'au 29 juillet.

déplacement du fluide. Un écoulement est qualifié d'uniforme²⁵ lorsque ces deux forces s'égalent. La profondeur d'écoulement, qui reste constante en tout point du tronçon considéré, est dite « normale » (CHAUDHRY, 2008). Une nouvelle fois, la pente d'énergie est approchée par celle de la pente de fond (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2021). Cette condition de profondeur normale est située à l'ouest de la zone d'étude, à l'aval du château de Crupet.

7.2.5 Équations de l'écoulement

Au travers du maillage précédemment présenté, les écoulements sont calculés par les équations de diffusion des ondes (*Diffusion Wave Equations*). À la différence des équations de Saint-Venant complètes (*Shallow Water Equations*), le pas de temps à appliquer peut être plus élevé, et la résolution est plus stable²⁶.

Les équations de Saint-Venant doivent être employées dans les conditions suivantes (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2022a) :

- Pour des vagues de crue très dynamiques (rupture de barrage), et l'étude de la propagation de vagues.
- Pour des contractions et expansions abruptes.
- Lorsque la rivière a une pente très faible.
- Dans des zones tidales.
- Pour représenter les surélévations de l'eau en dehors des méandres.
- Afin de fournir des informations détaillées relatives à la vitesse et à la hauteur d'eau au niveau des structures.
- En présence de régimes d'écoulement mixtes.

La situation modélisée ne reprend pas *sensu stricto* de contrainte citée ci-dessus. Dans ce cas, les équations de propagation des ondes peuvent être utilisées. Afin de résoudre ces équations, il est nécessaire d'utiliser un pas de temps compatible avec la taille du maillage créé. Le paramètre qui permet de juger du pas de temps est le *Courant Number*, défini comme suit (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2021) :

$$C = \frac{V \cdot \Delta T}{\Delta X} \leq 2 \quad (10)$$

Où $C_{Max} = 5$, et avec :

- C , le *Courant Number* [-].
- V , la vitesse d'écoulement [m/s].
- ΔT , le pas de temps [s].
- ΔX , la taille moyenne de la cellule [m].

Dans les simulations modélisées, le pas de temps est variable et est adapté directement à la valeur du *Courant Number*. Ce dernier est borné entre 0,2 et 3.

25. Il faut ainsi considérer un canal prismatique où la pente et les sections transversales sont constantes.

26. La résolution est dite instable lorsque le modèle ne parvient pas à résoudre les équations qui le gouvernent.

7.3 Calibration

Le modèle de simulations hydrauliques HEC-RAS dépend des hydrogrammes issus du modèle hydrologique HEC-HMS. En absence de données de terrain quantitatives, ce dernier modèle n'a pas pu être calibré. Ces incertitudes se reportent sur le modèle HEC-RAS, dont les débits en entrée et les coefficients de Manning devraient être calibrés.

Quant à la crue du 15 juillet 2021, les preuves de l'inondation fournies au PGICE sont nombreuses, notamment plusieurs centaines d'images et de vidéos. Des témoignages de multiples riverain-es sont également compilés dans le Crup'Échos de 2021. La situation de juillet 2021 est modélisée en testant divers hydrogrammes dont un paramètre varie. Les différents résultats sont comparés aux étendues et hauteurs d'eau visibles sur les données disponibles. En outre, ces résultats ont été présentés à des témoins oculaires des inondations afin qu'ils désignent le scénario le plus représentatif. En somme, cette étape permet de calibrer qualitativement le modèle du point de vue de l'hydrogramme entré. Les pluies synthétiques, dont le ratio a été calibré auparavant par la méthode de transfert de bassin, n'ont pas été calibrées dans le modèle HEC-RAS. De plus, les coefficients de rugosité (Manning) n'ont pas pu être ajustés.

7.4 Modélisation des aménagements

Les diverses modifications hydromorphologiques qui ont été simulées dans HEC-RAS sont détaillées ci-après. Une représentation de la situation actuelle permet d'avoir une première compréhension des phénomènes d'inondation et de localiser les potentiels problèmes. Des coupes longitudinales au travers de certains ouvrages démontrent la différence de hauteur d'eau entre l'amont et l'aval. Une telle situation peut témoigner de leur incidence sur l'écoulement de l'eau. Dans le cas de Crupet, l'eau s'accumule en amont de deux zones critiques : (1) au niveau du pont et de la chute au sud du n°7 de la rue Basse (2) à la confluence des ruisseaux de Crupet et de Vesse.

Le choix des aménagements testés se base d'une part sur les hypothèses formulées par la population locale, notamment celles relatées dans le journal local le Crup'Écho de décembre (BERNIER, 2021). En complément, des rencontres ont eu lieu avec quelques crupétois et crupétoises. D'autre part, des visites de terrain ont permis d'appréhender les contraintes topographiques et d'évaluer *de visu* la faisabilité des scénarios. Par conséquent, chaque problème potentiel identifié fait l'objet d'un aménagement dont l'impact est apprécié au regard des résultats du modèle HEC-RAS.

Dans le logiciel, la (re)construction de murs²⁷ est concrétisée par les outils de géométrie d'HEC-RAS (*SA/2D Conn* et le *RAS Mapper*). HEC-RAS propose également des outils capables de modifier la topographie. Après avoir défini des polygones, il est possible de leur assigner une valeur d'altitude afin de remplacer la topographie actuelle ou de la creuser. Dans d'autres cas, des canaux à section transversale trapézoïdale sont utilisés en y référant les pentes de côté, la largeur du fond et la largeur de l'emprise totale.

Pour chaque résultat obtenu, la carte des hauteurs d'eau maximales est extraite d'HEC-RAS pour mener des traitements cartographiques sur QGIS. Des données de statistique descriptive (moyenne, médiane, maximum) sont calculées au droit des bâtiments à l'aide d'un tampon de 10 cm avec l'outil de statistique de zone. Le tampon est développé au départ des limites des bâtiments fournies par la carte de PICC (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).

27. La méthode appliquée est identique à celle précédemment décrite en Section 7.2.2.

7.4.1 Scénario 1 : situation actuelle

Le premier scénario mis en œuvre représente la situation « actuelle » de Crupet. L'ensemble des simulations qui sont développées ci-après sont comparées aux conditions actuelles afin de juger leurs impacts. Il est important de remarquer que le château de Crupet est encerclé par des murs d'une hauteur d'environ un mètre, dont la partie nord-est est à l'aplomb des ruisseaux de Vesse et de Crupet. Au niveau de la confluence et à l'aval de celle-ci, les cours d'eau sont enclavés entre le mur du château et la rue Basse. Lors de la crue de juillet 2021, une partie du mur d'enceinte a cédé sous la pression de l'eau. Dans le scénario 1, l'enceinte du château est laissée telle qu'elle, c'est-à-dire que le mur est absent sur environ 16 mètres. La partie du mur qui n'a pas été touchée par la crue est néanmoins conservée et modélisée (cf. Figure 21).

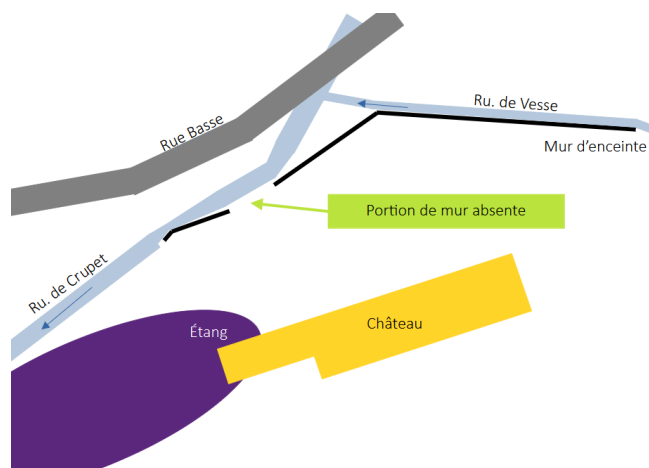


FIGURE 21 – Schéma du scénario 1 : situation actuelle.

7.4.2 Scénario 2 : reconstruction du mur du château

Lors de la crue du 15 juillet 2021, le niveau d'eau à l'amont du château est descendu de 50 à 60 cm quelques minutes après la rupture du mur (BERNIER, 2021 ; ANDRÉ et LABAR, 2021). Le PGICE a été alerté quant à l'impact négatif qu'aurait le mur sur les inondations à l'amont. Afin de vérifier cette hypothèse, un mur long de 16 m de long est modélisé à l'endroit exact où le précédent avait cédé (voir Figure 22). Cette situation représente les conditions avant le début de la crue de juillet 2021. En plus de quantifier l'incidence de l'enceinte, ce scénario permet à la Province de remettre un avis objectif sur une quelconque autorisation de reconstruction.

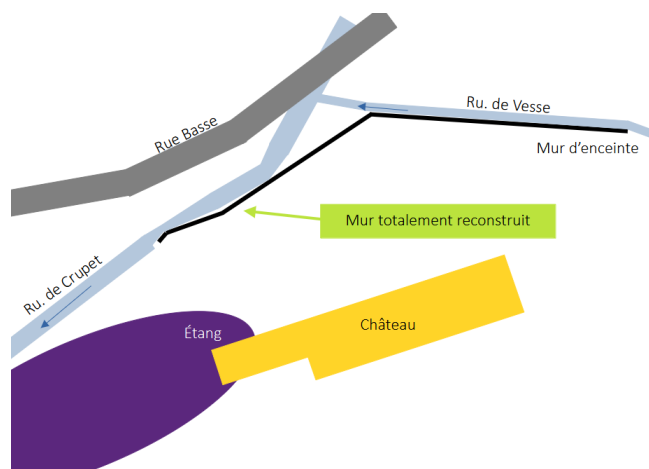


FIGURE 22 – Schéma du scénario 2 : reconstruction du mur du château.

7.4.3 Scénario 3 : reconstruction partielle du mur & émissaire de crue

Une rencontre avec les propriétaires et gestionnaires du château a permis de proposer un second scénario concernant la reconstruction de l'enceinte. L'aménagement consiste à combler la partie est du mur (qui s'était effondrée en 2021), mais à retirer la partie qui est toujours présente à l'ouest (voir Figure 23). Pour cette dernière partie, la cote relative à la surface du sol au droit du mur est fixée à 170,6 m. Un émissaire de crue est dimensionné de telle sorte que l'eau qui pénètre sur la propriété du château est reconduite vers le Crupet.

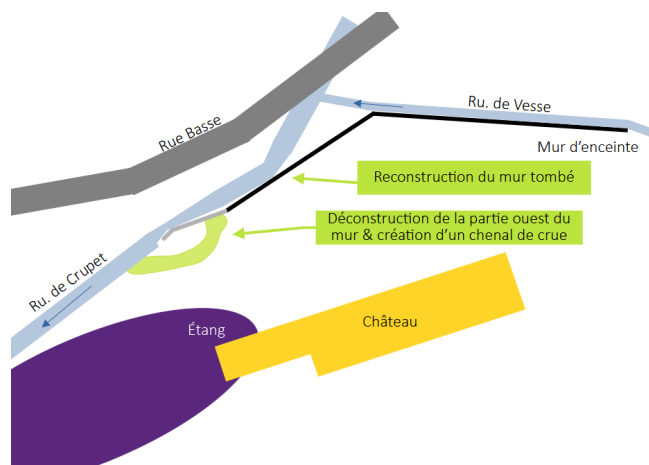


FIGURE 23 – Schéma du scénario 3 : reconstruction partielle du mur & émissaire de crue.

7.4.4 Scénario 4 : reconstruction totale du mur & ouverture du gabarit

Toujours au niveau de l'enceinte du château, la section transversale de la rivière se réduit au niveau de la partie ouest du mur. Cette section formerait un goulot d'étranglement qui limiterait le passage de l'eau vers l'aval. Le scénario 4 propose de donner du gabarit à la rivière dans sa berge droite en creusant dans les talus. Des banquettes sont ainsi créées afin que l'eau puisse s'y répandre en période de crue. Elles ont une largeur moyenne de 1,7 m, et elles sont surélevées de 0,5 à 1 m par rapport au fond du cours d'eau (voir coupe transversale en Figure 25). Parallèlement, le mur du château est reconstruit dans son entièreté (cf. Figure 24).

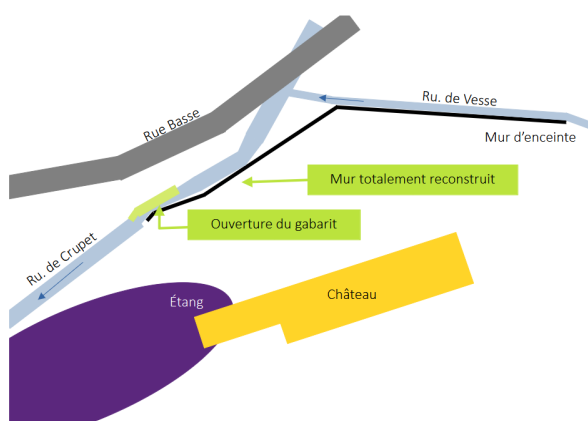


FIGURE 24 – Schéma du scénario 4 : reconstruction totale du mur & ouverture du gabarit.

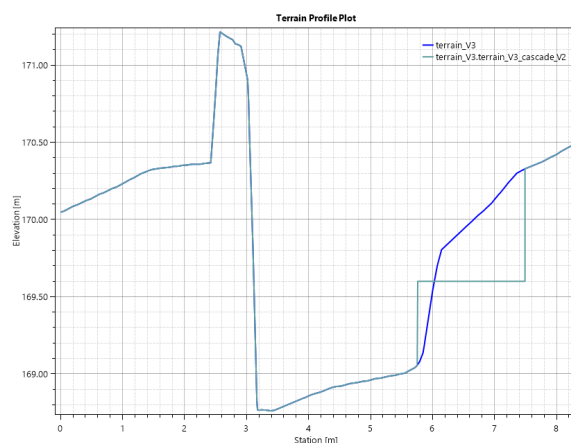


FIGURE 25 – Scénario 4 : coupe transversale du lit de la rivière (en bleu la topographie actuelle, en gris la topographie modifiée).

7.4.5 Scénario 4 bis (3 & 4 combinés) : reconstruction partielle du mur & ouverture du gabarit

Les scénarios 3 et 4 sont ensuite combinés, ce qui implique que la partie du mur à l'ouest est détruite, un chenal de crue est aménagé et le gabarit de la rivière en berge droite est élargi.

7.4.6 Scénario 5 : modification de la confluence

Actuellement, les ruisseaux de Vesse et de Crupet se rejoignent perpendiculairement. À cause de ce confluent en « T », le Crupet ferait écran au ruisseau de Vesse et l'eau aurait tendance à rester bloquée sur place (BERNIER, 2021 ; ANDRÉ et LABAR, 2021). Pour le scénario 5, la forme de la confluence est modifiée afin que les eaux qui se rejoignent s'écoulent dans une direction identique (illustré en Figure 26). Dans le modèle, un canal remplace les 12 derniers mètres du ruisseau de Vesse jusqu'au confluent (cf. coupe en Figure 27).

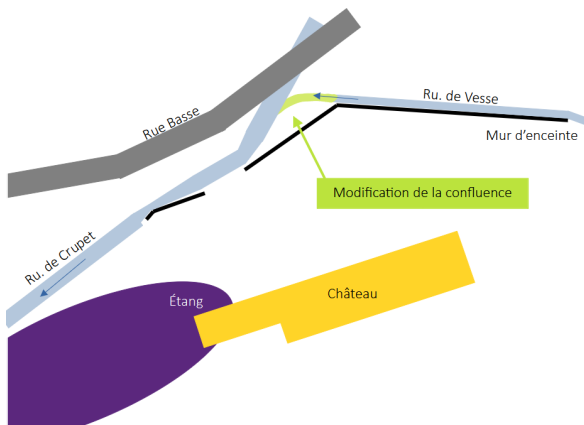


FIGURE 26 – Schéma du scénario 5 : modification de la confluence - Largeur de fond 1,1 m – Pente en rive gauche 4/4 et droite 8/4.

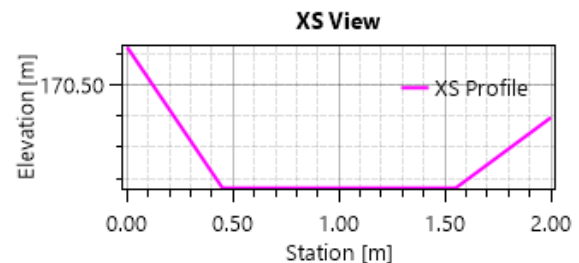


FIGURE 27 – Scénario 5 : coupe transversale dans le canal créé.

7.4.7 Scénario 6 : zone d'immersion temporaire (ZIT)

De plus amples informations sur les rôles et le fonctionnement des zones d'immersion temporaire sont disponibles en Annexe L.

Dans le cas du Crupet, la construction d'une ZIT est envisagée à la confluence entre les ruisseaux de Crupet et de Vovesenne (cf. Section 5 pour la localisation). L'ouvrage se compose d'une digue de 116,5 mètres de long et de hauteur 7 mètres. Sa capacité de stockage est d'environ 130 000 m³. Son volume correspond à l'écrêtement d'une pluie de période de retour de 50 ans (voir Figure 28 pour les caractéristiques de la ZIT, et la coupe transversale est présentée en Annexe L). Le déversoir inférieur laisse s'écouler au maximum un débit²⁸ de 1,5 m³/s. Lorsque que le volume de la ZIT est rempli à plus de 90 %, le débit sortant est doublé. L'effet de la ZIT est modélisé à l'aide d'un code Python sur la base de l'hydrogramme de crue initial à la confluence (ruisseaux de Crupet et de Vovesennes)²⁹. Ce dernier est modifié grâce à un calcul de bilans dynamiques des débits et volumes à chaque pas de temps considéré. Le fonctionnement de l'algorithme développé est détaillé en Annexe J.

28. Ce débit est choisi en fonction des simulations afin que le débordement n'atteignent pas les habitations. La carte des débits de plein bord est disponible en Annexe K.

29. La localisation du ruisseau de Vovesenne est fournie dans la Figure 5.

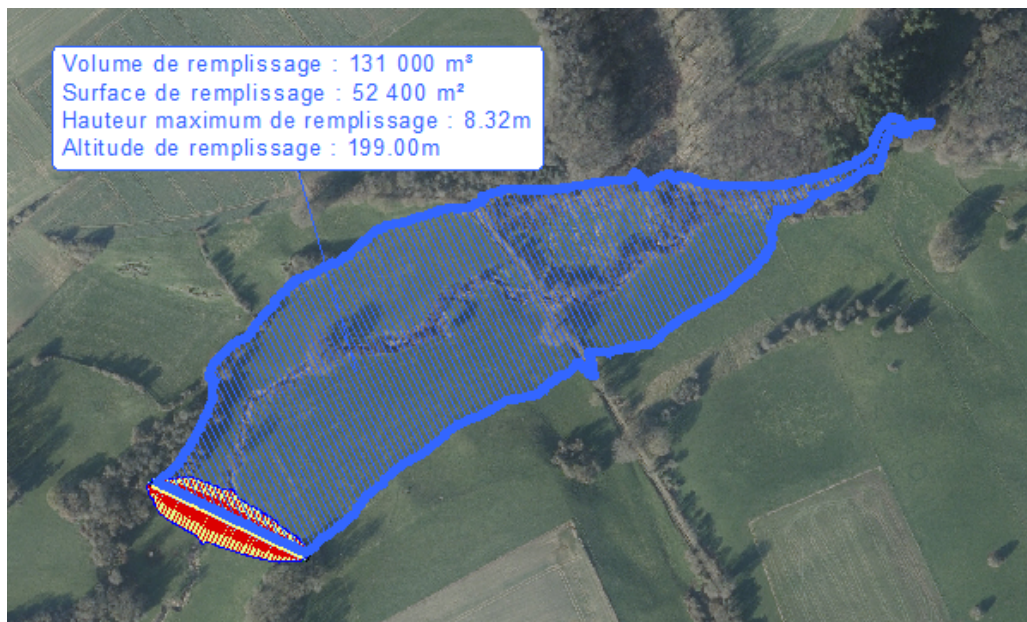


FIGURE 28 – Emprise de la digue de la ZIT et étendue inondée (données fournies par C. Descamps).

Une distance de $\pm 1\,200$ m sépare la ZIT de l'entrée du village. Par ailleurs, le ruisseau de Saint-Martin se jette dans le Crupet avant le village. Ces contributions accroissent le débit arrivant à Crupet par rapport à celui sortant de la ZIT. Cet apport est calculé par la différence entre les débits arrivant à l'entrée du village et les débits gagnant l'ouvrage (en absence de ZIT). Le débit sortant de la ZIT est donc majoré de cette différence afin d'obtenir l'hydrogramme réel atteignant le village. *In fine*, l'hydrogramme obtenu après modification est importé dans HEC-RAS.

