
Modélisations 1D et 2D des écoulements à surface libre

2ème année MFEE

Rapport

Auteurs :

Corentin MIQUEL

Tristan LADRECH

Professeur :

L. CASSAN

H. ROUX

16 septembre 2019

Table des matières

Introduction	3
1 Modélisation théorique numérique	4
1.1 Le logiciel HEC-RAS	4
1.2 Logiciel Telemac	5
2 Analyse du site et définition de la géométrie :	5
2.1 Contexte :	5
2.2 Reconnaissance du lieu :	6
2.3 Vérification des données :	6
3 Création du modèle de rivière avec l'outil RAS Mapper d'HEC-RAS :	6
3.1 Définition des limites de la rivière :	6
3.2 Définition des ouvrages sur le cours d'eau :	7
4 Calage et exploitation du modèle 1D :	7
4.1 Condition à la limite aval	7
4.2 Estimation du coefficient de rugosité en lit mineur	7
4.3 En régime permanent	8
4.4 Simulation d'une crue et analyse des résultats	10
5 Modélisation 2D et maillage :	11
6 Calcul 2D	11

Table des figures

1	Représentation de la détermination du modèle numérique	4
2	débits aux limites amonts des biefs	7
3	Représentation des lignes d'eau le long du cours d'eau	8
4	Visualisation des hauteurs d'eau au cours du temps en un point situé en amont et en un point situé en aval	8
5	Visualisation des hauteurs d'eau au cours du temps pour le point situé en aval	9
6	9
7	9
8	Nombre de Froude le long du cours d'eau	10
9	Résultats de la simulation 1D de la crue	10
10	Vecteur vitesse au passage du seuil situé en amont du lac des gaves	12
11	Hauteur d'eau au niveau de l'embouchure du gave d'Azun lors du pic de la crue de 2013 . . .	12

Introduction

L'objectif de ce cours est d'aborder les aspects théoriques et pratiques du processus de modélisation hydraulique d'un écoulement naturel : le Gave de Pau.

Les écoulements naturels étant complexes, il est nécessaire de réaliser un travail préalable de modélisation théorique afin de permettre la résolution des équations physiques.

Ainsi, nous pourrions identifier et comprendre les phénomènes qui prennent place dans ces écoulements, mais aussi détecter et anticiper les changements auxquels ils sont sujets.

1 Modélisation théorique numérique

Comme nous l'avons présenté dans l'introduction, il est d'abord nécessaire de déterminer un modèle théorique.

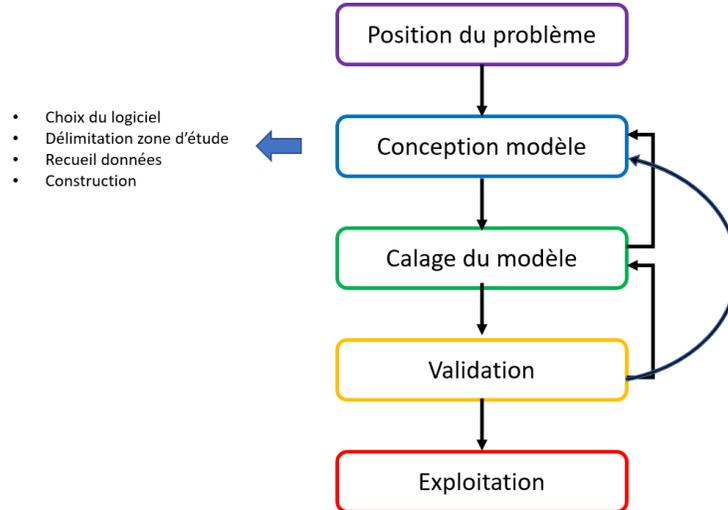


FIGURE 1 – Représentation de la détermination du modèle numérique

Nous passerons le détail de chaque étape étant donné que ce schéma est longuement détaillé dans l'énoncé de l'étude.

Étant donné que nous étudions un écoulement à surface libre naturel, nous travaillerons sur le logiciel HEC-RAS et Telemac.

