



Projet de fin d'études

Études hydrologique et hydraulique pour
la mise en place d'un système d'alerte
inondation sur le bassin versant de la
Vaux



Alexandre Navarro

2023

Remerciements

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers les personnes qui ont contribué à la réussite de mon stage au sein de l'Entente Oise Aisne. Leur soutien, leurs conseils et leur collaboration ont été d'une importance cruciale tout au long de cette expérience enrichissante.

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement mon collègue de bureau, Quentin Girardon. Sa supervision attentive et ses précieux conseils ont joué un rôle majeur dans ma compréhension des enjeux du projet. Sa disponibilité et sa patience ont grandement facilité mon intégration au sein de l'équipe.

J'adresse également mes remerciements à Marjorie André, ma tutrice de stage. Ses retours constructifs et sa confiance ont contribué à mon développement professionnel.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers Jean Michel Cornet, le directeur de l'Entente Oise Aisne, pour son accueil et la confiance qu'il a placée en moi tout au long de cette expérience.

Un grand merci à Thierry Frayon et Jean Baptiste Richet, mes collègues de bureau, pour notre collaboration et nos échanges fructueux. Leur présence à mes côtés a rendu le travail quotidien plus agréable et stimulant.

J'adresse mes remerciements à l'ensemble de l'équipe de l'Entente Oise Aisne pour son accueil chaleureux, sa collaboration et son esprit d'équipe. Votre soutien a créé un environnement propice à l'apprentissage et à la réussite collective.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers Thierry Lepelletier pour sa formation en hydrologie. Ses connaissances approfondies et sa volonté de partager ont enrichi ma compréhension des concepts hydrologiques et ont été d'une grande utilité pour mon travail.

Enfin, je tiens à remercier ma famille, mes amis et mes proches pour leur soutien tout au long de cette période.

Résumé

L'Entente Oise-Aisne est un établissement public dont la mission principale est la prévention d'inondations. Ce stage s'inscrit dans cette volonté, en travaillant à la mise en place d'un système d'alerte pour prévenir la population des inondations sur le bassin versant de la Vaux. Cette démarche se décline en trois étapes et conduit à une estimation des débits de seuils d'alerte et des pluies amenant de tels débits sur la commune de Wasigny (08).

Tout d'abord la première étape est une analyse approfondie du secteur et des événements marquants de crues ayant eu lieu au cours de ces 30 dernières années. Elle se caractérise par une recherche documentaire et des enquêtes de terrain afin de déterminer les enjeux sur la région. Sur le bassin versant, les communes de Signy l'Abbaye, Wasigny et Ecly sont les plus touchées par les inondations de la Vaux. Sur ces seules trois communes, on recense plus 70 habitations, 4 entreprises et 2 écoles pouvant être impactées par le eaux. Cependant, afin de mettre en place un système d'alerte efficace, il est apparu que la commune de Signy l'Abbaye se situait trop en amont du bassin versant et ne pourrait donc pas bénéficier d'une alerte suffisamment en avance basée sur de l'observation de pluie. Pour la commune d'Ecly, un tel système présenterait peu d'intérêt pour sa commune car les habitants ont déjà leurs propres repères avant une montée des eaux. Ainsi le reste de l'étude se focalise sur la commune de Wasigny.

La deuxième étape est l'étude hydrologique du bassin versant. Pour cela, deux modèles ont été développés : un sur HEC-HMS et l'autre sur Hydra. Les deux modèles sont des modèles à base physique continue qui fonctionnent sur une année hydrologique (septembre/août). Sur chacun de ces modèles, les chroniques de pluies des trois dernières années ont été injectées. Au final, les deux modèles se sont révélés pertinents mais avec toutefois une meilleure précision sur Hydra. C'est donc avec ce modèle que se poursuit l'analyse.

L'étude continue avec la modélisation hydraulique développée elle aussi sous Hydra. Cette partie hydraulique a tout d'abord permis de voir si les temps de retard prédits par l'hydrologie étaient bien respectés. Ce modèle a également permis de retrouver les observations des différents témoignages sur les crues passées. Pour Wasigny, le Modèle Numérique de Terrain est assez imprécis dans la zone et le calage ne permet pas de retranscrire totalement ce qui s'est réellement passé en terme d'inondation dans la commune. Néanmoins, on peut extraire de l'hydraulique les valeurs de débits de premiers débordements. Ainsi, à partir de $18 \text{ m}^3/\text{s}$, on constate que la Vaux sort de son lit et impacte les premiers enjeux.

La dernière partie a pour but de retrouver une pluie amenant un tel débit. Pour cela, nous avons simulé deux types de pluie, double triangle et moyenne arithmétique, qui conduisent à un débit de $18 \text{ m}^3/\text{s}$ à Wasigny. L'analyse des deux pluies nous montre que pour une pluie de même durée, la lame d'eau cumulée totale est différente et que la forme de la pluie a une importance sur le pic de crue. Par ailleurs, nous avons observé qu'une même pluie injectée en été et en hiver n'a pas du tout les mêmes conséquences sur le débit total. Ces questions seront donc à explorer pour la suite du projet.

Pour conclure, cette étude a permis de décrire une méthodologie d'analyse qui devra être complétée par une étude approfondie des pluies et de leurs impacts en fonction des saisons. L'objectif final reste la mise en place d'un système d'alerte abouti qui pourra être réutilisé par l'Entente Oise-Aisne sur d'autres bassins versants.

Abstract

Entente Oise-Aisne is a public body whose main mission is flood prevention. This internship is part of that mission, working on setting up a warning system to warn people of flooding in the Vaux catchment area. There are three stages to the process, leading to an estimate of alert threshold flows and the rainfall leading to such flows in Wasigny (08).

The first stage is an in-depth analysis of the area and the major flooding events that have occurred over the last 30 years. This involved documentary research and field surveys to determine what is at stake in the region. In the catchment area, the municipalities of Signy l'Abbaye, Wasigny and Ecly are the most affected by flooding from the Vaux. In these three communes, more than 70 homes, 4 businesses and 2 schools that could be affected by the water. However, in order to set up effective warning system, it became clear that Signy l'Abbaye was too far upstream in the catchment area and would therefore not be able to benefit from a sufficiently early warning based on the observation of rainfall. For the commune of Ecly, such a system would be of little interest to the municipality, as residents already have their own reference points before a rise in water levels. The rest of the study will therefore focus on Wasigny.

The second stage is the hydrological study of the catchment. For this, two models were developed : one on HEC-HMS and the other on Hydra. Both models have a continuous physical based models that operate over one hydrological year (September/August). On each of these models, rainfall records for the last three years have been injected. In the end, both models proved to be relevant, but with greater accuracy for Hydra. It is therefore with this model that the analysis continues.

The study continues with hydraulic modelling, also developed in Hydra. This hydraulic part first of all enabled us to see whether the delay times predicted by the hydrology were respected. This model also enabled us to find the observations made by various witnesses to past floods. For Wasigny, the Digital Terrain Model imprecise in the area and the calibration does not allow us to fully transcribe what really happened in terms of flooding in the municipality. Nevertheless, it is possible to extract the flow values for the first overflows from the hydraulics. Thus, from 18 m³/s, we can see that the Vaux leaves its bed and impacts the first issues at stake.

The aim of the last part is to find a rainfall that brings such a flow. To do this, we simulated two types of rainfall, double triangle and arithmetic mean, which lead to a flow of 18 m³/s at Wasigny. Analysis of the two rainfall events shows that for a rainfall of duration, the total accumulated water depth is different and that the shape of the rain has an importance importance on the flood peak. Furthermore, we have observed that the same rainfall injected in summer and winter does not have the same impact on the total flow. These questions will be explored for the rest of the project.

To conclude, this study has made it possible to describe an analysis methodology that will have to be supplemented by an in-depth study of rainfall and its seasonal impact. The final objective is to set up a fully-fledged warning system that can be reused by Entente Oise-Aisne on other catchment areas.

Nomenclature

BV Bassin Versant

Entente ou EOA Entente Oise-Aisne

EPCI Établissement public de coopération intercommunale

EPTB Établissement Public Territorial de Bassin

ERP Etablissement Recevant du Public

ETP Evapotranspiration potentielle

GEMAPI Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations

GW Groundwater

MNT Modèle Numérique de Terrain

PPRI Plan de Prévention du Risque Inondation

RFU Réserve Facilement Utilisable

SBV Sous Bassin Versant

SCS Soil Conservation Service

Table des matières

1	Introduction	1
2	Présentation de l'Entente	2
2.1	Qu'est ce qu'un EPTB?	2
2.2	Les missions de l'Entente Oise-Aisne	2
2.3	Présentation de l'équipe	3
2.4	Mon rôle au sein de l'équipe	4
3	Etude pour la mise en place d'un système d'alerte inondation	5
3.1	Méthodologie et objectifs	5
3.2	Cadre de l'étude et enjeux	5
3.2.1	Bibliographie d'inondation	5
3.2.2	Enquête de terrain	6
3.2.3	Liste des principales communes impactées et dates de crue	6
3.3	Etude préliminaire	7
3.3.1	Temps de concentration théorique	7
3.3.2	Étude des données météorologiques et de débit	8
3.4	Hydrologie	9
3.4.1	Modèle hydrologique sur HEC-HMS	9
3.4.2	Modèle hydrologique sur Hydra	16
3.4.3	Synthèse de l'hydrologie	21
3.5	Modèle hydraulique	23
3.5.1	Étude hydraulique des zones d'enjeux	23
3.5.2	Mise en place et calage du modèle hydraulique	25
3.6	Résultats et analyse	27
3.6.1	Définition des débits de premier débordement	27
3.6.2	Estimation d'une pluie de débordement	29
3.6.3	Synthèse	30
4	Conclusion	31
5	Bibliographie	32
6	Annexes	33
6.1	Exemple d'une enquête de terrain	33
6.2	Enjeux détaillés par commune	36
6.3	Formules du temps de concentration théorique	38
6.4	Formule de l'évapotranspiration	39
6.5	Estimation du débit à Hauteville	40
6.6	Méthodologie création d'un BV sur Qgis et HEC-HMS réalisé pour le fond documentaire de l'Entente	41
6.7	Liste des paramètres pour le modèle HEC-HMS	44
6.8	Liste des paramètres pour le modèle Hydra	45

Table des figures

2.1	Périmètre d'intervention de l'Entente	2
2.2	Equipe de l'Entente	4
3.1	Liste des enjeux déterminés par l'étude documentaire	6
3.2	Schéma décomposant un hydrogramme de crue et les temps caractéristiques associés	7
3.3	Liste des appareils de mesure disponible sur le bassin versant de la Vaux	9
3.4	Schéma de fonctionnement du modèle développé sur HEC-HMS	10
3.5	Bassin de la Vaux et du Plumion	12
3.6	Sous bassins de la Vaux en amont d'Hauteville	12
3.7	Comparaison des débits observés et simulés au niveau d'Ecly sur HEC-HMS	14
3.8	Zoom sur l'hiver (mi décembre - fin janvier)	15
3.9	Schéma de principe de fonctionnement du modèle Hydra	16
3.10	Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique développé sur Hydra	17
3.11	Panneau de commande Hydra pour la paramétrisation de l'hydrologie d'un BV	18
3.12	Exemple de la différence entre sols perméables et imperméables dans la conception d'Hydra [12]	18
3.13	Comparaison des débits observés et simulés au niveau d'Ecly avec le modèle hydrologique d'Hydra	20
3.14	Zoom sur l'hiver (mi-décembre - fin janvier) avec le modèle hydrologique d'Hydra	21
3.15	Image d'archive - Crue de Janvier 2009 à Wasigny (Rue Anatole France)	23
3.16	Images d'archives - Crue de Juillet 1989 à Ecly [13]	24
3.17	Modèle hydraulique réalisé sur le secteur à enjeux à l'aide du module hydraulique d'Hydra	25
3.18	Comparaison des pics de débit simulés et observés à Hauteville en janvier 2021	26
3.19	Comparaison des pics de débit simulés et observés à Ecly en janvier 2021	26
3.20	Comparaison des pics de débit simulés et observés à Ecly en janvier 1993	26
3.21	Cartographie des inondations sur Ecly en janvier 2021 et janvier 1993	27
3.22	Débit de $16 m^3/s$ en 2021	28
3.23	Débit constant de $18 m^3/s$	28
3.24	Comparaison des pics de débit simulés et observés à Wasigny en janvier 1993	28
3.25	Pluie double triangle apportant un débit de pointe de $18 m^3/s$ à Wasigny	29
3.26	Pluie moyenne arithmétique apportant un débit de pointe de $18 m^3/s$ à Wasigny	30
6.1	Carte des enjeux relevés à Librecy et Signy l'abbaye sur la base de données	36
6.2	Carte des enjeux relevés à Lalobbe sur la base de données	37
6.3	Carte des enjeux relevés à Wasigny et la Neuville lès Wasigny sur la base de données	38
6.4	Formules théoriques du temps de concentration utilisées dans le cadre de ce stage	39
6.5	Formule théorique de l'ETP de Thornthwaite	40
6.6	Dimension du pont sur lequel la sonde de l'Entente a été installée	40

Liste des tableaux

3.1	Liste des principaux paramètres pour la modélisation hydrologique sur HEC-HMS	12
3.2	Liste des paramètres finaux pour la modélisation hydrologique sur Hydra	19
3.3	Comparaison des paramètres semblables sur HEC-HMS et Hydra	22
3.4	Comparaison des critères de Nash sur HEC-HMS et Hydra	22
3.5	Comparaison des critères de Nash sur HEC-HMS et Hydra	22
6.6	Liste des paramètres calés pour la modélisation hydrologique sur HEC-HMS	44

6.7 Liste des paramètres calés pour la modélisation hydrologique sur Hydra 45

1 Introduction

Dans le cadre de mon stage de fin d'études, qui s'est déroulé du 27 mars au 1er septembre 2023, j'ai intégré la Direction de l'Appui au Territoire au sein de l'Entente Oise-Aisne, à Compiègne. Ce stage a été l'occasion de mettre en pratique mes connaissances académiques acquises à l'ENSEEIH7 et d'approfondir mon expertise dans un environnement professionnel concret.

L'Entente Oise Aisne (EPTB) joue un rôle central dans la gestion des ressources hydriques et la prévention des risques d'inondation dans la région. En tant qu'organisme de gestion de bassin versant, l'EPTB œuvre pour la préservation des milieux aquatiques et la protection des populations contre les inondations.

Mon rôle au sein de la Direction de l'Appui au Territoire en tant que stagiaire ingénieur en modélisation a été de contribuer à l'étude pour la mise en place d'un système d'alerte inondation. Mon objectif principal était de mettre en œuvre une méthodologie complète alliant études de terrain, analyse hydrologique et analyse hydraulique, afin d'évaluer les risques d'inondation et de proposer des seuils d'alerte.

Après avoir présenté l'entreprise, ce rapport se décompose en quatre parties reflétant mon travail au sein de l'Entente Oise-Aisne :

Analyse préliminaire et Étude de Terrain : Cette section se focalise sur la collecte d'informations de terrain, la récupération de données existantes et la compréhension du contexte géographique du bassin versant de la Vaux.

Analyse Hydrologique : Cette partie traite de la mise en place de deux modèles hydrologiques, permettant d'estimer des débits suite aux événements pluvieux.

Analyse Hydraulique : Ici, l'accent est mis sur la modélisation hydraulique sous Hydra, du bassin versant étudié en prenant en compte l'hydrologie, les ouvrages et la topographie. Cette partie permet également de définir des seuils de débit de débordement.

Résultats et Analyse : La dernière section présente les scénarios de pluies conduisant aux premiers débordements. Elle propose également des recommandations pour la suite de l'étude et la mise en œuvre du système d'alerte inondation.

Ce rapport expose de manière détaillée chaque étape de mon stage au sein de l'Entente Oise Aisne, démontrant l'application pratique de mes compétences d'ingénieur en modélisation hydraulique et hydrologique.

2 Présentation de l'Entente

2.1 Qu'est ce qu'un EPTB ?

Un Établissement Public Territorial de Bassin (EPTB) est un établissement qui intervient dans l'aménagement des fleuves et des rivières dans le cadre d'un territoire hydrographique. Les EPTB ont le statut de syndicat mixte et permettent de rassembler tous les niveaux de collectivités (communes, EPCI, départements, régions). Il est ainsi l'outil de référence permettant de faciliter l'exercice de leurs compétences respectives, à l'échelle adaptée du bassin, en assurant la co-construction d'un projet partagé solidaire. Les EPTB sont des structures gemapiennes, c'est à dire qui exercent les compétences de la GEMAPI (Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations). En France, il existe aujourd'hui 42 EPTB, de tailles diverses, et chacun de ces établissements possède des missions qui lui sont propres. Ces missions peuvent être liés à l'amélioration des connaissances et de l'expertise ainsi qu'à l'accompagnement des collectivités territoriales et à la planification d'actions mais également à la maîtrise d'ouvrage. En effet, les EPTB n'ont pas de compétences générales mais uniquement des compétences qui lui sont transférées par les collectivités.