7.4.8 Scénario 7 : suppression d'une chute

Quelques mètres au sud du n°7 de la rue Basse, un seuil semble modifier l'écoulement du cours d'eau. En dehors des périodes de crue, la section transversale y est réduite de moitié. Pour le scénario 7, ce seuil est supprimé et la topographie est remplacée par une section de canal de 17 m de long (voir Figures 29 et 30). Les dimensions du passage restent toutefois identiques à celles de la section actuelle.

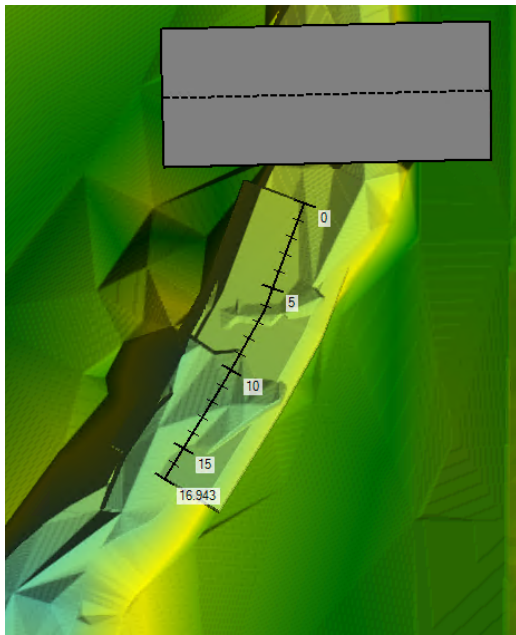


FIGURE 29 – Schéma du scénario 7 : suppression d'une chute à l'aval d'un pont.

7.4.9 Scénario 8 : banquette végétalisée

65 mètres en amont de la confluence, une banquette végétalisée a été modélisée au niveau des maisons du n°8, 9 et 9A de la rue Basse. Elle permet d'ouvrir le gabarit du cours d'eau en rive droite, dans l'optique de prévenir des inondations des habitations situées en rive gauche. Le décaissement mené se fait sur une largeur de ± 2 m, et sur une linéaire de presque 63 m (cf. Figure 31). La banquette se trouve environ 90 cm au-dessus du fond du Crupet (voir Figure 32).

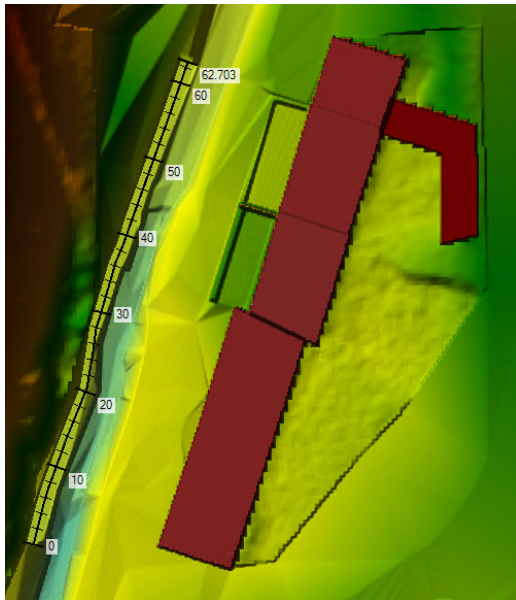


FIGURE 31 – Schéma du scénario 8 : banquette végétalisée.

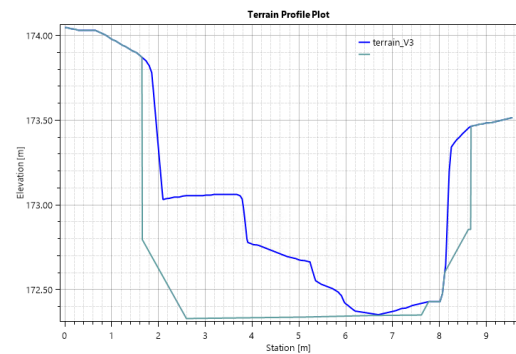


FIGURE 30 – Scénario 7 : coupe transversale dans le canal créé (en bleu la topographie actuelle, en gris la topographie modifiée).

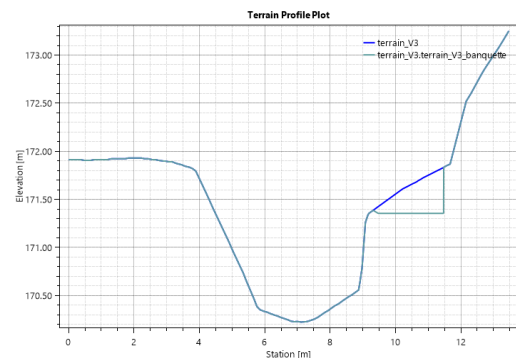


FIGURE 32 – Scénario 8 : coupe transversale dans la banquette (en bleu la topographie actuelle, en gris la topographie modifiée).

8 Modèle économique

Le modèle INSYDE-BE est utilisé afin de chiffrer les dommages des inondations sur les habitations de Crupet. Comme indiqué en Section 3, il est capital de connaître les caractéristiques des inondations et les propriétés des bâtiments touchés. L'ensemble des paramètres repris dans le modèle sont résumés dans le Tableau 2.

Tout d'abord, les vitesses et les hauteurs d'eau sont exportées du logiciel HEC-RAS. Avec QGIS, l'outil de statistique de zone est appliqué sur les cartes raster avec un tampon de 10 cm bordant les habitations. Après exportation sous format Excel, une hauteur d'eau/une vitesse d'écoulement moyenne, médiane et maximale est associée à chaque bâtiment étudié. Concernant les sédiments, la valeur par défaut est maintenue telle qu'elle, et l'eau est considérée comme polluée. La dernière caractéristique à renseigner est la durée de l'inondation qui semble courte selon les riverain-es et les archives (BERNIER, 2021). Dans ce cas, une valeur de 12 heures est choisie arbitrairement. La valeur exacte importe peu puisque pour une durée inférieure ou égale à 12h, certains coûts sont nuls (comme la déshumidification ou l'enlèvement des plinthes), et ceci quelle que soit sa valeur exacte.

Ensuite, les caractéristiques propres aux bâtiments sont issues de plusieurs sources. Le PICC (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a) est exploité pour calculer la surface externe des maisons. Une visite de terrain a permis de collecter des informations telles que le type de revêtement extérieur, le niveau de finition et de maintenance, etc. Les données chiffrées (comme la hauteur des seuils) ont été estimées *de visu*. Quant à la date de construction des bâtiments, elle a été approchée à l'aide des orthoimages de WalOnMap qui permettent de remonter dans le temps (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a). Pour les bâtiments anciens (19e et 20e siècles), une date par défaut (1940) a été choisie³⁰. Les prix unitaires des matériaux sont mis à jour pour l'année 2023 grâce à l'indice de prix à la production dans la construction publié par Statbel (2023).

Le modèle INSYDE-BE est employé directement puisqu'un code RStudio est fourni par Scorzini et al. (2022). Une matrice des dommages (en €) en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement³¹ est générée indépendamment pour 24 habitations de la zone étudiée. Les dommages totaux des inondations sont calculés en comparant la situation actuelle et celle après aménagement (pour chaque scénario). Un code Python permet de faire correspondre les données des hauteurs d'eau, des vitesses d'écoulement avant et après aménagement à l'échelle de chaque bâtiments, et les coûts recensés dans la matrice de dommages. Les dommages totaux résultent de la somme des coûts de chacune des habitations.

30. L'année charnière du modèle est 1970 puisque les calculs divergent en fonction de la date de construction des bâtiments.

31. L'incrément est de 0,01 m pour les hauteurs d'eau et 0,1 m/s pour les vitesses.

TABLE 2 – Résumé des paramètres à introduire dans le modèle INSUDE-BE.

Abréviation	Nom de la donnée	Description	Unité	Source
he	Hauteur d'eau	Valeur à l'intérieur du bâtiment	m	HEC-RAS
v	Vitesse d'écoulement	Valeur max perpendiculaire au bâtiment	m/s	HEC-RAS
s	Concentration en sédiments		%	Valeur par défaut
d	Durée d'inondation		h	Valeur par défaut
q	Qualité de l'eau	Valeur binaire	-	Hypothèse
BT	Type de bâtiment	1 - Détaché 2 - Semi-détaché 3 - Attaché 4 - Appartement	-	Terrain
BS	Structure du bâtiment	1- Béton armé 2- Maçonnerie	-	Terrain
PB	Position du bâtiment	1 - Coin 2- Centre 3- Autre	-	Terrain
YY	Année de construction		Années	WalOnMap
PD	Plan de distribution (si YY < 1990)	1- Centralisé 2- Individuel	-	Valeur par défaut
FL	Coefficient du niveau de finition	1,2 - Haut 1 - Intermédiaire 0,8 - Bas	-	Terrain
EFM	Niveau de finition extérieur	1- Platre 2-Pierre 3- Maçonnerie/brique 4- Pierre + brique	-	Terrain

TABLE 2 – Résumé des paramètres à introduire dans le modèle INSYDE-BE.

Abréviation	Nom de la donnée	Description	Unité	Source
LM	Coefficient du niveau de maintenance	1,2 - Haut 1 - Intermédiaire 0,9 - Bas	-	Terrain
FA	Surface du bâtiment		m ²	PICC
IH	Hauteur entre les étages		m	Terrain
BH	Hauteur du sous-sol		m	Terrain
NF	Nombre d'étage		Entier	Terrain

Résultats

9 Modèle hydrologique

9.1 Délimitation des sous-bassins versants

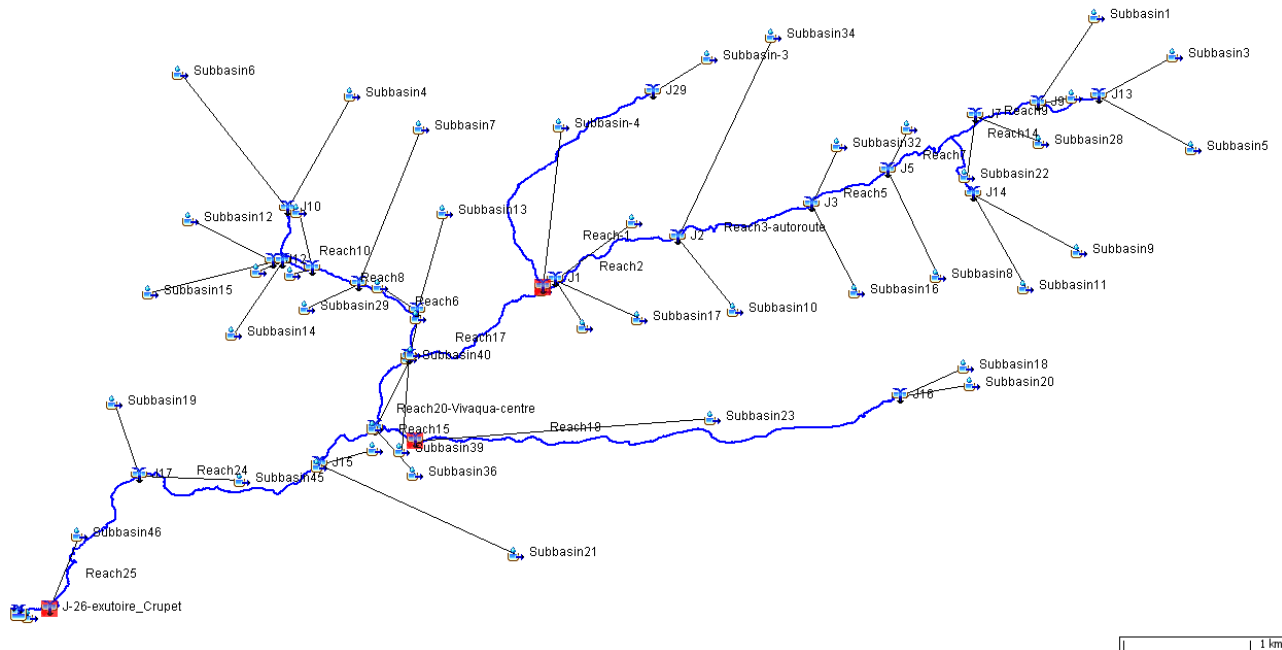


FIGURE 33 – Capture d'écran du modèle HEC-HMS.

Le modèle hydrologique schématisant le bassin versant de Crupet est présenté en Figure 33. Il est composé de 48 sous-bassins versants chacun relié à un élément de jonction. Les jonctions sont reliées entre elles par des sections de rivière (qui sont au nombre de 47). La Figure 34 permet d'apprécier la répartition des sous-bassins ainsi que des sections de rivière. Le résultat obtenu peut être comparé aux données du Réseau Hydrographique Wallon (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a). *De visu*, la majorité de tronçons se superpose, mis à part pour certains cours d'eau non classés. À noter que les rivières générées par HEC-HMS sont définies à partir d'une surface drainée supérieure à $0,4 \text{ km}^2$. Dans l'ensemble, les rivières ont une longueur médiane de 684 m et les sous-bassins ont une superficie médiane de 60,3 ha. Degré et al. (2014) suggèrent de ne pas utiliser la méthode SCS pour des superficies supérieures à 800 ha. Le modèle HEC-HMS respecte cette condition puisque les sous-bassins font au maximum 346 ha.

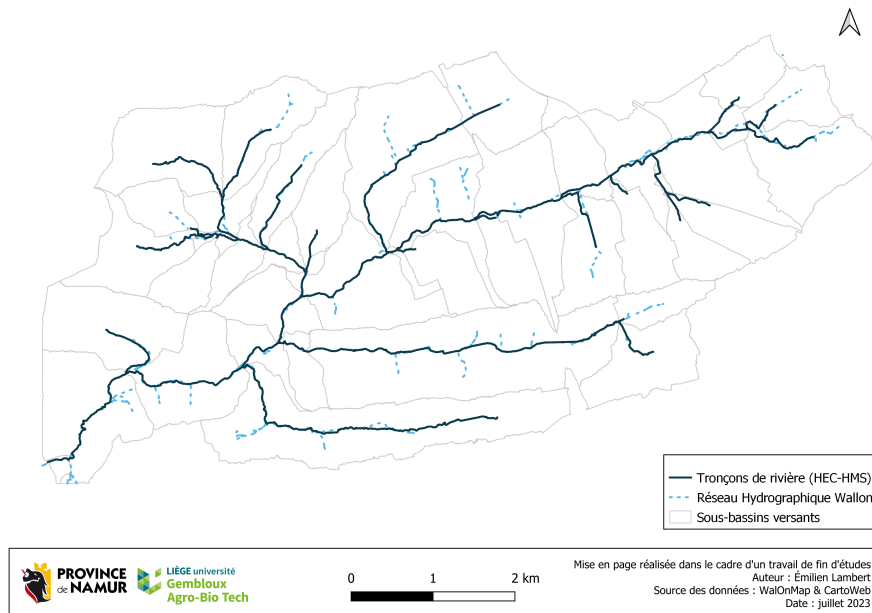


FIGURE 34 – Carte des sous-bassins versants et des tronçons de rivière obtenus avec HEC-HMS.

9.2 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité du modèle HEC-HMS a permis de connaître les paramètres clés qui impactent plus ou moins fortement les résultats. Pour cette analyse, cinq variables ont été prises en compte : le *Curve Number* (CN), l'interception initiale (Ia), le temps de montée (*Lagtime*), le coefficient de Manning (du lit mineur, et des berges droites et gauches), et l'index d'écoulement (*Index Flow*)³² Le Tableau 35 porte sur les débits de pointe et le Tableau 36 sur les volumes totaux arrivant à l'exutoire. Les résultats montrent que le coefficient CN impacte fortement le modèle. Une variation de l'ordre de 10 % du paramètre implique une modification de débits ou de volumes comprise entre 20 % et 30 %. Le coefficient CN moyen de l'ensemble du bassin versant³³ est comparé à celui obtenu avec les cartes du SPW-GISER (cf. Annexe M). Pour les autres paramètres, une erreur de 30 % du paramètre entré conduit à une erreur inférieure à 10 % sur les débits et les volumes générés.

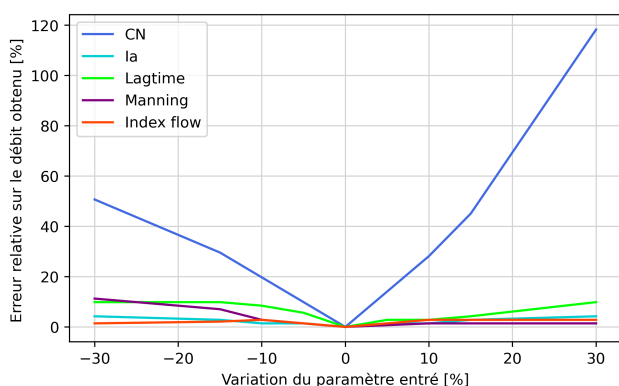


FIGURE 35 – Analyse de sensibilité du débit de pointe pour la pluie du 15 juillet 2021.

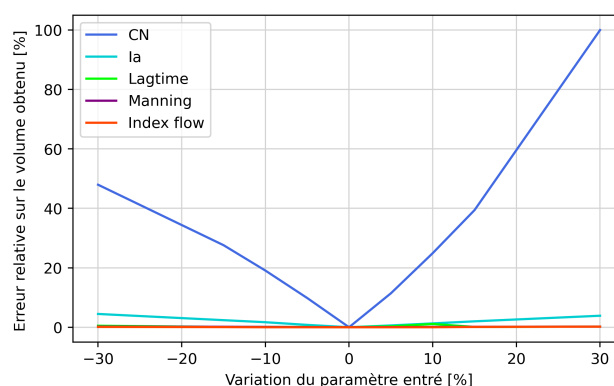


FIGURE 36 – Analyse de sensibilité du volumes à l'exutoire pour la pluie du 15 juillet 2021.

32. La signification de ces paramètres est expliquée aux Sections 6.1 et 6.2.

33. La moyenne du coefficient se base sur les valeurs unitaires des CN choisies pour chaque classe d'occupation du sol dans le modèle HEC-HMS.

9.3 Hydrogrammes de crue

Le résultat final du modèle HEC-HMS consiste à obtenir les hydrogrammes de crue qui seront importés dans le modèle de simulation d'inondations. Avant de rentrer dans le vif du sujet, il est opportun de remarquer que la calibration du modèle HEC-HMS est expliquée dans la section suivante puisqu'elle concerne conjointement les modèles hydrologique et hydraulique.

Tout d'abord, les hydrogrammes se distinguent par rapport à la nature de l'évènement simulé. D'une part, les données s'appuient sur des pluies réelles, comme pour l'inondation du 15 juillet 2021. Cette situation est illustrée en Figure 37 qui présente les hydrogrammes de crue des ruisseaux de Vesse et de Crupet³⁴. En termes de débits, le ruisseau de Crupet a une plus grande contribution puisque son bassin versant ($22,9 \text{ km}^2$) est largement supérieur à celui du ruisseau de Vesse ($4,9 \text{ km}^2$). De plus, deux pics se distinguent dont le premier est plus marqué. Celui-ci s'étale sur environ six heures et les débits au pic de crue sont de l'ordre de $16,3 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le Crupet et $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le ruisseau de Vesse.

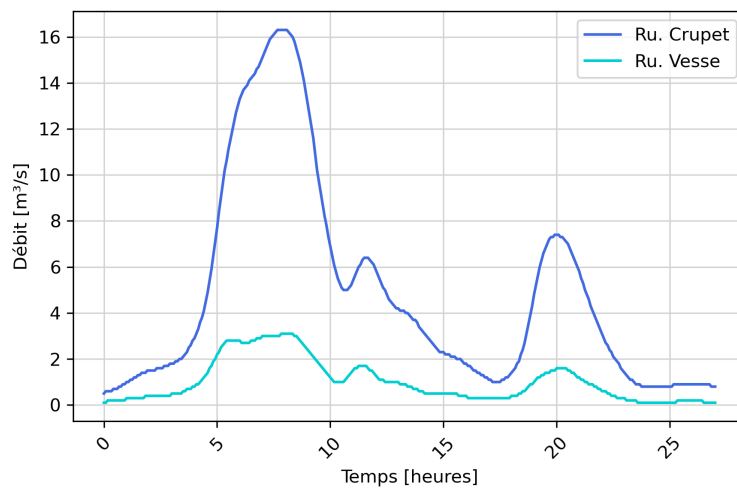


FIGURE 37 – Hydrogrammes associée à la pluie du 15 juillet 2021.

L'hydrogramme précédemment présenté est appliqué à l'ensemble des scénarios de simulation d'inondation, à l'exception de celui propre à la zone d'immersion temporaire. L'effet de la ZIT, pour sa part, est modélisé par la modification de l'hydrogramme de crue du ruisseau de Crupet. La Figure 38 présente l'ensemble des débits sortants et entrants de la ZIT, et les débits arrivant au village de Crupet. La comparaison des hydrogrammes avant et après la construction d'une ZIT est fournie en Figure 39. Pour la pluie de juillet 2021, les débits maximums au centre du village sont réduits de $16,3$ à $9,4 \text{ m}^3/\text{s}$ grâce à l'ouvrage.