1.1 Le logiciel HEC-RAS

HEC-RAS est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique qui permet de simuler les écoulements à surface libre. Il a été conçu par l'Hydrologic Engineering Center du U.S Army Corps of Engineers. La dernière version de HEC-RAS permet de simuler les écoulements permanents et non permanents, le transport de sédiments et certaines fonctions facilitant la conception d'ouvrages hydrauliques.

Comme beaucoup de logiciels, HEC-RAS utilise un schéma de Preissman pour réaliser ces calculs.

Il résout l'équation de quantité de mouvement linéarisée suivante :

$$CL \cdot \Delta Q_{j+1} + CM \cdot \Delta Z_{j+1} = CN \cdot \Delta Q_j + CO \cdot \Delta Z_j + CP \quad (1)$$

Où CL, CM, CN, CO et CP sont des coefficients dépendant des paramètres géométriques et hydrauliques. Le balayage commence à l'amont du bief avec la condition à la limite suivante :

$$CR_{am} \cdot \Delta Q_{am} + CS_{am} \cdot \Delta Z_{am} = CT_{am}$$

CR_{am} , CS_{am} et CT_{am} des coefficients définissant la loi connue. A partir de ces coefficients, on peut réaliser le premier balayage qui nous donnera les coefficients des relations de transfert, établies à partir des équations de continuité de la masse et de la quantité de mouvement et les coefficients de la relation d'impédance.

On a alors le système matriciel suivant :

$$\begin{pmatrix} \Delta Q_j \\ \Delta Z_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} GA_j & GB_j \\ GD_j & GE_j \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta Q_{j+1} \\ \Delta Z_{j+1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} GC_j \\ GF_j \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$CR_{j+1} \cdot \Delta Q_{j+1} + CS_{j+1} \cdot \Delta Z_{j+1} = CT_{j+1} \quad (3)$$

La condition aux limites et la relation d'impédance à l'aval du tronçon permettent de fermer le système. Nous avons alors deux équations avec deux inconnues, qu'il est donc possible de résoudre. Le second balayage se fait de l'aval vers l'amont pour calculer Q et Z dans le domaine intérieur.

1.2 Logiciel Telemac

Telemac présente plusieurs avantages pour la résolution 2D. Gratuit depuis 2010, il permet d'utiliser avec des maillages non structurés à base de triangle avec un raffinement local. De plus, il est soutenu par une grande communauté.

Telemac utilise Saint Venant 2D :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \langle U \rangle \frac{\partial h}{\partial x} + \langle V \rangle \frac{\partial h}{\partial y} + h \left(\frac{\partial \langle U \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle V \rangle}{\partial y} \right) = S_{ce} \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \langle U \rangle \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial x} + F_x + \frac{1}{h} \text{div}(h\nu_\epsilon \vec{\text{grad}}(\langle U \rangle)) + (u_{sce} - \langle U \rangle) \frac{S_{ce}}{h} \quad (5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + \langle V \rangle \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial y} + F_y + \frac{1}{h} \text{div}(h\nu_\epsilon \vec{\text{grad}}(\langle V \rangle)) + (v_{sce} - \langle V \rangle) \frac{S_{ce}}{h} \quad (6)$$

Telemac utilise la méthode des éléments finis et des volumes finis. Les éléments finis pour résoudre en espace et les volumes finis pour le temps.

2 Analyse du site et définition de la géométrie :

2.1 Contexte :

Nous allons nous intéresser à la modélisation des crues dans le bassin du gave de Pau. Ce lieu, qui regroupe de nombreux affluents Pyrénéens, voit beaucoup d'eau transiter. Nous nous intéresserons en particulier à la zone se situant autour du Lac des Gaves. Ce lac a été comblé de sédiments suite à la crue de 2013 et présente

donc un danger particulier concernant les crues à venir.

2.2 Reconnaissance du lieu :

Nous avons ainsi réalisé une reconnaissance de la zone grâce à Google earth afin de repérer les différents ouvrages sur le cours d'eau (voies ferrées, routes, ponts, ect ...)