2.2 Les missions de l'Entente Oise-Aisne

L'Entente Oise-Aisne est un syndicat mixte ouvert, établissement public territorial de bassin, composé de 32 collectivités membres. Elle est compétente sur l'ensemble du bassin versant de l'Oise, de l'Aisne et de leurs affluents, soit 16 900 km² et gère plus de 40 ouvrages. Elle exerce des compétences à la carte sur les problématiques de risques naturels (inondation par débordement de cours d'eau, ruissellement et coulées de boue) et de qualité des milieux aquatiques. Enfin, elle assure une coordination de l'ensemble des acteurs agissant sur le grand cycle de l'eau et rend des avis sur leurs projets.



FIGURE 2.1 – Périmètre d'intervention de l'Entente

Les principales compétences de l'Entente sont détaillées ci-dessous [1] :

- **Prévention des inondations**

Cette compétence des EPCI (ou des syndicats mixtes qui l'ont reçue par transfert) peut être transférée à l'Entente Oise Aisne pour tout le territoire de l'EPCI dans le bassin de l'Oise. Statutairement, un EPCI ou un syndicat mixte doté de la compétence GEMAPI qui adhère à l'Entente, transfère obligatoirement cette compétence.

- **Gestion des milieux aquatiques**

Cette compétence des EPCI (ou des syndicats mixtes qui l'ont reçue par transfert) peut être déléguée ou transférée à l'Entente Oise Aisne pour tout le territoire de l'EPCI dans le bassin de l'Oise. Statutairement, cette compétence est facultative, les nombreux syndicats locaux présents sur le bassin de l'Oise assurant une gestion de proximité sur une très grande partie du réseau hydrographique.

- **Animation concertation**

Cette compétence est partagée (elle peut être prise par plusieurs collectivités sur un même territoire). Statutairement, toute collectivité adhérente peut la transférer à l'Entente après s'en être saisie. Toutefois, un Département ou une Région adhérente transfère obligatoirement cette compétence.

- **Gestion des eaux de ruissellement**

Cette compétence est partagée (elle peut être prise par plusieurs collectivités sur un même territoire). Statutairement, toute collectivité adhérente peut la transférer à l'Entente après s'en être saisie. Dans un souci de complétude de la "boîte à outils" de gestion du risque, et pour augmenter l'attractivité de l'adhésion à l'Entente, celle-ci a vivement incité les départements à lui apporter cette compétence optionnelle.

2.3 Présentation de l'équipe

Le service regroupe 22 salariés permanents répartis en 5 départements :

- Direction (2 personnes)
- Direction administrative (5 personnes)
- Direction des ouvrages et de l'exploitation (4 personnes)
- Direction de l'appui aux territoires (8 personnes)
- Direction de l'environnement (3 personnes)



FIGURE 2.2 – Equipe de l'Entente

2.4 Mon rôle au sein de l'équipe

J'ai intégré l'équipe au sein du pôle de l'appui aux territoires sous la direction de Marjorie André (N7 2009) en qualité de stagiaire en modélisation et anticipation de la crise. Ma mission principale au cours de ce stage est la définition et l'application d'une méthodologie d'analyses hydrologiques sur des sous-bassins versants de l'Oise afin de calibrer des alertes pour l'anticipation des phénomènes d'inondations. Ce travail présente une grande part de modélisation technique en hydraulique et hydrologique et j'ai travaillé en collaboration avec Quentin Girardon (N7 2020) qui m'a beaucoup guidé sur le stage et formé sur les nouveaux logiciels (Hydra). Au cours de ce stage j'ai également eu l'occasion d'en apprendre davantage sur le fonctionnement d'un EPTB, ses relations avec les autres acteurs du monde de l'eau mais aussi le fonctionnement de la maîtrise d'ouvrage.



3 Etude pour la mise en place d'un système d'alerte inondation

3.1 Méthodologie et objectifs

Ce stage a pour objectif principal de définir et d'appliquer sur un premier cas, une méthodologie d'analyse des sous bassins versants de l'Aisne et de l'Oise, afin de calibrer des alertes et anticiper les phénomènes d'inondations. Il permet aussi de tester différents outils d'analyse hydrologique et de comparer leur efficacité. L'Entente Oise-Aisne pourra à la suite du stage mettre en place la méthodologie développée pour répondre à des problèmes rencontrés par des adhérents sur d'autres bassins versants. L'étude peut alors être découpée en sous-objectifs :

- Identification des enjeux par témoignages et visites de terrain
- Etude de l'hydrologie et de la genèse des crues
- Etude de la propagation de la crue à l'aide des outils de modélisation hydraulique de l'Entente
- Estimation des pluies débordantes et seuils d'alertes associés

3.2 Cadre de l'étude et enjeux

L'étude se déroule sur le bassin versant de la Vaux. Ce bassin a une superficie de 320 km^2 pour un linéaire de cours d'eau de 37 km. La rivière traverse 8 communes d'amont à aval : Librecy, Signy l'abbaye, Lalobbe, La Neuville lès Wasigny, Wasigny, Justine-Herbigny, Hauteville et Ecly. La Vaux possède trois principaux affluents : la Draize (bassin versant de 47 km^2), le Rau-Doumély (37 km^2) et le Plumion (150 km^2). Cette étude sur la Vaux pourra servir de référence méthodologique pour des études similaires à venir sur d'autres bassins versants.

3.2.1 Bibliographie d'inondation

La première phase de cette étude consiste à répertorier les enjeux et les différentes zones potentiellement impactées par des inondations. Les enjeux représentent les structures et les populations potentiellement touchées par un aléa. Dans un premier temps, l'objectif est de rassembler les données existantes sur le secteur ainsi que les dernières études hydrauliques faites. Le long de la Vaux, 6 communes possèdent une carte d'aléa inondation (Diagnostic hydraulique Hydratech 2011 [2]). Cette carte considère la crue de janvier 2009 comme crue de référence : Librecy, Signy l'abbaye, Lalobbe, La Neuville les Wasigny, Wasigny, Hauteville et Ecly. Cette crue sert de référence car elle est la dernière crue marquante en date sur le bassin et pour laquelle des données sont disponibles. Environ une centaine d'habitations, 4 entreprises, une école et une église ont été impactées par le passé par les eaux et sont représentées sur la carte suivante :

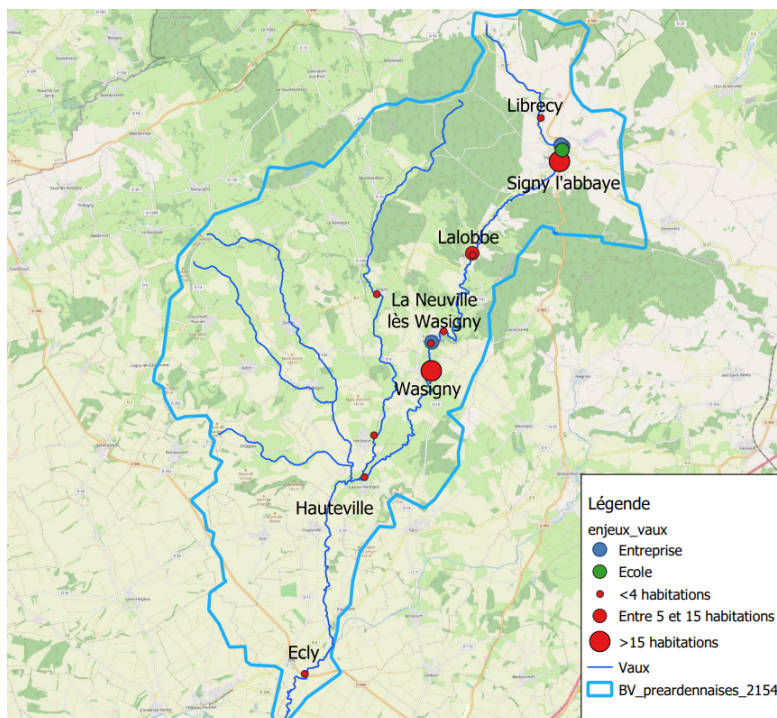


FIGURE 3.1 – Liste des enjeux déterminés par l'étude documentaire

D'après cette première approche, les communes de Signy l'abbaye et Wasigny semblent particulièrement touchées. L'enquête de terrain va permettre de connaître en détail les différents lieux touchés.

3.2.2 Enquête de terrain

Une fois les enjeux pré-identifiés, une première phase de terrain s'impose afin d'aller à la rencontre des populations pour en savoir plus sur les dernières crues au cours des dix dernières années ainsi que sur la manière dont la Vaux déborde et affecte, ou non, les enjeux. Cette étape permet alors d'identifier les enjeux un à un afin de les répertorier dans la base de données enjeux de l'Entente, qui est en cours de construction. Elle a également permis de vérifier si les travaux suggérés par l'étude Hydratech de 2011 avaient été réalisés sur certaines communes (travaux de restauration de la berge en amont de Librecy, déviation d'un ruisseau à Signy l'Abbaye, ...). Enfin, cette étape a permis d'identifier les ouvrages présents le long de la Vaux ce qui sera utile par la suite pour la partie hydraulique. Un compte rendu est disponible en annexe 6.1 à titre d'exemple et détaille les rencontres avec les riverains et les élus locaux.

3.2.3 Liste des principales communes impactées et dates de crue

- Librecy, habitations (2002, 2009)
- Signy l'abbaye, écoles, entreprises, habitations (1982, 1988 1993, 1995, 1998, 2002, 2003, 2009)

- Lalobbe, habitations (2002, 2009)
- La Neuville lès Wasigny, habitations, entreprise (1993, 1995, 2009)
- Wasigny, habitations (1993, 1995, 2003, 2009)
- Ecly, habitations (1993, 1995, 2009)

Les détails de chaque enjeu sont disponibles par commune en annexe **6.2**.

3.3 Etude préliminaire

3.3.1 Temps de concentration théorique

Le temps de concentration correspond au temps nécessaire de réponse d'un cours d'eau suite à un évènement de pluie. Il est défini comme le temps nécessaire à une goutte d'eau de pluie pour parcourir la distance depuis le point le plus éloigné de l'exutoire d'un bassin jusqu'à celui-ci. Il ne faut pas le confondre avec le temps de réponse (ou temps de retard) qui permet de mesurer l'écart de temps entre le pic de pluie et le pic de débit sur une région donnée. D'après la littérature, une bonne approximation du temps de réponse est 0.6 fois le temps de concentration [3]. Afin d'estimer ce temps de concentration qui est propre à chaque BV et SBV, il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques du BV comme sa pente moyenne, sa superficie,... Ce temps va nous être utile pour modéliser par la suite l'hydrologie d'un bassin versant.

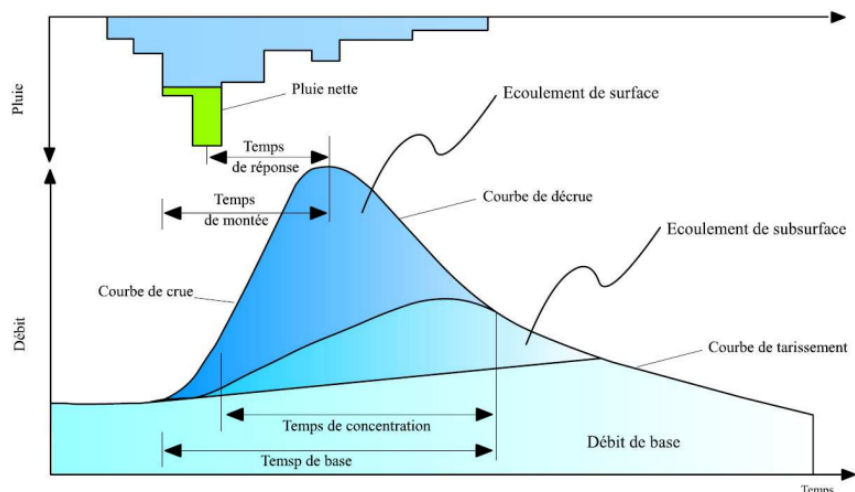


FIGURE 3.2 – Schéma décomposant un hydrogramme de crue et les temps caractéristiques associés

Les caractéristiques intrinsèques du sol au moment de la pluie n'étant pas connues, il existe un grand nombre de formules permettant d'évaluer ce temps de concentration, qui n'utilisent pas tous les mêmes paramètres, ni les mêmes domaines de validité et obtiennent des résultats parfois très différents. Ces études sont toutes empiriques et les détails des formules sont disponibles en annexe **6.3** [4]. Ainsi pour estimer un temps moyen, on décide de prendre la médiane des différents résultats afin de se soustraire aux différents extrêmes de certaines formules et en donnant plus de poids aux formules ayant un domaine de validité cohérent avec notre BV. Cela

nous donne finalement un temps de concentration d'environ **12h** pour Hauteville et de **17h** pour Ecly.

3.3.2 Étude des données météorologiques et de débit

Données météorologiques

Sur le bassin versant étudié, l'Entente possède un capteur de pluie au niveau de Signy l'Abbaye qui récupère les données depuis 2011. Ces données sont des mesures pluviométriques relevées toutes les 6 minutes. Toutefois, les données de ce capteur semblent présenter certaines limites ; des données sont manquantes sur de longues périodes, et parfois le capteur renvoie des données aberrantes qui surestiment les pluies. Pour ces différentes raisons et du fait qu'il n'y a qu'un seul capteur sur le territoire au nord du SBV, l'utilisation des données Météofrance semblent plus en adéquation. Les données Météofrance sont disponibles depuis juillet 2020, date à partir de laquelle l'Entente les a achetées, et sont des données radars qui donnent une mesure de pluie par la méthode indirecte des ondes radars sur des mailles au km^2 . Ces données sont complètes et donnent la pluie cumulée horaire en chaque point du maillage. Après comparaison des événements récents, la pluie radar semble meilleure, même si celle-ci n'est disponible qu'au pas de temps horaire, et se trouve donc être moins précis pour les événements orageux, elle reste plus fiable sur la durée que les mesures du pluviomètre. C'est donc avec les données de Météofrance que l'étude va se poursuivre.

Pour les besoins de l'étude, les données d'évapotranspiration (ETP) sont également indispensables. Elles permettent de mesurer la quantité d'eau qui s'évapore. Ces données n'étant pas disponibles directement, il a été nécessaire de recalculer cette ETP à l'aide des données de températures [5], elles disponibles, sur la région. A partir de ces données, l'ETP a été recalculée en mm/mois et nous donne donc une valeur mensuelle d'ETP. Les détails de la formule et des résultats sont disponibles en annexe 6.4 [6]

Données de débit

Concernant les données de débit l'Entente, possède un capteur de hauteur d'eau au niveau de Hauteville, en aval des confluences de la Vaux avec la Draize et le Doumély et en amont de la confluence avec le Plumion. Cependant, il n'existe pas de courbes de tarage pour ces hauteurs d'eau mais la topographie du pont a été faite en 2011 et il est donc possible d'estimer un débit à partir des caractéristiques géométriques de l'ouvrage et du cours d'eau à cet endroit la formule utilisée est détaillée en annexe 6.5 [7].

Les autres données de débit sont disponibles sur l'Hydroportail [8] avec un capteur en aval de la Draize à Justine et un capteur en aval de la Vaux à Ecly. L'Hydroportail est une base de données de l'Etat qui regroupe toutes les entités de mesures hydrographiques publiques du territoire. Concernant les capteurs, ce sont des sondes mesurant la hauteur d'eau dont une loi de tarage a été renseignée afin de donner les débits en continu.