³⁴. Les hydrogrammes correspondent à la position des conditions limites de la simulation HEC-RAS (comme présentée en Figure 17).

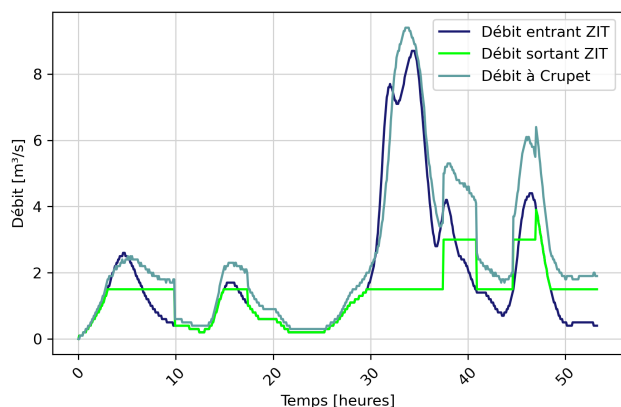


FIGURE 38 – Hydrogrammes d'entrée et de sortie de la ZIT, et hydrogramme de crue à l'entrée du village.

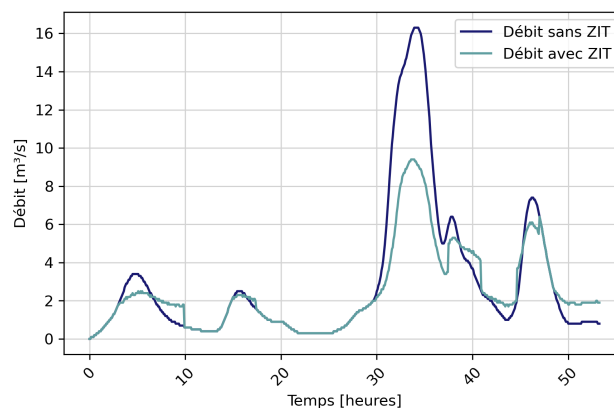


FIGURE 39 – Comparaison des hydrogrammes du ruisseau de Crupet (à l'entrée du village) avec et sans l'implémentation d'une ZIT.

Enfin, des pluies synthétiques (associées à des périodes de retour de 5, 15, 25, 50 et 100 ans) d'une durée de 24 heures ont servi à l'élaboration de divers hydrogrammes. Le graphique des précipitations cumulées (Figure 55) et ceux des hydrogrammes résultants (Figure 54) sont consultables en Annexe N.

10 Calibration des modèles hydrologique et hydraulique

10.1 Ajustements conjoints des modèles

L'intérêt de la calibration est de comparer, pour un ou plusieurs événements donnés, les résultats issus d'un modèle à des mesures prises sur le terrain. Puisque le bassin versant de Crupet n'est pas jaugé, les hydrogrammes obtenus par le modèle HEC-HMS ne peuvent être calibrés directement. Afin de s'affranchir du manque de données, les modèles hydrologique et hydraulique sont calibrés conjointement.

La procédure appliquée s'appuie sur l'évènement du 15 juillet 2021 étant donné qu'il est largement documenté³⁵. À l'issue des premières simulations, les caractéristiques de l'inondation (étendue, hauteur d'eau, dynamique) s'éloignent fortement des données historiques disponibles (photos, vidéos, témoignages). Afin de pallier ce problème, une calibration manuelle des paramètres prépondérants est effectuée sur le modèle HEC-HMS. La réduction du coefficient CN permet de restreindre les débits arrivant à l'exutoire, mais il n'est pas possible de garder ce paramètre dans l'intervalle de confiance préalablement défini. La modification des autres paramètres du modèle n'a pas non plus permis d'obtenir un hydrogramme dont les effets coïncident avec les données historiques.

³⁵. Pour rappel, les précipitations sont renseignées à l'échelle du sous-bassin versant avec des pluies spatialisées publiées par l'IRM (INSTITUT ROYAL MÉTÉOROLOGIQUE, 2023b).

Afin de garder l'ensemble des paramètres dans une gamme de valeur physiquement interprétable, une méthode de ratio (*Ratio Method*) a dû être appliquée. Cette ultime solution permet de réduire fictivement les débits produits à l'échelle des sous-bassins versants. Comme le choix de cette valeur de ratio est totalement arbitraire du point de vue hydrologique, la calibration s'appuie sur les simulations hydrauliques. En effet, différents scénarios de ratio ³⁶ ont été modélisés dans HEC-RAS afin de juger les résultats obtenus. *In fine*, le scénario le plus représentatif est lié au ratio de 0,4. Ceci implique que 40 % des débits calculés sont conservés tandis que les 60 % restants ne sont plus pris en compte. Dans ce cas, la dynamique propre à l'inondation paraît cohérente, comme pour certains murs qui sont surpassés par l'écoulement (notamment dans la partie nord du Crupet). Il en est de même pour l'étendue et les hauteurs d'eau, qui se rapprochent des images, vidéos et témoignages récoltés. Les différentes simulations associées à un ratio donné ont été présentées à des riverains témoins de l'inondation et le choix du ratio de 0,4 a été confirmé. Il est probable que la réduction des débits soit liée à l'effet des roches karstiques, dont les processus ne sont pas repris dans le modèle. D'autres explications concernant les pertes karstiques et la méthode de ratio seront discutées ci-après.

10.2 Méthode de transfert

Comme expliqué précédemment, la méthode de transfert permet d'estimer le débit au pic de crue pour le bassin versant de Crupet en le comparant au bassin hydrographique du Leignon. Quatre événements de crue ont été isolés entre 2010 et aujourd'hui sur le Leignon à partir des données pluviométriques et limnimétriques. Pour cette région, les débits mesurés varient entre 4,11 et 6,96 m³/s. La table des précipitations extrêmes de l'IRM pour Ciney établit la correspondance entre une pluie et sa période de retour associée (INSTITUT ROYAL MÉTÉOROLOGIQUE, 2023a). Le Tableau 3 présente l'ensemble de ces données, ainsi que les débits issus de l'application de la méthode. Comme le Crupet a une superficie supérieure au Leignon, les débits estimés sont majorés. Ceux-ci se situent entre 4,44 et 7,24 m³/s. En guise de complément, une analyse de sensibilité du paramètre α est présentée en Annexe H.

TABLE 3 – Estimation des débits du Crupet au pic de crue par la méthode de transfert sur base de quatre événements mesurés sur le Leignon.

Date de la crue (Leignon)	Débit de pointe (Leignon)	Période de retour (de la pluie)	Débit estimé (Crupet)
14/11/2010	4,60 m ³ /s	2 ans	5,34 m ³ /s
21/09/2014	6,96 m ³ /s	30 - 40 ans	8,08 m ³ /s
09/10/2014	4,11 m ³ /s	2 - 5 ans	4,44 m ³ /s
15/07/2021	6,24 m ³ /s	10 - 15 ans	7,24 m ³ /s

36. Les ratios choisis vont de 1 à 0,1, avec un intervalle de 0,1, voire 0,05 pour affiner certains résultats.

10.2.1 Comparaison avec les débits estimés

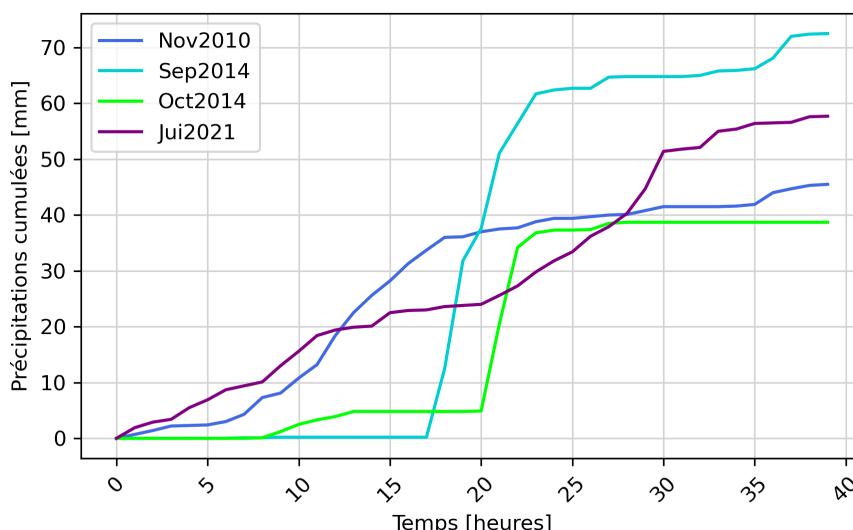


FIGURE 40 – Précipitations cumulées extraites du pluviomètre de Ciney pour quatre évènements majeurs.

Dans le point précédent, une calibration combinée des modèles hydrologique et hydraulique a été menée. Il est toutefois nécessaire de vérifier la pertinence des hydrogrammes obtenus avec le modèle HEC-HMS au regard des résultats de la méthode de ratio. Pour les quatre évènements choisis sur le Leignon, l'allure des précipitations cumulées est présentée en Figure 40. Les pluies de novembre 2010 et juillet 2021 ont tendance à s'étendre sur une longue période. Au contraire, en septembre 2014 et octobre 2014 les précipitations sont brèves. Une hypothèse doit être formulée quant à l'homogénéité de la répartition des pluies sur les bassins versants. Celle-ci implique de considérer que la mesure des précipitations du pluviomètre de Ciney est représentative de l'ensemble du bassin versant.

Les données des débits au pic de crue estimés (avec la méthode de transfert) et obtenus par le modèle HEC-HMS (avec le ratio de 0,4) sont présentées dans le Tableau 4. Sans utiliser la méthode de ratio, les débits issus du modèle sont entre 8 et 10 fois supérieurs aux estimatifs réalisés. Ils s'éloignent fortement des résultats attendus, et dans le cas du Crupet, semblent totalement improbables. Les divergences entre le modèle et les prédictions se restreignent avec le ratio de 0,4, bien que les résultats d'HEC-HMS restent entre 1,2 et 2 fois supérieurs. En complément, l'Annexe Q reprend une analyse des coefficients d'écoulement pour le bassin versant du Leignon.

TABLE 4 – Résultats des débits au pic de crue avec et sans utilisation de la méthode de ratio.

Date de la crue	Débit (sans ratio)	Débit (avec ratio 0,4)	Débit estimé (méthode de transfert)
14/11/2010	24,60 m ³ /s	3,80 m ³ /s	5,34 m ³ /s
21/09/2014	86,60 m ³ /s	16,40 m ³ /s	8,08 m ³ /s
09/10/2014	42,40 m ³ /s	9,30 m ³ /s	4,44 m ³ /s
15/07/2021	63,90 m ³ /s	9,00 m ³ /s	7,24 m ³ /s

11 Modèle hydraulique

11.1 Précipitations du 15 juillet 2021

Sur base de l'hydrogramme de crue de juillet 2021, divers aménagements hydrauliques ont été modélisés afin de quantifier leurs impacts. Les scénarios testés se rapportent à ceux qui ont été détaillés dans la Section 7.4.

Il convient de distinguer les mesures simulées en fonction de leur localisation spatiale. Les scénarios de 1 à 6 ont un impact sur l'ensemble de la zone étudiée, tandis que les scénarios 7 et 8 portent sur l'amélioration du Crupet avant sa confluence avec le ruisseau de Vesse. Le modèle HEC-RAS permet d'obtenir des cartes de répartition des hauteurs d'eau et des vitesses. Dans les plaines inondables, les vitesses d'écoulement restent limitées et ne font pas l'objet d'une analyse approfondie. L'étude se concentre plutôt sur les hauteurs d'eau qui impactent majoritairement les habitations de Crupet. La carte présentée en Figure 57 illustre un exemple de la répartition des hauteurs d'eau. L'ensemble des cartes lié aux scénarios d'aménagement est disponible en Annexe O.

11.1.1 Impacts des aménagements à l'échelle globale

Dans le Tableau 5 se trouvent les résultats des scénarios de 1 à 6 portant sur la zone proche de la confluence des cours d'eau de Crupet et de Vesse. La situation actuelle sert de référence.

Les résultats montrent que la reconstruction totale du mur engendre une augmentation de 4 320 m² des zones inondées. La hauteur d'eau (médiane) au droit des bâtiments croît de 18 cm et 3 maisons supplémentaires sont touchées. Le constat est identique pour le scénario 4 qui combine la reconstruction du mur à l'élargissement localisé du gabarit de la rivière. Seule la hauteur d'eau maximale moyenne est réduite de 2 cm en comparaison à la situation actuelle.

Concernant la reconstruction de la portion détruite du mur, la destruction de la partie de gauche et la création d'une émissaire de crue (scénario 3), l'étendue de la zone touchée augmente d'un peu moins de 700 m². La hauteur d'eau à l'intérieur des habitations s'accroît de 3 cm (selon la médiane). Le nombre de maisons touchées reste toutefois identique aux conditions actuelles. Le scénario 3, lorsqu'il est combiné à l'élargissement du gabarit de la rivière (scénario 4), ne montre pas de différence majeure par rapport au scénario 3 appliqué seul.

En outre, une modification de l'angle de confluence a été testée dans le scénario 5. Elle conduit à une diminution de la surface inondée de 120 m². *De visu*, l'amélioration semble surtout profiter aux maisons 14 et 15 de la rue Basse (voir Figure 61). La hauteur maximale est le seul paramètre dont les valeurs diminuent significativement (5 cm). Ce scénario n'a toutefois pas d'influence sur le nombre de maisons touchées. Enfin, la création d'une zone d'immersion temporaire dimensionnée pour retenir une pluie de période de retour de 50 ans a été examinée (scénario 6). La superficie inondée est ainsi réduite de 6 262 m², c'est-à-dire une diminution proche de 25 %. La ZIT permet de préserver trois habitations par rapport à la situation actuelle. De plus, les niveaux d'eau médians sont abaissés de 17 cm, et la hauteur maximale diminue de 26 cm.

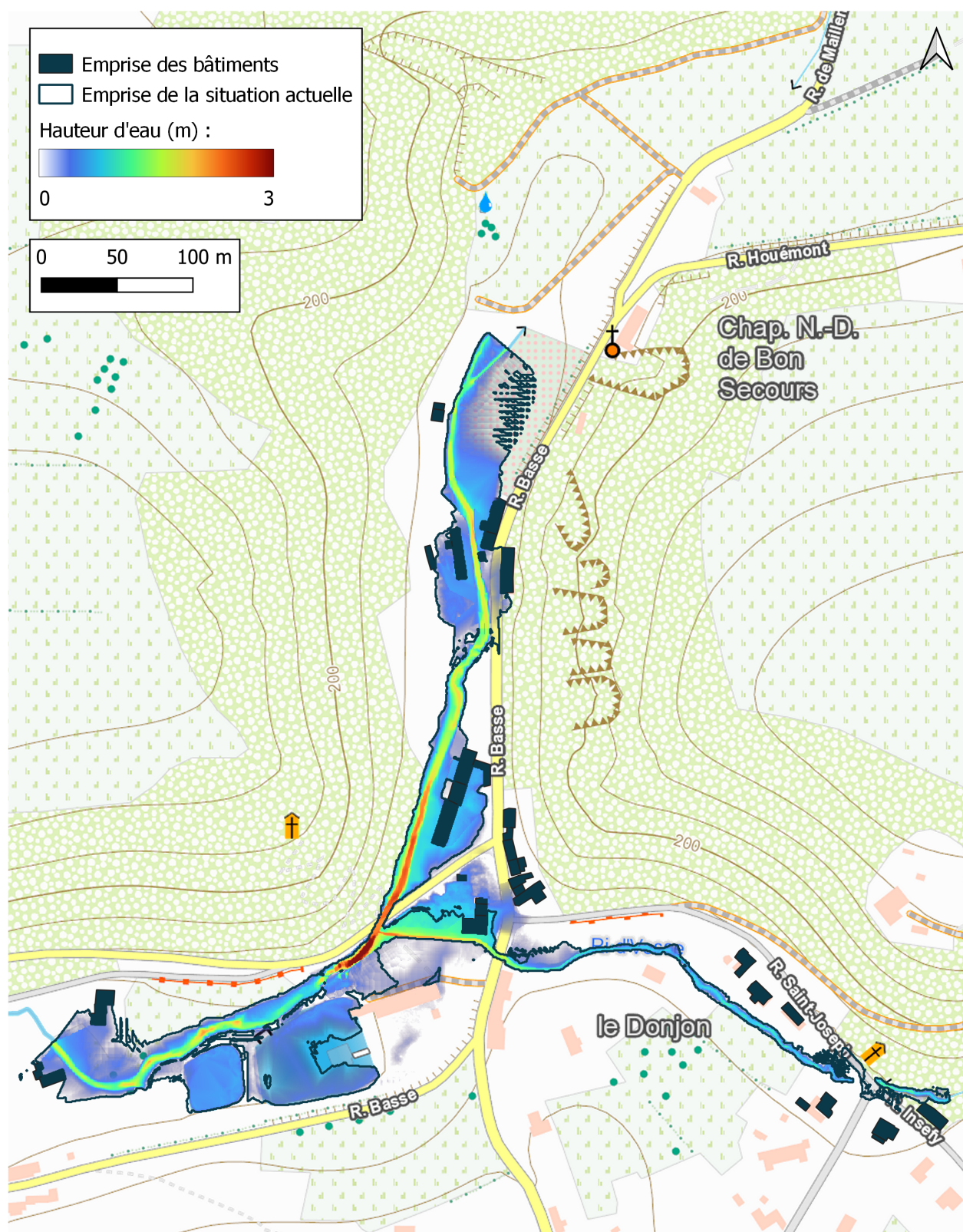


FIGURE 41 – Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 2 - reconstruction totale du mur.

TABLE 5 – Résultats des scénarios de 1 à 6.

Scénario	Intitulé	Étendue	Nb de maisons touchées ($h_{eau} > 0$ cm)	Hauteur médiane	Hauteur max
1	Situation actuelle	26 024 m ²	11	26 cm	54 cm
2	Reconstruction totale du mur	30 348 m ²	14	44 cm	59 cm
3	Reconstruction partielle du mur et émissaire de crue	26 713 m ²	11	29 cm	54 cm
4	Élargissement du gabarit et reconstruction totale du mur	30 499 m ²	14	44 cm	52 cm
4 bis	Scénario 3 + scénario 4	26 647 m ²	11	29 cm	53 cm
5	Confluence	25 897 m ²	11	25 cm	49 cm
6	ZIT	19 762 m ²	8	9 cm	28 cm

TABLE 6 – Résultats des scénarios de 7 et 8.

Scénario	Intitulé	Étendue	Nb de maisons touchées ($h_{eau} > 0$ cm)	Hauteur médiane	Hauteur max
1	Situation actuelle	26 024 m ²	7	26 cm	69 cm
7	Suppression chute	25 597 m ²	7	23 cm	64 cm
8	Banquette	26 003 m ²	7	26 cm	68 cm

11.1.2 Impacts des aménagements pour la section nord

Dans une seconde approche, le Crupet est analysé dans son tronçon avant la confluence avec le ruisseau de Vesse. Les aménagements testés ont pour objectif de réduire l'inondabilité le long de la rue Basse. La situation actuelle sert une nouvelle fois de comparatif, mais les chiffres repris ne concernent que les maisons de la partie nord du Crupet. Les résultats associés sont repris dans le Tableau 6.

Pour commencer, la suppression de la chute quelques mètres en aval du pont (scénario 7) réduit la zone inondée d'environ 432 m². Les hauteurs d'eau diminuent de 3 et 5 cm respectivement pour la médiane et la hauteur maximale. Le nombre de maisons touchées, qui équivaut à 7, ne varie pas avec le scénario 7. Finalement, la création d'une banquette a fait l'objet de la simulation 8. Les résultats obtenus se confondent avec ceux de la situation actuelle.

11.2 Pluies synthétiques

L'utilisation de pluies synthétiques permet de modéliser l'étendue des zones inondées à Crupet en fonction des périodes de retour. Dans ce cas, une vue plus globale de la situation est apportée au regard des statistiques d'occurrence. Des pluies d'une durée de 24 heures et d'une période de retour de 5, 15, 25, 50 et 100 ans ont été appliquées sur l'ensemble du bassin versant dans le modèle HEC-HMS. Les hydrogrammes sont ensuite exportés vers le modèle de simulation d'inondations. Il est important de souligner que les périodes de retour portent sur les pluies et ne peuvent pas être confondues avec celles propres aux crues. Ces dernières restent toutefois inconnues puisque le bassin versant n'est pas jaugé. Les simulations ont permis d'obtenir les étendues inondées qui sont présentées en Figure 42. Elles se basent sur l'état actuel des rivières de Crupet. En complément, la carte des aléas d'inondation légalement en vigueur est accessible en Annexe P.

Les résultats obtenus montrent que plusieurs habitations ont un niveau de vulnérabilité élevé. C'est le cas des maisons à la confluence entre les ruisseaux de Crupet et de Vesse (rue Basse n°14 et 15), qui subissent les inondations dès la période de retour de 5 ans. Le constat est identique concernant six habitations bordant le Crupet à hauteur de la rue Basse. Cependant, la vulnérabilité est plus faible le long du ruisseau de Vesse (à l'est de la rue Basse). Deux maisons sont touchées par les inondations³⁷ et ceci à partir d'une période de retour de 25 ans.