Nous avons ensuite réalisé une recherche hydrologique grâce aux données de la "banque hydro" sur <http://www.hydro.eaufrance.fr/>

2.3 Vérification des données :

Grâce à Bluekenue, nous avons pu visualiser les relevées topographiques. Nous avons également pu y superposer des images de google earth afin de bien situer la zone d'étude. Cette étape est à ne pas négliger car elle permet de vérifier la cohérence des données, notamment aux endroits spécifiques tels que des seuils ou des ponts.

3 Création du modèle de rivière avec l'outil RAS Mapper d'HEC-RAS :

3.1 Définition des limites de la rivière :

Dans cette partie, nous allons brièvement présenter la création de la géométrie avec HEC-RAS et les problèmes qui ont pu être soulevés.

Dans un premier temps nous avons créé la structure de la zone étudiée, c'est-à-dire que nous avons défini la rivière, les biefs, et les jonctions.

Ensuite nous avons tracé les sections qui définiront les profils en travers. Cette étape, bien que répétitive et longue, nécessite toute notre attention pour ne pas perturber les calculs par la suite. Les sections doivent être réalisées "de l'aval vers l'amont pour chaque bief et de la rive gauche vers la rive droite pour chaque profil" et sans se croiser.

Ensuite nous avons lancé un calcul en régime permanent afin de déterminer le lit majeur et le lit mineur. On considère en hydraulique fluviale que le débit de période de retour 2 ans définit la limitation du lit mineur. Nous avons donc lancé la simulation est fixé la limite lit majeur/lit mineur sur la ligne d'eau. Cette manière de procéder soulève quelques problèmes. En effet, sa précision repose sur la supposition que les valeurs relevées soient juste et que l'hypothèse sur le débit de période de retour soit vérifiée par ce cours d'eau. Pour notre simulation, nous allons imposer un coefficient de Manning constant le long de la rivière de 0.01 m^{-1/3}/s pour le lit mineur et de 0.03 m^{-1/3}/s pour le lit majeur.

3.2 Définition des ouvrages sur le cours d'eau :

Après avoir repéré les différents ouvrages sur Google earth, nous les ajoutons au modèle de rivière. La modélisation de ces ouvrages étant définie sur les sections à l'amont et en aval immédiat, il est nécessaire de les avoir bien réalisés. Ainsi nous réalisons les seuils, ponts et digues comme indiqué sur l'énoncé de l'étude. La création des digues est ici étudié pour palier à un problème de modélisation concernant une rivière de contournement qui est considéré comme le cours d'eau principal (en 1D, la majorité du débit passe par cette rivière artificielle). Les conditions de l'étude nous permettent de simplement modéliser l'ouvrage amont qui empêche cet écoulement par de simples digues.

4 Calage et exploitation du modèle 1D :

4.1 Condition à la limite aval

Nous avons importé la géométrie qui nous était donnée puis nous avons paramétré le calcul en régime permanent (Edit/Steady flow Data) et nous avons saisi les débits aux limites amonts des biefs suivant (ceux du 18/06/18) :

Reach	Q (m^3/s) 18/06/2018	Q (m^3/s) 09/07/2018
Gavarnie	31	82
Cauterets	14	29
Pau_ amont	45	111
Azun	14	30
Pau_ aval	59	141

FIGURE 2 – débits aux limites amonts des biefs

La condition aux limite aval que nous imposons est une courbe de tarage qui nous donnera donc une hauteur d'eau en fonction du débit qui sera reçu. Grâce à cela, nous pourrions ensuite caler notre coefficient de Manning.

4.2 Estimation du coefficient de rugosité en lit mineur

Comme vu précédemment, le calage du modèle permet d'associer à chaque section du cours d'eau un coefficient de frottement reproduisant au mieux la hauteur d'eau pour un certain débit. Nous comparons ces lignes d'eau obtenues avec celles mesurées et nous pouvons ainsi caler le coefficient de Manning.