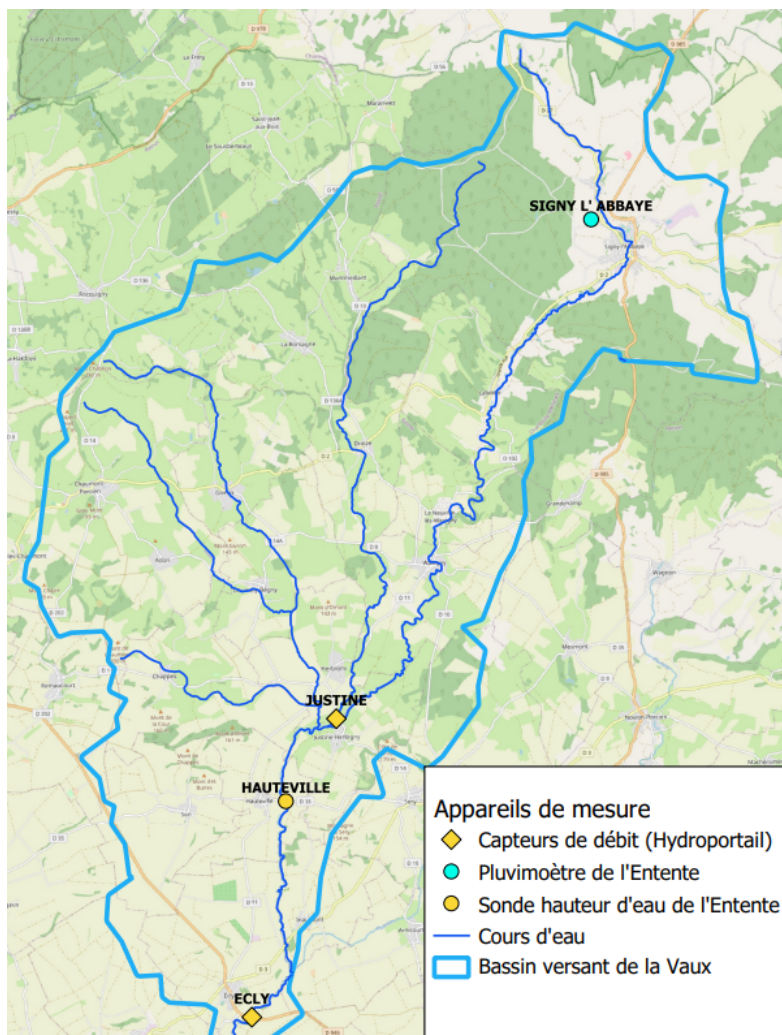


FIGURE 3.3 – Liste des appareils de mesure disponible sur le bassin versant de la Vaux

Grâce à ces différentes données, il est possible d'estimer un temps de retard moyen pour le SBV. Ces temps de retard observés correspondent à des pluies faibles observées au cours des trois dernières années ayant amené simplement des pics de débits mais en aucun cas des inondations. Au niveau d'Hauteville, le temps de retard observé varie entre **8h et 12h** et il vaut entre **13h et 16h** au niveau d'Eclly. Ce travail préliminaire étant fait, il est maintenant possible de réaliser un modèle hydrologique à partir des différentes données extraites.

3.4 Hydrologie

3.4.1 Modèle hydrologique sur HEC-HMS

Mise en place du modèle

La première modélisation a été développée à l'aide du logiciel HEC-HMS. Ce logiciel permet de réaliser des simulations hydrologiques sur un BV en choisissant le type de méthode le plus adapté en fonction des caractéristiques du BV et du type de situation (année hydrologique, évènement orageux, crue spécifique, ...). La méthode pour créer les bassins versants sera détaillée en annexe 6.6. Pour cette étude, le choix s'est porté sur un modèle à base physique à l'aide des outils disponibles. Les différentes fonctions choisies sont les suivantes [9] :

- Simple canopy method qui va décrire la couche végétale en surface
- Soil moisture accounting qui va décrire l'état ainsi que la vitesse de remplissage des sols
- Clark Unit Hydrograph qui va permettre de donner la valeur du temps de concentration du BV
- Baseflow linear reservoirs qui va décrire le retour de l'eau stockée dans les sols à la rivière sur des temps des temps longs

Ce modèle est adapté à des simulations sur des temps longs (plusieurs mois) car il va permettre de retranscrire ce qui se passe dans le sol après des événements pluvieux afin de retrouver un débit nominal. Il est par exemple plus adapté que la méthode du SCS curve number qui est spécifique à un unique événement pluvieux et qui permet de caler uniquement un débit de pointe sans prendre en compte la capacité réelle d'absorption des sols. Le schéma peut être résumé de la façon suivante :

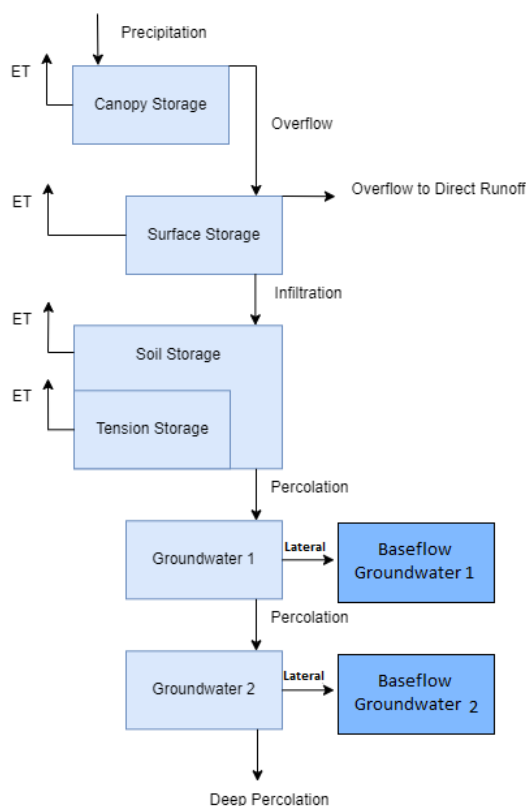


FIGURE 3.4 – Schéma de fonctionnement du modèle développé sur HEC-HMS

Le sol est décomposé en 7 réservoirs.

- **Canopy storage** : Le réservoir supérieur correspond à la couche végétale. Ce réservoir n'a qu'une incidence faible sur le ruissellement et il dépend surtout de l'occupation des sols et de la nature du bassin versant. Ce réservoir est également très sensible à l'évapotranspiration. et permet donc d'ajuster le niveau dans les couches de sols pendant les temps secs.

- **Surface storage** : L'excédent est alors transféré vers la couche de surface. Dans le modèle choisi, sa capacité est faible voir négligeable. La végétation étant importante, nous avons

considéré que le ruissellement direct était nul. L'eau s'infiltré donc dans la première couche de sol.

Cette première couche de sol va se décomposer en deux sous couches imbriquées l'une dans l'autre.

- La **Soil storage** correspond à la quantité totale d'eau que la couche va pouvoir contenir.
- La **Tension storage** correspond, elle, à la quantité d'eau à partir de laquelle la percolation de la « Soil storage » va commencer.

Le passage de la couche **Soil Storage** à la couche **Groudwater 1** est aussi régulée par un coefficient de percolation (qui peut varier d'une couche à l'autre). Cette couche est également soumise à l'évapotranspiration. Pour toutes les couches soumises à l'évapotranspiration, celle-ci est définie uniquement dans la partie meteorological models (cf partie 4) et est la même pour toutes les couches. Si la couche **Soil Storage** se retrouve saturée, alors l'excédent d'eau va directement ruisseler.

- **Groudwater 1 (GW1) et Groudwater 2 (GW2)** : Les couches **GW1** et **GW2** fonctionnent de façon similaire. Elles récupèrent l'eau par percolation qui sera ensuite ressuyée vers le cours d'eau, formant le débit de base, moyennant un temps choisi pour la restitution. Chaque couche a donc son propre temps de retour de débit vers la rivière. L'eau arrive alors dans deux nouveaux réservoirs **Baseflow GW1** et **Baseflow GW2** qui fonctionnent comme **GW1** et **GW2**. L'eau qui percole de la **GW2** est « stockée » dans les aquifères, elle est ainsi perdue pour le système.

L'intérêt de décomposer ces couches en quatre couches différentes est de pouvoir renseigner plus de paramètres pour chacun des réservoirs et pouvoir ainsi gérer au mieux le retour à un débit nominal après un épisode pluvial. Le **GW1** permettant d'ajuster le retour au débit nominal aux temps courts après un épisode de pluie (<4 jours) tandis que le **GW2** se concentre sur les débits aux temps longs (environ 20 jours).

Calage du modèle

Le calage du modèle a été réalisé en deux parties : une première en découpant le BV en 2 SBV avec la Vaux et le Plumion et une deuxième avec les SBV du Rau-Doumély, de la Draize et de la Vaux amont.



FIGURE 3.5 – Bassin de la Vaux et du Plumion

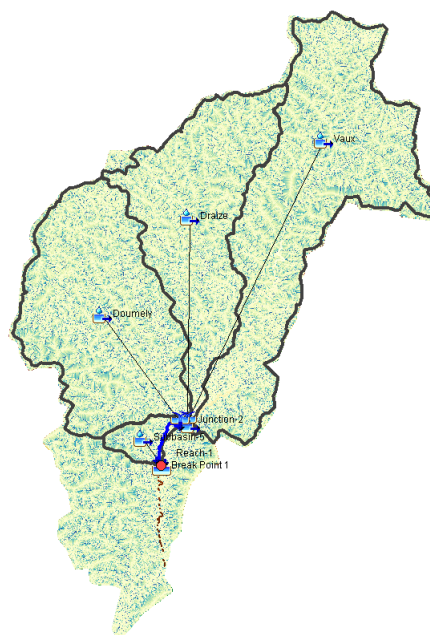


FIGURE 3.6 – Sous bassins de la Vaux en amont d'Hauteville

Le calage sur la Vaux a permis une première approximation des paramètres du Plumion grâce aux débits mesurés à Ecly et le second d'affiner ces paramètres grâce à la station de Justine sur la Draize qui a permis par mimétisme d'approximer au mieux les bassins de la Vaux amont et du Rau-Doumély. La totalité des paramètres retenus sont disponibles en annexe 6.7. Les paramètres les plus importants sont résumés dans le tableau suivant :

Paramètres		Vaux amont	Plumion	Draize/Doumely
Canopy	Max storage (mm)	19	19	19
Baseflow	GW1 coefficient (hr)	80	100	80
	GW2 coefficient (hr)	800	1000	800
Loss	Impervious (%)	40	40	40
	Soil storage (mm)	50	50	50
	Tension storage (mm)	38	40	38
	Soil percolation (mm/hr)	4	4	4
Transform	Time concentration (hr)	10	17	7,5

TABLE 3.1 – Liste des principaux paramètres pour la modélisation hydrologique sur HEC-HMS

La couche **Canopy max storage** permet de réguler la quantité d'eau en surface, et va donc avoir un impact notamment sur les débits de base en début de cycle et en fin de cycle de pluie, la couche étant saturée la plupart du temps en hiver.

Les couches **GW1 et GW2 coefficient** permettent de réajuster le retour à la rivière de l'eau stockée dans les sols plusieurs jours après un événement pluvieux.

Les couches présentes dans **Loss** sont les couches qui permettent de caractériser les pics de débits suite aux épisodes pluvieux. **Impervious** correspond donc à la quantité d'eau qui va ruisseler directement vers la rivière. Les autres couches permettent de calibrer à quel point le sol est saturé et à partir de quel moment le surplus est renvoyé vers la rivière par ruissellement.

Enfin le **Temps de concentration** correspond au temps mis par une goutte d'eau tombée à rejoindre l'exutoire.

Ainsi, tous ces paramètres permettent d'ajuster au mieux le modèle afin d'obtenir un débit à l'exutoire, en connaissance d'une pluie initiale, sur une longue période (année hydrologique).

Afin de calibrer au mieux les différents paramètres, il a été choisi de faire à partir de l'année hydrologique (septembre/août) 2020/2021 et de vérifier sur 2021/2022 et 2022/2023. Cependant pour l'année 2022/2023, les résultats seront à relativiser car l'été 2022 a été particulièrement chaud et l'hiver qui a suivi très sec, ce qui a conduit à un état des sols très différent des deux précédentes années.

Critère de Nash-Sutcliffe

La qualité d'un modèle peut être représentée par son critère de Nash-Sutcliffe. Ce critère statistique est défini par [10] :

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{iobs} - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\overline{X_{obs}} - X_{iobs})^2} \quad (1)$$

Sa valeur est donc comprise entre $-\infty$ et 1. Plus la valeur se rapproche de 1, plus le modèle est proche de la réalité. A 0, cela signifie que le modèle ne fait pas mieux que de se situer proche de la moyenne des valeurs du modèle observé. Pour qu'un test soit valide, de manière générale, on cherche à ce que le critère dépasse les 0.7.

Résultats HEC-HMS

Les résultats présentés correspondent à la comparaison entre la simulation et les débits réellement observés à la station d'Ecly en aval du BV pour la période 2020-2023. Les résultats sont représentés sur les figures ci-dessous :

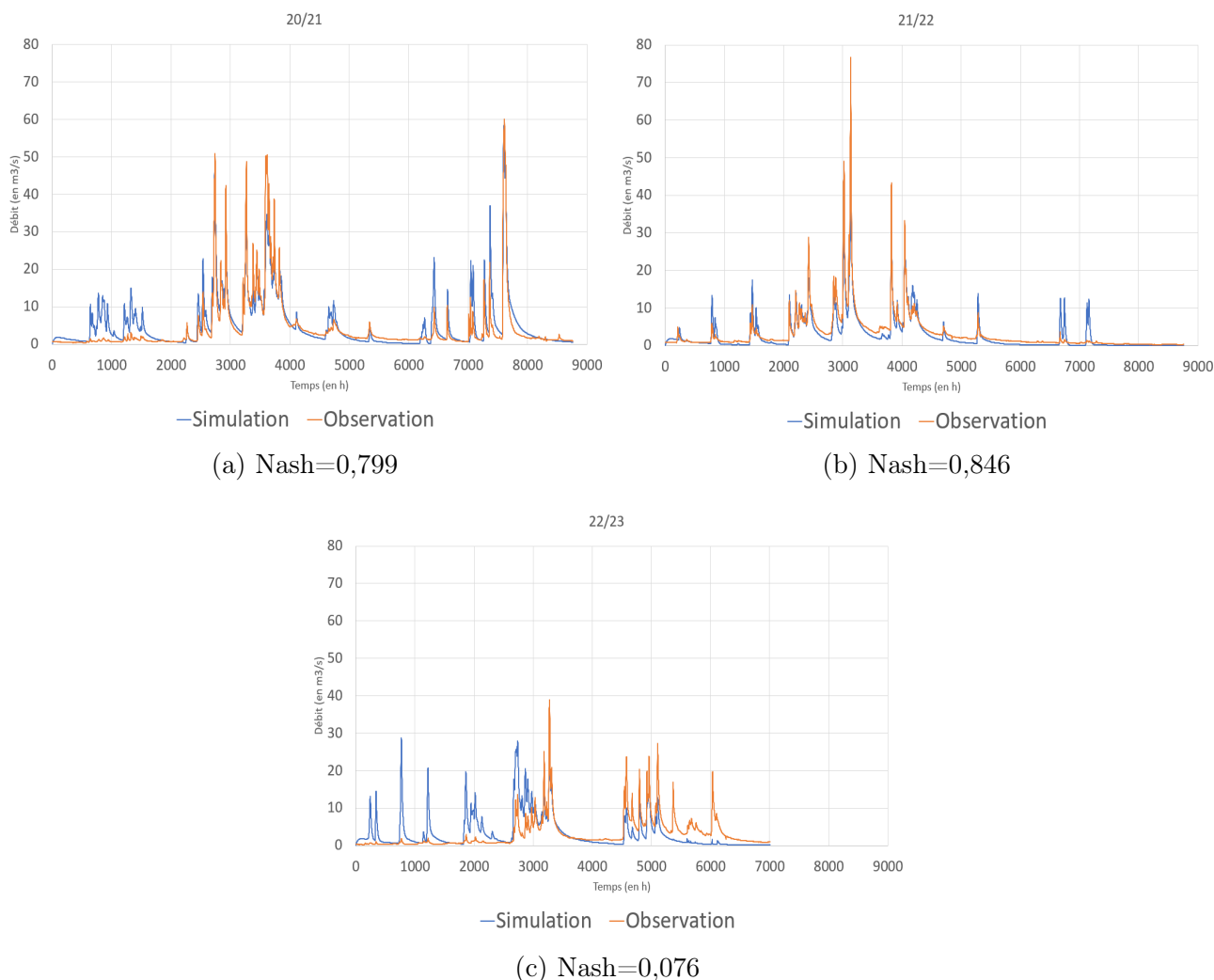


FIGURE 3.7 – Comparaison des débits observés et simulés au niveau d'Eclly sur HEC-HMS

Les résultats montrent que le calage est correct sur 2020/2021 et 2021/2022 avec des critères de Nash $> 0,7$ mais que celui-ci se révèle inadapté sur 2022/2023 comme nous avons pu le suggérer. Dès lors, cette année nécessite un calage particulier mais qui ne conviendrait pas pour les deux années précédentes, ainsi il a été choisi de ne pas conserver ce calage spécifique sans avoir plus d'années à analyser.