37. Une des maisons impactées (à l'extrême est du village) a été construite en 2021. En suivant les prérogatives actuelles exigées en termes de construction par la Province, cette maison est probablement surélevée du niveau du sol.

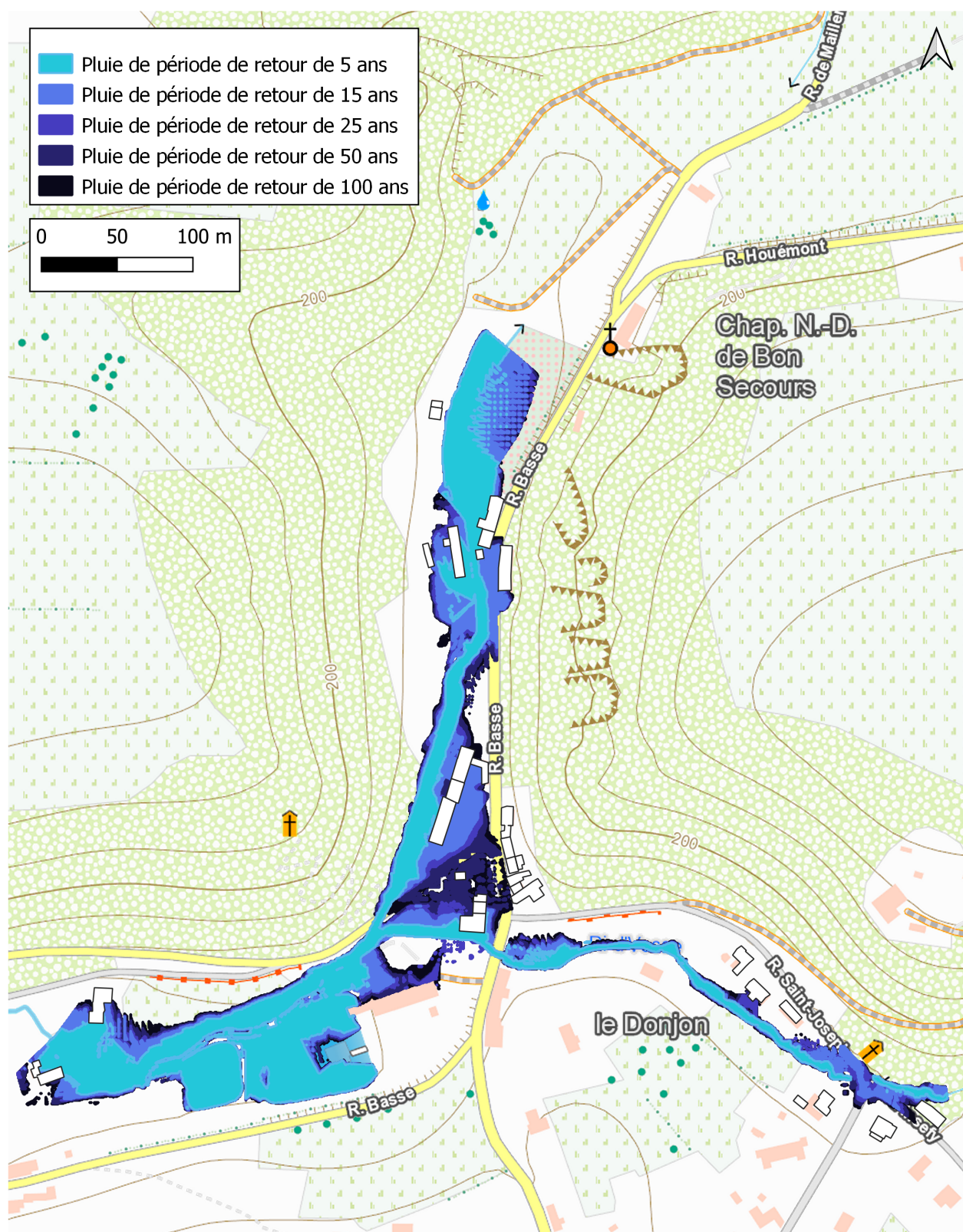


FIGURE 42 – Carte des zones inondées pour diverses pluies de période de retour.

En Annexe K se trouve une carte des débits de plein bord. Un point d'attention doit être marqué concernant le dernier tronçon du ruisseau de Vesse, juste avant la confluence avec le Crupet. Dans cette section, le débit de plein bord semble faible en comparaison aux autres portions en amont du même cours d'eau. Cette remarque confirme la vulnérabilité élevée qui a été évoquée concernant les habitations proches du ruisseau de Vesse, aux numéros 14 et 15 de la rue Basse.

12 Analyse économique

L'implémentation du modèle INSYDE-BE a permis de calculer le coût des dommages pour chaque scénario d'aménagement précédemment modélisé. Les préjudices sont calculés indépendamment pour les 24 habitations étudiées. Le montant des dégâts provient d'une matrice reliant les coûts des pertes en fonction des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement. Un exemple de fonctions de dommage portant sur trois maisons est illustré en Figure 43.

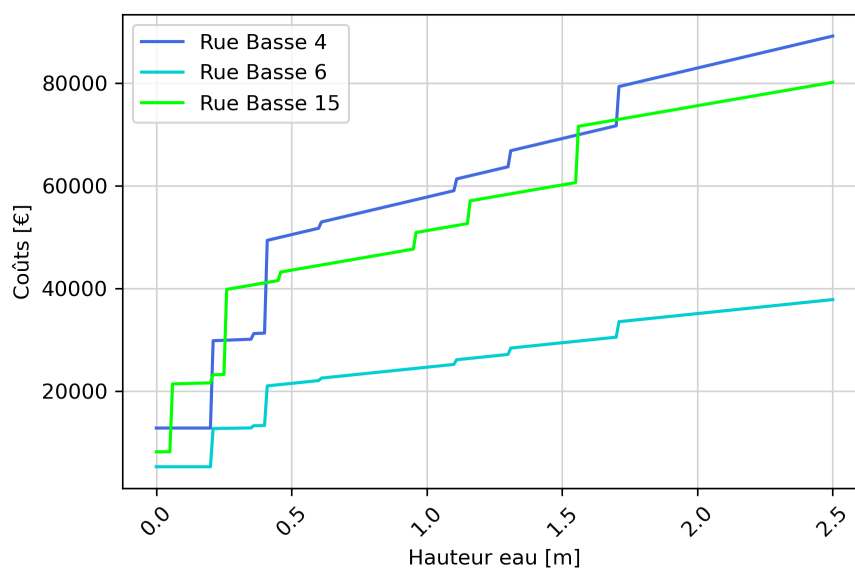


FIGURE 43 – Exemple de fonctions de dommage (en considérant une vitesse d'écoulement de 0,5 m/s).

Le Tableau 7 présente l'analyse économique qui compare la situation actuelle à celles après la mise en place des aménagements. La crue du 15 juillet 2021 sert une nouvelle fois de référence. À noter que l'analyse économique des aménagements aurait pu être réalisée sur la base des pluies synthétiques. Ainsi, il est possible de quantifier les dommages évités aussi bien pour des crues récurrentes et que pour des événements peu fréquents. Cependant, cette approche nécessite un nombre élevé de simulations, en modélisant chaque aménagement pour plusieurs périodes de retour de pluies différentes. Pour cette raison, l'étude économique s'appuie uniquement sur l'évènement de référence du 15 juillet 2021.

D'une part, certaines simulations empirent la situation actuelle en provoquant une augmentation des dégâts. La reconstruction totale du mur du château (couplée ou non avec l'élargissement du gabarit) engendre des coûts de l'ordre de 79 000 € (scénarios 2 et 4). La modification du mur, combinée à la création d'une émissaire de crue (scénarios 3 et 4 bis), entraîne des dommages proches de 18 000 €. Qui plus est, la création d'une banquettes (scénario 8) n'a pas d'influence sur les inondations et ne change donc pas l'ampleur des dommages occasionnés.

TABLE 7 – Coûts des dommages totaux estimés avant et après la réalisation d'aménagements au regard de la crue du 15 juillet 2021.

Scénario	Intitulé	Coûts actuels	Coûts après aménagement	Différence de coûts
2	Reconstruction totale du mur		238 718 €	+ 79 183 €
3	Reconstruction partielle du mur et émissaire de crue		177 902 €	+ 18 368 €
4	Élargissement du gabarit et reconstruction totale du mur		238 435 €	+ 78 900 €
4 bis	Scénario 3 + scénario 4	159 534 €	177 811 €	+18 277 €
5	Confluence		157 922 €	-1 613 €
6	ZIT		26 749 €	-132 785 €
7	Suppression chute		142 336 €	-17 198 €
8	Banquette		159 534 €	0 €

D'autre part, plusieurs aménagements sont bénéfiques pour éviter les préjudices sur les habitations. Ceux-ci montent jusqu'à 132 785 € lors de l'aménagement d'une zone d'immersion temporaire (scénario 6). La suppression de la chute (scénario 5) et le changement de l'angle de confluence (scénario 7) réduisent les dommages de respectivement 17 198 € et 1 613 €.

Pour la mise en place des mesures qui réduisent le risque d'inondation, les montants totaux (hors TVA) sont présentés dans le Tableau 8³⁸. À noter que ces estimatifs ne prennent pas en compte les coûts de maintenance des ouvrages. En outre, l'indicateur de Retour Sur Investissement (RSI) illustre le lien entre l'argent investi pour l'établissement des mesures et les dommages évités pour l'évènement de juillet 2021. Le RSI est obtenu comme suit :

$$RSI = \frac{\text{(Gains liés au projet - coûts du projet)}}{\text{Coûts du projet}} \quad (11)$$

Sur la base du Tableau 8, l'argent gagné par la suppression de la chute (scénario 7) est presque dix fois supérieur aux coûts de mise en œuvre des travaux. Concernant l'amélioration de la confluence, il faudrait trois inondations comme celle de juillet 2021 pour que les dommages évités couvrent les investissements réalisés par la Province. Enfin, la construction d'une ZIT demandent des investissements de plusieurs milliers d'euros (environ 665 000 €)³⁹. Même si les bénéfices retirés sont conséquents, les coûts des travaux sont tels que le RSI est négatif.

TABLE 8 – Coûts de mise en œuvre des aménagements (HTVA) et Retour Sur Investissement (RSI).

Scénario	Intitulé	Estimation des travaux (HTVA)	RSI
5	Confluence	5 000 €	-0,68
6	ZIT	665 000 €	-0,80
7	Suppression chute	1 600 €	9,75

38. D'après les estimations réalisées par Isuf Hoti.

39. Un bureau d'études a été consulté pour l'étude géotechnique de la ZIT. Pour rappel, la digue est construite sur une sol karstique dont la stabilité du sol est à vérifier. L'offre reçue se décline en trois volets : la pré-étude de faisabilité (21 150 €), l'étude de faisabilité complète (35 250 €) et l'étude de conception de l'ouvrage (24 000 €). Ces montants illustrent les coûts demandés uniquement pour l'étude et le dimensionnement du projet.

Discussion

13 Limites des modèles hydrologique et hydraulique

13.1 Influence des données entrées

Dès sa conception, la qualité d'un modèle est tributaire de la précision des données sur lesquelles il repose. Certaines d'entre elles sont détaillées, comme pour la topographie qui avait fait l'objet d'un important relevé de terrain. Les données contenaient également les dimensions des ouvrages (ponts, murs, chutes, etc.). En outre, de nombreuses informations proviennent de cartes extraites de WalOnMap (le MNT, le réseau hydrographique, la géologie, l'occupation du sol, etc.).

Pour le modèle hydrologique, des pluies spatialisées de résolution d'1 km² ont pu être appliquées dans le modèle HEC-HMS à chacun des sous-bassins versants pour l'évènement du 15 juillet 2021. La Figure 44 illustre la variabilité inhérente aux précipitations à l'échelle du bassin versant de Crupet. Entre le 13 et le 16 juillet, la zone ouest a reçu jusqu'à 42,11 mm en plus que la partie est. Avec un écart-type de 9,81 mm, l'évènement pluvieux semble relativement homogène, du moins sur les trois quarts ouest du bassin versant. La spatialisation des pluies dans le modèle permet ainsi de prendre en compte la variabilité à l'échelle du bassin versant.

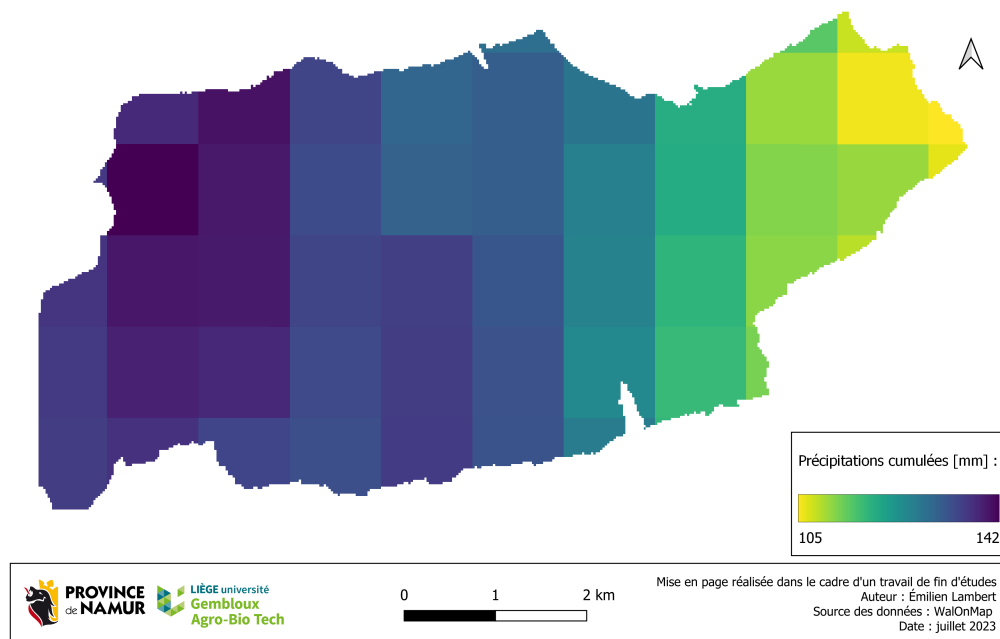


FIGURE 44 – Répartition spatiale des précipitations cumulées du 13 au 16 juillet 2021 (INSTITUT ROYAL MÉTÉOROLOGIQUE, 2023b).

Cependant, sans jaugeage⁴⁰, il n'est pas possible d'améliorer la qualité du modèle grâce à une calibration. L'absence de calibration impacte directement le modèle HEC-HMS, et de cause à effet le modèle HEC-RAS qui se base sur les hydrogrammes précédemment obtenus.

40. Pour rappel, aucune station limnimétrique n'est installée sur le Crupet et ses affluents.

Il en résulte l'impossibilité d'ajuster les coefficients du *Curve Number* pour le modèle HEC-HMS alors que ce paramètre est prépondérant. Le problème se reporte alors sur le modèle HEC-RAS dont les coefficients de rugosité ne peuvent pas non plus être calibrés.

Une dernière inconnue concerne l'état initial du bassin versant, et plus précisément du niveau de saturation des terres. Après une période pluvieuse, une proportion plus importante de l'eau va ruisseler vers l'exutoire puisque les sols sont déjà gorgés d'eau. Le rôle du sol, en termes de réservoir, peut être significatif : en considérant que la teneur en eau volumique sur l'ensemble du bassin versant augmente de 5 %, sur une épaisseur de sol de 50 cm, il est possible de stocker environ 904 000 m³. Ceci équivaut à retenir une précipitation de 25 mm.

13.2 Calibration conjointe

Puisque le modèle hydrologique ne peut être calé sur un jeu de données, l'hydrogramme obtenu est testé directement dans le modèle de simulations d'inondations. Ainsi, les modèles sont calibrés conjointement.

De prime abord, les caractéristiques de la simulation de la crue du 15 juillet 2021 ne correspondaient pas aux données historiques et aux témoignages. Dans ce cas, et pour tous les cas suivant, la comparaison repose sur une appréciation qualitative des hauteurs d'eau, de l'étendue inondée, du dépassement des murs par l'eau. De plus, les débits au pic de crue étaient 8 à 10 fois supérieurs à ceux estimés par la méthode de transfert.

Une calibration manuelle des paramètres du modèle hydrologique uniquement (CN, Manning...) n'a pas permis d'obtenir des résultats concluants. L'ajout d'une méthode de ratio (de 0,4), réduisant de 60 % les débits, a permis d'obtenir des résultats hydrauliques concordant avec l'évènement de juillet 2021. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer la complexité de la calibration du modèle hydrologique : (1) le contexte karstique de la vallée de Crupet (2) le choix des coefficients CN (3) le fonctionnement intrinsèque de la calibration.

Premièrement, l'impact des couches karstiques, qui occupent 51,9 % de la superficie du bassin versant, n'est pas pris en compte dans le modèle. La présence de karst engendre une multitude de phénomènes, comme des failles, des résurgences, des rivières souterraines, etc. (cf. le schéma en Figure 45). Dans un tel contexte, il est concevable qu'une partie des précipitations transite par les fissures de l'épikarst et contribue aux écoulements et stockages géologiques. Cette masse d'eau ne participe donc pas aux écoulements de surface qui sont simulés par le modèle. Le karst joue un rôle particulier à Crupet puisque, pour rappel, entre 12 000 et 18 000 m³ d'eau sont collectés journalièrement par la société Vivaqua. Dans différentes régions de France, il a été démontré que le karst peut mener à une réduction de 50 % des débits et de 20 % des précipitations. La présence de roches karstiques augmente le temps caractéristique de crues et limite le pic de crue sans affecter la vitesse de la vague d'inondation. La variabilité spatiale des roches rencontrées et les conditions climatiques du milieu influencent la magnitude de l'amortissement des précipitations et des débits (LE MESNIL et al., 2021). Force est de constater que les interactions entre les eaux de surfaces, de subsurfaces et souterraines, qui ne sont pas modélisées à Crupet, ne sont pas négligeables. La méthode de ratio a permis de pallier ce problème en réduisant artificiellement les débits de 60 %. Néanmoins, cette méthode ne permet pas de distinguer les effets des précipitations et des débits, et le coefficient tient compte de leurs impacts combinés.

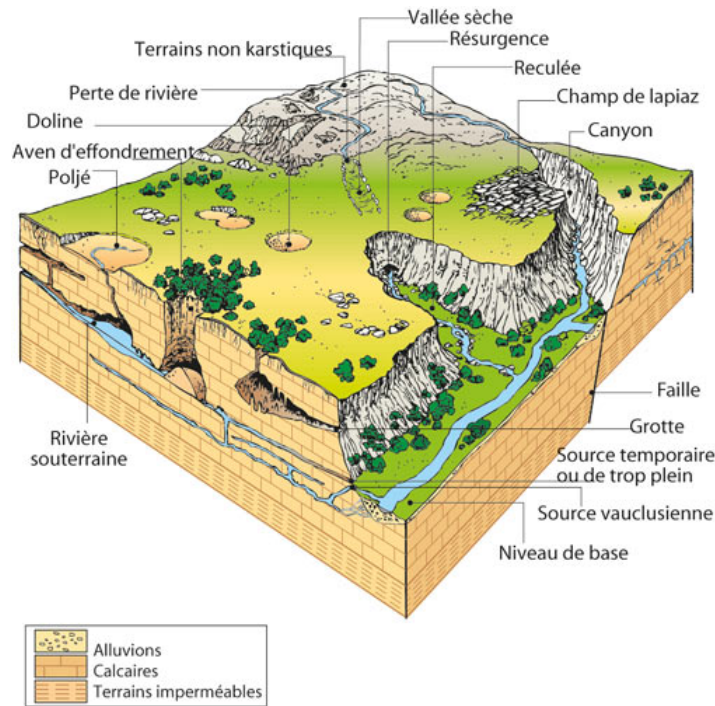


FIGURE 45 – Schéma descriptif des phénomènes karstiques (BAKALOWICZ, 1999).

Deuxièmement, le coefficient CN (*Curve Number*) a été identifié comme le paramètre ayant le plus d'influence sur le modèle. Comme il l'a été évoqué précédemment, le choix de la valeur de CN associée à chaque classe d'occupation du sol n'est pas univoque. Dans le cas de Crupet, une seule valeur de CN correspond aux champs. Dans l'approche menée dans ce travail, le *Curve Number* a été borné entre deux situations extrêmes afin de rester dans une gamme de valeur plausible. Or, dans un article publié par Martin et al. (2010), les scientifiques se sont intéressés à la production du ruissellement sur un bassin versant en Normandie (France) grâce au modèle DIAR (Diagnostic Agronomique du Ruissellement). Il en ressort que le ruissellement agricole n'est pas égal entre les fermes : 5 fermes sur 26 contribuent à 50 % du ruissellement. Le manque d'information quant à l'occupation des parcelles agricoles peut être conséquente puisque l'agriculture représente 41,1 % des terres du bassin versant de Crupet.