Voici le graphe obtenu :

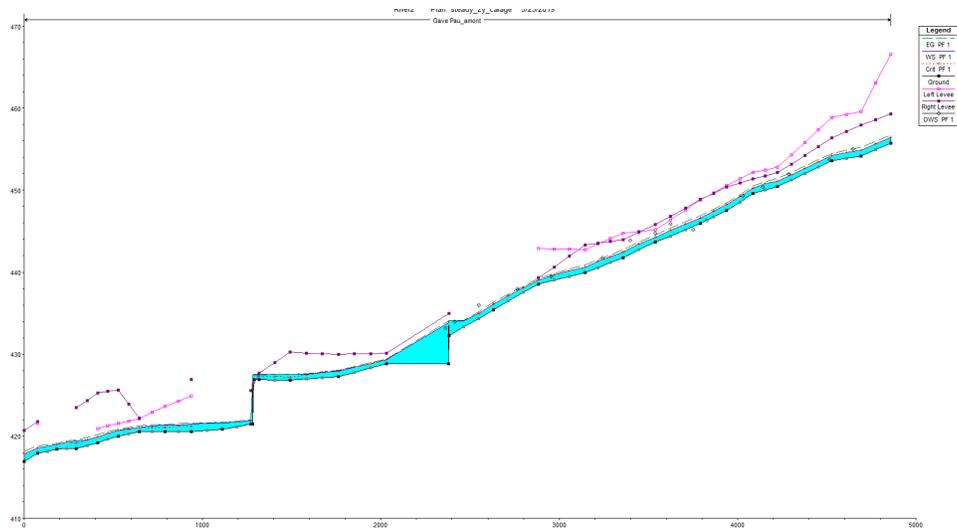


FIGURE 3 – Représentation des lignes d'eau le long du cours d'eau

Nous pouvons ainsi lire sur le graphique les zones fluviales ou torrentielles grâce à la hauteur critique (en rouge) par exemple.

4.3 En régime permanent

Nous pouvons maintenant simuler différents évènements en régime permanent. Il est tout d'abord nécessaire de vérifier que le régime permanent est bien atteint. Pour cela, nous pouvons observer l'évolution de la hauteur d'eau au cours du temps. Voici les hauteurs d'eau obtenues :

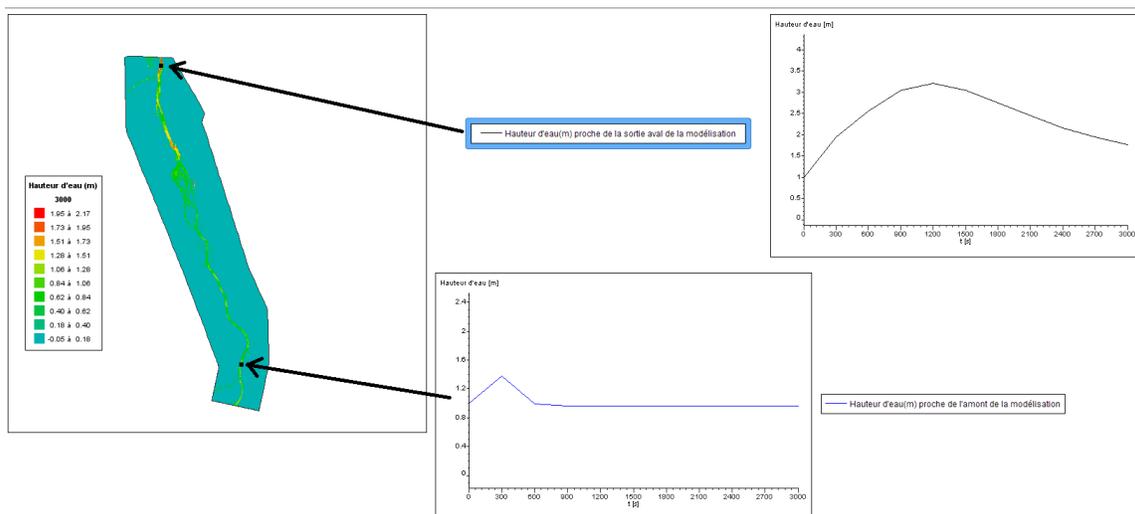


FIGURE 4 – Visualisation des hauteurs d'eau au cours du temps en un point situé en amont et en un point situé en aval