Un zoom sur la période hivernale, permettrait d'en savoir plus sur la qualité des pics de débit.

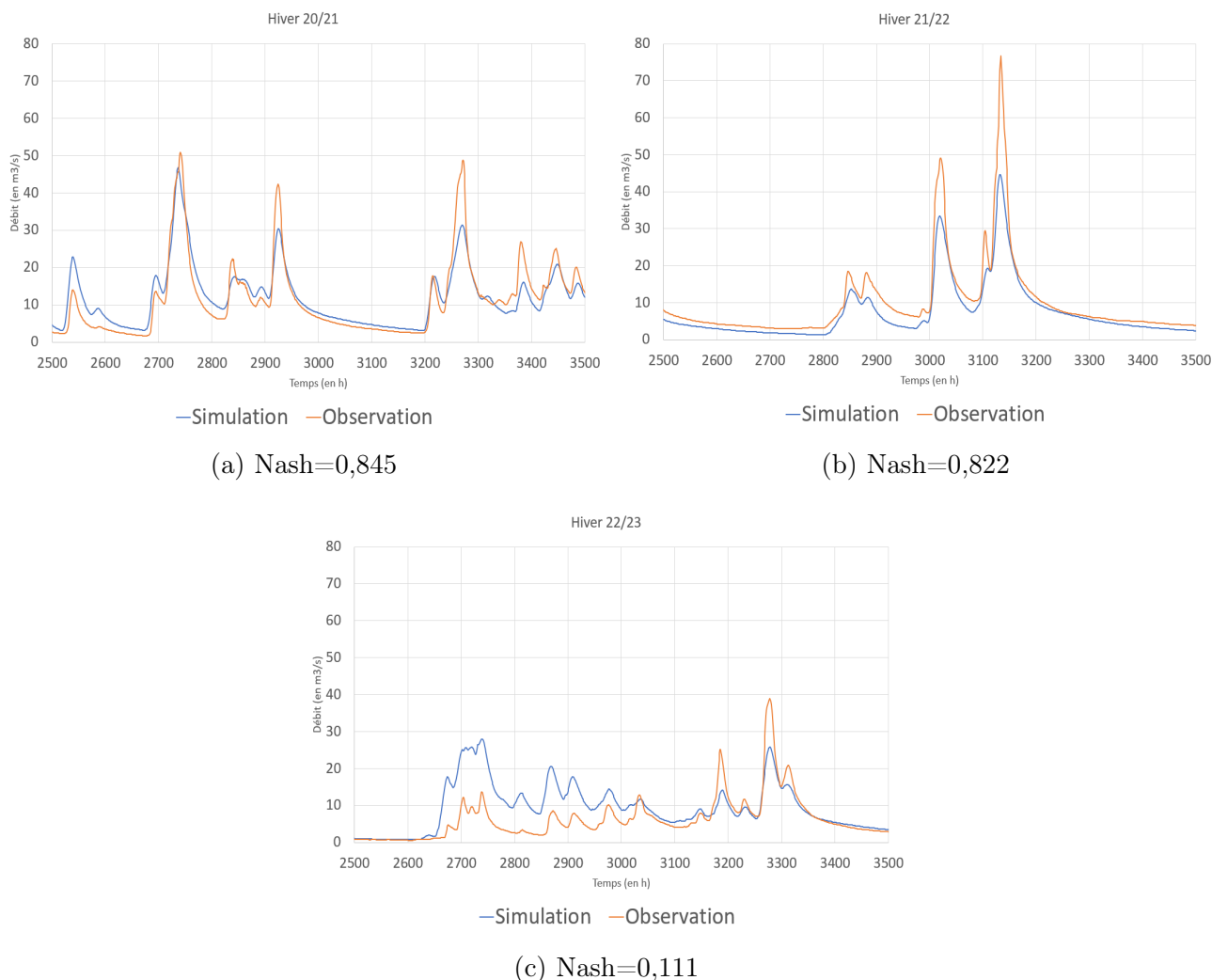


FIGURE 3.8 – Zoom sur l’hiver (mi décembre - fin janvier)

Pour les trois années testées, l’arrivée des pics de crues est cohérente entre la simulation et l’observation, de même le débit de base simulé est relativement proche de l’observation. Cela signifie que les temps de concentration et de retard sont bien estimés, et que le retour de l’eau dans la rivière après son passage dans les différentes couches de sols semble corrects. Cependant, pour les deux premières années, les pics simulés sous-estiment presque tout le temps les pics observés ce qui témoigne un ruissellement direct insuffisant ou une saturation trop lente des premières couches de surface. Le calage présenté reste le meilleur compromis qui a pu être obtenu afin de représenter les pics aux mêmes instants que l’observation, tout en conservant une représentation du débit de base cohérente. Même si pour l’alerte, les débits les plus importants à simuler sont les débits de pointe, il est nécessaire d’avoir calé un bon débit de base sur lequel on est certain de pouvoir s’appuyer pour faire de la prédiction. Si les débits de base sont faux, il ne sera pas possible de prévoir le temps d’arrivée du pic de débit ni sa hauteur. Dans ce modèle, l’important est d’avoir les pics de débit qui arrivent aux bons moments même si la quantité simulée est parfois trop faible ou trop forte. Au fur et à mesure des nouvelles données disponibles, il sera alors possible de réajuster la quantité d’eau et d’obtenir un modèle encore plus proche de la réalité.

Pour 2022/2023, la simulation sur estime les débits sur la période mi-décembre mi-janvier

avant de les sous-estimer pour la période suivante. Cela ressemble à ce qui se passe lors des mois de septembre et d'octobre sur les deux années précédentes, à savoir une période de remplissage des sols qui permet au modèle, par la suite, de s'auto-réguler. Cela vient donc à confirmer l'hypothèse que le déficit de pluie rencontré en hiver rend l'analyse de cette année hydrologique différente des deux précédentes.

Les résultats n'étant donc pas pleinement satisfaisants, le choix a été fait de se tourner sur le logiciel Hydra, qui correspond au logiciel utilisé par l'Entente pour mettre en place son modèle hydraulique et hydrologique.

3.4.2 Modèle hydrologique sur Hydra

Hydra est un logiciel d'hydraulique fluviale et urbaine développé par Hydratech, une filiale de la Setec. Ce logiciel a la particularité d'être complètement intégré dans l'environnement Qgis et dont les outils sont compatibles avec ceux d'Hydra. De plus, il permet de coupler hydrologie et hydraulique ainsi que les écoulements de surface avec les écoulements en réseaux. [11]

Afin de prendre en main les modules hydrologiques de l'outil, M. Thierry LEPELLETIER (n7 promo 1975 et concepteur de l'outil) a réalisé à l'Entente une formation sur les différentes fonctionnalités qui sont présentées par la suite.

Fonctionnement du modèle hydrologique d'Hydra

Comme le modèle précédent celui-ci se veut à base physique, c'est à dire que l'on essaye à l'aide des différents paramètres de représenter ce qui se passe réellement dans les sols. La principale différence entre ce modèle et le précédent est que celui-ci présente une quantité moins importante de couches de sols ce qui amène à une plus grande simplicité dans la compréhension du modèle [12].

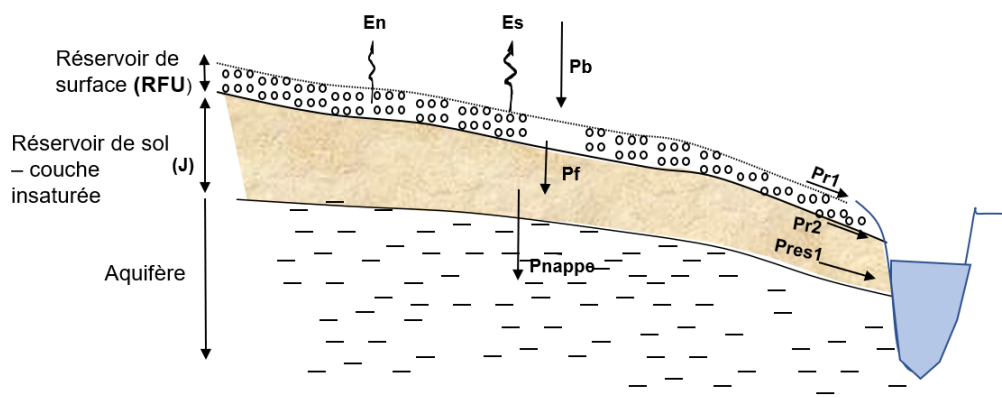


FIGURE 3.9 – Schéma de principe de fonctionnement du modèle Hydra

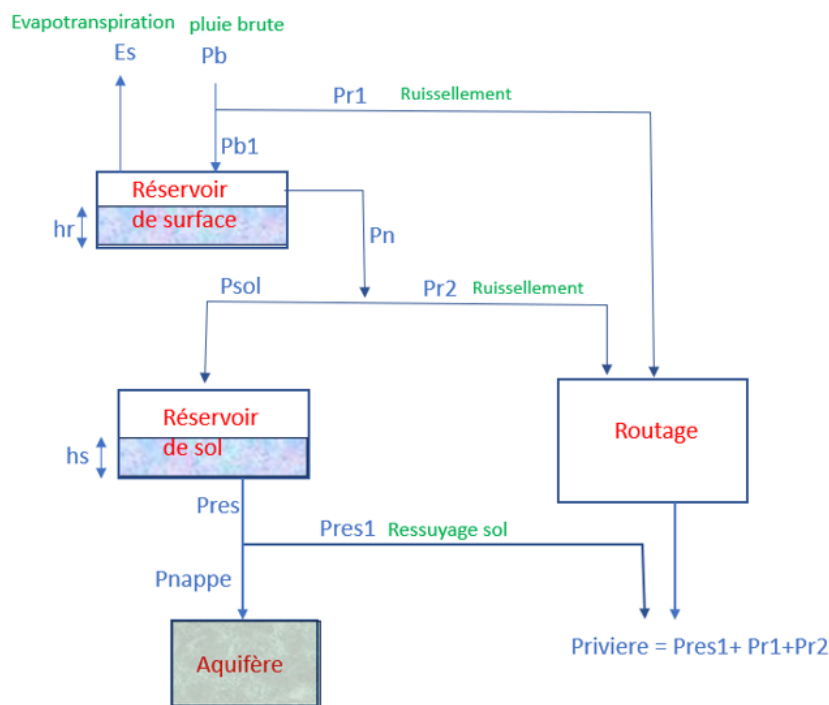


FIGURE 3.10 – Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique développé sur Hydra

Ce modèle, plus simple à caler car possédant moins de paramètres qui ont chacun un impact marqué sur le résultat, se constitue de deux réservoirs principaux :

Le premier réservoir de surface, **RFU**, constitue la couche végétale en surface. Dans cette couche soumise à l'ETP, l'eau de pluie va ruisseler ou s'infiltrer dans le sol. Cette répartition est définie par les paramètres **impervious soil coefficient**, qui illustre la proportion de sol provoquant un ruissellement direct, et les coefficients **f0 infiltration rate** et **split coeff** qui donnent la capacité du sol à absorber l'eau en fonction du type de sol, perméable ou non perméable (cf **Calage du modèle p18**)

Une fois dans la couche de sol **J**, cette eau va ruisseler en différé vers la rivière à l'aide du paramètre de **temps de concentration**, ou bien être stockée par le sol. L'eau stockée repart ensuite au cours d'eau par ressuyage, qui va lui dépendre du paramètre **QRES** drainage time, exprimé en jours. L'eau qui n'est pas ressuyée s'infiltrer dans la nappe et est perdue pour le système. La quantité d'eau s'infiltrant dans la nappe est définie par les paramètres **catchement connect coeff** et **max infiltration rate**.

FIGURE 3.11 – Panneau de commande Hydra pour la paramétrisation de l'hydrologie d'un BV

Pour le découpage des BV, le découpage en 4 SBV (Vaux amont, Draize, Rau-Doumely et Plumion) a été repris

Calage du modèle

Tout d'abord, avant d'identifier les différents paramètres, il est nécessaire de déterminer le type de sol perméable ou imperméable. A partir des chroniques de débit et pour cette modélisation, on peut définir qu'un sol est perméable lorsque la différence de débit entre le débit de base et le débit de pic de crue est faible et inversement donc pour les sols imperméables. En effet, pour un sol perméable une plus grande quantité d'eau atteindra la rivière par ressuyage tandis que pour un sol imperméable, l'eau atteindra la rivière directement par ruissellement.

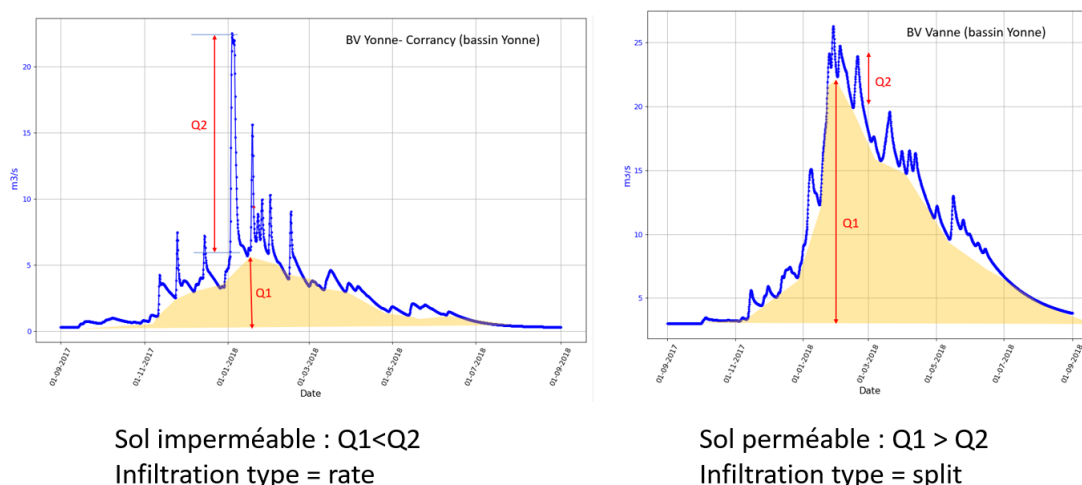


FIGURE 3.12 – Exemple de la différence entre sols perméables et imperméables dans la conception d'Hydra [12]

Comme nous avons pu le voir sur les courbes des années hydrologiques testées, on en déduit que le sol ici est de type imperméable. (cf p.14 3.4.1 Résultats HEC-HMS)

Pour le découpage en sous bassin versant, le choix a été le même que sur HEC-HMS avec la Vaux amont, la Draize, le Doumely et le Plumion.

De la même manière que précédemment, le choix a été fait de faire un calage sur 2020/2021 et de vérifier sur les deux années suivantes avec toujours une réserve sur l'année 2022/2023. Après différents tests, les principaux paramètres choisis sont les suivants (la liste de tous les paramètres est disponible en annexe 6.8) :

Paramètres		Vaux amont	Draize	Doumely	Plumion
Caractéristiques	Impervious soil coef	0,1	0,1	0,1	0,1
Runoff production	Concentration time (min)	741	567	631	1 137
Net flow production	Storage RFU (mm)	150	150	150	150
	Infiltration type	rate	rate	rate	rate
	Infiltration rate f0 (mm/day)	999	999	999	999
	Storage J (mm)	22	22	22	22
	Drainage time (day)	5	5	5	5

TABLE 3.2 – Liste des paramètres finaux pour la modélisation hydrologique sur Hydra

Le détail de l'influence de chaque paramètre sera détaillé dans la partie SYNTHESE DE L'HYDROLOGIE avec une comparaison des paramètres HEC-HMS. Ici, il est important de retenir que le temps de concentration a une forte importance sur le moment d'arrivée des pics de débit et que la couche **storage RFU** joue sur la quantité d'eau globale qui revient à la rivière, notamment lors des épisodes pluvieux.