Troisièmement, la calibration manuelle qui a été menée est un procédé où il peut être difficile d'atteindre un optimum visé. Dans certains cas, des minimums locaux peuvent cacher un optimum général qui n'est pas nécessairement détectable. Ensuite, le changement d'un paramètre peut être compensé par la modification d'un autre paramètre lorsqu'ils sont interdépendants. Enfin, si les variables ont un très faible impact sur la performance du modèle, le paramètre peut varier fortement alors que les modifications du modèle seront très faibles. L'utilisation de nombreux jeux de données permet de pallier ce potentiel problème (HINGRAY et al., 2014).

Concernant le modèle hydraulique, il fait l'objet de la calibration conjointe avec le modèle hydrologique du point de vue des hydrogrammes. Celle-ci se base sur des critères qualitatifs, comme expliqué précédemment. Cependant, les coefficients de rugosité (Manning) n'ont pas pu être ajustés dans le modèle.

13.3 Vérification des hydrogrammes

Afin de s’affranchir du manque de données, la vallée du Crupet a été comparée à celle du Leignon par la méthode de transfert de bassin. Cette méthode ne remplace pas de véritables données de terrain, mais elle reste un outil intéressant pour estimer l’ampleur du pic attendu. Pour son utilisation, il a fallu considérer que les deux bassins versants se trouvent sur des régions homogènes. Cette notion présente évidemment ses limites puisque chaque territoire possède ses caractéristiques propres. Par exemple, la région de Crupet repose sur 18,3 % de sols karstiques en plus que celle du Leignon. Il est de même pour les classes des pentes qui varient d’un bassin hydrographique à l’autre.

La comparaison dressée entre les résultats obtenus dans le modèle HEC-HMS calibré⁴¹ et la méthode de transfert coïncide pour les pluies de novembre 2010 et juillet 2021. Pour les deux événements de 2014, l’erreur s’approche des 52 %. Pour rappel, les précipitations de 2014 se concentrent sur quelques heures tandis que les autres pluies sont réparties sur une journée entière (cf. Figure 40). Étant donné leur courte durée, les précipitations de 2014 n’ont peut-être pas couvert l’ensemble du bassin versant, ou du moins pas au même moment. En considérant que les pluies sont homogènes, il est possible que le modèle surestime les débits lorsque les précipitations sont localisées.

14 Pistes d’amélioration

Diverses pistes d’amélioration peuvent être évoquées concernant le modèle hydrologique. Tout d’abord, le modèle peut être affiné en travaillant avec des données raster⁴². Les calculs (précipitation, infiltration et ruissellement) seraient ainsi discrétisés à plus petite échelle que celle du sous-bassin versant. Une résolution plus fine permet d’améliorer la précision des résultats. En outre, le modèle peut être complexifié avec l’ajout d’une méthode modélisant les débits de base (*Baseflow Method*). D’autres fonctions de production et de transfert pourraient être explorées, comme avec le modèle de Green et Ampt qui repose sur l’utilisation des propriétés du sol.

Dans tous les cas, l’effet du karst sur les écoulements à Crupet n’est pas aisément quantifiable. Le modèle hydrologique ne remplace pas les données d’une station limnimétrique. De telles mesures seraient bénéfiques pour calibrer le modèle hydrologique, et par conséquent accroître la qualité du modèle hydraulique.

Concernant le modèle HEC-RAS, l’utilisation des équations complètes de Saint-Venant permet de prendre en compte davantage de phénomènes que les équations de diffusion des ondes. Elles modélisent notamment les accélérations locales et convectives (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2021). Les équations de Saint-Venant sont toutefois moins stables lors de la résolution. Un accroissement de la taille des mailles⁴³ pourrait augmenter la stabilité du modèle sans accroître fortement les temps de calcul. Une autre amélioration serait de calibrer les coefficients de Manning par rapport à la rugosité réelle des classes d’occupation du sol.

41. Qui tient compte de la méthode de ratio.

42. Données sous forme d’un maillage où chaque cellule possède une information.

43. Les mailles sont liées à la discrétisation spatiale.

15 Analyse des aménagements

15.1 Choix de l'évènement de référence

L'un des paramètres clés du modèle hydraulique est le choix de l'hydrogramme de crue, et par extension la précipitation dont il dépend. L'absence de données sur les débits du ruisseau de Crupet mène à faire correspondre la période de retour d'une pluie à celle d'une crue. En réalité, ces deux notions sont distinctes, puisqu'une pluie d'une période de retour donnée ne produit pas nécessairement une crue avec un temps de retour équivalent. Une autre simplification suppose que la pluie est appliquée sur l'ensemble du bassin versant, ce qui implique qu'elle soit homogène sur une région de 36 km². Sur base de ce postulat, les débits de crue devraient être proportionnels à une période de retour croissante. Or, dans le Tableau 3, le débit d'une pluie de période de retour de 2 ans est supérieur au débit de celle de 5 ans. Ce constat remet en cause l'hypothèse d'homogénéité de la pluie pour certaines précipitations. À noter qu'en Belgique, la longueur moyenne des orages à « petite et mésoéchelle » est de 30 km (MUÑOZ LOPEZ et al., 2023).

Pour l'évaluation des scénarios, la crue exceptionnelle du 15 juillet 2021 a été simulée. L'intérêt de cet événement vient du fait qu'il est largement documenté (plusieurs centaines de photos et vidéos, témoignages dans le journal local, etc.). Leur usage a permis de confronter les résultats du modèle HEC-RAS à la situation qui s'est réellement déroulée. Il est néanmoins important de remarquer qu'une telle pluie est statistiquement peu fréquente : la période de retour est supérieure à 200 ans. La dernière crue comparable date de 160 ans auparavant, en 1861 (BERNIER, 2021).

L'inconvénient de cette crue réside dans le fait certains aménagements pourraient être dépassés par l'ampleur de l'inondation. Dans ce cas, les résultats obtenus ne souligneraient pas le plein potentiel des mesures. À *contrario*, les circonstances dans lesquelles les scénarios sont testés correspondent à des conditions réelles déjà vécues. Quoiqu'il en soit, les mesures proposées restent des actions largement étudiées dans la littérature pour lesquelles les effets restent bénéfiques dans un contexte de gestion durable des cours d'eau. Plusieurs scénarios sont inspirés des neuf principes du programme *Ruimte voor de rivier*, présentés précédemment en Figure 3 : le stockage d'eau (scénario 6), le déplacement de digues (scénario 3), le canal de dérivation (scénario 3), et l'excavation en zone inondable (scénarios 4, 7, 8).

En dernier lieu, la carte des aléas d'inondation (Figure 42) avait présenté les étendues inondées en fonction de diverses périodes de retour. Le recours aux pluies synthétiques permet de s'affranchir des événements historiques et d'y associer une probabilité d'occurrence. Les différents niveaux de vulnérabilité des habitations ont pu être étudiés pour les ruisseaux de Crupet et de Vesse. Enfin, les simulations basées sur des pluies synthétiques servent au dimensionnement d'ouvrages. Tel a été le cas pour l'étude de la ZIT qui peut retenir une pluie de période de retour de 50 ans.

15.2 Analyse technico-économique des aménagements

Parmi les huit scénarios modélisés dans HEC-RAS, cinq ont un effet néfaste ou nul sur les inondations, et trois sont bénéfiques. Dans une approche de gestion intégrée des risques d'inondation, le premier objectif poursuivi est, d'à minima, conserver la situation actuelle. Une seconde ambition consiste à réduire le risque.

Avant tout, il est important de souligner que le Retour Sur Investissement (RSI) fournit une première analyse sommaire du lien entre les investissements réalisés et les bénéfices économiques retirés. Comme ce paramètre se base sur l'évènement de juillet 2021, les pertes évitées et le RSI tendent à être minimisés. En effet, les dégâts évités pour l'ensemble des crues qui touchent Crupet ne sont pas pris en compte. Dans l'analyse présentée ci-après, le RSI met en évidence les aménagements « rentables », mais il convient d'être prudent concernant ceux qui ne le seraient pas. Une analyse économique liée à des périodes de retour permettrait d'aller plus loin dans l'interprétation du RSI vis-à-vis des probabilités d'occurrence des événements.

L'étude a pu démontrer que la reconstruction partielle, voire totale, du mur d'enceinte du château (scénarios 2, 3, 4 (bis)) ne contribue pas aux objectifs préalablement cités. En effet, la reconstruction à l'identique du mur (scénario 2) impacte l'amont du château en augmentant la hauteur d'eau (médiane) de 18 cm dans les maisons et en touchant trois habitations supplémentaires. Dans ce cas, les dommages supplémentaires se chiffrent à 79 000 € pour une crue comme celle de juillet 2021. Si le mur est reconstruit partiellement (scénarios 3, 4 (bis)), les dégâts supplémentaires sont moindres, mais ils restent toutefois conséquents (18 000 €). L'effet du mur est probablement lié au fait que la rivière est contrainte entre le mur du château et le talus menant à la rue Basse (voir Figure 46). Le cours d'eau n'a donc pas la place pour s'étendre dans son lit majeur, et la hauteur d'eau tend à monter jusqu'à plus de trois mètres.

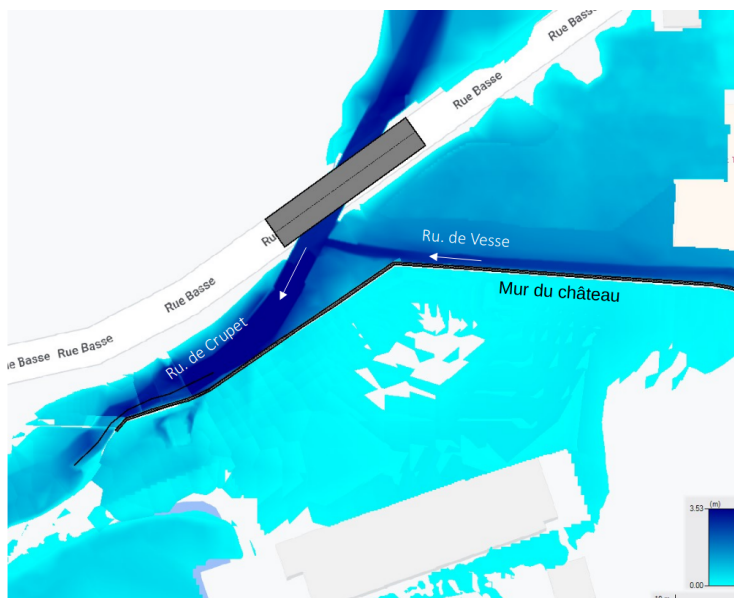


FIGURE 46 – Capture d'écran de la répartition des hauteurs d'eau lors de la reconstruction totale du mur du château.

Concernant l'élargissement du gabarit de la rivière, qui est repris dans les scénarios 4 et 4 bis, les effets obtenus sont insignifiants. Le constat est identique pour la création d'une bannette végétalisée juste avant la confluence des ruisseaux de Vespe et de Crupet (scénario 8). Ces résultats sont cependant à relativiser puisque la crue modélisée est conséquente, comme évoqué dans la Section 15.1. Il est dès lors possible que ces aménagements présentent un intérêt pour des crues d'ampleur inférieure à celle du 15 juillet 2021.

En matière d'amélioration, la modification de l'angle de confluence entre les ruisseaux de Vespe et de Crupet (scénario 5) se marque par une faible réduction de la zone inondée (127 m²). L'effet est peu visible sur les hauteurs d'eau puisque l'aménagement ne bénéficie qu'aux maisons n°14 et 15 de la rue Basse. Le RSI, dont la valeur est négative (-0,68), peut s'expliquer

par des bénéfices très localisés. Dans la section avant le confluent, la suppression de la chute sur le Crupet (scénario 7) décroît la hauteur d'eau (médiane) de 3 cm et tient à l'abri une superficie de 427 m². Le montant des travaux étant relativement peu coûteux (1 600 €) en comparaison aux dommages évités (17 200 €), le Retour Sur Investissement est largement positif (9,75). De fait, l'aménagement réduit le risque encouru des maisons n°4, 5, 6 et 7 de la rue Basse. Du point de vue technique, la zone d'immersion temporaire (scénario 6) offre la protection la plus élevée. Elle préserve complètement trois maisons et elle réduit de 17 cm l'eau dans les habitations atteintes. Malgré les nombreux dommages évités (132 800 €), le RSI reste faible puisque la construction de tels ouvrages engendre des dépenses conséquentes.

15.3 Perspectives futures

Le présent travail s'est cantonné à étudier huit mesures sur les ruisseaux de Crupet et de Vesse. Le modèle de simulation d'inondations peut cependant être amélioré et modifié afin d'aller plus loin dans l'étude de Crupet.

Pour commencer, l'étendue de l'étude pourrait être augmentée afin que l'ensemble du village soit repris dans le modèle. Un tel changement permettrait d'étudier l'effet des aménagements sur les habitations en aval du château, notamment pour celles qui ont également été touchées par les inondations. Ensuite, il serait judicieux d'analyser le dernier tronçon du ruisseau de Vesse afin de protéger davantage les maisons n°14 et 15 de la rue Basse. Pour rappel, cette section possède une valeur de débit de plein bord assez faible. L'élargissement du gabarit du ruisseau pourrait être simulé dans le modèle HEC-RAS, ainsi que l'éloignement des murets de protection. En outre, dans la partie nord du ruisseau de Crupet, le retrait des murs de protection peut être simulé afin de vérifier qu'ils n'ont pas un impact néfaste sur les inondations. Enfin, un travail supplémentaire de modélisation doit également être réalisé concernant le mur d'enceinte du château. Ce volet serait utile afin de trouver une solution qui respecte les exigences de la Province et qui répond aux demandes des gestionnaires du château.

Conclusion

Au travers du présent travail, il a été question d'étudier la dynamique des inondations à Crupet et de proposer des aménagements qui visent à y réduire le risque d'inondation. Les processus hydrologiques du bassin versant de Crupet ont été modélisés avec le logiciel HEC-HMS afin d'obtenir les hydrogrammes de crue. Ces derniers ont contribué à l'élaboration d'un modèle hydraulique développé sur HEC-RAS qui simule des inondations. Le modèle HEC-RAS a également permis de représenter et de simuler de potentiels aménagements. L'utilisation de ces outils a permis de tester diverses hypothèses de modifications hydromorphologiques proposées par les riverains et la Province. L'impact lié à ces mesures a ainsi pu être quantifié.

Sur base de ces résultats, il a été possible de localiser les tronçons critiques des ruisseaux de Crupet et de Vespe. Il a pu être démontré que certaines habitations sont touchées dès lors que le bassin versant est soumis à une pluie de période de retour de 5 ans. Même si le risque est plus faible, la plupart des maisons atteintes par l'eau le sont à partir de périodes de retour de 15 et 25 ans.

Concernant les mesures testées, certaines accentuent le risque d'inondation. Ceci est le cas pour la reconstruction partielle et totale du mur du château. D'autres aménagements n'ont pas présenté un réel intérêt, comme pour la création d'une banquette végétalisée ou l'élargissement du gabarit de la rivière au niveau du château. Une amélioration par rapport à la situation actuelle a pu être atteinte grâce à la suppression d'un seuil, la modification de l'angle de confluence (Crupet-Vespe) et la création d'une zone d'immersion temporaire.

En complément, une étude des coûts totaux des dommages a été dressée avec le modèle INSYDE-BE. Ce modèle a permis de chiffrer les dommages avant et après l'implémentation de chaque mesure. En tant qu'entité publique, le PGICE dispose d'un budget donné pour gérer l'ensemble des rivières de la province de Namur. Ces données sont un terreau fertile afin de discuter et d'objectiver des investissements qui préviendraient de futurs dommages. Il est cependant nécessaire de souligner que les aménagements réduisent le risque d'inondation jusqu'à l'ampleur de la crue du 15 juillet 2021, à minima. Dans ce sens, les dommages pour des inondations moindres sont également réduits, même s'ils ne sont pas économiquement pris en compte. Par cette approche, il est très probable que les dommages évités aient été sous-estimés.

Ce volet met en évidence que des mesures peu coûteuses permettent de réduire le risque d'inondation, comme la suppression d'un ancien seuil et la modification de la confluence. Mais une réduction prononcée du risque à une échelle globale demande des investissements conséquents. Des mesures comme une zone d'immersion temporaire requièrent des pré-études coûteuses et complexes, sans toutefois garantir la faisabilité finale du projet. Ceci est notamment lié à la présence de karst, dont la propension à être instable fait appel à davantage de vigilance lors de la conception. L'intérêt d'une ZIT ayant été démontré à Crupet, un tel projet pourrait faire l'objet de subventions et obtenir des financements. Dans tous les cas, une analyse économique telle que présentée dans ce travail reste complexe à interpréter pour une institution publique. D'une part, le budget du PGICE doit être utilisé à bon escient dans le cadre de ses prérogatives. D'autre part, la Province travaille au bénéfice de sa population, au sens large, et ceci dans une optique de réduction des risques. Le volet économique représente une contrainte dans les projets portés par le PGICE, sans toutefois que la rentabilité y soit une finalité en soi.

Enfin, la géologie karstique du bassin versant de Crupet a complexifié la mise en place d'un modèle hydrologique. Les incertitudes inhérentes se sont reportées sur le modèle de simulation d'inondation puisqu'il en dépend. L'installation de stations limnimétriques, avec des prises de données sur une longue période, pourrait pallier ce problème. Ainsi, des mesures de terrain seraient une aubaine pour l'étude de zones régulièrement touchées par les inondations, et où les bassins versants et les rivières sont complexes à modéliser (régions fortement anthropisées, géologie karstique, etc).

Bibliographie

- ANDRÉ, P., & LABAR, H. (2021). Rencontre citoyenne : narration des événements d'inondation à Crupet.
- BAKALOWICZ, M. (1999). *Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques*. (Guide technique N° 3). Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée - Corse, Lyon,
- BERNIER, F. (2014). Crup' Échos (89^e éd.), 32. Récupérée 31 mars 2022, à partir de <http://www.crupechos.be/mapage/ce89-comprime.pdf>
- BERNIER, F. (2021). Crup' Échos (102^e éd.), 40. Récupérée 31 mars 2022, à partir de <http://www.crupechos.be/lescrupechosn101/ce102-compri.pdf>
- BIARD, B. (2022). La commission d'enquête parlementaire wallonne sur les inondations de juillet 2021 [Place : Bruxelles Publisher : CRISP]. *Courrier hebdomadaire du CRISP*, 2546-2547(21-22), 3-70. <https://doi.org/10.3917/cris.2546.0003>
- CAHYONO, C., & ADIDARMA, W. K. (2019). Influence analysis of peak rate factor in the flood events' calibration process using HEC-HMS. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(4), 1705-1722. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00625-8>
- CALETKA, M., ŠULC MICHÁLKOVÁ, M., KARÁSEK, P., & FUČÍK, P. (2020). Improvement of SCS-CN Initial Abstraction Coefficient in the Czech Republic : A Study of Five Catchments [Number : 7 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute]. *Water*, 12(7), 1964. <https://doi.org/10.3390/w12071964>
- CHAUDHRY, M. H. (2008). *Open-channel flow* (2. ed). Springer
Hier auch später erschienene, unveränderte Nachdrucke. - Nachdr. ohne die im Vorwort erwähnte CD-ROM erschienen. Der Inhalt der CD-ROM ist unter folgender Adresse verfügbar : <http://extras.springer.com> Previous ed. : Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1993.
- CHOW, V. T. (1988). *Open-channel hydraulics* (McGraw-Hill Book Compagny). Blackburn Press
Literaturangaben Reprint of the 1959 ed., McGraw Hill Book Company, Inc.
- COLLOT, J. (1920). Li vy pèlèt Colot d'Crupet.
- DARBANDSARI, P., & COULIBALY, P. (2020). Inter-comparison of lumped hydrological models in data-scarce watersheds using different precipitation forcing data sets : Case study of Northern Ontario, Canada. *Journal of Hydrology : Regional Studies*, 31, 100730. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100730>
- DEGOUTTE, G. (2012). *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : hydraulique et morphologie fluviales appliquées* (2e édition). Éditions Tec & doc.
- DEGRÉ, A., & BIELDERS, C. (2014). Calcul d'un hydrogramme : la méthode Soil Conservation Service.
- DEMARIN, P., SOHIER, C., MOKADEM, A. I., DAUTREBANDE, S., & DEGRÉ, A. (2011). Essai de cartographie des classes d'infiltrabilité des sols de Wallonie (Belgique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 1(15), 119-128. Récupérée 13 mars 2023, à partir de <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=17025&file=1&pid=7053>

- DOTTORI, F., MENTASCHI, L., BIANCHI, A., ALFIERI, L., & FEYEN, L. (2023). Cost-effective adaptation strategies to rising river flood risk in Europe [Number : 2 Publisher : Nature Publishing Group]. *Nature Climate Change*, 13(2), 196-202. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01540-0>
- ERNST, J., CONINX, I., DEWALS, B., DETREMBLEUR, S., ERPICUM, S., BACHUS, K., & PIROTON, M. (2009). Planning flood risk reducing measures based on combined hydraulic and socio-economic impact modelling at a micro-scale. 411-418, 8. Récupérée 12 juin 2023, à partir de https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/40668/1/Ernst_Coninx_2009.pdf
- ERNST, J., DEWALS, B. J., DETREMBLEUR, S., ARCHAMBEAU, P., ERPICUM, S., & PIROTON, M. (2010). Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data. *Natural Hazards*, 55(2), 181-209. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9520-y>
- EUROPEAN COMMISSION. (2023). Floods. Récupérée 12 juillet 2023, à partir de https://environment.ec.europa.eu/topics/water/floods_en
- GLOCK, K., TRITTHART, M., HABERSACK, H., & HAUER, C. (2019). Comparison of Hydrodynamics Simulated by 1D, 2D and 3D Models Focusing on Bed Shear Stresses [Number : 2 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute]. *Water*, 11(2), 226. <https://doi.org/10.3390/w11020226>
- HABERSACK, H., SCHÖBER, B., & HAUER, C. (2015). Floodplain evaluation matrix (FEM) : An interdisciplinary method for evaluating river floodplains in the context of integrated flood risk management. *Natural Hazards*, 75(1), 5-32. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0842-4>
- HINGRAY, B., PICOUE, C., & MUSY, A. (2014). *Hydrologie 2 - Une sciences pour l'ingénieur* (2^e éd.). Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- HORACIO, J. (2014). *River Sinuosity Index : Geomorphological characterisation* (Technical note 2). CIREF et Wetlands International. Récupérée 23 mai 2023, à partir de <https://europe.wetlands.org/publications/river-sinuosity-index-geomorphological-characterisation/>
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. (2020). *River Analysis System HEC-RAS - Hydraulic Reference Manual* (rapp. tech. CPD-69). U.S. Army Corps of Engineers. Davis (USA). Récupérée 24 mai 2023, à partir de <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/latest>
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. (2021). *River Analysis System HEC-RAS 2D - User's Manual* (rapp. tech.). U.S. Army Corps of Engineers. Davis (USA). Récupérée 17 mars 2023, à partir de <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/latest>
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. (2022a). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Technical Reference Manual* (rapp. tech. CPD-74B). U.S. Army Corps of Engineers. Davis (USA). Récupérée 14 avril 2023, à partir de <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm>
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. (2022b). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS - User's Manual* (rapp. tech. CPD-74A). U.S. Army Corps of Engineers. Davis (USA). Récupérée 8 mars 2023, à partir de <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.10>
- HYDROSCAN SA/NV. (2020). *Modélisations hydrologique et hydraulique 1D/2D des ruisseaux du Leignon et des Fonds de Leffe et de leurs affluents* (rapp. tech. CSC - CE2019/10). Hydroscan SA/NV. Gembloux.