On constate que le régime est établi au niveau de l'amont du cours d'eau mais il ne l'est pas en aval. Il est donc nécessaire d'augmenter le temps de calcul. Une fois cela fait, nous obtenons ce graphe de hauteur d'eau en aval :

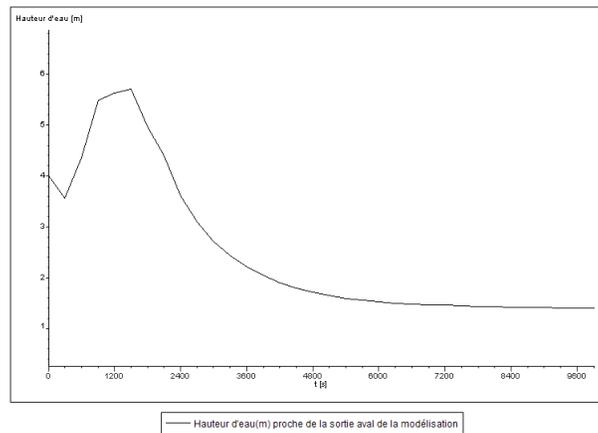


FIGURE 5 – Visualisation des hauteurs d'eau au cours du temps pour le point situé en aval

Le régime permanent est maintenant atteint. Nous cherchons alors à identifier les zones à enjeux qui pourraient être vulnérables en cas de crue.

Nous observons tout d'abord une zone où l'eau sort totalement de son lit à cause du fait qu'un pont avait faussé le relevé altimétrique. Nous avons donc remplacé les côtes correspondant aux noeuds situés sur le pont par des côtes correspondant bien à celles du lit mineur. Ensuite nous avons lancé une première simulation avec des débits d'entrée correspondant à la situation de crue de 2018. Nous pouvons en tirer des zones à risques telles que celle située au niveau l'embranchement du gave d'azun.

Cette zone semble être une zone industrielle et un débordement provenant du gave d'Azun inonde une partie de cette zone. Peu après la jonction du Gave de Gavarnie et du Gave de Cauterets, un autre zone à enjeux est inondée d'après notre simulation. En effet, la route est inondée et l'eau monte très près de l'habitation qui la borde.

Pour palier à ces problèmes, on pourrait envisager de construire des digues afin de garder le cours d'eau dans son lit. A terme, il faudrait simplement arrêter de construire dans la zone.

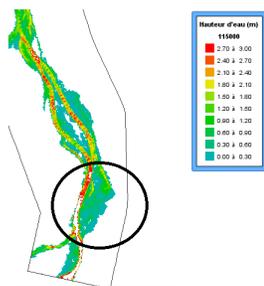


FIGURE 6 –
Route inondée visualisé sur fudaa-prepro

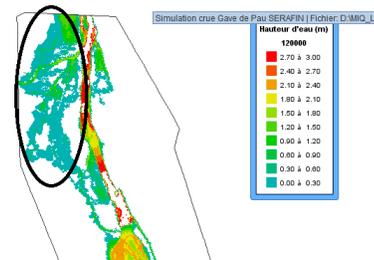


FIGURE 7 –
Zone industrielle visualisé sur fudaa-prepro

On constate également que le seuil tend à favoriser la sortie du lit du cours d'eau notamment en aval du lac comblé de gravats, où le seuil est combiné à un amincissement du cours d'eau. L'eau s'étale alors sur la totalité de la surface du lac comblé et déborde légèrement. En aval de ce seuil, la hauteur d'eau est alors très importante, ce qui pourrait causer une inondation en cas de grosse crue. Néanmoins, le cours d'eau reprend une morphologie classique grâce au seuil. Une crue comme celle de 2018 a une période de retour d'environ 3 à 5 ans.

