



4

---

RAPPORT DE STAGE ENM  
APPORT DE LA DONNÉE SPATIALE POUR LA PRÉVISION  
DES CRUES ET DES INONDATIONS

---

*Par : Anthéa Delmotte*

ENSEEIHT

MÉCANIQUE DES FLUIDES, ÉNERGIE & ENVIRONNEMENT

SCIENCES DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT

BIG DATA

ENM

MASTER SCIENCES DE L'OCÉAN, DE L'ATMOSPHÈRE ET DU CLIMAT

DYNAMIQUE DU CLIMAT

*Encadrante : Sophie Ricci<sup>1</sup>*

*Co-Encadrants : Thanh Huy Nguyen<sup>1</sup>, Andrea Piacentini<sup>1</sup>, Peter Kettig<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> CECI, CERFACS/CNRS UMR 5318, <sup>2</sup> CNES

*Entreprise : CERFACS*

42 Avenue Gaspard Coriolis, 31100 Toulouse

*Période : 22/03/2021 - 21/09/2021*

Édité le 30 août 2021

## Résumé/Abstract

### Résumé

Les inondations représentent l'une des catastrophes naturelles les plus courantes et dévastatrices dans le monde, il devient donc crucial d'anticiper ces phénomènes et de pouvoir déterminer l'étendue des zones inondées le plus précisément possible. Par manque de stations de mesure, les observations in-situ disponibles combinées à l'utilisation de modèles numériques hydrodynamiques TELEMAC-2D n'apportent pas de résultats satisfaisants. Les données satellitaires d'observation de la Terre apparaissent alors comme une source de données fondamentale. Dans le but de développer un outil efficace de cartographie et de surveillance des zones inondées, le projet FloodDAM s'appuie sur l'ensemble de ces éléments ainsi que sur l'assimilation de données.

*Mots clés : inondation, in-situ, TELEMAC-2D, FloodDAM, cartographie, assimilation de données*

### Abstract

As floods are the most common, and one of the most devastating natural disasters worldwide, it becomes crucial to anticipate these phenomena and be able to determine the extent of the flooded areas accurately. Due to the lack of measurement stations, the available in-situ observations combined with the use of numerical hydrodynamic models TELEMAC-2D do not provide satisfying results. Earth observation satellite data then appears to be a fundamental data source. In order to develop an effective tool for mapping and monitoring flooded areas, the FloodDAM project relies on all of these elements as well as on data assimilation.

*Keywords : flood, in-situ, TELEMAC-2D, FloodDAM, mapping, data assimilation*

## Remerciements

En premier lieu je tiens à remercier **Sophie Ricci**, mon encadrante de stage et chercheuse senior au CERFACS, pour m'avoir accompagnée tout au long de cette expérience professionnelle, avec patience et pédagogie.

Je désire aussi remercier les membres de l'équipe FloodDAM avec qui j'ai eu plaisir à travailler, **Thanh Huy Nguyen**, post-doctorant au CERFACS, **Andrea Piacentini**, consultant au CERFACS, **Peter Kettig**, responsable CNES du projet, ainsi que **Siham El Garroussi**, doctorante au CERFACS, pour ses conseils.

Je remercie également **Olivier Thual**, professeur à l'ENSEEIHIT et responsable de l'équipe GLOBC au CERFACS, pour m'avoir partagé cette opportunité de stage, ainsi que l'ensemble de **l'équipe GLOBC** du CERFACS pour leur gentillesse et leur disponibilité. Je remercie également **les stagiaires et les thésards** présents au CERFACS pour leur convivialité durant ces six mois de stage.

Pour finir, un grand merci à **mes proches** pour la relecture et pour m'avoir soutenue lors de mes études et de mon stage.

# Table des matières

Résumé/Abstract	i
Remerciements	ii
Table des matières	iv
Table des figures	v
Liste des tableaux	v
Glossaire	vii
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Contexte du stage</b>	<b>2</b>
1.1 Présentation de l'entreprise . . . . .	2
1.2 Projet FloodDAM . . . . .	3
1.3 Objectifs et méthodes . . . . .	3
1.4 Outils et matériels . . . . .	5
<b>2 Cas d'étude</b>	<b>6</b>
2.1 Présentation du tronçon et des stations . . . . .	6
2.2 Mise en données . . . . .	9
2.2.1 Données géométriques et hydrauliques . . . . .	9
2.2.2 Données d'observations in situ . . . . .	12
2.2.3 Données d'observations satellitaires . . . . .	13
2.2.4 Conditions limites . . . . .	14
<b>3 Résultats</b>	<b>16</b>
3.1 Garonne . . . . .	16
3.1.1 Diagnostic du modèle . . . . .	16
3.1.2 Analyse du modèle . . . . .	17
3.1.3 Conclusion . . . . .	23
3.2 Seine . . . . .	24
<b>4 Conclusion et perspectives</b>	<b>28</b>

<b>5</b>	<b>Bilan personnel</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>Annexe A - Analyse bibliographique</b>	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>Annexe B - Résultats Garonne, crue Décembre 1981</b>	<b>38</b>

## Table des figures

2	Tronçon de la Garonne étudié . . . . .	6
3	Tronçon de la Seine étudié . . . . .	8
4	Maillage en fonction des zones - Garonne . . . . .	10
5	Coefficient de frottement en fonction des zones - Garonne . . . . .	10
6	Zones au maillage plus raffiné - Seine . . . . .	11
7	Zones au maillage moins raffiné - Seine . . . . .	11
8	Zones non maillées - Seine . . . . .	12
9	Courbes de tarage aux stations Vigicrues - Garonne . . . . .	12
10	Carte d'inondation - Sans modification - Garonne 2021 . . . . .	13
11	Courbe de tarage utilisée comme condition limite à La Réole - Garonne . .	14
12	Comparaison des hydrogrammes de crues - Seine 2021 . . . . .	15
13	Simulation T2D de référence - Garonne 2021 . . . . .	16
14	Courbes de tarage simulée et observées aux stations Vigicrues - Garonne .	17
15	Simulation avec modification de la bathymétrie - Garonne 2021 . . . . .	18
16	Comparaison des hydrogrammes de crues - Garonne 2021 . . . . .	19
17	Simulation avec modification de l'hydrogramme de crue - Garonne 2021 . .	19
18	Cartes d'inondation - Modification de l'hydrogramme - Garonne 2021 . . .	19
19	Simulation avec modification du fichier .cas - Garonne 2021 . . . . .	20
20	Cartes d'inondation - Modification du fichier .cas - Garonne 2021 . . . . .	20
21	Comparaison des hydrogrammes à deux conditions limites - Garonne 2021	21
22	Simulation avec modification des conditions limites amonts - Garonne 2021	22
23	Cartes d'inondation - Modification de l'hydrogramme 2CL - Garonne 2021	22
24	Simulation avec modification du profil de vitesse - Garonne 2021 . . . . .	23
25	Cartes d'inondation - Modification du profil de vitesse - Garonne 2021 . . .	23
32	Simulation T2D de référence - Seine 2018 . . . . .	26
33	Simulation T2D de référence - Garonne 1981 . . . . .	38
34	Comparaison des hydrogrammes de crues - Garonne 1981 . . . . .	38

35	Simulation avec modification de l'hydrogramme de crue - Garonne 1981 . . .	38
36	Simulation avec modification de la bathymétrie - Garonne 1981 . . . . .	39
37	Simulation avec raffinement du maillage - Garonne 1981 . . . . .	39
38	Simulation avec modification du fichier cas - Garonne 1981 . . . . .	39
39	Simulation avec raffinement du pas de temps - Garonne 1981 . . . . .	40
40	Comparaison des hydrogrammes à deux conditions limites - Garonne 1981	40
41	Simulation avec modification des conditions limites amonts - Garonne 1981	40

## Liste des tableaux

1	Données stations - Garonne . . . . .	7
2	Période de retour - Tonneins . . . . .	7
3	Données stations - Seine . . . . .	9
4	Paramètres étudiés en fonction de la crue - Garonne . . . . .	17

## Glossaire

**ArcGIS** Logiciel SIG - explication.

**CECI** Climat, Environnement, Couplages et Incertitudes - labo de blabla.

**CERFACS** Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique.

**CFD** Computational Fluid Dynamics (mécanique des fluides numériques).

**CNES** Centre National d'Études Spatiales - partenaire du projet FloodDAM.

**CNRS** Centre National de la Recherche Scientifique.

**CT** Courbe de Tarage - explication.

**DC** Dynamique du Climat - explication.

**DEM** Digital Elevation Model (traduction).

**DREAL** Direction Régionale Environnement Aménagement Logement.

**ENM** École Nationale de la Météorologie.

**ENSEEIH**T École Nationale Supérieure d'Électrotechnique, d'Électronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications.

**FloodDAM** Flood Detection, Alert and rapid Mapping - (traduction) projet du SCO France.

**FloodML** Flood Machine Learning (traduction).

**GLOBC** Modélisation du climat et de son changement global - équipe du CERFACS.

**HPC** High Performance Computing (traduction).

**HR** High Resolution (traduction).

**LiDAR** Light Detection And Ranging (traduction).

**LNHE** Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement - département R&D d'EDF.

**MFEE** Mécanique des Fluides, Énergie & Environnement - parcours de l'ENSEEIH

**ML** Machine Learning (traduction).

**MNS** Modèle Numérique de Surface.

**MNT** Modèle Numérique de Terrain.

**NGF** Nivellement Général de la France - réseau de repères altimétriques.

**PHE** Plus Hautes Eaux.

**pkl** pickle - format de fichiers.

**QGIS** Logiciel SIG open source - explication.

**SAR** Synthetic Aperture Radar (traduction).

**SCHAPI** Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations.

**SCO** Space Climate Observatory (traduction), groupe informel d'agences spatiales et d'organismes internationaux.

**shp** shapefile - format de fichiers.

**SIG** Système d'Information Géographique - explication.

**slf** selafin - format de fichiers.

**SOAC** Sciences de l'Océan, de l'Atmosphère et du Climat - explication.

**SPC** Services de Prévision des Crues.

**T2D** Module 2D de TELEMAC-MASCARET.

**TELEMAC** Abréviation du logiciel libre TELEMAC-MASCARET de simulation numérique en mécanique des fluides, développé par le LNHE.