- INSTITUT ROYAL MÉTÉOROLOGIQUE. (2023a). IRM - Climat dans votre commune. Récupérée 17 avril 2023, à partir de <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/climat-dans-votre-commune>
- INSTITUT ROYAL MÉTÉOROLOGIQUE. (2023b). Opendata meteo.be. Récupérée 27 juin 2023, à partir de <https://opendata.meteo.be/cases/202107.php>
- JANSSEN, C. (2016). *Manning's n values for various land covers : to use for dam breach analyses by NRCS in Kansas* (rapp. tech.). Récupérée 22 mars 2023, à partir de <https://rashms.com/wp-content/uploads/2021/01/Mannings-n-values-NLCD-NRCS.pdf>
- LE MESNIL, M., MOUSSA, R., CHARLIER, J.-B., & CABALLERO, Y. (2021). Impact of karst areas on runoff generation, lateral flow and interbasin groundwater flow at the storm-event timescale [Publisher : Copernicus GmbH]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(3), 1259-1282. <https://doi.org/10.5194/hess-25-1259-2021>
- LÉVÊQUE, C. (2019). *La mémoire des fleuves et des rivières : l'histoire des relations entre les hommes et les cours d'eau à travers les siècles*. Ulmer. Récupérée 12 juillet 2023, à partir de <https://www.unitheque.com/UploadFile/DocumentPDF/9782841389681-memoire-fleuves-rivieres-extrait.pdf>
- MARTIN, P., JOANNON, A., & PISKIEWICZ, N. (2010). Temporal variability of surface runoff due to cropping systems in cultivated catchment areas : Use of the DIAR model for the assessment of environmental public policies in the Pays de Caux (France). *Journal of Environmental Management*, 91(4), 869-878. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.11.003>
- MICHEL, G., THYS, G., & DE BROYER, C. (2011). *Atlas du karst wallon : bassins du Bocq et du Samson* (2^e éd.). SPW / EDI WALL.
- MUÑOZ LOPEZ, C., WANG, L.-P., & WILLEMS, P. (2023). Statistical characterization of rainfall fields based upon a 12-year high-resolution radar archive of Belgium. *Atmospheric Research*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106544>
- OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU & OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ. (2023). Glossaire eau, milieux marins et biodiversité. Récupérée 5 juin 2023, à partir de <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr/>
- PARLEMENT EUROPÉEN & CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE. (2007). Directive 2007/60/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. Récupérée 14 avril 2023, à partir de <http://data.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj>
- PITON, G. (2017). Méthode de transfert de bassin. Récupérée 28 avril 2023, à partir de https://lms.fun-mooc.fr/c4x/grenobleinp/19001/asset/Methode_de_transfert_de_bassin_G_Piton.pdf
- PÔLE PROVINCIAL DE GESTION INTÉGRÉE DES COURS D'EAU. (2022). En action(s) sur les cours d'eau. Récupérée 19 mai 2023, à partir de https://www.province.namur.be/documents/fichier/1/1168/20221216_1115541670940813brochureeauvectorisee_e_version_finale.pdf
- ROSSANO, F., & BORDES-PAGÈS, E. (2016). Intégration du risque inondation : un programme national aux Pays-Bas. (731), 6. Récupérée 7 juillet 2023, à partir de <https://www.institutparisregion.>

fr/nos-travaux/publications/integration-du-risque-inondation-un-programme-national-aux-pays-bas/

- ROUSSELOT, P., VETSCH, D., & FÄH, R. (2012). *Modélisation numérique des cours d'eau* (rapp. tech. Fiche 7). Office fédéral de l'environnement (OFEV). Berne. Récupérée 9 mai 2023, à partir de https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/wasser/uw-umwelt-wissen/merkblatt_7_numerischefliessgewaesser-modellierung.pdf.download.pdf/fiche_7_modelisationnumeriquedesoursdeau.pdf
- SCORZINI, A. R., DEWALS, B., RODRIGUEZ CASTRO, D., ARCHAMBEAU, P., & MOLINARI, D. (2022). INSYDE-BE : adaptation of the INSYDE model to the Walloon region (Belgium) [Publisher : Copernicus GmbH]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(5), 1743-1761. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1743-2022>
- SERVICE PUBLIC DE WALLONIE. (2022). *Les Plans de Gestion des Risques d'Inondation pour la Wallonie : Districts hydrographiques internationaux de la Meuse, de l'Escaut, du Rhin et de la Seine*. Récupérée 5 juin 2023, à partir de https://inondations.wallonie.be/files/documents_a_telecharger/DI/PGRI%202/22513-SPW-Enquetes_publicques_PGDH_PGRI-Brochure_web-FR-BD.pdf
- SERVICE PUBLIC DE WALLONIE. (2023a). Géoportail de la Wallonie. Récupérée 8 mars 2023, à partir de <http://geoportail.wallonie.be/home.html>
- SERVICE PUBLIC DE WALLONIE. (2023b). Inondations en Wallonie. Récupérée 2 juin 2023, à partir de <http://inondations.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/inondations/home.html>
- SERVICE PUBLIC DE WALLONIE. (2023c). L'hydrométrie en Wallonie. Récupérée 17 avril 2023, à partir de <https://hydrometrie.wallonie.be/home.html>
- STATBEL. (2023). Indice des prix à la production dans la construction. Récupérée 17 juillet 2023, à partir de <https://statbel.fgov.be/en/themes/indicators/prices/construction-output-price-index#figures>
- WOODWARD, D. E., HAWKINS, R. H., JIANG, R., HJELMFELT, A. T., Jr., VAN MULLEM, J. A., & QUAN, Q. D. (2003). Runoff Curve Number Method : Examination of the Initial Abstraction Ratio. *World Water & Environmental Resources Congress 2003*, 1-10. [https://doi.org/10.1061/40685\(2003\)308](https://doi.org/10.1061/40685(2003)308)
- WOODWARD, D. E., KENT, K. M., HOEFT, C. C., HUMPAL, A., & CERRELLI, G. (2010). *Time of Concentration, Chapter 15* (rapp. tech. H_210_NEH_630). Natural Resources Conservation Service (NRCS). Washington DC. Récupérée 2 février 2023, à partir de <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=27002.wba>
- WORLD WEATHER ATTRIBUTION. (2021). *Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021* (rapp. tech.). World Weather Attribution. Récupérée 14 avril 2023, à partir de <https://www.worldweatherattribution.org/heavy-rainfall-which-led-to-severe-flooding-in-western-europe-made-more-likely-by-climate-change/>

Annexes

A Modification des rivières depuis 1861

Dans le Crup Échos⁴⁴ n°102, une comparaison est dressée entre les inondations de 1861 et celles de 2021. Ces informations donnent des indications sur l'évolution et les modifications faites sur les rivières du village. Ces éléments qualifiés de « perturbateurs », lorsque leurs effets se combinent, auraient peut-être accentué les conséquences des inondations. Sur la base d'une rencontre avec messieurs Pascal André et Hugues Labar⁴⁵, et en complément du Crup Échos, les modifications et les problèmes constatés depuis 1861 seraient (BERNIER, 2021) (ANDRÉ & LABAR, 2021) :

- Les infrastructures : la construction du captage de Vivaqua ; la E411 collecte et déverse de l'eau de ses surfaces imperméabilisées (30 000 m² dans le Ry de Vesse et 60 000 m² dans le Ry de Mière).
- L'urbanisation : notamment de la rue Saint-Joseph et d'Ivoy.
- L'entretien : le manque d'entretien généralisé des berges (arbres tombés, fond envasé, et ouvrages d'art défectueux).
- Les vestiges des anciens moulins : la présence d'anciens ouvrages datant du XIXe siècle a modifié l'écoulement naturel du cours d'eau. Crupet comptait notamment sept anciens moulins qui existent toujours ou qui ont disparu. Certains modifient le trajet de l'eau (comme le mur d'enceinte du château avec le goulot d'étranglement de la rivière), d'autres ont disparu (comme les biefs comblés qui pourraient servir de canal de fuite), ou certains ne sont pas utilisés (à l'instar de la vanne se trouvant au droit du moulin d'Aviron qui était fermée lors de l'inondation).
- La confluence entre le ruisseau de Crupet et de Vesse : leur rencontre se fait perpendiculairement. Les eaux du ruisseau de Vesse « se jettent pratiquement sur un mur et ne peuvent passer » (ANDRÉ & LABAR, 2021). De plus, le Ry de Vesse ne peut s'étendre par débordement sur le terrain adjacent à cause d'un mur de 1,5 m de haut construit en 1990. Le ruisseau de Crupet se retrouve donc enclavé entre, d'une part, le mur d'enceinte du château et, d'autre part, la rue Basse.
- À l'époque de J. Collot (1961), il existait sur le Ry de Mière et de Vesse des étangs destinés à retenir les eaux. Seuls les vestiges de murs sont restés.

44. Le Crup Échos est le journal local de la localité de Crupet.

45. P. André et H. Labar sont des riverains témoins des inondations de juillet 2021, et ils sont impliqués dans la rédaction du Crup Échos.

B Schéma des fonctionnalités d'HEC-HMS

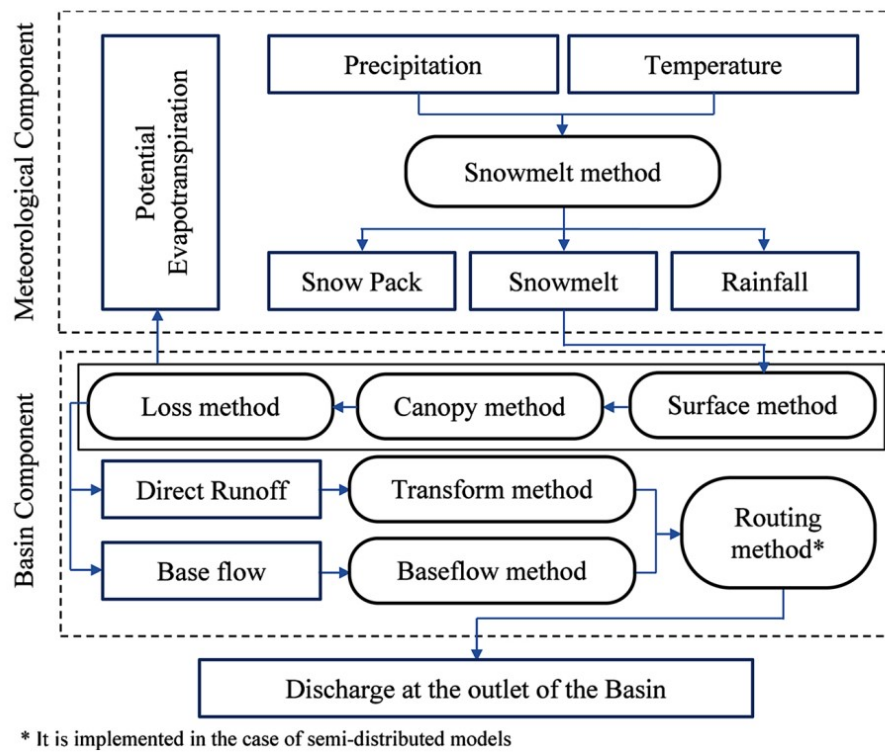


FIGURE 47 – Schéma des méthodes implémentables dans HEC-HMS (DARBANDSARI & COULIBALY, 2020).

C Tableau des fonctions de production

TABLE 9 – Synthèse des fonctions de production (*Loss Method*) disponibles dans HEC-HMS.

Nom	Fonctionnement	Données nécessaires	
<i>Exponential Loss</i>	Méthode empirique où l'infiltration est incrémentielle et est représentée par une fonction exponentielle décroissante.	<i>Initial Range</i> <i>Initial Coefficient</i> <i>Coefficient Ratio</i>	<i>Impervious (%)</i> <i>Precipitation Exponent</i>
<i>(Gridded) Green and Ampt Loss</i>	Méthode basée sur les équations de Richard pour les écoulements transitoires dans les sols.	<i>Method (Initial Content OU Initial Deficit)</i> <i>(Initial Content & Saturated Content) OU Initial Deficit</i> <i>Saturated Content</i> <i>Suction</i>	<i>Conductivity</i> <i>Impervious (%)</i>
<i>(Gridded) SCS Curve Number Loss</i>	Implémentation de la méthode du <i>Soil Conservation Service (SCS)</i> . Le but est de calculer incrémentiellement l'infiltration totale lors d'un évènement simulé. Les volumes infiltrés correspondent à la différence de volume entre deux intervalles successifs.	<i>Initial Abstraction/Ratio</i> <i>Curve Number</i>	<i>Impervious (%) / Factor</i>
<i>Smith & Parlange Loss</i>	Méthode développée à partir des équations de Richard, où le front de mouillage est modélisé par une fonction exponentielle de la conductivité à saturation.	<i>Initial Content</i> <i>Residual Content</i> <i>Saturated Content</i> <i>Buddling Pressure</i> <i>Pore Distribution</i>	<i>Conductivity</i> <i>Impervious (%)</i> <i>Temperature gage</i> <i>Beta Zero</i>
<i>Initial and Constant Loss</i>	Modèle utilisant une condition initiale et un taux constant.	<i>Initial Loss</i> <i>Constant Rate</i>	<i>Impervious (%)</i>

D Tableau des fonctions de transfert

TABLE 10 – Synthèse des fonctions de transfert (*Transform Method*) disponibles dans HEC-HMS.

Nom	Fonctionnement	Données nécessaires	
<i>User-Specified Unit Hydrogram Transform</i>	Méthode où les hydrogrammes unitaires sont créés pour chaque sous-bassin à partir de mesures de terrain.	<i>Data Source</i> <i>Units</i>	<i>Interval</i> <i>Duration</i>
<i>Clark Unit Hydrograph Transform</i>	Création d'un hydrogramme unitaire synthétique. Une courbe temps-surface permet une translation adéquate de l'hydrogramme à partir d'une précipitation. L'effet du stockage est synthétisé par un modèle à réservoir linéaire.	3 méthode au choix (Standard - 1) (Variable Parameter - 2) (Maricopa County AZ USA - 3)	Index Excess (2)
		Time of Concentration (1)(2)	Concentration Curve (2)
		Storage Coefficient (1)(2)	Storage Curve (2)
		Time-Area Method (1)(2)(3)	Flowpath Length (3)
		Resistance Coefficient (3)	Flowpath Slope (3)
<i>ModClark Transform</i>	Méthode de transformation à réservoir linéaire et quasi-distribuée. Les sous-bassins sont représentés par une grille de cellules. Le fonctionnement est analogue à la méthode de Clark. Mais à sa différence, la méthode ModClark utilise un temps de progression à l'échelle de chaque cellule. Elle s'affranchit donc de l'utilisation de courbe temps-zone ("time-area").	Time of Concentration	Storage Coefficient
<i>Snyder Unit Hydrograph Transform</i>	Procédé de création d'un hydrogramme unitaire synthétique, c'est-à-dire que le pic de crue est déduit d'une précipitation unitaire. Les équations estiment le temps de base et la largeur de l'hydrogramme à la moitié du pic de crue.	3 méthode au choix (Standard - 1)(Ft Worth District - 2)(Tulsa District - 3)	Length (2)(3)
		Standard Lag (1)	Centroid Length (2)(3)
		Peaking Coefficient (1)	Weighted Slope (2)(3)
		Urbanization (2) Sand (2)	Peaking coefficient (2) Channelization (3)
<i>User-Specified S-Graph Transform</i>	Technique qui somme des hydrogrammes unitaires (appelés S-Graph) entre-eux pour obtenir une réponse globale du bassin versant. Le choix et l'utilisation des S-Graph dépend des caractéristiques propres aux sous-bassins versants.	2 méthode au choix (Standard - 1)(Regression - 2)	Slope (2)
		S-Graph (1)(2)	Roughness (2)
		Lag Time (1)	M Exponent (2)
		Length (2) Centroid Length (2)	P Exponent (2)

<i>SCS Unit Hydrograph Transform</i>	Développée par le <i>Soil Conservation Service</i> (SCS), la méthode définit un hydrographe unitaire curvilinéaire en connaissant la part de ruissellement qui survient avant le pic de crue.	<i>Graph Type (Peak Rate Factor)</i>	<i>Lag Time</i>
		<i>Length (Plane, Subcollector, Channel)</i>	<i>Manning's n (Subcollector, Channel)</i>
<i>Kinematic Wave Transform</i>	Méthode propre aux zones urbaines ou peu développées. Les surfaces perméables et imperméables sont séparées en deux niveaux différents à cause de leur capacité d'infiltration différente. La ruissellement est <i>in fine</i> obtenu par la somme pondérée des résultats obtenus pour les deux niveaux.	<i>Slope (Plane, Subcollector, Channel)</i>	<i>Subreaches (Subcollector)</i>
		<i>Roughness (Plane)</i>	<i>Bottom Width (Subcollector)</i>
		<i>Area (Plane, Subcollector)</i>	<i>Side Slope (Subcollector)</i>
		<i>Routing Steps (Plane)</i>	<i>Width (Channel)</i>
		<i>Route Upstream (Channel)</i>	<i>Shape (Subcollector, Channel)</i>
		<i>Routing Method (Channel)</i>	<i>Subreaches (Channel)</i>
<i>2D Diffusion Wave Transform</i>	Procédé s'appuyant sur les équations de continuité et de conservation de mouvements qui simule le transport de l'excès de précipitation au sein du bassin versant. Il permet donc de simuler des mouvements d'eau non linéaires.	Modèle nécessitant l'utilisation de nombreuses données.	

E Tableau des méthodes de routage

TABLE 11 – Synthèse des méthodes de routage (*Routing Method*) disponibles dans HEC-HMS.