On repère également les parties du cours d'eau qui sont en écoulement torrentiel et celles qui sont en écoulement fluvial. Cela est directement visible en observant le nombre de froude comme sur la figure suivante ;

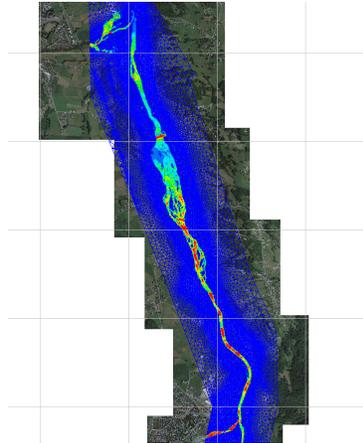


FIGURE 8 – Nombre de Froude le long du cours d'eau

Sur la figure précédente, le partie en rouge représentent un froude supérieur ou égal à 1, c'est à dire que dans ces parties là, l'écoulement est torrentiel. Les autres présentent donc par conséquent un écoulement fluvial. On remarque que plus le cours d'eau est étriqué, plus le régime aura une propension à être torrentiel. De plus, plus la pente est forte, plus il aura de chance d'être torrentiel. On vérifie bien ces observations.

4.4 Simulation d'une crue et analyse des résultats

Nous avons ensuite effectué un calcul non permanent. Dans ce cas, et en simulant en 1D toujours, le résultat obtenu pour la crue de 2013 est le suivant :

Reach	Q (m^3/s) 18/06/2018	Q (m^3/s) 09/07/2018
Gavarnie	31	82
Cauterets	14	29
Pau_ amont	45	111
Azun	14	30
Pau_ aval	59	141

FIGURE 9 – Résultats de la simulation 1D de la crue

5 Modélisation 2D et maillage :

Dans cette partie nous avons vu comment simuler un écoulement 2D. Bien simulé cet écoulement nécessite de savoir comment créer un maillage adéquat de notre domaine de modélisation.

Le maillage généré de prime abord n'étant d'une grande qualité, il est nécessaire de l'améliorer.

On remarque en particulier que les mailles ne sont pas bien uniformes aux frontières. C'est la première correction apporté au maillage.

Ensuite nous avons réglé le problème des mailles surcontraintes. En effet, le maillage est composé d'une multitude de triangles liés entre eux, certains sont en contact avec la frontière et sont sujet à une condition aux limites. Cependant, si un triangle a ses 3 point sur une frontière, ce dernier est alors surcontraint. Ce dernier pourrait alors fausser les calculs. Par chance, nous n'avons pas eu de mailles surcontrainte car notre maillage s'est automatiquement bien généré.

Nous avons alors pu mapper le maillage, c'est à dire affecter une cote à chaque noeud de notre maillage, et créer le maillage finale selafin qui sera utilisé par Telemac.

Finalement, nous avons créé les conditions aux limites et les conditions initiales. Dans les conditions aux limites nous indiquons en particulier les "frontières liquides", où l'eau est échangé avec l'extérieur du domaine. Les conditions initiales sont essentielles à la résolution des équations de Saint Venant. Il est pas nécessaire de partir d'une solution physique car celle-ci est atteinte au bout d'un certain nombre d'itérations. Cependant plus on en est proche en premier lieu, moins on a besoin d'itérations.

6 Calcul 2D

Avant de simuler la crue, il a été nécessaire de simuler un écoulement stationnaire afin de déterminer le fonctionnement initial du cours d'eau.

Nous lançons maintenant des calculs 2D pour simuler la crue de 2013. Nous utilisons le fichier de débits donnés pour la crue de 2013 afin d'avoir les débits entrants au différents endroits au cours du temps. Nous utilisons également la courbe de tarage. Nous lançons un calcul sur l'ensemble de la plage de temps qui nous a été fournie. Nous obtenons des résultats pour cette plage de temps et pouvons ainsi faire une analyse plus complète que précédemment.