**VHR** Very High Resolution (traduction).

## Introduction

Dans le but de valider le diplôme Mécanique des Fluides, Énergétique & Environnement (MFEE) à l'ENSEEIHIT et le master Dynamique du Climat (DC) Sciences de l'Océan, de l'Atmosphère et du Climat (SOAC) à l'ENM, j'ai effectué mon stage de fin d'études au CERFACS, du 22/03/2021 au 21/09/2021. Ce stage s'est déroulé dans l'équipe GLOBC, sous la supervision de Sophie Ricci, chercheuse senior, sur l'apport de la donnée spatiale pour la prévision des crues et des inondations.

Ce rapport présente donc une synthèse des travaux effectués dans le cadre de mon stage de fin d'études.

### Plan du rapport

Ce rapport se décompose en 5 parties principales :

- L'introduction du contexte de stage à travers la présentation de l'entreprise et du projet FloodDAM dans lequel s'inscrit mon stage, ainsi que des objectifs à réaliser et des outils utilisés pour cela.
- La présentation des deux cas d'études sur lesquels j'ai eu l'opportunité de travailler, la Garonne Marmandaise et la Seine Aval.
- Les résultats obtenus pour les modèles de la Garonne et de la Seine, avec dans un premier temps un diagnostic de chaque modèle puis une analyse de sensibilité.
- La conclusion sur les résultats précédents, et sur la suite du travail à effectuer.
- Le bilan personnel de ce stage et ce qu'il a pu m'apporter.

L'annexe permet de rajouter des résultats non présents dans le corps du rapport.

# 1 Contexte du stage

## 1.1 Présentation de l'entreprise

Le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique, dit CERFACS, est un centre de recherche fondamentale et appliquée sous la direction de Catherine Lambert, spécialisé dans la modélisation et la simulation numérique, notamment pour les secteurs de l'aéronautique, du spatial, du climat, de l'énergie et de l'environnement.

Créé en 1987, le groupement scientifique du CERFACS se transforme en groupement d'intérêt public l'année suivante et devient société par actions simplifiées autour des sept structures associées : Airbus, CNES, Météo-France, EDF, Safran, Onera et Total en 2021.

Impliqué dans des projets d'envergure nationale et internationale, le CERFACS travaille en forte interaction avec ses sept associés mentionnés précédemment. D'autres partenariats avec le CNRS (Unité de recherche associée), l'Irit (laboratoire commun), le CEA et l'Inria (accords de coopération) sont également en place.

Les membres du CERFACS se répartissent en cinq équipes :

- **ALGO**rithmes parallèles & **s**Cientific **s**Oftware **O**perational **P**erformances (ALGO-COOP)
- Aviation & environnement
- Equipe Informatique et Support Utilisateur
- Mécanique des fluides numérique (CFD)
- Modélisation du climat et de son **C**hangement **G**LOBal (GLOBC)

L'équipe GLOBC dans laquelle j'effectue mon stage est associée au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) à travers l'unité mixte de recherche UMR 5318 CECI.

Les différentes missions du CERFACS sont les suivantes :

- Développer des recherches scientifiques et techniques visant l'amélioration des méthodes de calcul avancé, incluant une meilleure prise en compte des processus physiques concernés, et la mise au point d'algorithmes performants pour les nouvelles architectures de calculateurs,
- Permettre l'accès, soit en propre, soit en mode partagé, aux calculateurs d'architecture nouvelle susceptibles d'apporter un gain significatif de performances,
- Transférer ces connaissances scientifiques et méthodes techniques, pour application,

- vers les grands secteurs industriels ,
- Former des personnels hautement qualifiés et offrir une formation avancée pour les secteurs et domaines d’application retenus.

## 1.2 Projet FloodDAM

Le sujet de ce stage s’inscrit dans le projet FloodDAM [1], un projet mis en place par le SCO en mars 2020, visant à développer un outil opérationnel de détection, surveillance et prévision des inondations à l’échelle globale. Les inondations sont l’une des catastrophes naturelles les plus courantes et les plus dévastatrices dans le monde, et leur fréquence est en constante augmentation. Dans le but de comprendre et d’anticiper ces phénomènes, l’utilisation de modèle numérique pour représenter les zones inondées est complétée par des mesures in-situ. Il existe cependant peu de stations de mesures, d’autant moins dans les plaines d’inondations, ce qui ne suffit pas à modéliser précisément les événements de crue. C’est dans cette optique que l’observation de la Terre depuis l’espace, via des satellites tels que Sentinel, est apparue comme un moyen efficace de cartographier et surveiller l’étendue des zones inondées à travers la mise en œuvre, l’étalonnage et la validation des modèles hydrauliques [2]. La fréquence des observations spatiales étant plus faible que les mesures in situ, il faut compléter ces observations par des méthodes d’assimilation de données. La combinaison de toutes ces informations et la prise en compte des erreurs associées permettent ainsi d’améliorer le modèle et la prévision.

La place du CERFACS dans ce projet est de proposer des prévisions à court terme avec une ré-analyse des événements via l’assimilation de données [3] et l’utilisation de TELEMAC 2D (T2D) ([open.telemac.org](http://open.telemac.org)) [4]. Une collaboration entre le CNES et le CERFACS est menée dans le but de travailler sur la comparaison des MNS à très haute résolution avec les modèles CFD issus de TELEMAC, et ce travail fait l’objet d’un post-doctorat mené par Thanh Huy Nguyen.

## 1.3 Objectifs et méthodes

L’objectif principal de mon stage est d’améliorer les modèles numériques hydrodynamiques T2D existants pour la Garonne Marmandaise et pour la Seine Aval en utilisant l’apport de données spatiales. Cet objectif se divise en plusieurs étapes pour chacun des modèles :

- *Prise en main du modèle*

La prise en main de chaque modèle comprend l'étude de la zone, la connaissance des crues majeures associées et la compréhension des scripts Python liés aux simulations.

Dans le cas du modèle Garonne, la prise en main a été plus rapide car le modèle était déjà utilisé à mon arrivée dans le groupe de travail FloodDAM du CERFACS. Mon premier travail a donc été de me familiariser avec les données déjà disponibles et les résultats issus de simulations réalisées en amont. Ces résultats m'ont servi de point de référence lors des premières simulations que j'ai réalisées.

Concernant le modèle Seine, la prise en main du modèle a nécessité plus de travail. Le modèle nous étant parvenu pendant mon stage, j'ai participé à la prise de connaissance des différents fichiers et scripts associés au modèle. J'ai également participé à l'étape de mise en place des stations d'intérêt, pour déterminer les stations à utiliser en fonction de leur position et de la disponibilité de données d'observation (Partie 2.1 - Table 3) et ainsi créer les fichiers de données d'observation à partir des données de la Banque HYDRO.

- *Diagnostic du modèle*

Il faut ensuite déterminer l'écart à corriger entre les hauteurs d'eau en sortie de la simulation T2D de référence et les données d'observations in-situ et spatiales. Les courbes de tarage observées et simulées sont elles aussi à comparer.

J'ai donc réalisé une première simulation dite de référence où les paramètres d'entrée sont considérés comme les paramètres par défaut.

Le diagnostic du modèle se fait alors en trois temps, en comparant les données observées et les données en sortie de la simulation de référence pour :

- les séries temporelles de hauteurs d'eau aux stations d'intérêt,
- les cartes d'inondations,
- les courbes de tarage aux stations amont.

Les écarts à corriger entre les simulations et les observations sont alors connus.

Les diagnostics pour les modèles de la Garonne et de la Seine sont respectivement présentés dans les parties 3.1.1 et 3.2.1.

Dans le cas de la Garonne, j'ai également fait des simulations en régime permanent pour établir les courbes de tarage issues de T2D (Figure 14).

- *Analyse de sensibilité*

Dans le but de réduire les écarts constatés précédemment et d'améliorer les modèles, j'ai ensuite mené une analyse de sensibilité sur chacun d'eux pour déterminer la paramétrisation initiale idéale du modèle. Certains paramètres ont donc été modifiés et les simulations associées comparées à la simulation de référence pour déterminer si les paramètres modifiés permettent d'améliorer le modèle ou non.

Le modèle de la Seine couvrant une zone beaucoup plus importante pour une durée de crue supérieure, les temps de simulations sont bien plus longs. Avec l'arrivée tardive de ce modèle au cours de mon stage, je n'ai donc pas pu réaliser autant de simulations sur ce modèle que sur celui de la Garonne. Les résultats présentés seront donc essentiellement ceux du modèle Garonne.

Bien que non traitée au cours de mon stage, l'assimilation de données [3] intervient à la suite de l'analyse de sensibilité pour compléter cette première correction.

## 1.4 Outils et matériels

La mise en données des modèles a été faite avec T2D, via des scripts Python sur un environnement Linux. Les simulations sont lancées sur ce même environnement et tournent sur le cluster HPC Nemo (300 Tflop/s crête) du CERFACS.

La partie visualisation/post-traitement est ensuite faite à partir de scripts Python que j'ai développés et les fichiers de sortie pkl pour les séries temporelles/courbes de tarage. J'ai ensuite créé les cartes d'inondation avec le logiciel QGIS, à partir des fichiers de sortie slf ou shp, des cartes FloodML, et d'un algorithme développé par T.H.Nguyen.

L'ensemble des scripts python développés au cours de ce projet par chaque membre de l'équipe FloodDAM a été déposé sur GitLab afin de faciliter l'accès des scripts à tous. Il en va de même avec l'ensemble des fichiers de données des modèles Seine et Garonne.

## 2 Cas d'étude

### 2.1 Présentation du tronçon et des stations

#### Garonne

La zone étudiée correspond au tronçon de la Garonne compris entre Tonneins et La Réole, ce qui représente environ 50 km.