Résultats Hydra

Toujours en comparaison avec les mesures à la station d'Ecly, les résultats sont les suivants :

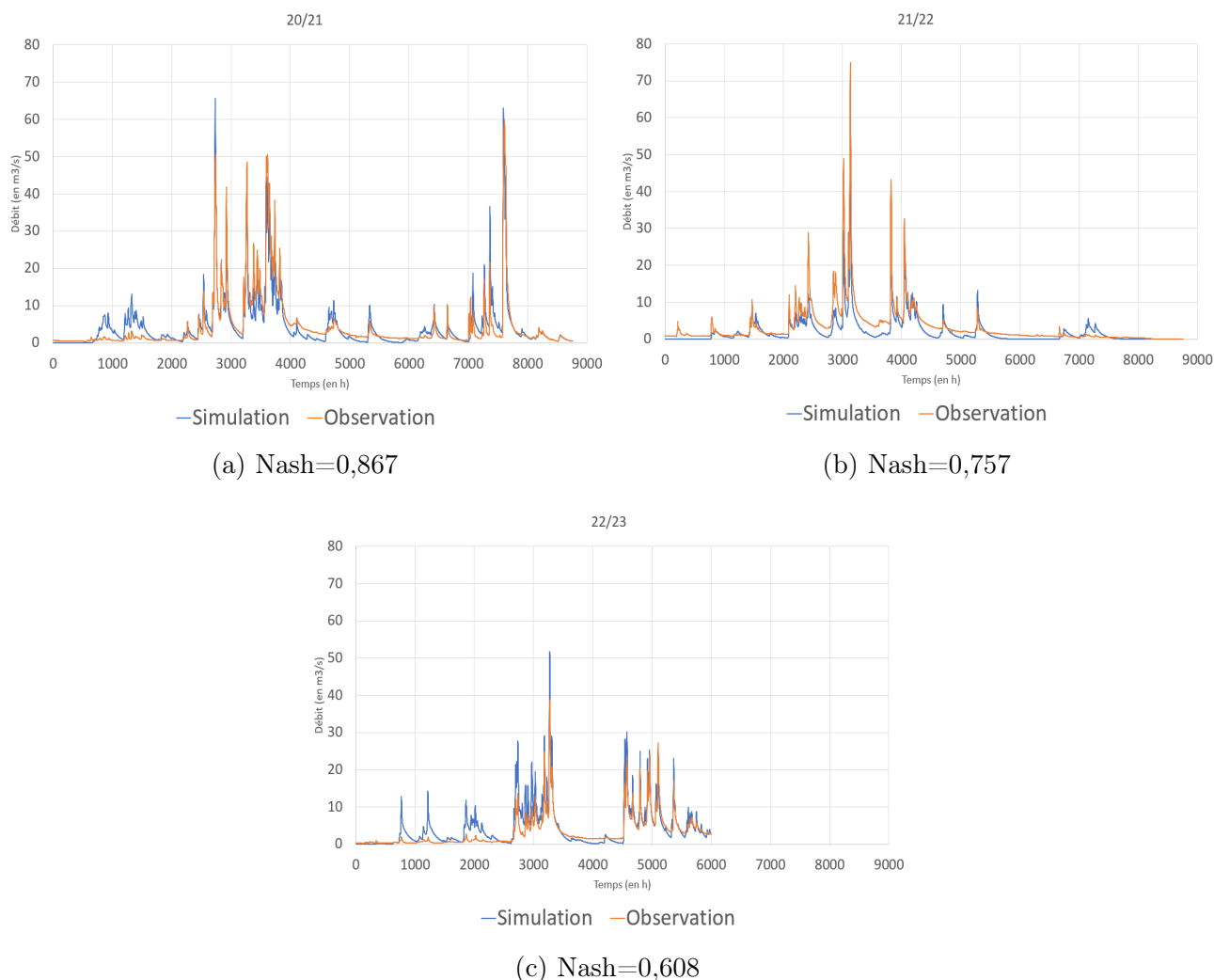


FIGURE 3.13 – Comparaison des débits observés et simulés au niveau d’Ecly avec le modèle hydrologique d’Hydra

Pour les années 2020/2021 et 2021/2022, les résultats sont bons. Cependant pour 2022/2023, les résultats sont bien meilleurs que sur HEC-HMS, même si le critère de Nash reste inférieur à 0,7. Cela signifie donc que ce modèle est moins sensible aux variations d’état des sols. Un zoom sur l’hiver donne les résultats suivants :

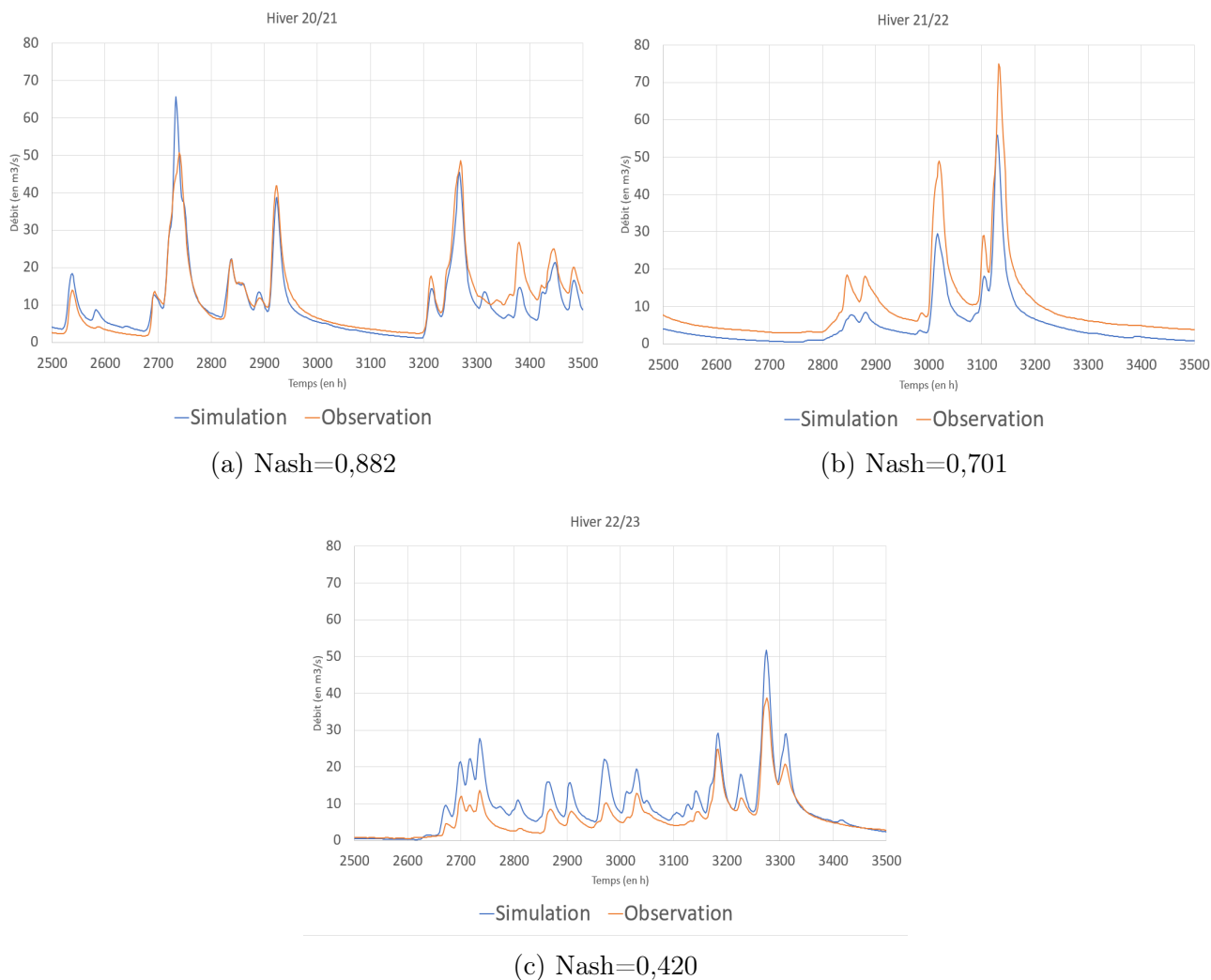


FIGURE 3.14 – Zoom sur l’hiver (mi-décembre - fin janvier) avec le modèle hydrologique d’Hydra

Les pics simulés et observés arrivent au même moment, semblant valider le temps de concentration choisi. Outre l’année 2020/2021 où les courbes se superposent, la simulation sous-estime les débits en 2021/2022 et les sur estime en 2022/2023. Dès lors, il est difficile d’avoir un meilleur modèle pour les trois années car un changement de paramétrage, conduirait de toute manière un moins bon modèle pour l’une des trois années. Ce calage intermédiaire donne néanmoins des résultats satisfaisants dans la globalité.

3.4.3 Synthèse de l’hydrologie

Comparaison des paramètres d’HEC-HMS et d’Hydra

Paramètres	HEC-HMS	Hydra
Impervious	0,4	0,1
Surface storage	69	150
Groundwater storage	150	22
Drainage time (day)	3,5	5
Concentration time (h)	10	12

TABLE 3.3 – Comparaison des paramètres semblables sur HEC-HMS et Hydra

Le paramètre **Impervious soil coef** donne la quantité d'eau qui ruisselle directement à la rivière. la différence de valeur avec la couche Impervious du modèle HEC-HMS s'explique par le fait que l'eau ruisselle également une fois dans la couche **RFU**. Le **temps de concentration** a été calculé directement par Hydra par la méthode de Ventura et permet d'ajuster l'arrivée des pics de débit. On constate une différence d'environ 2 heures de plus sur Hydra que sur HEC-HMS cependant dans les deux modèles les pics observés et simulés arrivent simultanément. La couche **storage RFU** pourrait correspondre aux couches **canopy storage et soil storage**. On remarque ici que sa capacité est légèrement supérieure. Plus ce paramètre est élevé, moins la quantité d'eau au niveau des pics est élevée. On a bien un **infiltration type** de type **rate** qui signifie la présence d'un sol imperméable. Un **infiltration rate f0** égal à 999 mm/day signifie que l'infiltration entre la **RFU** et **J** n'est pas limitante. La couche **storage J** pourrait correspondre à la couche **GW1** avec une capacité plus faible. Ce paramètre va permettre d'estimer la quantité d'eau qui pourra retourner à la rivière par ressuyage après les événements pluvieux. Enfin, le **drainage time** correspond au temps de ressuyage de l'eau contenue dans la couche **J** et se rapproche du terme **GW1 coefficient**

Comparaison des résultats

Critère de Nash	HEC-HMS	Hydra
2020/2021	0,794	0,867
2021/2022	0,846	0,757
2022/2023	0,076	0,608

TABLE 3.4 – Comparaison des critères de Nash sur HEC-HMS et Hydra

Critère de Nash	HEC-HMS	Hydra
2020/2021	0,845	0,882
2021/2022	0,822	0,701
2022/2023	0,111	0,420

TABLE 3.5 – Comparaison des critères de Nash sur HEC-HMS et Hydra

Pour les deux premières années, les résultats sont bons et sensiblement identiques. Cependant pour 2022/2023, même si le résultat n'est pas très bon sur Hydra, il reste bien meilleur que sur HEC-HMS. De plus, le modèle hydraulique de l'Entente étant développé sur Hydra, il reste plus intéressant de conserver le modèle hydrologique sous Hydra dans l'optique de faire un système de prévention, permettant de lier hydrologie et hydraulique. Le modèle sur HEC-HMS n'est cependant pas à abandonner et il pourra toujours servir de point de comparaison avec le modèle Hydra.

3.5 Modèle hydraulique

3.5.1 Étude hydraulique des zones d'enjeux

Du fait des temps de réponses très courts sur l'amont, il est apparu évident qu'un modèle sur tout le linéaire de la Vaux n'était pas nécessaire et nous nous sommes donc concentrés sur l'aval, du secteur de la Neuville les Wasigny, jusqu'à Ecly, en amont de la confluence avec l'Aisne. Cela s'explique notamment par le fait que les temps de concentration au niveau de Librecy et Signy l'Abbaye, où des enjeux sont présents, sont très faibles (inférieur à 3 h) et il n'est donc pas pertinent d'y affecter un système de prévention, la population voyant la pluie et connaissant ses propres points de repères.

Les visites de terrain ont permis de faire ressortir différentes zones d'intérêts. Cependant, pour les communes situées en amont de Wasigny, les temps de retard sont trop faibles et l'intérêt de travailler sur ces secteurs pour mettre en place un système d'alerte perd de la valeur. Ainsi sur le reste du BV, deux zones présentent des enjeux majeurs : la commune de Wasigny en amont et la commune d'Ecly en aval après la confluence avec le Plumion [2].



FIGURE 3.15 – Image d'archive - Crue de Janvier 2009 à Wasigny (Rue Anatole France)



FIGURE 3.16 – Images d'archives - Crue de Juillet 1989 à Ecly [13]

Le modèle Hydra hydraulique est un modèle 1D/2D. Après avoir importé le MNT et tracé la rivière dessus, il est nécessaire de placer des profils en travers tout au long du linéaire afin d'affiner le MNT au niveau du lit mineur et majeur si possible. Le modèle interpole ensuite ces cross section entre elles et un calcul 1D se met en place pour chaque cross section. Il est possible de rajouter au modèle des zones 2D. Dans ces zones les équations de barré Saint Venant sont recalculées dans chaque maille, ce qui alourdit le temps de calcul. Il est donc nécessaire de réduire ces zones au maximum et de ne les utiliser que dans les zones à enjeux afin de prendre en compte la complexité des écoulements dans le lit majeur qui ne sont pas toujours à une seule dimension [14]. Dans notre modèle, les zones à enjeux sont les communes de Wasigny et d'Ecly.

Le modèle hydraulique est donc un modèle linéaire avec un bras unique sur toute la longueur de la Vaux à partir de la Neuville lès Wasigny. L'apport des affluents, Draize, Doumely et Plumion sont également pris en compte. Pour cela, un hydrogramme d'entrée est placé en amont de chacune des trois confluences. La condition de limite aval est une condition de type pente de frottement.

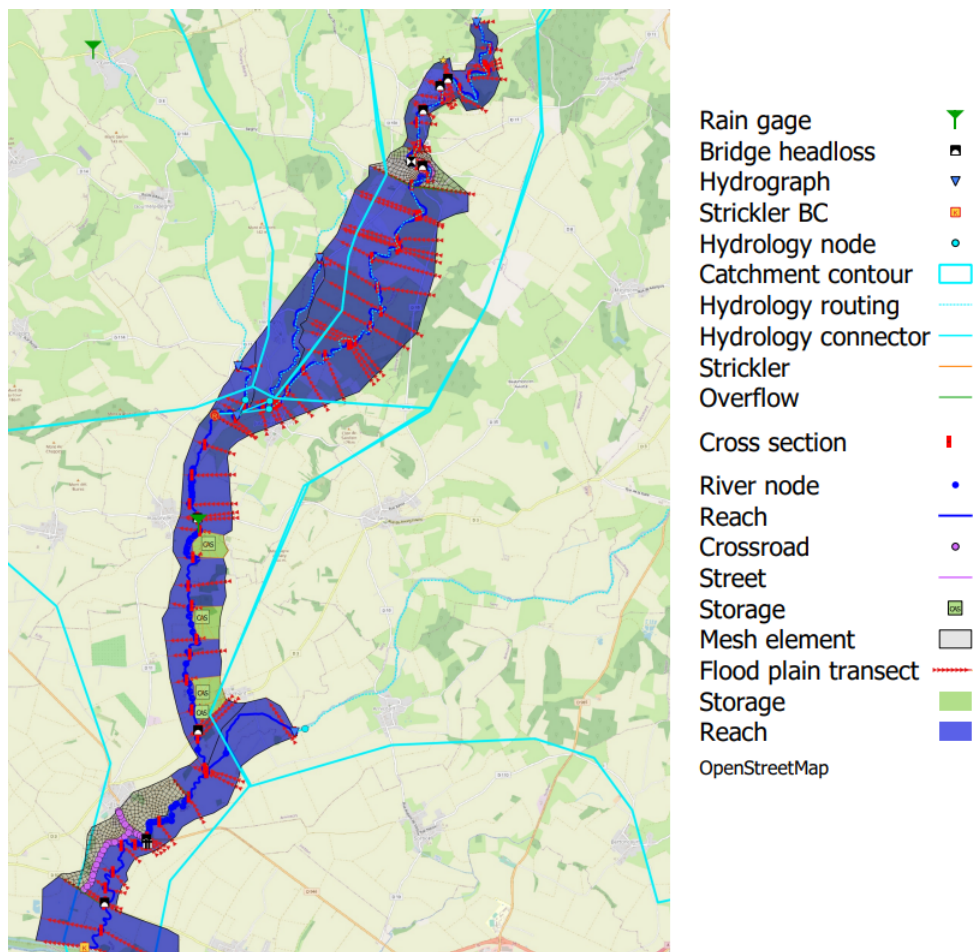


FIGURE 3.17 – Modèle hydraulique réalisé sur le secteur à enjeux à l'aide du module hydraulique d'Hydra

é

3.5.2 Mise en place et calage du modèle hydraulique

Le modèle s'appuie sur le MNT RGE alti 1m 2019 de la région des Ardennes. Ce MNT semble correct sur la partie aval (à partir de Hauteville) mais l'amont reste imprécis. Cependant un relevé topographique de transects de 2011 permet d'avoir une représentation plus fine du lit mineur. Ce levé topographique a également relevé les différents ouvrages présents sur le linéaire.