Nom	Fonctionnement	Données nécessaires	
<i>Kinematic Wave Routing</i>	Cette méthode utilise les équations complètes de l'écoulement instationnaire, mais en négligeant les forces de pression et inertielles. La ligne d'énergie est considérée comme étant parallèle à celle de fond.	<i>Initial Type</i>	<i>Index Method</i>
		<i>Initial Discharge</i>	<i>Index Celerity</i>
		<i>Length</i>	<i>Shape</i>
		<i>Slope</i>	<i>Bottom Width</i>
		<i>Manning's n</i>	<i>Side Slope</i>
		<i>Subreaches</i>	<i>Invert</i>
<i>Lag Routing</i>	Technique pour modéliser la translation des vagues de crue, mais en négligeant les processus d'atténuation et de diffusion. Dans ce cas, cette technique s'applique aux canaux de courte longueur où le temps de propagation de la vague ne varie pas avec la profondeur.	<i>Initial Type</i>	<i>Lag</i>
<i>Lag and K Routing</i>	Cas particulier de la méthode <i>Lag Routing</i> , dans laquelle le stockage de l'eau est négligé dans les coins de la composante prismatique.	<i>Initial Type</i>	<i>K Method</i>
		<i>Lag Method</i>	<i>Constant K</i>
		<i>Constant Lag</i>	
<i>Modified Puls Routing</i>	L'écoulement est conduit dans la rivière à l'aide du principe de conservation de la masse, ainsi que de la relation entre le stockage et le débit. Ce modèle prend en compte le stockage et le relâchement différé de l'eau afin de modéliser les atténuations, sans toutefois appliquer le principe de conservation des mouvements.	<i>Initial Type</i>	<i>Subreaches</i>
		<i>Initial Discharge</i>	<i>Elev-Dis Function</i>
		<i>Stor-Dis Function</i>	<i>Invert</i>
<i>Muskingum Routing</i>	Méthode basée sur le principe de conservation de la masse. La surface de l'eau n'est pas supposée plane, et elle peut varier afin de servir de stockage pendant les pics de crue. L'atténuation est ajoutée au modèle par le temps de propagation, et pondérée par l'influence de la différence entre les flux sortants et entrants.	<i>Initial Type</i>	<i>Muskingum X</i>
		<i>Muskingum K</i>	<i>Subreaches</i>

<i>Muskingum-Cunge Routing</i>	Simulation prenant en compte le principe de conservation de la masse et de quantité de mouvements. Les variables sont calculées à chaque pas de temps à partir de la profondeur de l'écoulement et des propriétés du canal. Ceci implique la modélisation de l'atténuation des ondes de crue.	<i>Initial Type</i>	<i>Index Celerity</i>
		<i>Length</i>	<i>Shape</i>
		<i>Slope</i>	<i>Left Manning's n</i>
		<i>Manning's n</i>	<i>Right Manning's n</i>
		<i>Space-Time Method</i>	<i>Cross Section</i>
<i>Normal Depth Routing</i>	La relation stockage-débit est calculée par HEC-HMS, dans le cas d'une profondeur normale, en connaissant le coefficient de Manning pour les différents canaux.	<i>Index Method</i>	<i>Invert</i>
		<i>Initial Discharge</i>	<i>Invert</i>
		<i>Length</i>	<i>Shape</i>
		<i>Slope</i>	<i>Left Manning's n</i>
		<i>Manning's n</i>	<i>Right Manning's n</i>
<i>Straddle Stagger Routing</i>	Les processus d'atténuation et de translation sont développés sur base d'un modèle empirique.	<i>Index Flow</i>	<i>Cross Section</i>
		<i>Initial Type</i>	<i>Lag</i>
		<i>Initial Discharge</i>	<i>Duration</i>

F Choix de la valeur de lambda

Selon une étude menée par Caletka et al. (2020) sur cinq bassins versants avec HEC-HMS, une valeur d'interception initiale (λ) de 0,0142 génère des modèles plus proches de la réalité. Le choix de la valeur de 0,2 n'a été concluant que dans un seul cas. Pour Woodward et al. 2003, le constat est identique : 90% des 134 cas calibrés ont un coefficient λ inférieure à 0,2. L'utilisation de 0,05 donne un coefficient de détermination plus élevé dans 5 cas sur 6. Dans une approche sécuritaire, la valeur de λ est fixée à 0,05. En effet, une valeur d'interception élevée peut mener à une sous-estimation des débits obtenus à l'exutoire.

G Données nécessaires pour la méthode de routage

Les données suivantes sont requises pour la mise en application de la méthode de *Muskingum-Cunge* (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2022a) :

- **Initial Type** : ce paramètre propose le choix entre deux types de conditions initiales. L'*Inflow Equals Outflow* stipule que les débits entrant dans un tronçon sont égaux à ceux quittant le tronçon en amont. Ceci s'apparente à une condition initiale de stationnarité de l'écoulement. Pour la *Specified Discharge*, une valeur de débit est saisie manuellement. Comme les données des débits pour chaque section ne sont pas disponibles, le choix s'est porté sur la première technique.
- **Length et Slope** : la longueur et la pente moyenne des tronçons de rivière, qui est calculée automatiquement par le logiciel HEC-HMS.
- **(Left/Right) Manning's n** : une valeur moyenne de rugosité est affectée à chaque segment de rivière sur la base d'observations d'images satellites. Les notions *Left* et *Right* font référence aux plaines inondables de part et d'autre de la rivière, et l'absence de précision particulière renvoie au coefficient propre au lit mineur. Les valeurs exploitées proviennent de la littérature (CHOW, 1988 ; CHAUDHRY, 2008).
- **Space-Time Method** : ce paramètre permet de gérer les intervalles temporels et spatiaux calculés par l'algorithme. L'option *Auto DX Auto DT Method* a été retenue afin de s'affranchir des risques d'instabilité du modèle.
- **Index Method et Index Celerity** : ce coefficient joue un rôle dans la discrétisation⁴⁶ des tronçons dans l'espace et le temps. Selon le manuel d'HEC-HMS, la valeur de ce paramètre est la valeur du débit à équidistance entre le débit de base et le débit de crue d'un hydrogramme. Dans la pratique, il existe un et un seul hydrogramme par sous-bassin versant et par pluie de période de retour simulée. L'obtention de ce paramètre pour tout bassin versant est donc une étape laborieuse et chronophage. Par conséquent, l'opération est réalisée sur un seul sous-bassin dont la superficie est proche de la moyenne de l'ensemble. Il existe donc une valeur unique associée à chaque pluie de période de retour donnée.
- **Shape** : la section transversale de la rivière est schématisée par huit points de coordonnées connues au moyen de l'outil *Eight Point*. Pour ce faire, une coupe est faite dans chaque section de rivière à un endroit le plus représentatif à l'aide de l'extension *Profile Tool* de QGIS.
- **Invert Elevation** : cette option permet de calculer une hauteur de chute, qui est égale à la profondeur d'écoulement rehaussée de l'élévation du radier. Cette option n'est pas utilisée dans le modèle.

46. La discrétisation consiste à découper une variable continue (le temps, l'espace) en des variables discontinues qui pourront être traitées par un ordinateur.

H Compléments sur la méthode de transfert

La formule de Myer (de transfert) se base sur différents postulats (PITON, 2017) :

- La quantité de pluies annuelles arrivant à deux rivières géographiquement proches est proportionnelle à la taille du bassin versant.
- Plus le bassin versant d'un cours d'eau est de petite taille, plus ses différents compartiments (plans d'eau, nappes phréatiques, etc.) réagissent rapidement. De même que la réaction d'un bassin versant est dépendante de la taille des cellules orageuses, ce qui implique que les petits bassins versants peuvent être globalement confrontés à des précipitations plus intenses que ceux de grande taille.
- Si la région est considérée homogène, les modules de deux cours d'eau sont souvent proportionnels à l'étendue du bassin versant. **Deux régions sont dites homogènes si elles varient peu quant aux caractéristiques des pluies subies, à leur géologie, leur relief, et l'utilisation de leurs sols.**
- Lors des crues, les petits cours d'eau présentent généralement des débits spécifiques⁴⁷ plus élevés que ceux des grands cours d'eau.

Pour l'application de cette méthode, la région de Crupet est comparée à celle de Leignon qui se trouve sur la commune de Ciney. Ces deux régions sont éloignées de 13,9 km⁴⁸, et le ruisseau de Leignon est également un affluent du Bocq (cf. Figure 48). Le bassin versant du Leignon possède un pluviomètre opérationnel depuis 2002 ainsi qu'un limnimètre datant de 2009 (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023c).

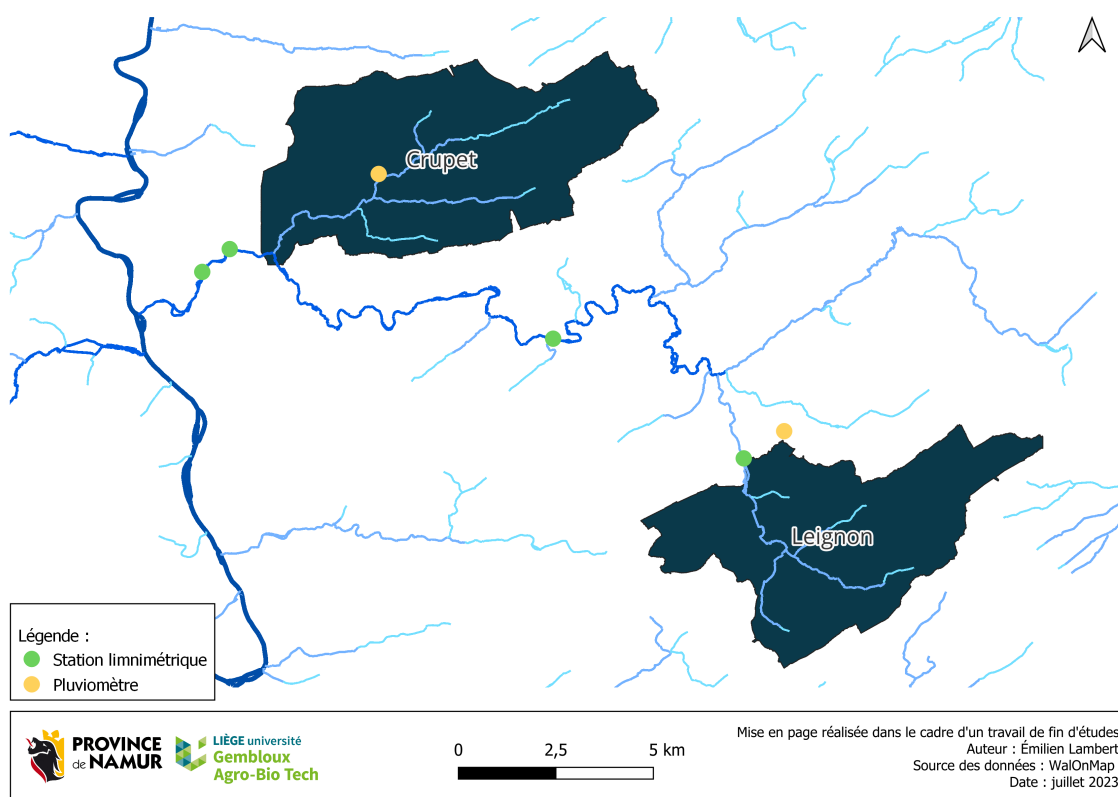


FIGURE 48 – Carte du réseau hydrographique du Bocq (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).

47. Débit par unité de surface $\text{m}^3/\text{s}/\text{ha}$.

48. Distance calculée de centroïde à centroïde.

Différentes caractéristiques doivent être vérifiées afin de pouvoir considérer que les deux bassins versants sont homogènes. En termes de superficie, le Leignon fait 29,64 km² et le Crupet 36,17 km². La densité de rivière⁴⁹ s'élève respectivement à 1,13 et 1,11 km/km² pour le Crupet et le Leignon.

Ensuite, le Tableau 12 compare quatre classes d'occupation du sol en fonction de la superficie qu'elles occupent⁵⁰. L'écart le plus important ne dépasse pas 5,5 % et est imputable aux forêts. Mis à part pour les espaces forestiers, le Crupet est un peu moins urbanisé et les surfaces agricoles sont très légèrement moins développées au profit des forêts.

TABLE 12 – Comparaison des superficies relatives allouées à diverses classes d'occupation du sol pour le Leignon et le Crupet.

Classe d'occupation du sol	Leignon	Crupet	Différence
Zones artificielles	15,6 %	12,6 %	3 %
Zones agricoles	71,3 %	69,0 %	2,3 %
Forêts	12,7 %	18,2 %	5,5 %
Zones humides et surfaces en eau	0,4 %	0,1 %	0,3 %

Concernant les classes de pentes présentées dans le Tableau 13, elles ont été générées à partir du MNT 2012-2013 (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a). La classe la plus variable est celle des pentes de 5 à 10 % avec une différence de 11 %. Le Crupet présente davantage de pentes fortes (supérieures à 10 %) que le Leignon, alors que ce dernier présente une valeur modale bien marquée pour la classe 5 - 10 %.

TABLE 13 – Comparaison des classes de répartition des pentes du Leignon et du Crupet.

Classe de pente	Leignon	Crupet	Différence absolue
0 - 5 %	28,24 %	31,16 %	2,92 %
5 - 10 %	46,47 %	35,47 %	11,00 %
10 - 15 %	6,87 %	10,02 %	3,15 %
> 15 %	18,42 %	23,35 %	4,93 %

Un autre critère analysé est l'infiltrabilité⁵¹ du sol puisqu'elle influence la formation du ruissellement. Sur la base de la carte des groupes hydrologiques de Demarcin et al. (2011), quatre groupes (A, B, C, D) classifient les sols en fonction de leur capacité d'infiltrabilité. Le Tableau 14 dresse la répartition relative des sols dans chaque bassin versant. Il en ressort que le pourcentage de groupe A est similaire entre les régions, mais la répartition dans les groupes B, C et D diverge. Dans la région de Ciney, 82,54 % des sols sont de classe C, et 67,90 % pour Crupet. Pour cette dernière région, on retrouve d'autant plus de sols des groupes B et D.

49. En kilomètre linéaire de rivière par kilomètre carré.

50. Les données du Leignon sont issues de l'étude de Hydrosan SA/NV (2020).

51. Capacité d'infiltration de l'eau dans les sols.

TABLE 14 – Comparaison des groupes hydrologiques du Leignon et du Crupet.

Groupe hydrologique	Leignon	Crupet	Différence absolue
A	6,16 %	5,53 %	0,63 %
B	4,39 %	10,68 %	6,29 %
C	82,54 %	67,90 %	14,64 %
D	6,91 %	15,89 %	8,98 %

Une dernière comparaison, qui porte sur la géologie du milieu, est présentée en Figure 49. Le bassin versant du Leignon repose sur 33,6 % de roches karstiques (24,4 % de calcaire du Carbonifère et 9,2 % de schiste calcaire). Pour rappel, le Crupet comporte du karst à hauteur de 51,9 % de son territoire.

Sur la base des vérifications présentées préalablement, l'hypothèse d'homogénéité des bassins versants du Crupet et du Leignon est acceptée.

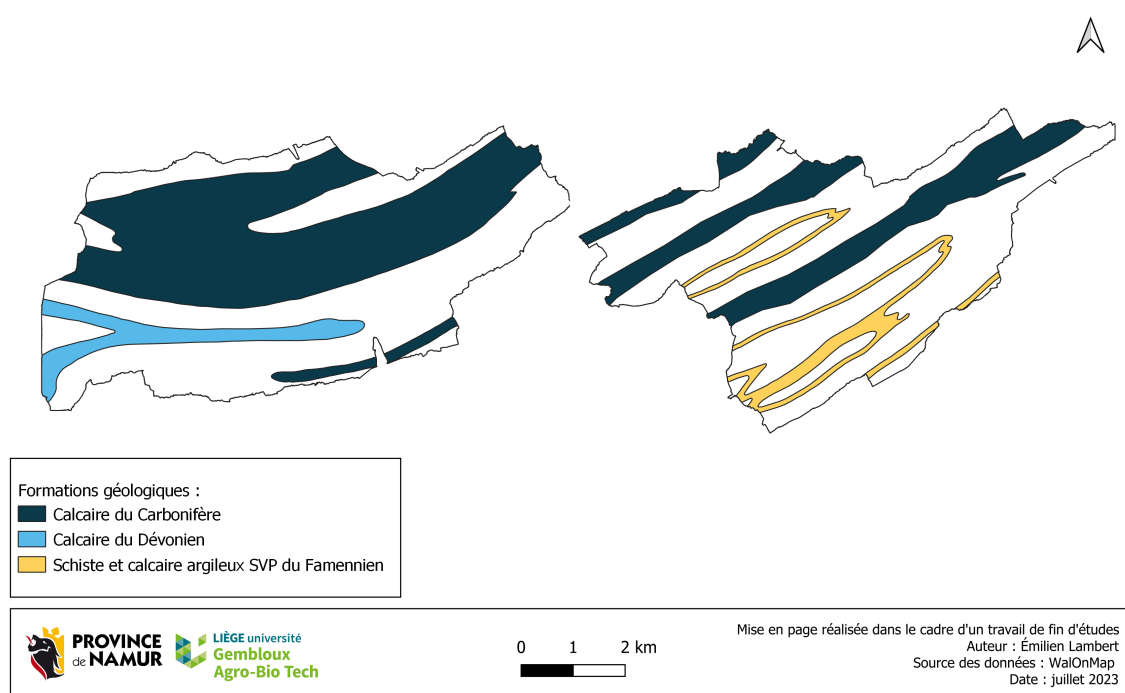


FIGURE 49 – Cartes de comparaison du karst dans la vallée du Crupet (à gauche) et du Leignon (à droite).

Finalement, le coefficient α avait été tiré de la littérature sans toutefois pouvoir le calibrer. Une analyse de sensibilité du paramètre est présentée en Table 15. Pour le choix d'une valeur de 0,7 et 0,8, comme proposé par diverses sources, l'erreur sur le débit obtenu est d'environ 1 %. Comme la fonction est exponentielle, une surestimation de α donne une erreur plus conséquente qu'une sous-estimation.

TABLE 15 – Analyse de sensibilité du paramètre α .

Valeur α	Erreur sur α	Erreur sur le débit calculé
0,65	-15 %	1,97 %
0,7	-5 %	0,99 %
0,74	-1 %	0,20 %
0,75	0 %	0 %
0,76	+1 %	0,20 %
0,8	+5 %	1,00 %
0,95	+15 %	4,06 %

I Explications sur les modèles 1D, 2D et 3D

Les modèles d'hydrauliques 1D s'utilisent notamment pour des études portant sur de longs tronçons, ou lorsqu'une modélisation sur une durée conséquente est nécessaire. Pour ce type de simulation, le niveau de détail reste peu élaboré (ROUSSELOT et al., 2012). Ils s'appliquent davantage à des rivières possédant une géométrie rectiligne et dont la section varie peu. Les processus à l'échelle d'une section transversale sont simplifiés, et ils ne font pas l'objet de l'étude en elle-même (voir Figure 14).

En passant aux modèles à deux dimensions, il est dès lors possible de simuler les écoulements d'eau dans le lit mineur et sur les plaines inondables. Les résultats obtenus apportent des informations sur les processus locaux, à l'instar des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement. Les modèles 2D sont utilisés pour l'étude d'inondations, la création de cartes de danger ou pour des dimensionnements divers (ROUSSELOT et al., 2012). Ils sont employés dans des situations où les échanges d'eau horizontaux peuvent être complexes. À noter qu'il existe également des modèles qualifiés de « 1D-2D » qui combinent l'écoulement de type 1D d'une rivière connectées à des zones 2D.

Le niveau de complexité le plus élevé se rencontre dans les modèles à trois dimensions. Du point de vue de l'écoulement, les courants turbulents jouent un rôle prépondérant et ils peuvent être étudiés par des modèles de type 3D. Ceux-ci s'appliquent à des problèmes ayant des dimensions spatiales réduites, à l'image de l'amont d'une centrale hydroélectrique ou de la pile d'un pont (ROUSSELOT et al., 2012). Ils sont donc utiles afin de connaître les vitesses horizontales et verticales de l'écoulement. La Province de Namur ne possède néanmoins pas les ressources nécessaires pour réaliser des modèles 3D en interne.