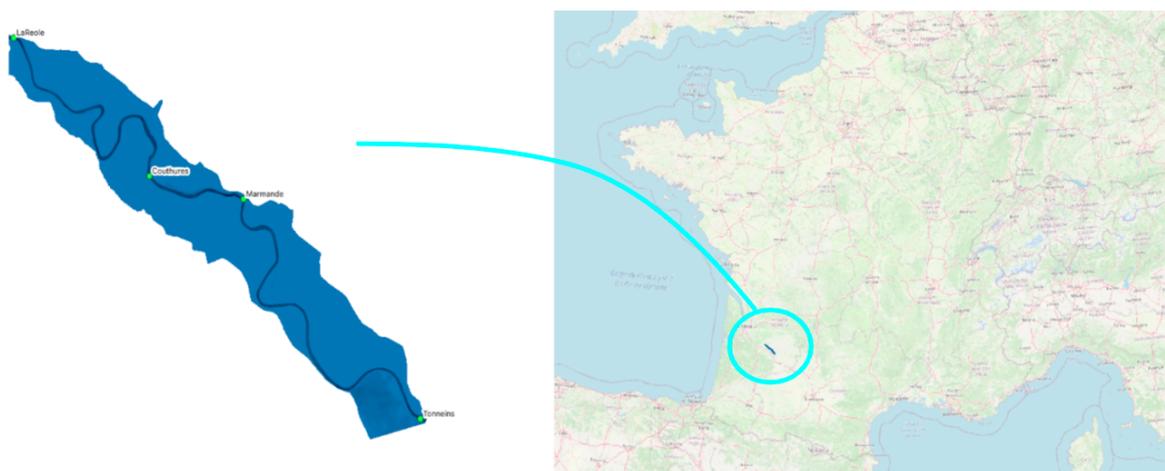


FIGURE 2 – Tronçon de la Garonne étudié

Les stations Tonneins, Marmande et La Réole sont gérées par le réseau Vigicrues. La station Tonneins qui se situe en aval de la confluence avec le Lot n'existe que depuis le 1er Janvier 1989. Avant cette date, les observations étaient mesurées à la station Mas d'Agenais qui a été fermée le 1er Décembre 1988. Une nouvelle station Vortex.io (<https://elk.vortex-io.report/s/cnes/>) a été installée à Couthures-sur-Garonne le 20 février 2021, à la suite des crues de Janvier-Février 2021 pour permettre de nouvelles mesures de hauteur d'eau.

Le tronçon de la Garonne étudié présente divers aménagements tels que des endiguements et des déversoirs dans le but de contenir les crues de la Garonne.

Les données relatives aux stations présentes sur le tronçon étudié sont synthétisées dans la Table 1.

Station	Code	Système de coordonnées de référence <sup>1</sup>	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	Altitude du 0 de l'échelle <sup>3</sup> (m)	Altitude du fond de la rivière <sup>4</sup> (m)
Tonneins	O9000010	Lambert Sud France	437850.0	234106.6	19.15	15.8799
Mas d'Agenais	O9060010	Lambert II Étendu	431485	1936810	17	
Marmande	O9090010	Lambert Sud France	426633.21	246704.33	12.92	12.6227
		Lambert II Étendu	426502	1946707		
La Réole	O9190010	Lambert Sud France	412138	255882	6.251	-0.8374
		Lambert II Étendu	411469	1955818		
Couthures-sur-Garonne		Lambert Sud France	420722.14	247974.72	5	9.4839
		WGS 84	44.50967	0.08147		

<sup>1</sup> Lambert II Étendu EPSG :27572 / Lambert Sud France EPSG :27563 / WGS 84 EPSG :4326

<sup>2</sup> source : hubeau

<sup>3</sup> NGF IGN69 / source : SPC et banque HYDRO

<sup>4</sup> valeurs extraites à partir de la géométrie du modèle

<sup>5</sup> Mesures fournies : altitudes référencées NGF

TABLE 1 – Données stations - Garonne

A partir des fiches stations Vigicrues et du rapport de EDF R&D [5], nous connaissons les informations suivantes sur le débit à Tonneins :

- Débit moyen annuel : environ  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Débit de plein bord dans le lit mineur :  $2550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Gamme de débit d'intérêt : entre  $2600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (seuil d'alerte) et  $6000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Dans le cadre de la modélisation de la Garonne avec Telemac 2D, les crues de Décembre 1981 et Janvier-Février 2021 ont été utilisées pour validation. Les périodes de retour ayant été calculées par la DREAL Midi-Pyrénées [6] pour la station de Tonneins (Table 2) on peut respectivement classer les crues de 1981 et de 2021 comme des crues décennale et quinquennale.

Fréquence	QIX <sup>1</sup> (m <sup>3</sup> /s)	Intervalle de confiance à 95%
Biennale	3500.0	[3300.0 ;3700.0]
Quinquennale	4800.0	[4500.0 ;5100.0]
Décennale	5700.0	[5300.0 ;6100.0]
Vicennale	6500.0	[6100.0 ;7100.0]
Cinquantennale	7500.0	[7000.0 ;8300.0]

<sup>1</sup> calcul de crue utilisant les débits instantanés maximaux mensuels en entrée

TABLE 2 – Période de retour - Tonneins[6]

## Seine

La zone étudiée correspond au tronçon de la Seine compris entre Bray-sur-Seine et Poses, soit environ 280km, ainsi que ses affluents (voir Figure 3) :

- l'Oise sur 55km depuis Creil,
- la Marne sur 110km depuis Ferté-sous-Jouarre,
- et l'Yonne sur 30km depuis Pont-sur-Yonne

Le linéaire total de la zone d'étude est d'environ 475km (*Source : Géoportail*).



FIGURE 3 – Tronçon de la Seine étudié

L'ensemble de la zone étudiée comprend 25 stations Vigicrues avec 15 stations appartenant à la Seine, 3 stations à l'Oise, 4 à la Marne, 1 à l'Yonne, 1 au Grand-Morin et 1 à l'Orge. Les stations amonts de l'Yonne, la Seine, la Marne et l'Oise sont respectivement les stations de Courlon, Bray-sur-Seine, Meaux et Creil.

Les données relatives aux stations présentes sur le tronçon étudié sont synthétisées dans la Table 3.

Tronçon	Station	Code	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	Altitude du 0 de l'échelle <sup>3</sup> (m)	Altitude du fond de la rivière <sup>4</sup> (m)
Seine	Poses	H3220010	571752.218	6913708.532		1.39987643
Seine	Vernon	H8100021	589577.174	6889481.381	9.16	6.05434820
Seine	Limay	H7940020	606699.461	6877747.983	12.72	10.34264511
Seine	Poissy	H7900010	629554.051	6871176.967	17.02	11.99681087
Seine	Chatou	H5940010	638627.620	6866210.497	20.37	16.23656469
Seine	Suresnes	H5920050	643733.384	6863603.418	21.22	18.63054573
Seine	Paris	H5920010	653473.967	6860729.431	25.92	21.36885189
Seine	Alfortville	H4340020	657175.033	6853537.922	29.46	23.60528097
Seine	Corbeil-Essonnes	H3950010	661968.973	6834931.013	31.25	28.96741342
Seine	St-Fargeau-Ponthierry	H3930020	666624.857	6826455.462	34.72	31.93798267
Seine	Melun	H3930030	674717.938	6826189.481	36.01	34.30270241
Seine	St-Mammès	H2900030	685729.677	6809972.990	40.72	39.21401477
Seine	Montereau	H2900010	696664.717	6809864.992	45.68	41.75255065
Seine	Bazoches-lès-Bray	H1940020	714008.836	6813858.996	52.59	48.00380697
Seine	Bray-sur-Seine	H1900020	717300.8851	6813121.9820	51.59	49.80056970
Oise	Pontoise	H7861020	633981.452	6882645.743	20.39	16.06698694
Oise	L'Isle-Adam	H7841020	642549.706	6891555.465	20.42	19.97618386
Oise	Creil	H7611010	660761.553	6906305.246	26.25	21.59158904
Marne	Créteil	H5841070	660838.786	6856273.534	28.86	23.52945229
Marne	Gournay-sur-Marne	H5841020			33.05	38.73876614
Marne	Chalifert	H5821010	683026.901	6866447.974	37.96	31.33332499
Marne	Meaux	H5621010	691381.765	6872337.468	42.77	38.55982488
Yonne	Courlon	H2721010	711648.217	6803401.875	53.72	52.19877198
Grand Morin	Couilly-Pont-aux-Dames	H5752040			43.70	45.78003424
L'Orge	Morsang-sur-Orge	H4252010			34.72	40.

<sup>2</sup> source : shapefile<sup>3</sup> NGF IGN69 / source : SPC et banque HYDRO<sup>4</sup> valeurs extraites à partir de la géométrie du modèle

TABLE 3 – Données stations - Seine

## 2.2 Mise en données

### 2.2.1 Données géométriques et hydrauliques

La géométrie et le modèle Telemac 2D ont été fournis par EDF R&D (dept. LNHE) pour la Garonne et Artelia pour la Seine.

#### Garonne

Le domaine d'étude est composé de 82 116 cellules triangulaires et de 41 416 noeuds, et il est décrit par un ensemble de mailles triangulaires qui permettent de partitionner le domaine en 3 zones (Figure 4) :

- le lit mineur avec des mailles d'une taille maximale de 80m orientées dans le sens de l'écoulement (en bleu clair),
- le lit majeur avec des mailles de 150m déstructurées (en bleu foncé),
- les digues avec des mailles d'une taille maximale de 40m, plus raffinées (en noir).