La première partie du calage s'est faite sur les stations d'Ecly et de Hauteville. Le calage a été réalisé à partir de la crue de 1993 pour Ecly (pas de données à Hauteville en 1993) ainsi que des forts débits enregistrés en janvier 2021 sur les deux stations. L'objectif était de comparer le temps d'arrivée des pics de débit avec des débits réellement observés. Pour cela, les résultats de l'hydrologie pris sur une semaine de forts de débits ont été injectés à l'aval des différents SBV afin de comparer avec les observations réelles. Pour caler le temps, le coefficient de Strickler a été paramétré sur $31 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ce qui a donné de bons résultats sur les différents tests. La hauteur des pics elle était également bonne respectivement à l'hydrologie.

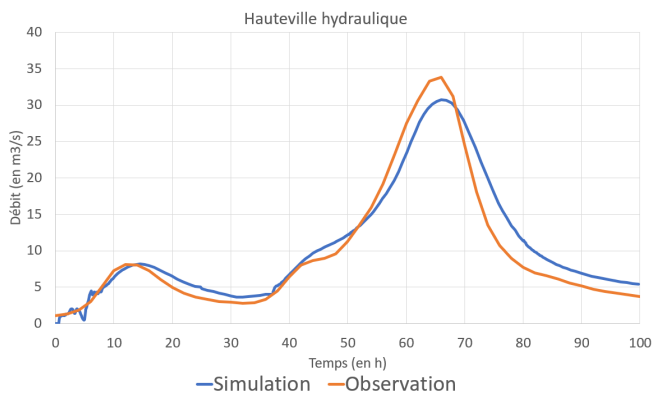


FIGURE 3.18 – Comparaison des pics de débit simulés et observés à Hauteville en janvier 2021

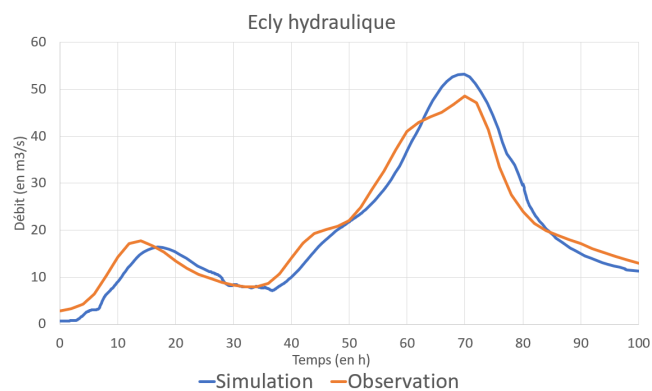


FIGURE 3.19 – Comparaison des pics de débit simulés et observés à Ecly en janvier 2021

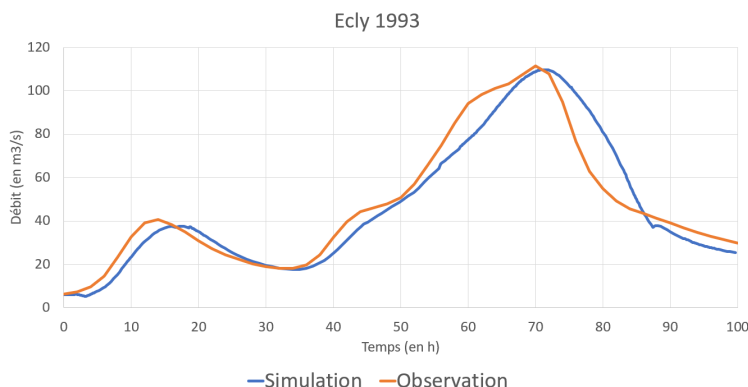


FIGURE 3.20 – Comparaison des pics de débit simulés et observés à Ecly en janvier 1993

La simulation hydraulique est cohérente avec le résultat observé avec toutefois un léger décalage de pic de simulation (environ 2h).

La seconde partie du calage consiste à observer la cartographie au niveau d'Ecly, là où le MNT est de bonne qualité, pour la crue 1993 et les forts débit de 2021.

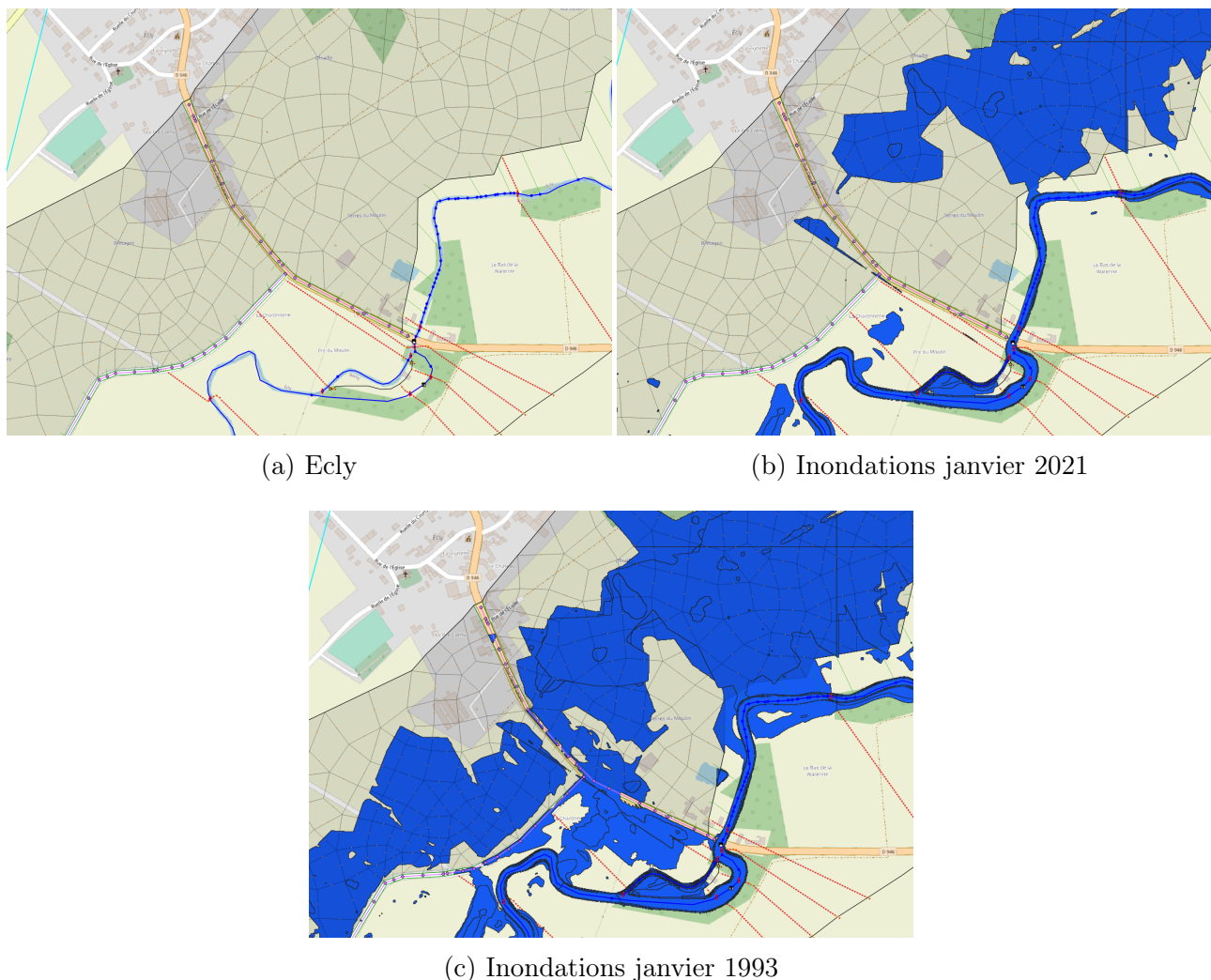


FIGURE 3.21 – Cartographie des inondations sur Ecly en janvier 2021 et janvier 1993

Pour les inondations de 2021, l'eau est sortie de son lit mais n'a touché aucune habitation conformément au discours de monsieur le maire. Pour la crue de 1993 l'eau a atteint 5 habitations et inondé une partie de la route toujours en concordance avec les propos de monsieur le maire. Le calage de la zone 2D semble donc cohérent sur Ecly.

Concernant le calage 2D sur Wasigny, la topographie en lit majeur semble très incertaine d'après les différences observées entre le MNT et la visite de terrain. De plus, les images d'archives et les riverains témoignent d'inondations sur la rue de l'église avec le pont de la RD8 en charge ce qui n'est pas du tout le cas avec les modélisations malgré un débit injecté plus fort que dans la réalité. Cependant, l'arrivée de l'eau dans la rue Anatole France semble bien correspondre aux témoignages et c'est par cette rue que la rivière sort de son lit ainsi nous allons tout de même pouvoir caler les débits de premiers débordements sur les zones à enjeux.

3.6 Résultats et analyse

3.6.1 Définition des débits de premier débordement

Une fois le calage présenté réalisé, il faut maintenant déterminer les débits à partir desquels l'eau déborde sur les zones à enjeux. Nous avons fait le choix ici de nous concentrer uniquement

D'après ces différentes cartes, on constate que la rue Anatole France commence à être inondé à partir de débits valant $18 \text{ m}^3/\text{s}$ et se retrouve complètement inondée pour des débits de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ représentant les crues de janvier 1993 et janvier 2009. (voir images d'archives 3.15). Toutefois la rue de l'église n'est pas inondée alors qu'elle l'était d'après les témoignages.

3.6.2 Estimation d'une pluie de débordement

Au cours de cette étude nous avons mis en place un modèle hydrologique cohérent sur Hydra et nous avons calé un modèle hydraulique à partir des données disponibles sur la Vaux. L'objectif de cette dernière partie est de déterminer une pluie conduisant à un débordement au niveau de la commune de Wasigny. Comme vu précédemment, les débordements ont lieu pour des débits compris entre 18 et $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Nous cherchons à déterminer les pluies conduisant à de tels débits. Pour vérifier si les pluies trouvées sont cohérentes à ce qui a été observé sur le territoire, nous nous baserons sur le mois de janvier 2022 qui correspond à un mois d'hiver où peu de pluies sont tombées. Cela nous permettra d'injecter la pluie simulée sur cette période dans notre modèle hydrologique et de pouvoir observer la réponse du cours d'eau au niveau de Wasigny dans un contexte réel. Plusieurs types de pluie ont été simulés. La pluie double triangle dans un premier temps est une pluie projet de référence qui permet d'estimer les intensités maximales de pluie. Dans un second temps, nous simulerons des pluies avec la méthode de la moyenne arithmétique qui permet de se rapprocher de la forme des pluies observées sur un territoire.

Pluie double triangle

Une première construction possible d'une pluie est la méthode de la pluie double triangle. Les observations des pluies sur les trois dernières années montrent que la durée des pluies en hiver est variable dans la région mais se situe généralement entre 12h et 30h. Ainsi, nous avons décidé de simuler une pluie double triangle sur une période de 24h avec une période intense de 6h. Après différents essais, la pluie apportant les premiers débordement est la suivante :

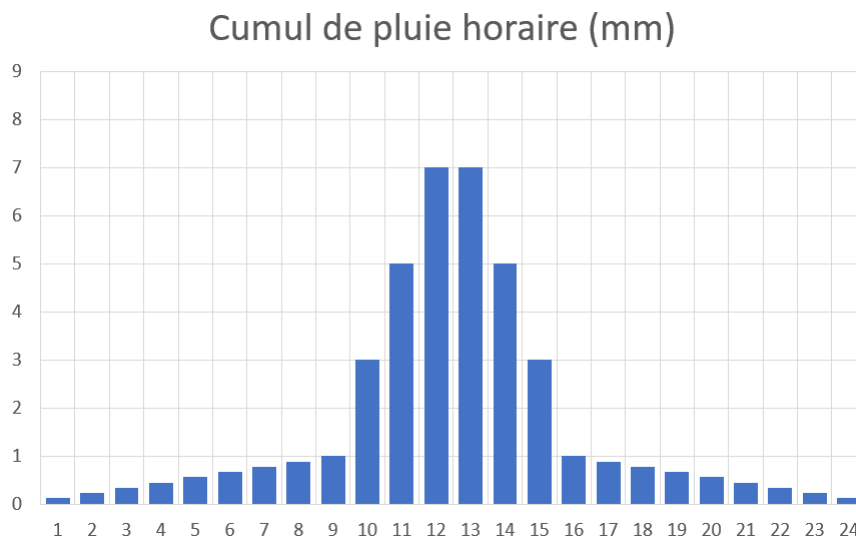


FIGURE 3.25 – Pluie double triangle apportant un débit de pointe de $18 \text{ m}^3/\text{s}$ à Wasigny

Le cumul de pluie observé sur 24h est de **41 mm** et le cumul sur les 6h intenses est de **30 mm** avec une intensité max de **7 mm/h**

Pluie moyenne arithmétique

Cette deuxième méthode permet de simuler des événements pluvieux qui se rapprochent des événements pluvieux déjà observé en faisant la moyenne des différentes pluies ayant eu des durées similaires [15]. Une fois la forme de la pluie déterminée, le cumul choisi multiplie chaque intensité pour obtenir la pluie totale. Ainsi, de la même manière, nous avons simulé une pluie de 24h.

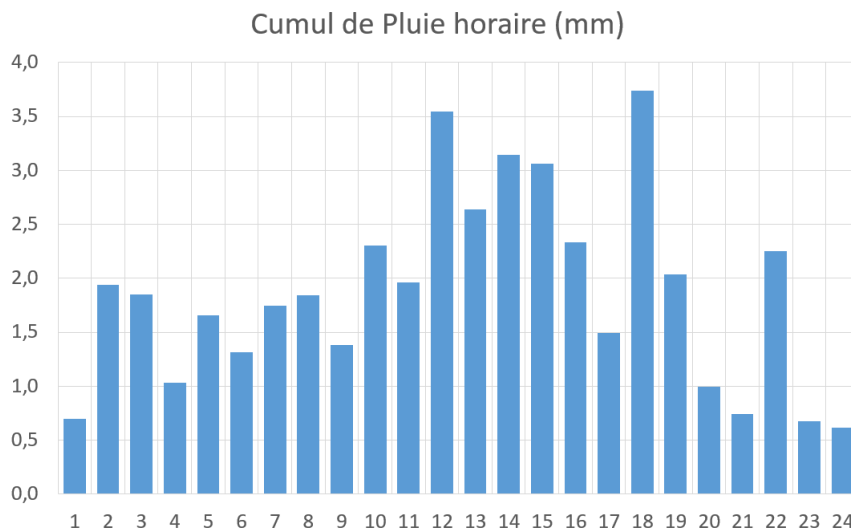


FIGURE 3.26 – Pluie moyenne arithmétique apportant un débit de pointe de $18 \text{ m}^3/\text{s}$ à Wasigny

Le cumul choisi pour atteindre les $18 \text{ m}^3/\text{s}$ de débits de pointe souhaités sur 24h est de **45 mm** avec une intensité max de **3,7 mm/h**. Le cumul de pluie est plus élevé que pour la double triangle mais conduit à un même débit de pointe. Cela s'explique par la régularité de la pluie à une intensité moyenne sans baisse significative.

3.6.3 Synthèse

On constate donc que la qualité de la pluie a une importance majeure sur le débit de pointe, au contraire de la lame d'eau cumulée qui peut conduire à des débits de pointe différents sur une même durée. Ainsi pour compléter l'étude il serait intéressant de trouver la lame d'eau nécessaire pour atteindre le débit de premier débordement sur 1h et sur 24h avec une intensité régulière. Un focus pourrait également être fait sur une pluie d'intensité moyenne ayant la durée du temps de concentration du BV au niveau de Wasigny.

De plus les pluies simulées dans cette partie l'ont été pendant une période hivernale "sèche", et il faudrait étudier ces phénomènes dans le cas d'un hiver humide (proche d'évènements pluvieux) et dans le cas des étés.