Premièrement, on constate que les ouvrages jouent un rôle important sur la ligne d'eau et l'étendue de la zone inondée. En effet, ceux-ci provoquent une accélération et peuvent provoquer une sortie du cours d'eau. Cela est visible sur l'image suivante :

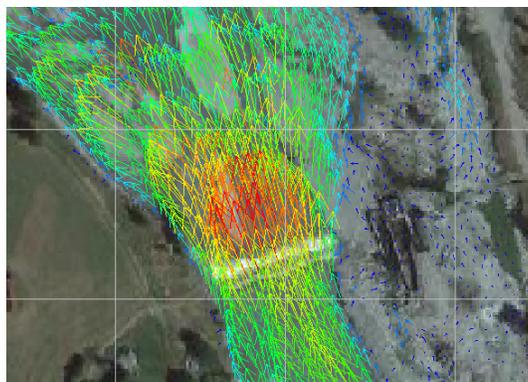


FIGURE 10 – Vecteur vitesse au passage du seuil situé en amont du lac des gaves

On observe maintenant la zone inondée au niveau de l’embouchure du gawe d’Azun.

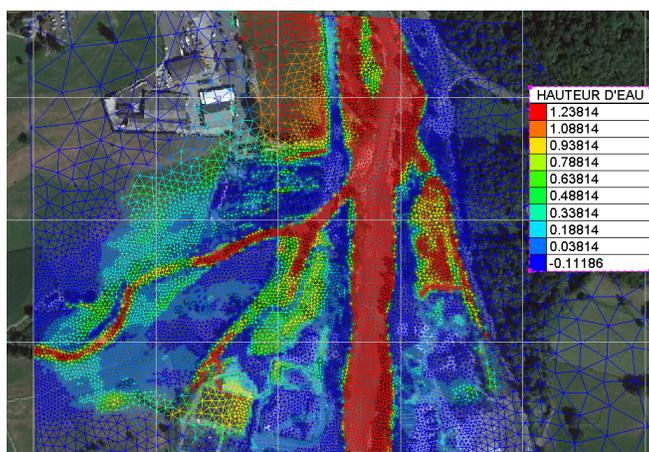


FIGURE 11 – Hauteur d’eau au niveau de l’embouchure du gawe d’Azun lors du pic de la crue de 2013

On constate que la zone inondée est bien plus importante que pour la crue de 2018. De plus, avec ce modèle 2D, à certains endroits de la simulation, le résultat diffère de celui de la modélisation 1D. En effet, cela était prévisible car si la topographie de la zone induit que le niveau d’eau est inférieur à celui des bords mais supérieur à la cote correspondant à une zone proche, alors avec la simulation 1D de l’eau apparaît automatiquement sans réalité physique (l’eau n’a pas pu passer par dessus le bord). Si l’eau montre à un niveau supérieur au bord et inonde l’ensemble de la région alors les modélisation 1D et 2D sont identiques. On pouvait donc prévoir que la modélisation 2D serait bien plus pertinente, notamment concernant la zone industrielle qui a par endroit une cote plus basse que le cours d’eau.

L’impact de la variabilité spatiale de la rugosité est que dans les zones où celle-ci est élevée, cela va favoriser l’augmentation du niveau d’eau. Cela facilite donc la sortie du lit du cours d’eau et les inondations.

Conclusion

Durant ce projet nous avons en premier temps appris à maîtriser les logiciels HEC-RAS, Telemac et Fudaa. Ensuite, nous avons vu que réaliser une étude hydrologique, même succincte, demande plus que la simple manipulation des logiciels. Il faut acquérir les données, se renseigner sur l'histoire du cours d'eau et de ses évènements marquants, identifier les enjeux de l'étude et les différents impacts locaux liés au cours d'eau. Nous avons également pris connaissance des défauts de chaque logiciels et de l'impact de différents facteurs comme la rugosité. Mais surtout, nous avons pu nous faire un idée de ce qu'était vraiment une étude hydrologique de cours d'eau en bureau d'étude. Néanmoins, comme il est précisé dans le sujet de BE, le temps de calcul étant limité, notre étude ne peut être considérée comme une véritable étude hydrologique. Il serait donc intéressant de passer un peu plus de temps sur ce sujet pour augmenter le degré de détail et en tirer de réelles conclusions.