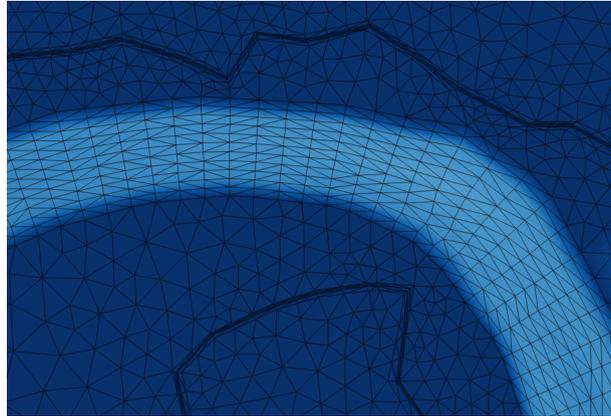


FIGURE 4 – Maillage en fonction des zones - Garonne

De même que le maillage, le coefficient de frottement est lui aussi défini différemment en fonction des zones, permettant de représenter un écoulement différent de la rivière. Dans le lit majeur on fixe  $K_s=17 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ , tandis que le lit mineur est réparti en trois zones (Figure 5) :

- Tonneins – Aval de Mas d’Agenais :  $K_s=45$
- Aval de Mas d’Agenais – Amont de Marmande :  $K_s=38$
- Amont de Marmande – La Réole (station Marmande incluse) :  $K_s=40$

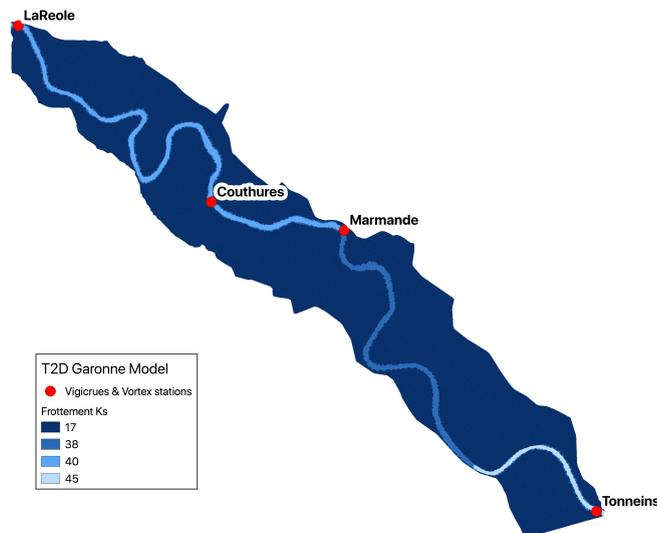


FIGURE 5 – Coefficient de frottement en fonction des zones - Garonne

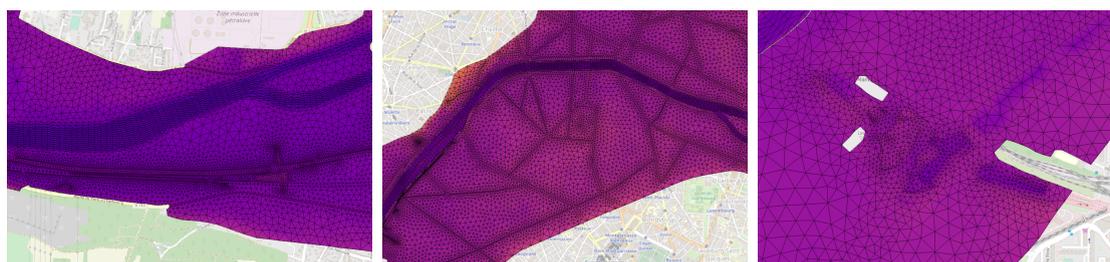
Le coefficient de frottement  $K_s$  est utilisé comme paramètre de calage. Il permet d’ajuster le modèle en prenant en compte des erreurs de simplification de la bathymétrie, du réseau hydraulique, en plus de sa valeur physique. Sa valeur n’est donc pas toujours exacte.

## Seine

Le domaine d'étude de la Seine est bien plus important et complexe que celui de la Garonne, avec 1 116 536 cellules triangulaires et 581 102 noeuds.

La dimension des mailles dépend de la zone, avec des mailles déstructurées dans le lit majeur et des mailles plus raffinées et orientées dans le sens de l'écoulement dans le lit mineur.

Il existe cependant des cas particuliers dans le lit majeur avec des zones plus raffinées comme certaines routes, autoroutes, tunnels, zones dites inondables, zones de niveau plus bas, usines, routes situées entre deux points d'eau, stations d'épuration (Figure 6). Au contraire, les chenaux et les plans d'eau ont des mailles plus importantes que la normale (Figure 7). Il existe également des zones non maillées comme les gares, certains tronçons de chemin de fer, les seuils, barrages, routes et zones d'altitude plus élevée, digues collées au cours d'eau (Figure 8).



(a) Autoroutes

(b) Routes

(c) Tunnel

FIGURE 6 – Zones au maillage plus raffiné - Seine



(a) Chenaux

(b) Plans d'eau

FIGURE 7 – Zones au maillage moins raffiné - Seine

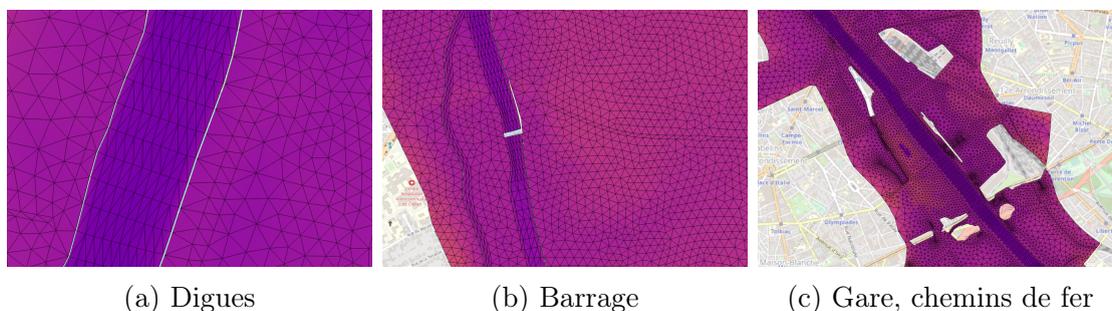


FIGURE 8 – Zones non maillées - Seine

## 2.2.2 Données d'observations in situ

Les observations in situ dont nous disposons pour les crues de la Garonne (Décembre 1981 et Janvier-Février 2021) ont été fournies par les SPC Garonne-Tarn-Lot (GTL) et Garonne-Adour-Dordogne (GAD), et sont issues de Vigicrue pour la Seine. Une partie de mon travail a été d'extraire les données Vigicrues disponibles pour la Seine et de les rendre compatibles avec les scripts de lecture déjà existants. Les données relatives aux épisodes de crue contiennent les hauteurs d'eau exprimées par rapport au zéro de l'échelle de mesure (Hobs) et le débit (Q) pour une fréquence élevée (5 à 15min pour la Garonne, 15min à quelques heures pour la Seine). La surface libre  $Z$  est obtenue à partir des observations de hauteur d'eau  $H_{obs}$  et de l'altitude du zéro de l'échelle  $Z_{0_{echelle}}$  :  $Z = H_{obs} + Z_{0_{echelle}}$

Les courbes de tarage aux différentes stations (Figure 9 pour la Garonne) sont construites à partir d'un nombre limité de jaugeages (Z,Q) différents, réalisés par les SPCs, SCHAPI, ou EDF au fil des années.

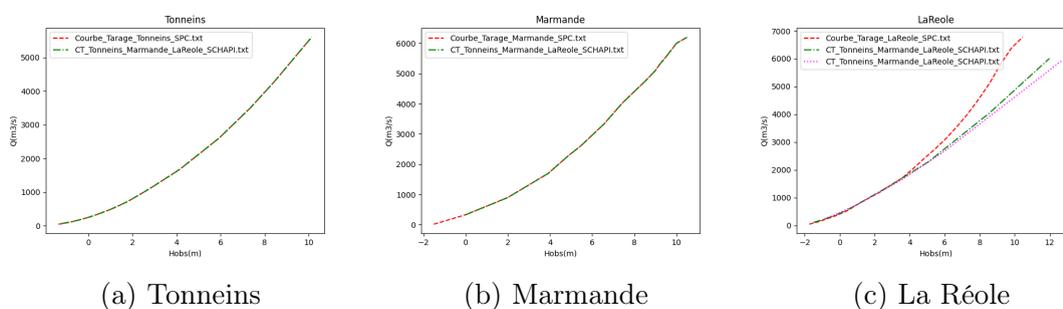


FIGURE 9 – Courbes de tarage aux stations Vigicrues en (Q, Hobs) - Garonne  
Source : SPC, SCHAPI

### 2.2.3 Données d'observations satellitaires

Les données satellites issues de Sentinel-1 sont traitées par les algorithmes de Machine Learning du CNES afin de produire les cartes FloodML de l'étendue des crues sous la forme de masques binaires [1]. La base de données d'apprentissage est créée à partir d'un algorithme de Random Forest sur des pixels d'eau sélectionnés à l'aide d'occurrences élevées dans le produit Global Surface Water Occurrence [7]. Sur la carte présentée Figure 10 les pixels blancs représentent les zones d'eau.

Les données SAR (radar à synthèse d'ouverture) sont particulièrement intéressantes car elles sont disponibles de jour comme de nuit, et ce quelque soit la météo [8]. Les zones de haute végétation et les bâtiments ne sont toutefois pas correctement identifiés sur les cartes FloodML, il faut le prendre en compte lors de la comparaison avec les sorties T2D. Cela peut s'expliquer par l'occlusion du signal SAR par les couronnes d'arbres pour les zones de haute végétation et par l'effet "diffusion à double rebond" pour les zones urbaines.

L'orbite du satellite ne permet pas non plus d'obtenir les données pour l'ensemble de la zone simulée avec T2D. Comme on peut le voir sur la Figure 10, la partie nord-ouest du domaine n'est pas représentée par la carte FloodML. Et la taille des pixels étant inversement proportionnelle au temps de revisite de l'orbite [8], la fréquence des cartes haute résolution est faible.

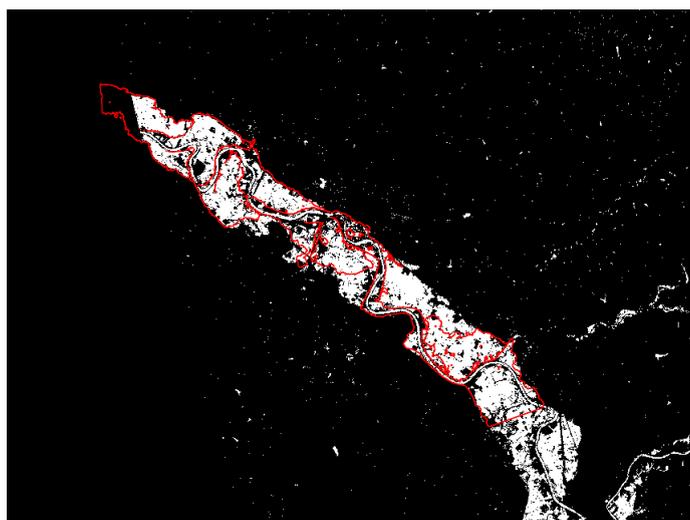


FIGURE 10 – Carte d'inondation FloodML vs T2D  
Sans modification - Garonne 03/02/2021

Contour rouge : simulation T2D // Masque : carte FloodML (pixel blanc : inondé)

## 2.2.4 Conditions limites

### Garonne

L'hydrogramme de référence que nous utilisons pour la crue de Décembre 1981 (Annexe B - Figure 34) a été fourni par EDF et l'hydrogramme utilisé pour la crue de Janvier-Février 2021 (Figure 16) a été généré à partir des observations Hobs et de la courbe de tarage à Tonneins fourni par le SPC (Figure 9(c) - courbe rouge).