4 Conclusion

En conclusion, lors de cette étude pour la mise en place d'un système d'alerte inondation nous avons exploré en détail les aspects hydrologiques et hydrauliques du secteur d'intérêt, avec un focus particulier sur les communes de Wasigny et d'Ecly.

La première phase de terrain a permis une reconnaissance des enjeux et une meilleure appréciation du secteur d'étude.

La seconde phase a consisté en la mise en place de deux modèles hydrologiques, d'abord sur HEC-HMS puis sur Hydra. C'est à partir de ces modèles hydrologiques que le système d'alerte pourra être mis en place suite à l'injection de la pluie observée dans le modèle. Ces modèles pourront également servir de référence pour des études ultérieures sur d'autres bassins.

Le processus de calage du modèle hydraulique s'est appuyé sur les données topographiques et les relevés de débits observés. Des comparaisons rigoureuses ont été réalisées entre les simulations et les observations réelles, permettant ainsi de valider la cohérence du modèle. Ce calage a permis de déterminer les débits de premiers débordements, essentiels pour évaluer les risques d'inondation.

L'estimation des pluies de débordement a constitué la dernière phase de l'étude. En utilisant différentes méthodes de simulation, telles que la pluie double triangle et la moyenne arithmétique, les précipitations nécessaires ont pu être déterminées pour atteindre les débits de premiers débordements. Ces résultats ont souligné l'importance de la qualité de la pluie et de sa répartition temporelle sur les débits d'inondation.

En synthèse, cette étude a permis de jeter les bases pour la mise en place d'un système d'alerte inondation efficace dans la région. L'objectif, à terme, est de pouvoir réutiliser cette méthodologie sur d'autres bassins versants. Cependant, il convient de noter que des aspects tels que les différentes conditions météorologiques saisonnières et la nécessité d'autres scénarios de simulation nécessitent une analyse plus approfondie. Ces futurs développements pourraient potentiellement aboutir à la conception d'un système d'alerte plus complet, permettant de prévenir les risques d'inondation et de protéger les populations du bassin versant. Bien entendu, avant qu'un tel système soit mis en place, il faudra une discussion avec les élus des communes concernées.

Cette expérience au sein de l'Entente Oise-Aisne a été particulièrement enrichissante et a débouché sur une offre d'emploi que j'ai accepté. Je vais donc avoir le plaisir de continuer cette étude, dont l'objectif est d'aboutir à la mise en place définitive d'un système d'alerte inondations aux populations sur la Vaux et sur d'autres bassins.

5 Bibliographie

[1] Site de l'Entente Oise-Aisne
<https://www.oise-aisne.net/>

[2] "Etude diagnostic pour l'aménagement des bassins versants des affluents de l'Aisne rive droite sur le territoire de la Communauté de Communes des Crêtes Préardennaises", Hydratech, 2011

[3] Cours N7 hydrologie HABAMU, Hélène ROUX

[4] WikiHydro Temps de Concentration
[http://wikihydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Temps_de_concentration_\(HU\)](http://wikihydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Temps_de_concentration_(HU))

[5] Météofrance chroniques températures
<https://donneespubliques.meteofrance.fr/>

[6] "Calcul automatique des bilans d'eau mensuels et annuels par les méthodes de Thornthwaite et de Turc", Bonnet, Delarozière-Bouillin Jusserand, Roux, 1970
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/70-SGN-107-HYD.pdf>

[7] Cours N7 hydraulique, Formule de Manning Stickler, Olivier Thual

[8] Hydroportail, EauFrance
<https://hydro.eaufrance.fr/>

[9] HEC-HMS User's manual, US Army
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/latest>

[10] Critères indicateurs d'auto-évaluation des modèles, Critère de Nash-Sutcliffe, Graie, 2016
<http://www.graie.org/graie/graiedoc/reseaux/autosurv/GRAIE-Criteres-INDICATEURS-AUTOEVALUATION-AUTOSURVEILLANCE-WEB18-v1.pdf>

[11] Plaquette présentation Hydra rivières réseaux et assainissements, Hydratech
<https://hydra-software.net/wp-content/uploads/2022/08/PLAQUETTE-HYDRA.pdf>

[12] Loi Hydra, Hydrologie application temps réel, Thierry Lepelletier, 2023

[13] Photo d'archive, Maire d'Ecly, 1989

[14] Hydra User'manual
<https://wiki.hydra-software.net/fr/home>

[15] Pluies de retour, Pluie moyenne arithmétique, Quentin Girardon

6 Annexes

6.1 Exemple d'une enquête de terrain

Compte rendu terrain 31/05/2023 sur le BV de la Vaux

Liste des communes visitées : Wasigny, Justine-Herbigny, Hauteville

Participants EOA : Quentin Girardon, Alexandre Navarro

Objectifs de la visite :

- Identifier les enjeux en zone inondable

- Réaliser des relevés GPS de ces enjeux

- En connaître plus sur l'hydrologie du cours d'eau (obstacle à l'écoulement, anciennes vannes, moulins, entreprise, ...)

- Identifier les dernières crues majeures et leurs impacts à l'aide des riverains

Résumé par commune :

Wasigny :

La commune de Wasigny est particulièrement touchée par les événements de crues et nous avons pu recenser une cinquantaine d'habitations pouvant être exposés au risque d'inondation. Les principales rues touchées sont la rue basse, la rue de l'église et la rue Anatole France. Les rues Jean Jaurès et du gué bon Jacques sont également en partie touchée. La majeure partie des inondations sont dues au passage de la Vaux par la route dans la rue Anatole France (janvier et décembre 1993, 2002, 2009). L'eau sort de son lit à deux endroits : une première fois au niveau de l'ancien moulin en aval d'anciennes vannes maintenant non fonctionnelles et une seconde fois au niveau du pont de la rue Basse. L'eau remonte alors toute la rue Anatole France jusqu'au numéro 1 côté impaire et jusqu'au numéro 6 côté pair. D'après deux riverains habitant dans cette rue, lors des crues de 1993 et 2009 l'eau est montée d'environ 50 cm dans les maisons sachant que les deux maisons se trouvent à un bout et l'autre de la rue (numéro 3 et numéro 27), les pompiers ayant dû intervenir en barque. De plus ces crues sont également extrêmement rapides et connaissent une montée aussi rapide que leur descente. Cependant l'eau ne déborde jamais dans les jardins en sortant du lit mais uniquement par la route.

La topographie de la commune va également entraîner les inondations de rue Basse et rue de l'église. En effet, lorsque l'eau sort de son lit au niveau du pont rue Basse, alors celle-ci va ruisseler sur toute la rue basse, le début de la rue Jean Jaurès et toute la rue de l'église qui forme une cuvette autour de l'église.

Concernant l'ancien ouvrage hydraulique, nous avons relevés ses cotes au GPS afin de pouvoir l'intégrer dans un prochain modèle hydraulique. Nous avons également récupéré au GPS les palier des enjeux identifiés.



Justine-Herbigny :

Dans cette commune seuls trois maisons semblaient être vulnérables aux montées de la Vaux. Nous avons pu rencontrer un riverain qui possède deux de ces maisons qui nous a dit que les crues étaient de plus en plus hautes depuis 5/6 ans et atteignaient son jardin sans pour autant entrer dans ses maisons les portes étant réhaussées. D'après lui l'entretien des champs juste en amont de sa maison en sont la principale cause car les propriétaires les ont laissés à l'abandon et cela entraîne de nombreux obstacles à l'écoulement. De plus, sa maison en question étant un ancien moulin, un ouvrage hydraulique est toujours présent et est responsable des nombreux embâcles qui s'y accumulent et font monter le niveau de l'eau. De plus de la terre se serait accumulée en rive droite ce qui rétrécirait le cours d'eau provoquant une plus forte montée. Un ancien bras qui contournait les vannages depuis le pont est aujourd'hui complètement remblayé de sédiments.



Hauteville :

Sur la commune d'Hauteville, il n'y a pas d'enjeu touché mais nous avons récupéré les coordonnées GPS de la sonde, du pont, de l'échelle limnimétrique ainsi que de la hauteur d'eau afin de pouvoir déterminer le débit à cet endroit-là.

6.2 Enjeux détaillés par commune

Signy l'abbaye et Librecy

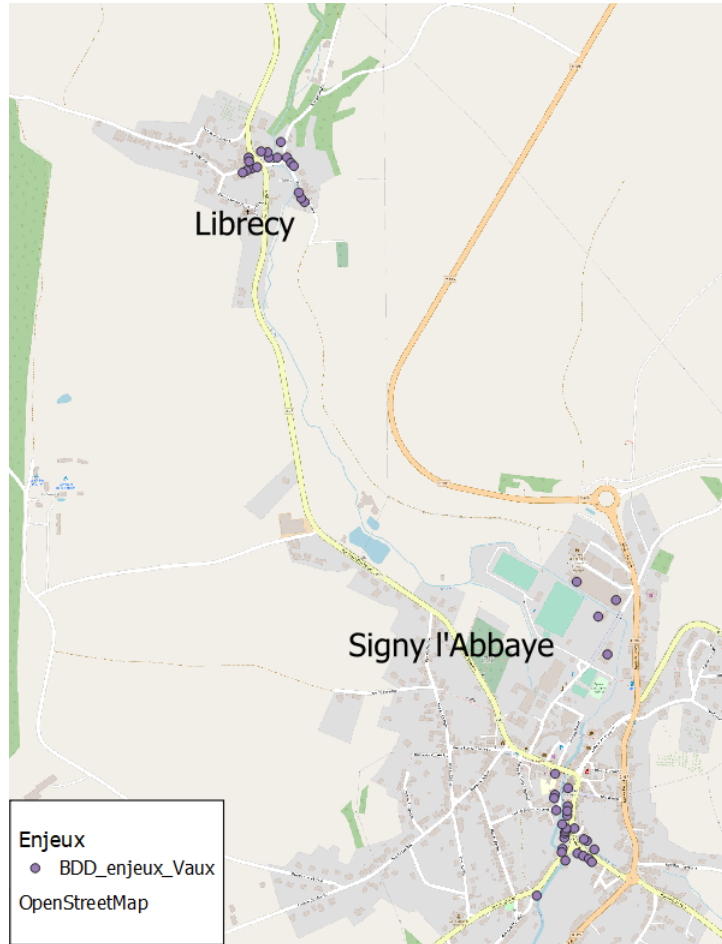


FIGURE 6.1 – Carte des enjeux relevés à Librecy et Signy l'abbaye sur la base de données

Lalobbe



FIGURE 6.2 – Carte des enjeux relevés à Lalobbe sur la base de données

La Neuville lès Wasigny et Wasigny



FIGURE 6.3 – Carte des enjeux relevés à Wassigny et la Neuville lès Wassigny sur la base de données

Pour chaque point, les caractéristiques suivantes sont détaillées dans la table attributaire de la base de données :

- Date de visite
- Commune
- Adresse
- Coordonnées
- Z_0 qui correspond à la hauteur du palier de la porte par rapport au trottoir
- Présence ou non d'un sous-sol
- Présence ou non d'un étage
- Type d'enjeu (habitation, entreprise, ERP, ...)
- Eventuelles remarques

6.3 Formules du temps de concentration théorique

Il existe une multitude de formules permettant d'évaluer le temps de concentration d'un bassin versant. Elles possèdent leur gamme de validité et ont été réalisées pour des cas particuliers propres à leur étude. Pour le déterminer, le choix a été fait de prendre la moyenne de toutes les valeurs trouvées en retirant les valeurs sortant de l'intervalle de l'écart-type. Les

formules utilisées issues d'un document interne à l'Entente sont les suivantes :

Formule de Kirpich (1940)	Formule de Passini	Formule de Ventura	Formule de Giandotti	Formule de Chow
Origine : Données issues du Tennesse, créé sur 6 petits bassins de drainage (entre 0.0051 et 0.433 km ²) Validité : Paramètres Tc (h) : temps de concentration L (m) : 37000 longueur du plus grand thalweg S (m/m) : 0,002 pente moyenne du thalweg Formule : $t_c = 0.000325 L^{0.77} S^{-0.385}$ Tc : 11,71 h Tc : 702,5 min	Origine : Validité : Pour des bassins versants > 40 km ² Paramètre Tc (h) : temps de concentration L (km) : 37 longueur du plus grand thalweg A (km ²) : 180 Superficie du BV S (m/m) : 0,002 pente moyenne du thalweg Formule : $t_c = 0.108(AL)^{1/3} S^{-0.5}$ Tc : 45,44 h Tc : 2726,2 min	Origine : Valide pour des BV avec des pentes faibles à modérée et une superficie > 10 km ² , ne tient pas compte de la longueur du Thalweg Validité : Paramètre Tc (h) : temps de concentration A (km ²) : 180 Superficie du BV S (m/m) : 0,002 pente moyenne du thalweg Formule : $t_c = 0.1272A^{0.5} S^{-0.5}$ Tc : 38,16 h Tc : 2289,6 min	Origine : Origine d'Italie Validité : Paramètre Tc (h) : temps de concentration L (km) : 37 longueur du plus grand thalweg A (km ²) : 180 Superficie du BV p0 (m) : 0 pente moyenne du thalweg zm (m) : 78 Formule : $t_c = \frac{4A^{0.5} + 1.5L}{0.8(z_m - Z_o)^{0.5}}$ Tc : 15,45 h Tc : 927,0 min	Validité : BV entre 0,1 et 20km ² Paramètre Tc (h) : Temps de concentration l(m/m) : 0,002 Pente moyenne du BV L(km) : 37 Longueur du thalweg Formule : $tc(h) = 0.0019 \times L^{0.64} / l^{0.32}$ Tc(h) : 11,64 Tc(min) : 698,59
D'après le Handbook f hydrology de David Maidment 1993	D'après Denis Dartus			
Formule de Bransby Williams	Formule de Viparelli/Dartus - issu directement de Denis Dartus	Formule SCS	Formule Federal aviation agency	
Origine : Utilisée dans différents pays Cr > 0,4 Validité : Paramètres Tc (h) : temps de concentration A (km ²) : 180 Superficie du BV S (m/m) : 0,002 pente moyenne du thalweg L (km) : 37 longueur du plus grand thalweg Choix coef : 3,97 entre 3.97 et 14.6 a été pour avoir des vitesses cohérentes et correspondant à ce qui a été observé Formule : $t_c = 21.3 L A^{-0.1} S^{-0.2}$ Tc : 4,35 h Tc : 260,9 min	Origine : Date indéterminée issue des expérimentations mais qui utilise l'hypothèse d'une vitesse de l'eau entre 1 et 1.5 Validité : Paramètre Tc (h) : temps de concentration L (m) : 37000 longueur du plus grand thalweg A (m ²) : 1,8E+08 Superficie du BV V (m/s) : 1 pente moyenne du thalweg Formules : $t_c = \frac{L}{V}$; $t_c = \frac{A}{LV}$ Tc : 10,28 h ; 1,35 h Tc : 616,7 min ; 81,1 min	Validité : BV semi ruraux < 2km ² Paramètres Tc (h) : Temps de concentration CN : 78 Curve Number l(m/m) : 0,002 Pente moyenne du BV L(km) : 37 Longueur du thalweg Formule : $tc(h) = 0.0136/60 \times L^{0.8} \times [(1000/CN)-9]^{0.7} / l^{0.5}$ Tc(h) : 63,86 Tc(min) : 3831,43	Validité : Cr < 0,4 Paramètres Tc (h) : Temps de concentration Cr : 0,3 Coeff de ruissellement l(%) : 0,2 Pente moyenne du BV L(m) : 37000 Longueur du thalweg Formule : $tc(h) = 0.054 \times (1,1-C) \times (L)^{0.5} \times l^{0.332}$ Tc(h) : 14,13 Tc(min) : 848,00	
Formule de Turazza	Formule du Cemagref	Formule Sogreah	Formule de Mockus	
Origine : BV ruraux et semi ruraux Validité : Paramètres Tc (h) : temps de concentration A (km ²) : 180 Superficie du BV L(km) : 37 Longueur du thalweg l(m/m) : 0,002 Pente du BV Formule : $Tc = \frac{0.1 \times (SL)^{1/3}}{\sqrt{l}}$ Tc : 42,07 h Tc : 2524,2 min	Origine : Validité : Paramètre Tc (h) : temps de concentration A (km ²) : 180 Superficie du BV Formule : $tc = \text{Exp} (0.375 \times \text{Ln}(A) + 3.729)$ Tc : 4,86 h Tc : 294,9 min	Validité : BV semi ruraux Paramètres Tc (h) : Temps de concentration A(km ²) : 180 Superficie du BV l(m/m) : 0,002 Pente moyenne du BV Cr : 0,3 Coeff de ruissellement Formule : $tc(h) = 0.0143 \times (l \times C)^{0.5} \times (A)^{0.35}$ Tc(h) : 18,0138188 Tc(min) : 1080,82913	Validité : BV entre 4 et 1000 ha pente longitudinale <1% Paramètres Tc (h) : Temps de concentration L(m) : 37000 Longueur du thalweg S(m/m) : 0,002 Pente moyenne du BV CN : 78 Curve number Formule : $T_c = \frac{L^{0.8} \times [1000 - 9]^{1.67}}{2083 \times (100 \times S)^{0.5}}$ Tc(h) : 56,0854 Tc(min) : 3365,13	
Formule de Johnstone	Formule de Johnstone et cross	Formule Simas Hawkins	Formule de Bourrier	
Origine : Validité : Paramètres Tc (h) : temps de concentration L(m) : 37000 Longueur du thalweg l(m/m) : 0,002 Pente du BV Formule : $tc(h) = 0.0146 \times (L)^{0.5} / (l)^{0.25}$ Tc : 13,28 h Tc : 796,8 min	Origine : Validité : Paramètre Tc (h) : temps de concentration L(m) : 37000 Longueur du thalweg l(m/m) : 0,002 Pente du BV Formule : $tc(h) = 0.00172 \times (L)^{0.5} / (l)^{0.5}$ Tc : 12,83 h Tc : 769,8 min	Validité : Paramètres Tc (h) : Temps de concentration CN : 75 Curve Number l(m/m) : 0,002 Pente moyenne du BV L(m) : 37000 Longueur du thalweg A(ha) : 18000 Superficie du BV Formule : $tc(h) = 1.4822 \times (AL)^{0.5937} \times l^{0.1565} \times [(25400/CN)-254]^{0.3131}$ Tc(h) : 9,88 Tc(min) : 592,97	Origine : Validité : Paramètres Tc (h) : temps de concentration A(ha) : 18000 Superficie BV L(m) : 37000 Longueur du thalweg l(m/m) : 0,002 Pente du BV Formule : $tc(h) = 4/3600 \times [(10000 \cdot AL)^{1.0} \times (l)^{0.5}]^{0.48}$ Tc : 18,35 h Tc : 1101,3 min	