J Schéma de la modélisation Python de la ZIT

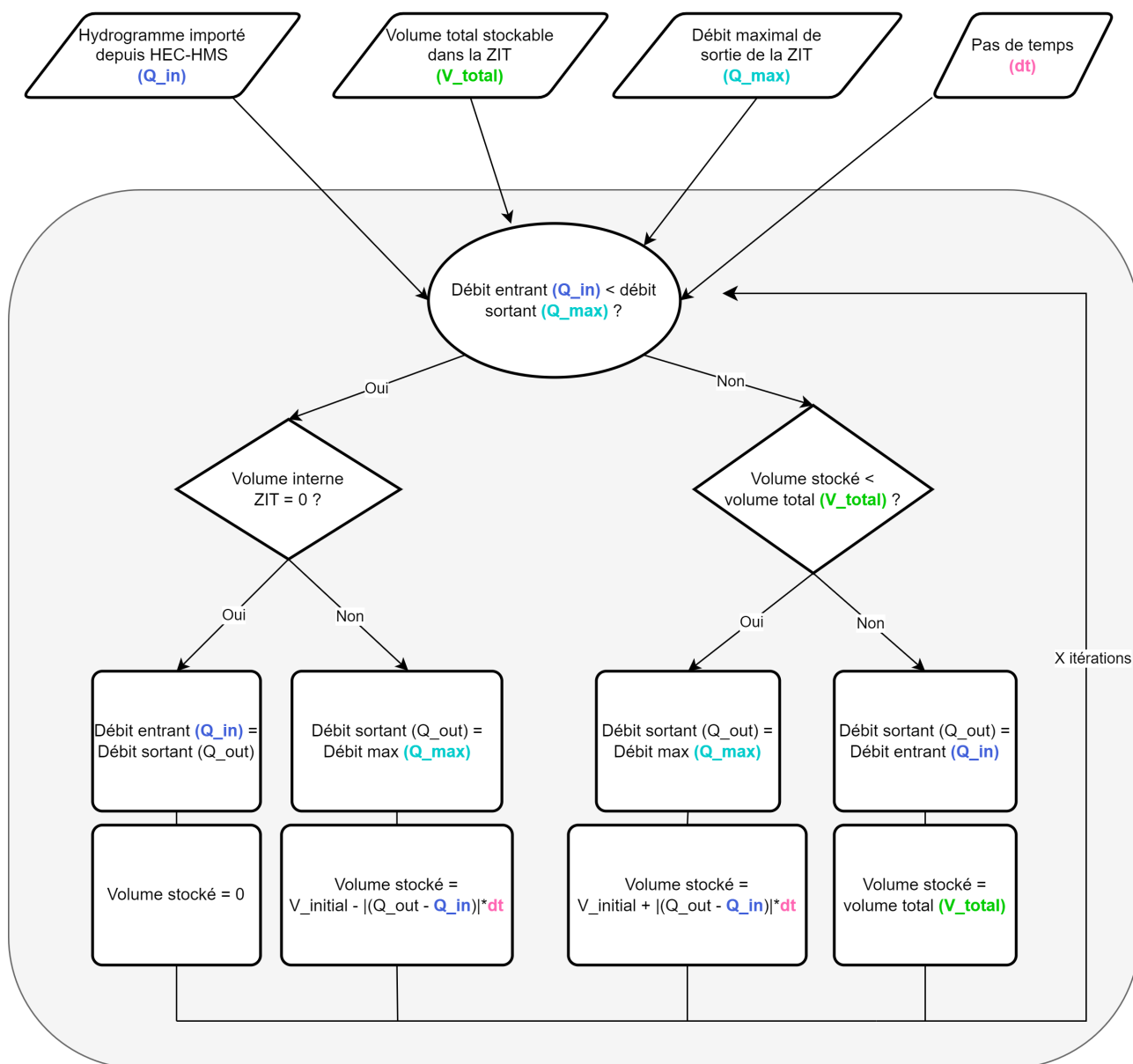


FIGURE 50 – Diagramme du fonctionnement du code Python simulant l'effet d'une Zone d'Immersion Temporaire (ZIT).

N.B. : lorsque le volume stocké est supérieur à 90 % de la capacité de la ZIT, le débit maximal de sortie est doublé afin de simuler l'effet d'un déversoir de sécurité.

K Carte des débits de plein bord



FIGURE 51 – Carte des débits de plein bord (débit maximal avant débordement).

L Informations complémentaires sur les zones d'immersion temporaires

Dans les simulations qui sont présentées dans ce travail, le débit est un paramètre clé qui conditionne l'ampleur de l'inondation. L'utilisation d'un réservoir en amont du village de Crupet permet d'écarter la crue, c'est-à-dire de retenir temporairement une partie de l'eau sur place lors de la phase aiguë de la crue. De tels ouvrages sont appelés Zones d'Immersion Temporaire (ZIT), Zones d'Expansion de Crue (ZEC), Zone de Ralentissement Dynamique des Crues (ZRDC) ou même barrages écrêteurs de crues. Ils consistent en la création d'une digue perpendiculaire à l'écoulement afin de former une retenue d'eau à l'amont.

Dans son fonctionnement habituel, un pertuis positionné à la base de la digue laisse s'écouler l'eau de la rivière. Il est dimensionné de telle sorte que le débit de sortie soit acceptable dans la section aval. Dans cette situation, le réservoir est ainsi maintenu vide. En période de crue, le débit de sortie au niveau du pertuis plafonne et l'eau excédentaire s'accumule dans le réservoir. Après avoir été retenue, l'eau s'évacue dans la rivière pendant la période de décrue. Si la crue s'avère être particulièrement importante, un déversoir de sécurité est positionné au sommet de la digue afin d'évacuer l'eau excédentaire sans endommager l'ouvrage.

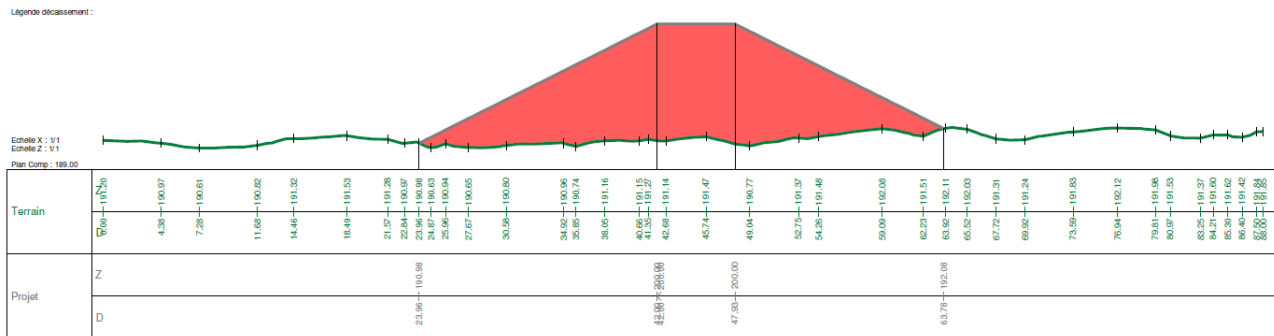


FIGURE 52 – Coupe transversale de la digue de la ZIT.

M Comparaison aux valeurs de CN de GISER

La cellule GISER (Gestion Intégrée Sol - Érosion - Ruissellement) a réalisé des cartes de coefficients CN pour les années 2006, 2007, 2008, 2009, 2010. Le PGICE utilise habituellement ces cartes pour obtenir la valeur du CN pour l'application de la méthode SCS. À noter que les cartes de GISER n'ont pas été utilisées dans ce travail afin de tenir compte des changements urbanistiques qui ont pu avoir lieu depuis une quinzaine d'année. Le Tableau 16 donne la moyenne de CN du modèle HEC-HMS et des différentes cartes de GISER. Ce complément d'analyse démontre que les valeurs sont dans tous les cas très proches, et les résultats sont éloignés de moins d'une unité (au maximum 0,32).

TABLE 16 – Comparaison des valeurs moyennes de CN du modèle HEC-HMS et des cartes GISER.

	CN moyen
HEC-HMS	70,46
GISER 2006	70,77
GISER 2007	70,68
GISER 2008	70,72
GISER 2009	70,78
GISER 2010	70,54

N Précipitations et hydrogrammes des pluies synthétiques

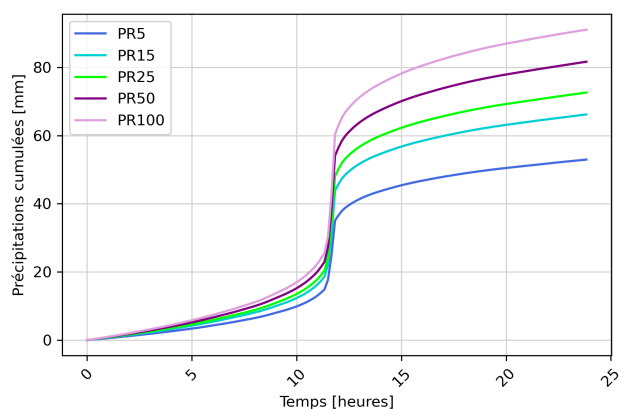


FIGURE 53 – Précipitations cumulées des différentes pluies synthétiques.

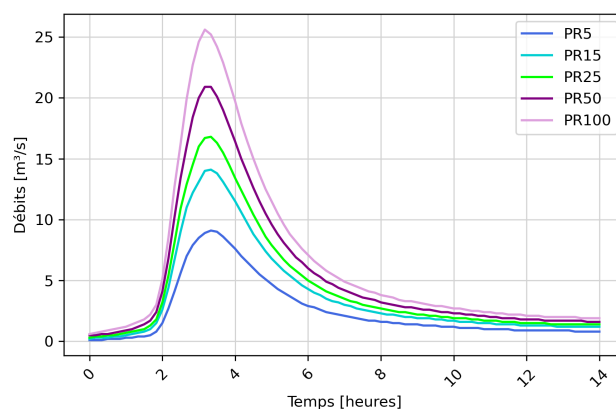


FIGURE 54 – Hydrogrammes de crue pour le ruisseau de Crupet pour diverses périodes de retour de pluies.

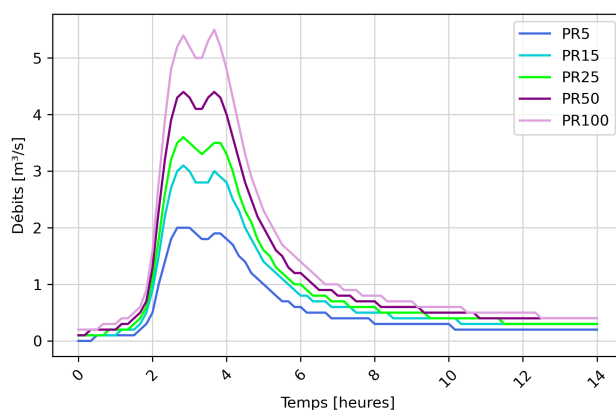


FIGURE 55 – Hydrogrammes de crue pour le ruisseau de Vesse pour diverses périodes de retour de pluies.

O Carte des répartitions des hauteurs d'eau pour chaque scénario



FIGURE 56 – Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 1 - situation actuelle.



FIGURE 57 – Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 2 - reconstruction totale du mur.



FIGURE 58 – Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 3 - reconstruction partielle du mur et émissaire de crue.



FIGURE 60 – Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 4 bis - combinaison des scénarios 3 & 4.



FIGURE 61 – Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 5 - modification de la confluence.

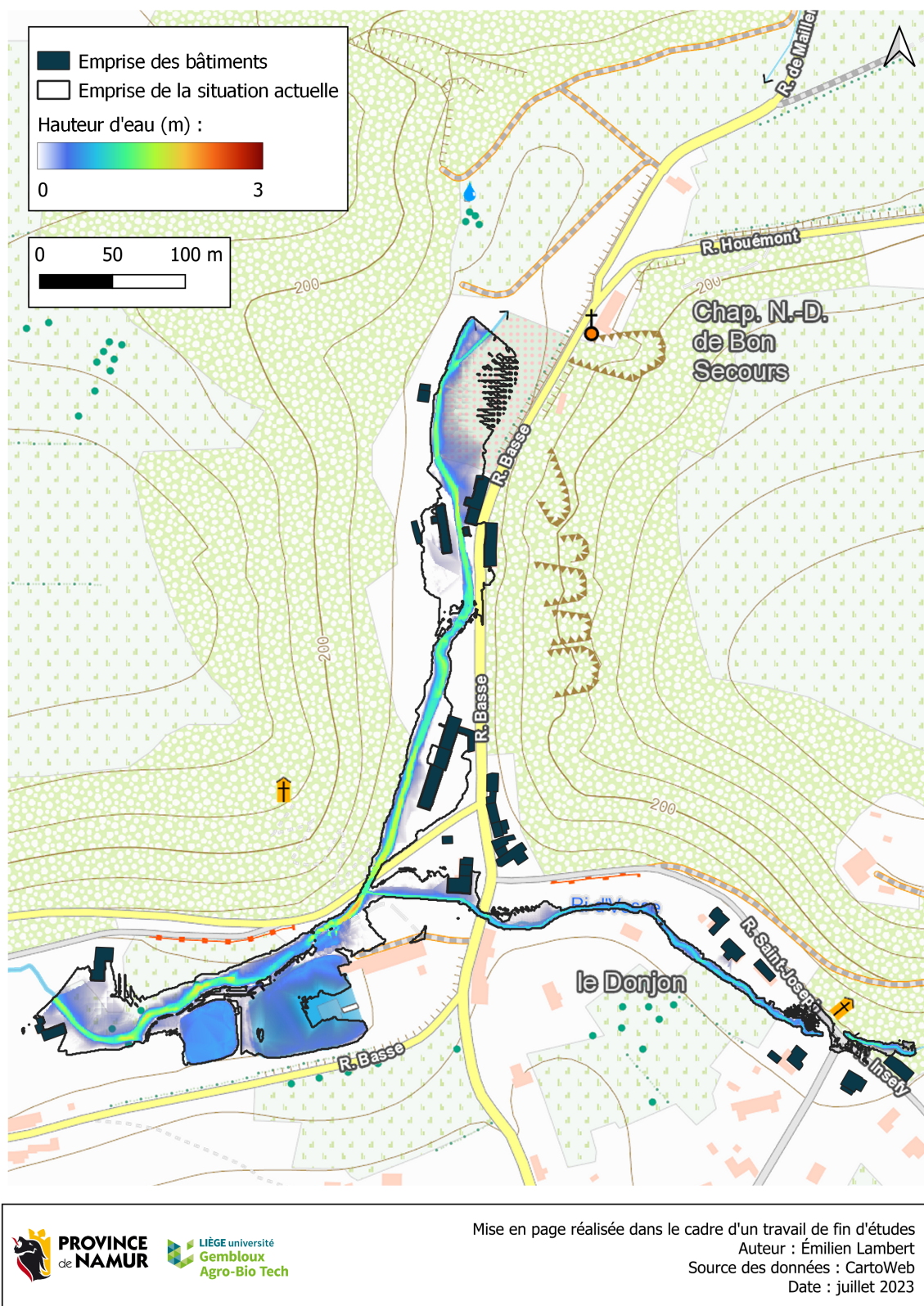


FIGURE 62 – Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 6 - zone d'immersion temporaire.



FIGURE 63 – Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 7 - suppression de la chute.



FIGURE 64 – Répartition des hauteurs d'eau pour le scénario 8 - création d'une banquette.

P Carte de l'aléa d'inondation

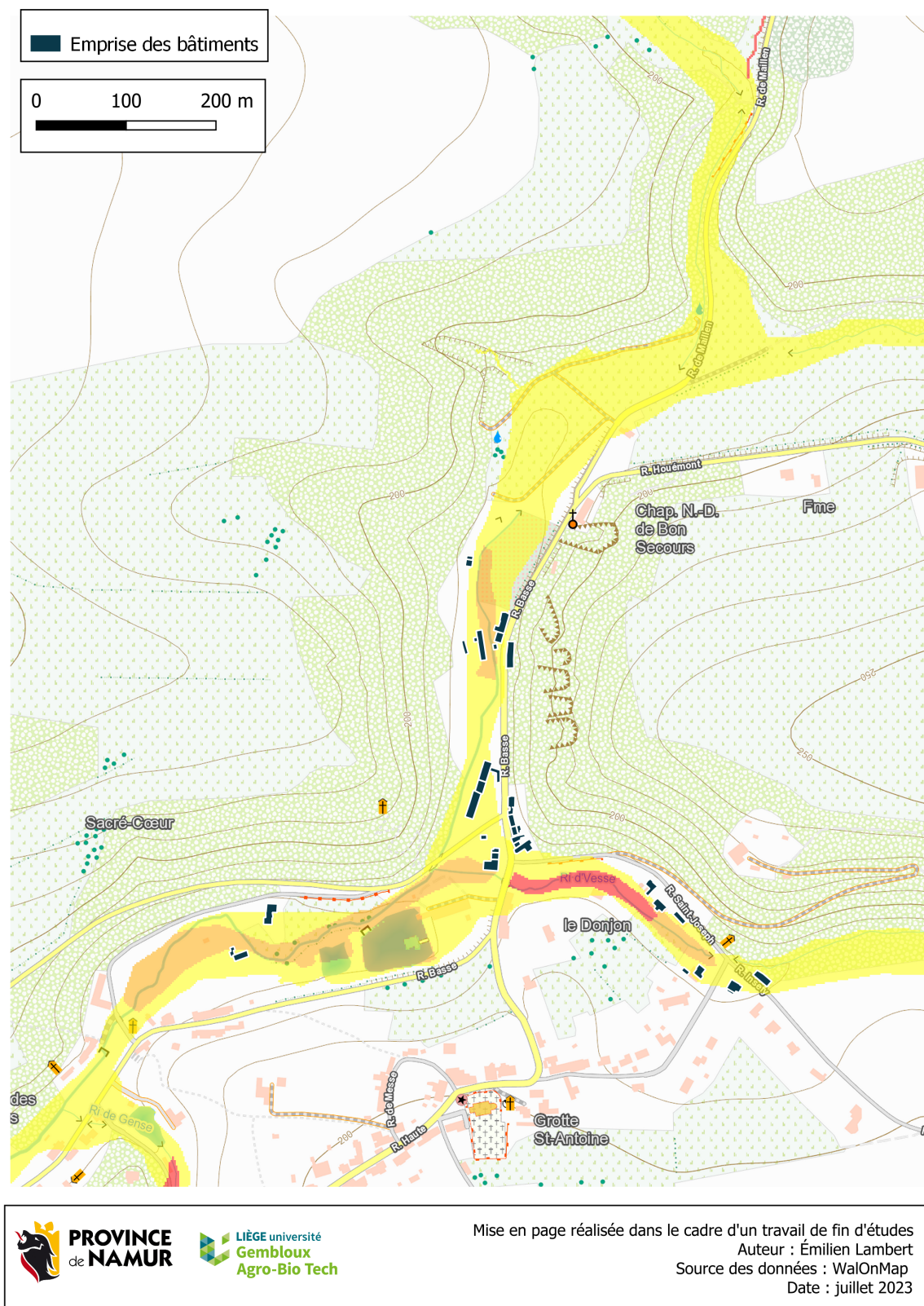


FIGURE 65 – Carte de l'aléa d'inondation par débordement des cours d'eau et par ruissellement en vigueur (MB : 24/03/2021)(SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023a).

Q Coefficients d'écoulement du Leignon

L'étude des coefficients d'écoulement permet de quantifier la proportion du volume d'eau précipité qui arrive *in fine* à l'exutoire. Le coefficient est calculé comme suit :

$$R = \left(\frac{V_{Tot,exutoire}}{V_{Tot,pluie}} \right) \quad (12)$$

Avec :

$$V_{Tot,pluie} = \sum_{i=1}^t \frac{\text{Précipitation}_{(i)}}{1000} * \text{Surface}_{BV} \quad (13)$$

Et :

$$V_{Tot,exutoire} = \sum_{i=1}^t (\text{Débit}_{(i)} - \text{Débit}_{(B)}) * 3600 \quad (14)$$

En considérant :

- R, le coefficient d'écoulement.
- V_{Pluie} , le volume total précipité [m³].
- $V_{Exutoire}$, le volume total arrivant à l'exutoire [m³].
- Précipitation_(i), la précipitation au moment t [mm].
- Surface_(BV), la superficie du bassin versant du Leignon [m²].
- Débit_(i), le débit moyen horaire au moment t [m³/s].
- Débit_(B), le débit de base [m³/s].

Les données proviennent du pluviomètre de Ciney et du limnimètre du ruisseau de Leignon (SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, 2023c). Le coefficient d'écoulement, calculé pour le bassin versant du Leignon, correspond à l'application de la méthode de ratio dans le modèle hydrologique de Crupet. Une remarque importante est à formuler sur la distinction entre le ruissellement de surface (tel que modélisé dans HEC-HMS) et le ruissellement souterrain (qui n'est pas compris dans le modèle). Afin de comparer le coefficient d'écoulement du Leignon au coefficient issu de la méthode de ratio (de HEC-HMS) pour le Crupet, les écoulements souterrains doivent être supprimés. Or, leur contribution par rapport aux volumes arrivant à l'exutoire est inconnue. Pour ce faire, les coefficients d'écoulement de la crue du 15 juillet 2021 et des cinq jours suivants sont présentés dans le Tableau 17.

Étant donné que le pic de crue s'est déroulé le 15 juillet vers midi, les coefficients d'écoulement augmentent avec le temps. Ce coefficient varie de 14,2 % au minimum jusqu'au maximum 42 %. Étant donné que la pluie s'arrête le 16 juillet à 16h, les volumes arrivant à l'exutoire les jours suivants sont probablement issus d'écoulements souterrains. En comparaison, le coefficient utilisé pour le modèle HEC-HMS de Crupet pour la méthode de ratio est de l'ordre de 40 %.

TABLE 17 – Résultats des coefficients d'écoulement pour la crue du 15 juillet 2021.

	15/07	16/07	17/07	18/07	19/07	20/07
Ratio d'écoulement	14,2 %	26,5 %	33,2 %	36,9 %	39,1 %	42,0 %