Nous utiliserons les hydrogrammes de ces deux événements à Tonneins comme condition limite amont.

Une courbe de tarage en  $(Q,Z)$  avec  $Z$  la côte de la surface libre sera utilisé comme condition limite aval pour forcer le modèle Telemac à La Réole (Figure 11).

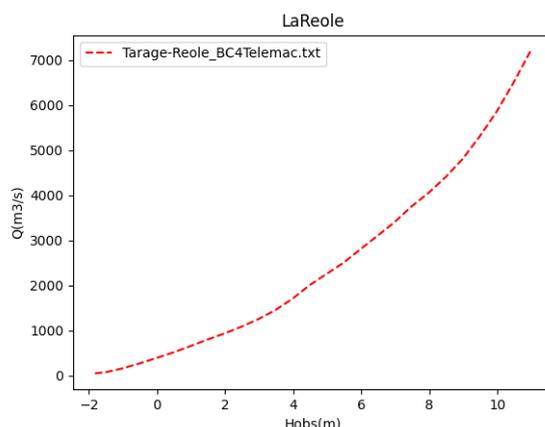


FIGURE 11 – Courbe de tarage utilisée comme condition limite à La Réole - Garonne

### Seine

Le tronçon de la Seine étudié comporte 3 affluents, il y a donc 4 conditions limites amont sous la forme d'hydrogrammes (Figure 12). Celles-ci sont situées à Bray-sur-Seine, Creil, Ferté-sous-Jouarre et Pont-sur-Yonne.

Les différentes courbes  $Q(1)$ ,  $Q(2)$ ,  $Q(10)$  et  $Q(24)$  n'ont pas pu être attribuées à leur station respective à ce jour. Le fichier *bounds.txt* dont les hydrogrammes sont issus ne contient pas le nom des stations correspondantes et l'ensemble des simulations permettant de le déterminer n'ont pas encore été réalisées.

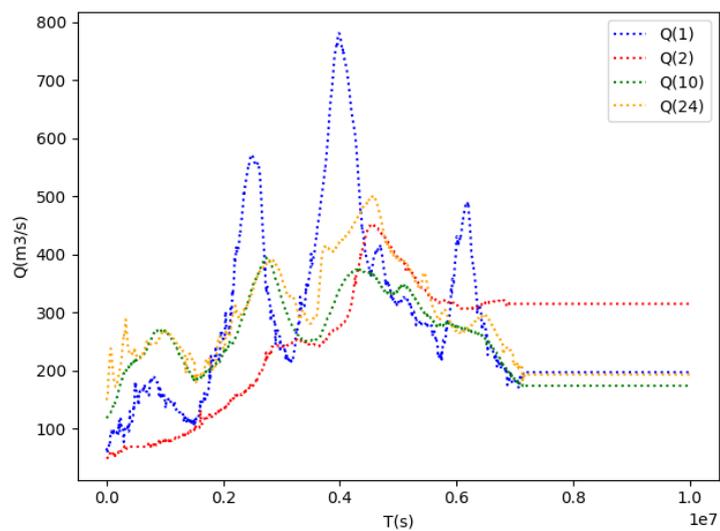


FIGURE 12 – Comparaison des hydrogrammes de crues issus du fichier bounds.txt - Seine 2021

### 3 Résultats

Comme décrit dans la partie 1.3, j'ai dans un premier temps établi un diagnostic de chaque modèle en comparant les sorties de Telemac 2D avec les données in situ dont nous disposons ainsi qu'avec les observations spatiales (uniquement disponibles pour la crue de Janvier-Février 2021).

J'ai ensuite modifié un certain nombre de paramètres, et comparé les nouvelles sorties de Telemac 2D avec les simulations de référence.

#### 3.1 Garonne

Seuls les résultats issus des simulations pour la crue de Janvier-Février 2021 seront présentés par la suite. Les figures présentant les résultats des simulations de la crue de 1981 sont regroupées en Annexe B.

##### 3.1.1 Diagnostic du modèle

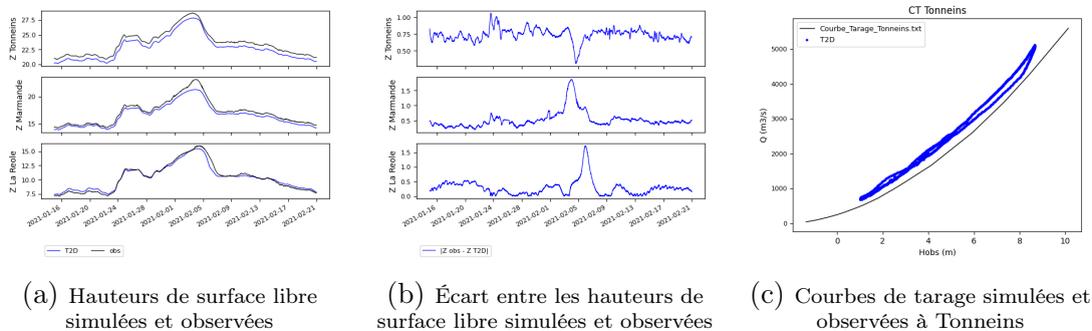


FIGURE 13 – Simulation T2D de référence - Garonne 2021

En comparant les observations avec les sorties de la simulation T2D (Figure 13) on remarque un biais d'environ 70cm à Tonneins, de 40cm à Marmande et d'environ 50cm à La Réole. Les écarts entre l'observation et la simulation sont maximums au niveau du pic de crue. La courbe de tarage simulée est encore supérieure à la courbe de tarage observée d'environ  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

##### *Diagnostic en régime permanent*

On cherche à présent à exprimer les courbes T2D aux 3 stations. J'ai pour cela réalisé un ensemble de simulations en régime permanent, pour des débits compris entre  $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

et  $7500m^3.s^{-1}$  avec un pas de  $150m^3.s^{-1}$ .

La courbe de tarage T2D (courbe bleu) sur l'évènement est comparée à celles construites à partir des observations (Figure 9) pour chaque station Vigicrue (Figure 14).

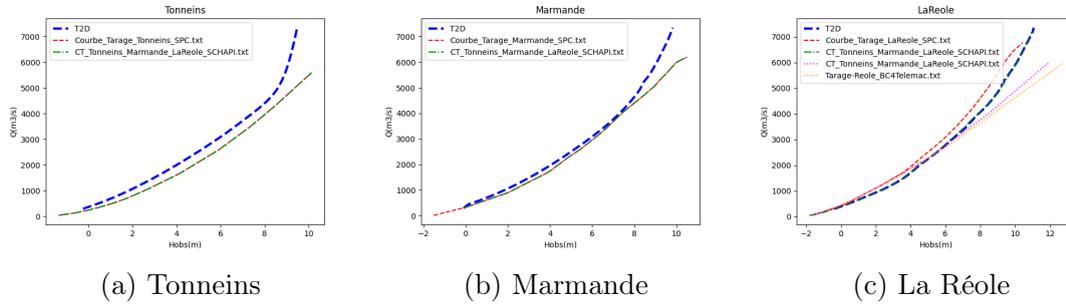


FIGURE 14 – Courbes de tarage simulée par T2D et observées aux stations Vigicrues en (Q, Hobs) - Garonne

### 3.1.2 Analyse du modèle

La Table 4 regroupe l'ensemble des modifications faites pour les crues de Décembre 1981 et Janvier-Février 2021.

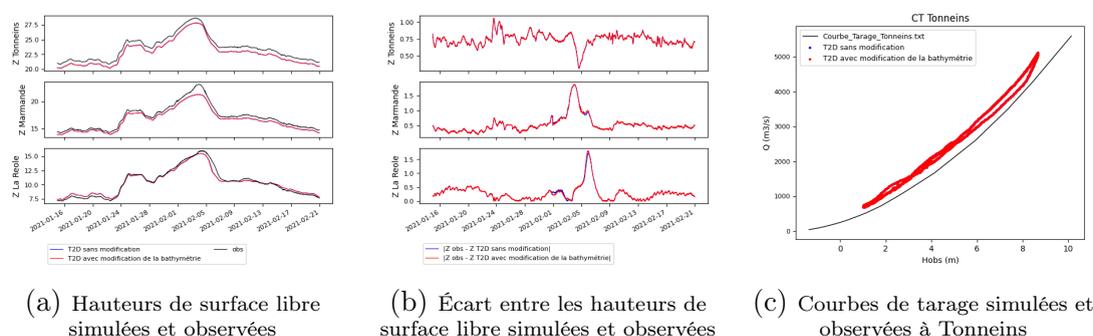
Paramètres étudiés	Décembre 1981	Janvier-Février 2021
Bathymétrie	✓	✓
Hydrogramme	✓	✓
Maillage	✓	✗
Fichier .cas	✓	✓
Pas de temps	✓	✗
Condition limite amont	✓	✓
Profil de vitesse	✗	✓

TABLE 4 – Paramètres étudiés en fonction de la crue - Garonne

### Bathymétrie

Dans un premier temps, la bathymétrie a été localement modifiée par EDF [5] afin d'améliorer le passage des digues et zones à fort gradient de bathymétrie.

La Figure 15 (b) nous permet de constater une légère modification de quelques centimètres pour la hauteur de surface libre au niveau du pic de crue à Marmande et à La Réole. Les simulations sont quasiment identiques en dehors de ces points, la courbe de tarage à Tonneins reste bien entendu inchangée.