FIGURE 6.4 – Formules théoriques du temps de concentration utilisées dans le cadre de ce stage

Pour cet exemple, le BV a une surface de 180 km², le cours d'eau mesure 37 km, la pente moyenne est de 0,002, le curve number vaut 81 et le coefficient de ruissellement 0,3.

6.4 Formule de l'évapotranspiration

Méthode de calcul de l'évapotranspiration avec l'exemple de la Vaux en 2021 :

Calcul ETP (Thornthwaite)	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juill	août	sept	oct	nov	dec	Formules
Tm	2,7	3,1	6,2	9,1	12,8	16	18	17,6	14,1	10,4	6,1	3,3	
Indice chaleur mensuel (Im)	0,39	0,48	1,38	2,48	4,15	5,82	6,95	6,72	4,80	3,03	1,35	0,53	$\frac{T_m^{1.514}}{5}$
Indice de chaleur (I)	38,10	38,10	38,10	38,10	38,10	38,10	38,10	38,10	38,10	38,10	38,10	38,10	$\sum_{m=1}^{12} Im$
Alpha	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	$\alpha = (6.75 \times 10^{-7})I^2 - (7.71 \times 10^{-5})I^2 + (1.792 \times 10^{-2})I + 0.49239$
Longueur du jour (L en heures)	9	10	12	14	15	16	16	14	13	11	9	8	L
ETP (mm/mois)	8,21	10,62	27,34	48,66	75,90	103,49	117,82	100,57	73,17	44,29	20,14	9,11	$16 \left(\frac{L}{12}\right) \left(\frac{10T_m}{I}\right)^\alpha$
ETP(mm/j)	0,26	0,38	0,88	1,62	2,45	3,45	3,80	3,24	2,44	1,43	0,67	0,29	$\frac{ETP}{N}$

N : Nb de jours dans le mois

FIGURE 6.5 – Formule théorique de l’ETP de Thornthwaite

6.5 Estimation du débit à Hauteville

La sonde radar d’Hauteville ne donnant que les hauteurs d’eau, le débit a été déterminé à l’aide de la formule de Manning utilisant la section passante sous l’ouvrage :

$$Q = \frac{1}{n} A R_H^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

avec n le coefficient de Manning (en $m^{(-1/3)}.s$), A l’aire de passage de l’eau (en m^2), R_H le rayon hydraulique (en m) et S_0 la pente de frottement (en m/m)

Les caractéristiques géométriques de l’ouvrage sont disponibles ci-dessous :

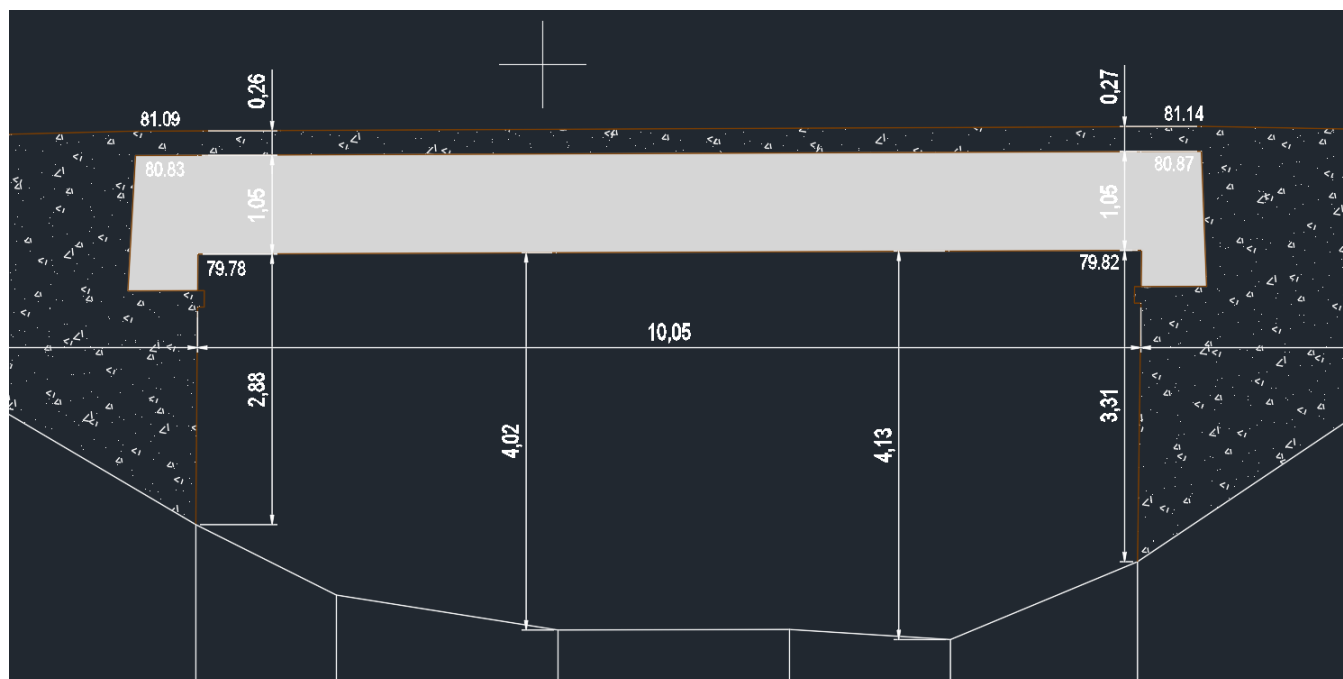


FIGURE 6.6 – Dimension du pont sur lequel la sonde de l’Entente a été installée

6.6 Méthodologie création d'un BV sur Qgis et HEC-HMS réalisé pour le fond documentaire de l'Entente

Délimitation d'un BV sur Qgis 3.28

Données nécessaires :

- Une couche des cours d'eau du secteur étudiés au format shape ;
- Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) du secteur étudié ;
- La localisation de l'exutoire du bassin versant (coordonnées X-Y dans le système de projection du projet) ;

Option : une emprise élargie du secteur d'étude afin de pouvoir découper éventuellement le MNT sur une superficie élargie du bassin versant afin de diminuer les temps de calcul (Boîte à outil - GDAL – Extraction raster – Fonction « Découper un raster selon une emprise »).

1- Travail préliminaire : nettoyage du MNT

A) Pour retirer les zones d'écoulement des cours d'eau du MNT :

- Rastériser les cours d'eau avec la boîte à outils – Géométrie vectorielle - fonction « Tampon » (prendre les valeurs par défaut) pour délimiter la zone de rastérisation. Utiliser l'outil "Rasteriser (vecteur vers raster)" de la boîte à outil ensuite reprendre avec la boîte à outils – GDAL – Extraction raster - fonction GDAL « Découper un raster selon une emprise ».

- « Brûler » les zones d'écoulement des cours d'eau. Pour cela utiliser depuis la boîte à outils – SAGA – Terrain analysis Preprocessing - la fonction « Burn stream network into DEM », y renseigner le MNT en DEM et la couche Cours d'eau au format raster en Stream. La troisième couche n'a pas d'importance si vous utilisez la méthode [0] ou [1]. Pour la valeur d'épsilon cela dépend de la taille de votre BV et de la précision souhaitée Cela permet de bien délimiter les rivières du bassin versant.

B) Pour supprimer les dépressions topographiques formant des bassins artificiels, et s'assurer que les cours d'eau ruissellent jusqu'à l'exutoire :

- Utiliser depuis la boîte à outil – SAGA Terrain analysis Preprocessing - la fonction « fill sinks (Wang et Liu) » Mettez la couche nouvellement créée en DEM et un minimum slope faible (fonction de votre BV) .

C) Pour vérifier que les cours d'eau de la couche Cours d'eau correspondent à la topographie issue du MNT :

- Calculer le Strahler Order. Utiliser dans la boîte à outil – SAGA – Terrain analysis Channels- la fonction « Strahler Order » et sélectionner la couche filled DEM créée précédemment. Modifier le style de la couche en ne gardant que les plus grands ordres de Strahler pour gagner en visibilité et pouvoir comparer le résultat obtenu avec la couche Cours d'eau initiale. Retravailler les zones qui semblent trop différentes.

2- Construction du bassin versant

- Définir l'exutoire souhaité

A) Création du bassin versant à partir des pentes :

- Utiliser depuis la boîte à outils – SAGA- Terrain Analysis Hydrology - la fonction « Upslope area » et rentrer les coordonnées X et Y de l'exutoire choisi. Attention à être précis sur le point considéré et s'assurer qu'il soit bien dans le cours d'eau. Prendre la couche filled DEM créée. Pour la méthode, le plus simple est d'utiliser la [0] 8 deterministic qui pour chaque pixel va chercher le ou les pixels autour de lui les plus susceptibles d'accueillir du ruissellement.

B) Calcul des caractéristiques du bassin versant :

- Transformer le raster obtenu en polygone (boîte à outils - GDAL- Conversation raster - fonction « Polygoniser ») ;

- Recouper la couche Cours d'eau shape avec le nouveau bassin versant défini (boîte à outils – Recouvrement de vecteurs - fonction « intersection ») ;

- Pour calculer la superficie du bassin versant polygonisé, utiliser la calculatrice de champs avec la table d'attributs (fonction area).

- Pour extraire les points hauts et bas du bassin versant, utiliser depuis la boîte à outils – Géométrie Vectorielle - la fonction « Extraire des sommets spécifiques ». Choisir la couche Cours d'eau Shape, sélectionner le cours d'eau principal et cocher « Entités sélectionnées seulement ». Pour les indexes écrire 0 (point le plus haut) et -1 (point le plus bas) de la sorte : 0,-1 . Dans la table d'attributs vous pouvez récupérer la distance entre les deux points le long du cours d'eau.

- Pour récupérer l'altitude de ces deux points, utiliser dans la boîte à outil – Analyse Raster - fonction « Prélèvement des valeurs raster vers ponctuels ».

- La pente moyenne du bassin versant peut alors être calculée à partir de la distance et de la différence de côte obtenues. .

Création d'un modèle sur HEC-HMS

Après avoir donné un nom et enregistré le fichier de projet à l'emplacement souhaité, il faut créer les différents composants d'un modèle. Un modèle est constitué d'un bassin versant, de données de météorologie, de caractéristiques de simulation et de données de terrain. Ces différents éléments se retrouvent dans les objets suivants :

Ouvrir Menu -> Components

- Basin Model Manager : New, Name -> [name] Create
- Meteorologic Model Manager : New, Name -> [name] Create
- Control specifications Manager : New, Name -> [name] Create
- Time-Series Data Manager -> Precipitation Gages : New, Name -> [name] Create

- Time-Series Data Manager -> Discharge Gages : New, Name -> [name] Create
- Terrain Data Manager : New, Name -> [name] -> [fichier-mnt] .tif.asc.vrt... -> meters -> Finish

HEC HMS permet de visualiser le bassin versant de l'étude ainsi que d'en calculer les caractéristiques physiques. Pour mettre en place la zone d'étude et définir les sous bassins versants sur cet outil il faut :

Importer le modèle numérique de terrain (MNT) :

- Sélectionner le modèle de bassin dans la fenêtre à gauche
 - Définir le système de coordonnées via : Menu, SIG -> Coordinate system, browse choisir un fichier de type .shp par exemple étant défini par le système de coordonnée voulu. -> Set
- Travailler le MNT pour en corriger les défauts :
- Prétraitement des données de terrain et définition des SBV -> Menu, SIG
 - Preprocess Sinks : Suppression des cuvettes — Preprocess Drainage : Identification des directions de drainage
 - — Identify Streams -> Area to define streams (KM2) -> [aire des SBV souhaité en km2], OK : identification des cours d'eau ayant une aire drainée supérieure à un seuil donné
 - Positionnement de l'exutoire du BV : Break point creation tool : Bien positionner l'exutoire dans le cours d'eau. Delineate Elements Insert junctions -> Yes, Convert Break points -> No
 - File -> Save

6.7 Liste des paramètres pour le modèle HEC-HMS

	Paramètres	Vaux amont	Plumion	Draize/Doumely
Canopy	Initial storage (mm)	5	5	5
	Max storage (mm)	19	19	19
	Crop coefficient	1	1	1
	ETP	dry period	dry period	dry period
Baseflow	Reservoirs	2	2	2
	Initial type	discharge	discharge	discharge
	GW1 initial (mm)	0	0	0
	GW2 initial (mm)	0	0	0
	GW1 coefficient (hr)	80	100	80
	GW2 coefficient (hr)	800	1000	800
Loss	Soil initial (%)	5	5	5
	GW1 initial (%)	5	5	5
	GW2 initial (%)	5	5	5
	Max infiltration (mm/hr)	100	100	100
	Impervious (%)	40	40	40
	Soil storage (mm)	50	50	50
	Tension storage (mm)	38	40	38
	Soil percolation (mm/hr)	4	4	4
	GW1 storage (mm)	150	150	150
	GW1 percolation (mm/hr)	2	2	2
	GW1 coefficient (hr)	76	76	80
	GW2 storage (mm)	400	400	400
	GW2 percolation (mm/hr)	1	1	1
	GW2 coefficient (hr)	160	160	160
Transform	Time concentration (hr)	10	17	7,5
	Storage coefficient (hr)	10	17	7,5

TABLE 6.6 – Liste des paramètres calés pour la modélisation hydrologique sur HEC-HMS

6.8 Liste des paramètres pour le modèle Hydra

	Paramètres	Vaux amont	Draize	Doumely	Plumion
Caractéristiques	Area (ha)	5 989	3 807	4 762	14 847
	Length (m)	24 394	16 813	11 154	22 207
	Average slope (m/m)	0,006	0,007	0,007	0,006
	Impervious soil coef	0,1	0,1	0,1	0,1
Runoff production	Concentration time (min)	741	567	631	1 137
	Shape coeficient	4	4	4	4
Net flow production	Storage RFU (mm)	150	150	150	150
	Infiltration type	rate	rate	rate	rate
	Infiltration rate f0 (mm/day)	999	999	999	999
	Storage J (mm)	22	22	22	22
	Drainage time (day)	5	5	5	5
	Catchement connect coef	1	1	1	1
	Max infiltration rate (mm/day)	999	999	999	999

TABLE 6.7 – Liste des paramètres calés pour la modélisation hydrologique sur Hydra