(a) Hauteurs de surface libre simulées et observées

(b) Écart entre les hauteurs de surface libre simulées et observées

(c) Courbes de tarage simulées et observées à Tonneins

FIGURE 15 – Simulation avec modification de la bathymétrie - Garonne 2021

## Hydrogramme

L'hydrogramme de crue a ensuite été modifié pour les crues de 1981 et 2021. La stratégie de modification n'est pas la même pour les deux évènements. Il s'agit d'augmenter l'apport d'eau au niveau du pic de crue [5] pour l'évènement de 1981 (Annexe B - Figure 34) et d'utiliser les observations et la courbe de tarage simulée par T2D afin de reconstruire un hydrogramme pour la crue de 2021. La modification apportée à l'évènement de 2021 aurait aussi pu être réalisée pour 1981.

Pour la crue de 2021, j'ai créé l'hydrogramme modifié (Figure 16) afin de faire correspondre la simulation T2D à Tonneins avec les observations puis converti les observations de hauteur d'eau à Tonneins en débit à travers la courbe de tarage simulée par T2D à Tonneins (Figure 14(a)). Ces observations sous forme de débit constituent l'hydrogramme utilisé pour les simulations suivantes.

Comme on pouvait s'y attendre, le forçage de l'hydrogramme à Tonneins (Figure 17) donne des résultats parfaits pour Tonneins avec une diminution de l'écart d'environ 0,7m. Les résultats à Marmande sont eux aussi améliorés, avec une diminution de l'écart de 1,5m au pic de crue. Cependant, les résultats ne sont pas aussi concluants à La Réole avec une augmentation de l'écart pouvant atteindre jusqu'à 1,5m au niveau du pic de crue.

Il faut toutefois nuancer les résultats précédents. En observant les cartes d'inondations (Figure 18), on peut voir que la simulation avec modification de l'hydrogramme de crue a tendance à sur-inonder la zone (zones bleues).

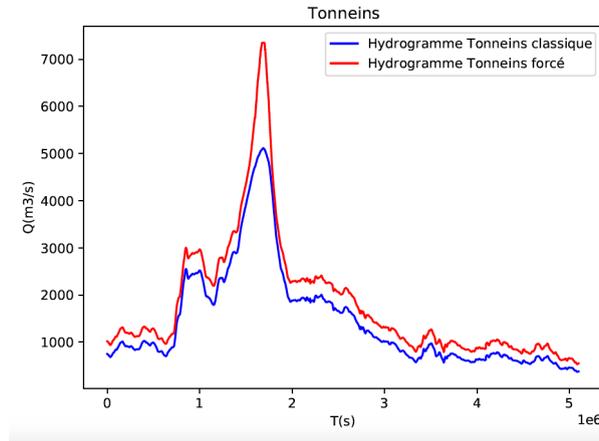


FIGURE 16 – Comparaison des hydrogrammes de crues mesuré et issu de la CT T2D - Garonne 2021

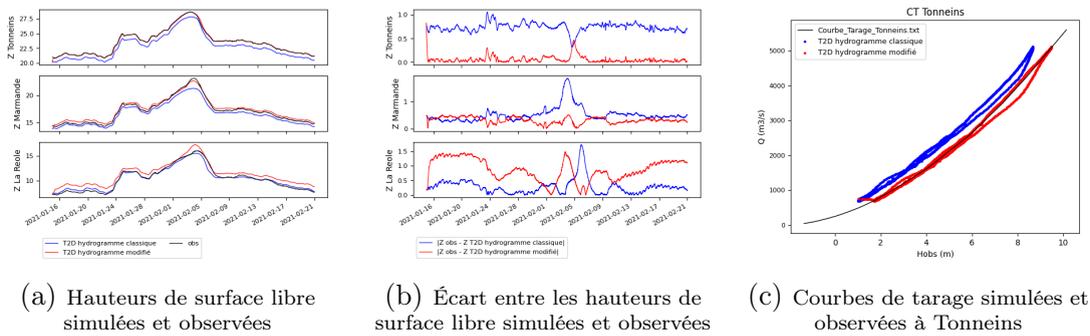


FIGURE 17 – Simulation avec modification de l'hydrogramme de crue - Garonne 2021



(a) Simulation sans modification de l'hydrogramme (b) Simulation avec modification de l'hydrogramme

FIGURE 18 – Cartes d'inondation FloodML vs T2D

Modification de l'hydrogramme de crue par forçage - Garonne 03/02/2021  
 Contour rouge : simulation T2D // Masque : carte FloodML (pixel blanc : inondé)

### Raffinement du maillage

Les simulations ont été refaites afin de réaliser une convergence en maillage. La dimension des mailles a été réduite par 2 pour le maillage haute résolution (HR) et par 4 pour le maillage très haute résolution (VHR).

### Fichier .cas

J'ai modifié le fichier .cas (fichier des paramètres TELEMAC) que nous utilisons pour le faire correspondre avec celui décrit en Annexe D de la note technique fournie par EDF[5].

Comme pour la crue de 1981 (Annexe B - Figure 38), les résultats (Figure 19) étaient un peu meilleurs avant de modifier les paramètres du fichier .cas. Avec la modification du fichier .cas, on peut aussi voir que les zones d'inondations (Figure 20) simulées par T2D sont légèrement moins étendues et représentatives des observations (zone bleue).

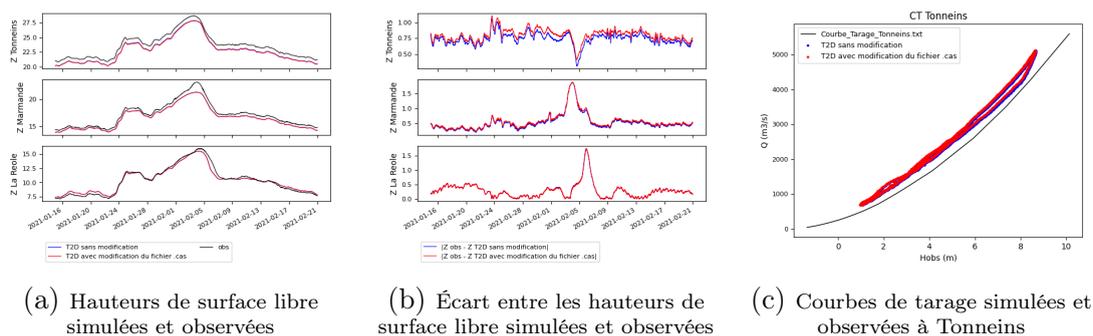


FIGURE 19 – Simulation avec modification du fichier .cas - Garonne 2021

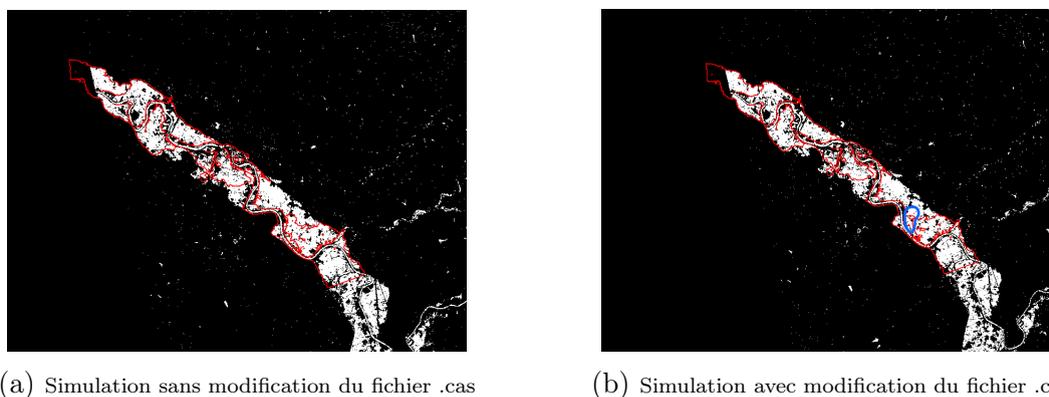


FIGURE 20 – Cartes d'inondation FloodML vs T2D  
Modification du fichier .cas - Garonne 03/02/2021

Contour rouge : simulation T2D // Masque : carte FloodML (pixel blanc : inondé)

## Modification du pas de temps

Pour ces nouvelles simulations, j'ai réduit le pas de temps de 5s à 3s puis 1s dans le fichier .cas.

## Description de la Condition limite amont

La condition limite amont que nous utilisons précédemment imposait de faire rentrer la même quantité d'eau dans le lit mineur et le lit majeur. J'ai donc modifié les fichiers d'entrée pour prescrire deux conditions limites différentes dans le lit mineur et le lit majeur. Le débit précédemment prescrit en entrée du modèle est maintenant séparé selon différentes répartitions (Figure 21) :

- 80% dans le lit mineur et 20% dans le lit majeur,
- 60% dans le lit mineur et 40% dans le lit majeur,
- a minima le débit de plein bord (2550 m<sup>3</sup>/s) dans le lit mineur et le reste du débit total dans le lit majeur.

La Figure 21 présente les différentes répartitions du débit initial entre le lit majeur (...) et le lit mineur (—) pour 2021.

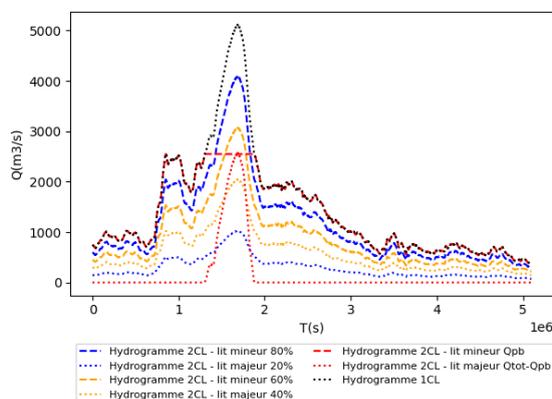


FIGURE 21 – Comparaison des hydrogrammes à deux conditions limites - Garonne 2021

Là encore, on n'observe aucune modification à Marmande et La Réole (Figure 22), quelque soit la répartition du débit imposée en entrée du modèle. Il y a une très légère amélioration, de l'ordre de quelques centimètres, à Tonneins lorsqu'on impose 60% du débit total dans le lit mineur. Le seuil de 5cm des cartes d'inondations ne permet pas de remarquer de différences notables entre les simulations (Figure 23). On peut toutefois se demander s'il y aurait une différence avec un seuil plus bas.

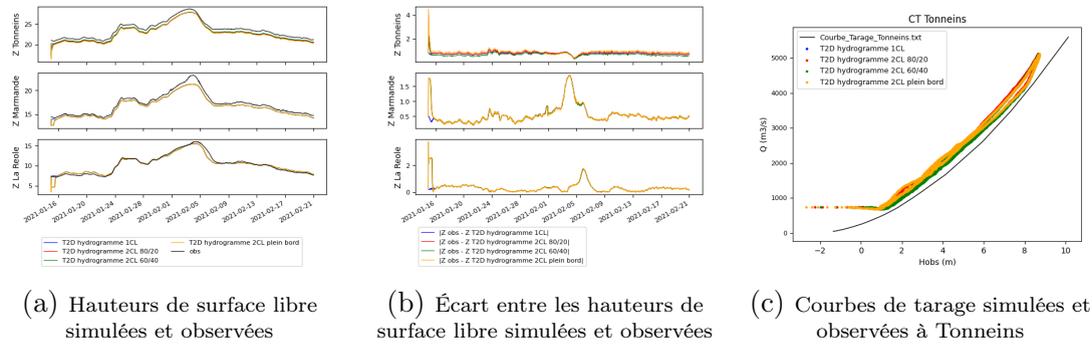


FIGURE 22 – Simulation avec modification des conditions limites amonts - Garonne 2021

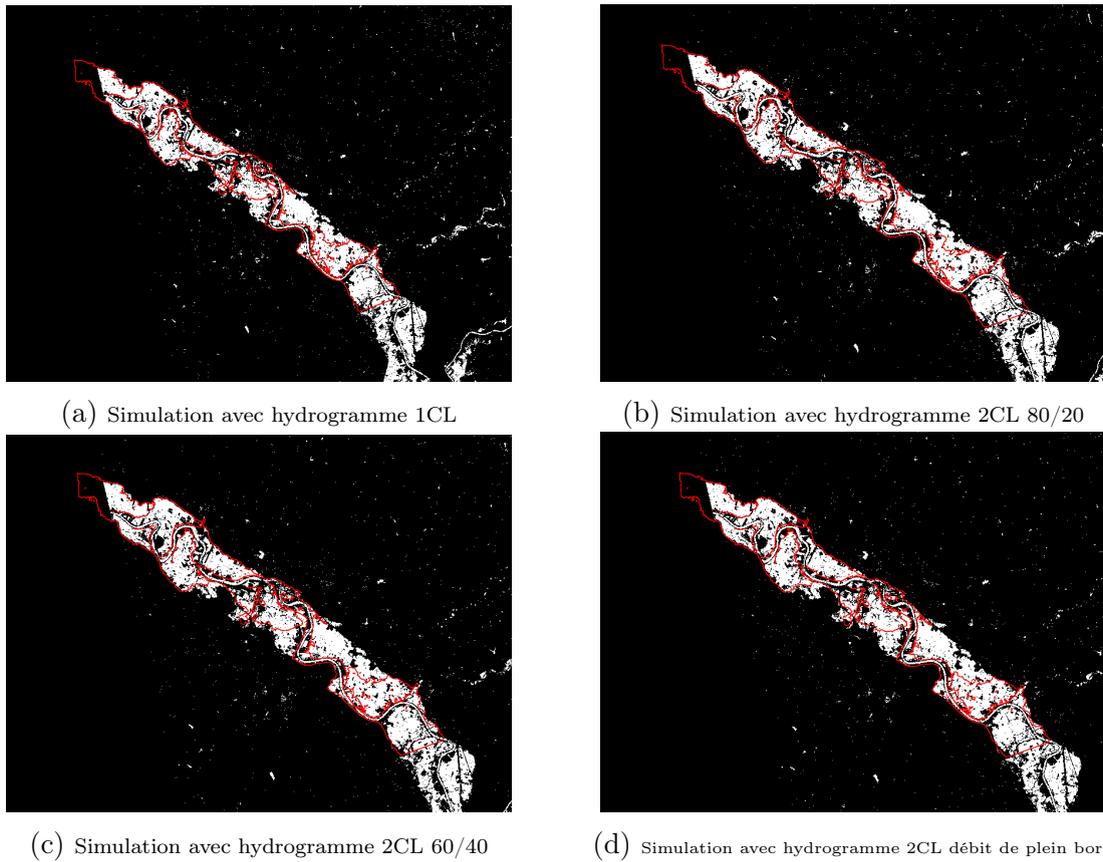


FIGURE 23 – Cartes d'inondation FloodML vs T2D

Modification de l'hydrogramme de crue 2CL - Garonne 03/02/2021

Contour rouge : simulation T2D // Masque : carte FloodML (pixel blanc : inondé)

En conclusion, l'utilisation de 2 conditions limites au lieu d'une seule ne permet pas d'améliorer le modèle. Cette modification n'est pas pertinente pour le modèle de la Garonne Marmandaise.

## Profil de vitesse

J'ai ensuite modifié le profil de vitesse dans le fichier .cas, pour passer d'un profil de vitesse uniforme (=1) à un profil de vitesse parabolique (=4). Cette modification du profil de vitesse permet d'avoir de meilleurs résultats à Tonneins (Figure 24), d'environ 20cm, mais n'apporte aucune modification à Marmande ou La Réole.

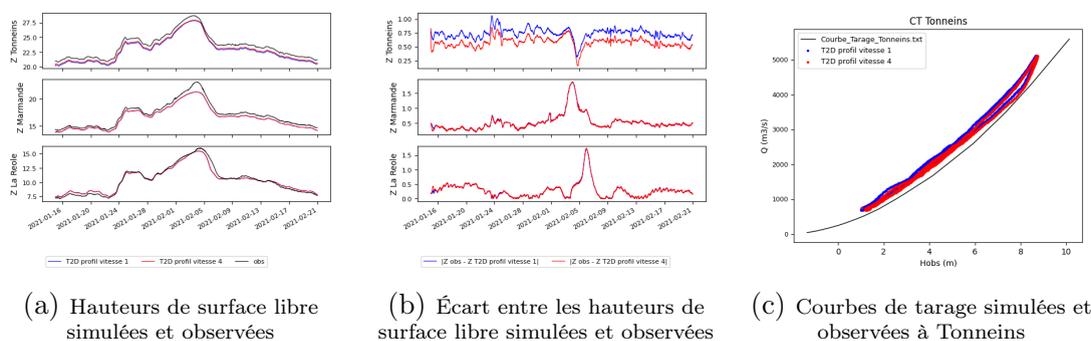


FIGURE 24 – Simulation avec modification du profil de vitesse - Garonne 2021

Il semblerait que la simulation avec le profil de vitesse 4 sous inonde légèrement la zone par rapport à la simulation (zone bleue, Figure 25) avec le profil de vitesse 1.

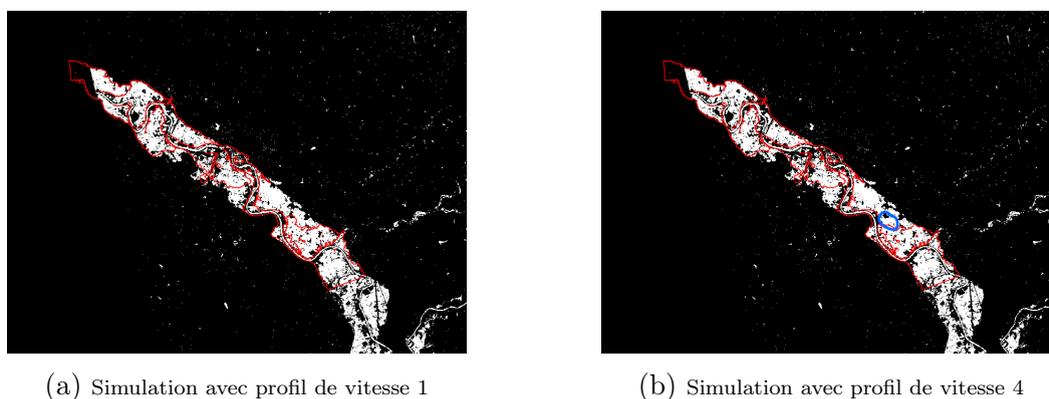


FIGURE 25 – Cartes d'inondation FloodML vs T2D  
Modification du profil de vitesse - Garonne 03/02/2021

Contour rouge : simulation T2D // Masque : carte FloodML (pixel blanc : inondé)

### 3.1.3 Conclusion

L'ensemble des modifications que nous avons pu apporter n'a pas permis d'améliorer significativement le modèle T2D de la Garonne. On remarque que le modèle n'est pas capable de représenter correctement la dynamique dans le lit mineur aux stations Vigicruces

et dans les plaines d'inondations. Cela est dû au fait que le modèle a été construit à partir des observations disponibles aux trois stations Vigicrues seulement et dans un objectif de hautes eaux uniquement.

Les divergences entre le modèle et les observations peuvent avoir plusieurs sources :

- les données spatiales n'étant pas disponibles le modèle a initialement été construit pour obtenir des bons résultats aux stations Vigicrues,
- les mécanismes d'évacuation (évapotranspiration, infiltration...) des zones inondées ne sont pas tous représentés par T2D au cours de la décrue,
- une loi de tarage sous-estimant le débit à Tonneins pour les fortes crues, et surestimant le débit total de la crue à Marmande,
- erreurs de modèle : la représentation des ouvrages, de la géométrie, des zones de frottements...
- erreurs liées aux incertitudes des observations spatiales non étudiées [2]

## 3.2 Seine

### Diagnostic du modèle

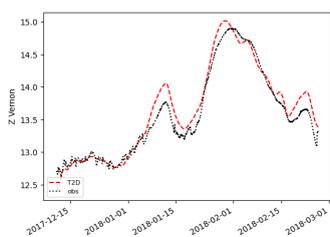
Les observations issues de Vigicrues sont comparées aux sorties de la simulation T2D (Figure 32). Certaines stations n'apparaissent pas dans les résultats car nous n'avons pas pu déterminer leur position exacte dans le lit mineur. C'est le cas des stations Gournay-sur-Marne, Couilly-Pont-aux-Dames, Morsang-sur-Orge et Poses. On remarque que les données d'observations ne couvrent pas l'ensemble de la crue pour toutes les stations (Figure 32 - cercles jaunes).

Les résultats sont sensiblement bons, à l'exception de la station de Bazoches-lès-Bray. Les observations en escalier s'expliquent par la proximité de la station à une écluse. Il est tout à fait possible que la station ne soit pas dans le lit mineur mais dans l'écluse. La hauteur d'eau n'ayant pas été simulée au même point, cela expliquerait la différence. Il se peut aussi que la hauteur ait été simulée non pas dans le lit mineur mais dans le lit majeur ou entre le lit mineur et l'écluse.

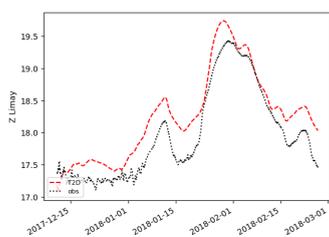
Dans l'ensemble, l'écart entre les observations et les simulations ne dépasse pas 0,5m, sauf pour la station de St-Mammès où l'écart atteint 0,75m pour le premier pic.

On remarque que les stations proches de Paris affichent les meilleurs résultats : Paris, Chatou, Corbeil-Essonne, Créteil et Alfortville, à l'exception de la station Suresnes pour

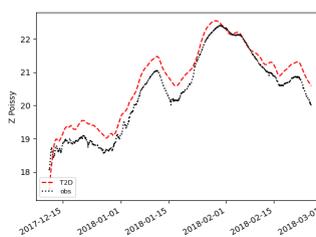
laquelle la hauteur simulée est constante les quinze premiers jours. Cette station étant en amont d'un barrage, il est possible que l'eau ait été retenue sur les quinze premiers jours de la crue. Un arrêté publié par le préfet des Hauts-de-Seine [9] stipule que la retenue normale théorique du bief est de 26,72m NGF (cohérent avec la simulation), et que les barrages sont susceptibles d'être effacés en période de crue lorsque le débit dépasse 850m<sup>3</sup>/s, ce qui expliquerait la hauteur constante au début de la crue.



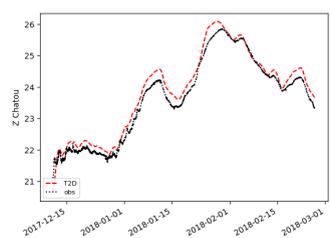
Vernon (Seine)



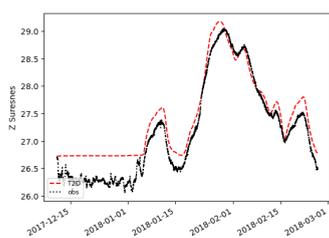
Limay (Seine)



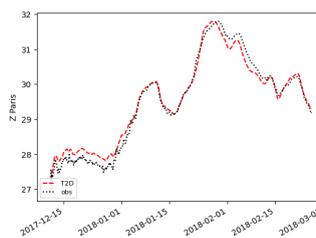
Poissy (Seine)



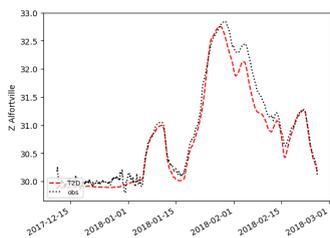
Chatou (Seine)



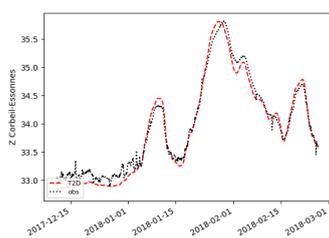
Suresnes (Seine)



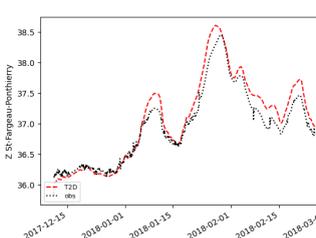
Paris (Seine)



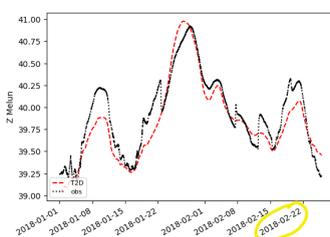
Alfortville (Seine)



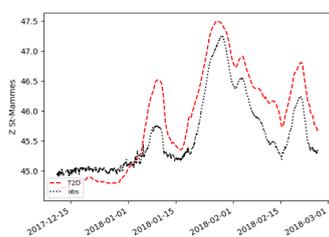
Corbeil-Essonnes (Seine)



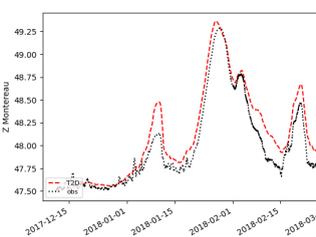
St-Fargeau-Ponthierry (Seine)



Melun (Seine)



St-Mammès (Seine)



Montereau (Seine)

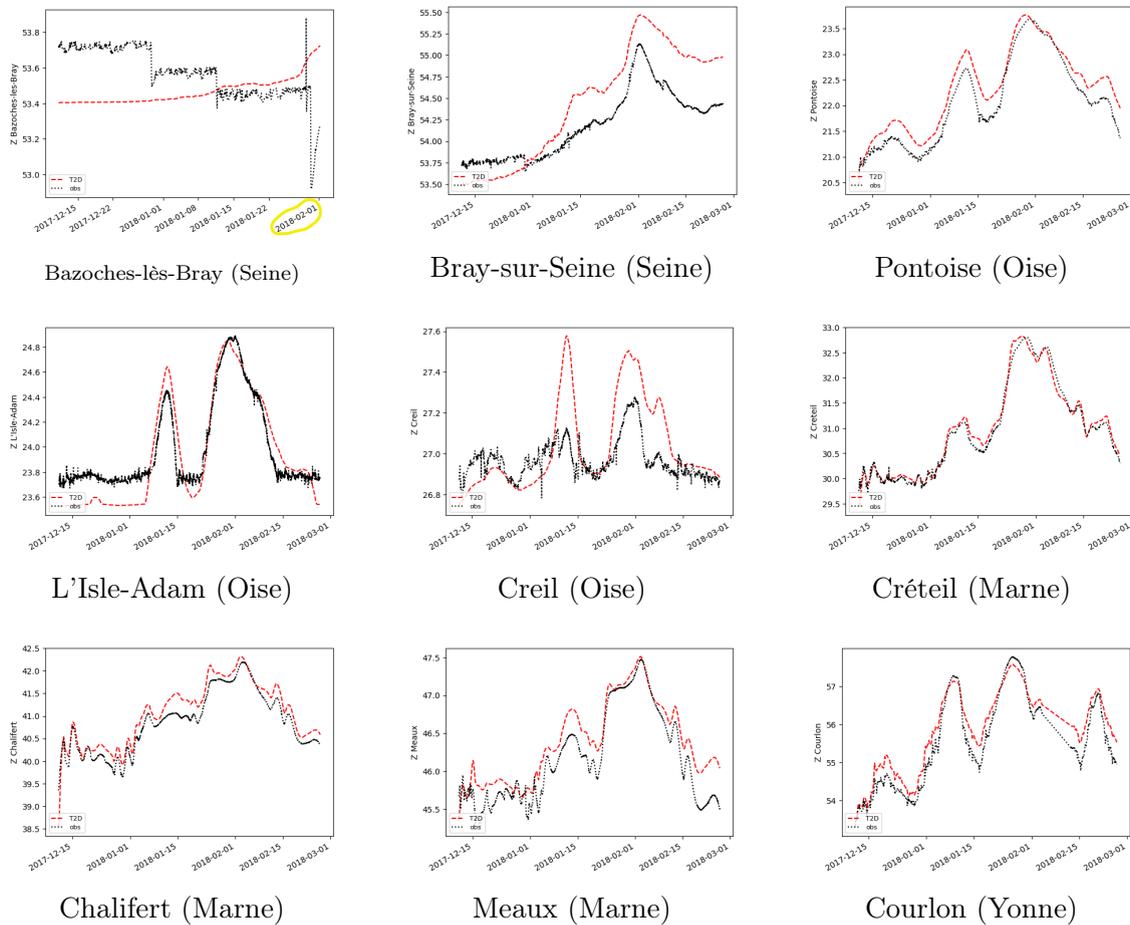


FIGURE 32 – Simulation T2D de référence - Seine 2018

### Analyse du modèle

L'analyse du modèle Seine Aval n'a pas pu être menée avant la remise de ce rapport.

### Conclusion

Le peu de résultats obtenus ne permet pas de conclure sur l'amélioration possible ou non du modèle.

On constate toutefois que le diagnostic du modèle est plutôt bon, on a des premiers résultats satisfaisants pour la majorité des stations (écart < 0.5m).

Il existe plusieurs pistes pour expliquer les résultats moins bons :

- la position des stations n'est pas toujours la même pour les observations et les simulations,

- le positionnement de certaines stations est erroné (dans le lit majeur, dans une écluse...),
- le positionnement ouvert/fermé des barrages et des écluses n'est pas pris en compte dans la simulation car non connu en tout temps,
- on peut supposer que le modèle a été calé essentiellement pour prédire les crues à Paris et aux stations alentours, ce qui explique de moins bons résultats dès lors qu'on s'en éloigne.

## 4 Conclusion et perspectives

Le but de ce stage était d'améliorer les modèles numériques hydrodynamiques T2D existants pour la Garonne Marmandaise et pour la Seine Aval.

Dans le cas de la Garonne, les résultats sont mitigés. Le modèle avait pour objectif d'être bon à Marmande, essentiellement pour les hautes eaux. L'analyse de sensibilité seule n'a donc pas permis d'améliorer le modèle à la fois dans le lit mineur et dans les plaines d'inondations. L'assimilation de données sera donc nécessaire pour obtenir de meilleurs résultats mais il se peut qu'il faille quand même choisir entre représenter le lit mineur ou le lit majeur.

Pour la Seine, le manque de temps ne m'a pas permis de réaliser plus de simulations. La fin de mon stage ne marque toutefois pas la fin des travaux sur ce modèle. Certaines stations ont déjà des résultats très bons mais il faudra déterminer l'origine d'importantes divergences pour d'autres stations, et peut être corriger leur emplacement avant de faire l'analyse de sensibilité et de passer à l'assimilation de données. Il se peut également que le modèle ait été construit pour être parfait à certaines stations comme Paris et qu'il faille accepter que d'autres stations assez éloignées ne puissent être améliorées.

## 5 Bilan personnel

D'un point de vue personnel, ce stage a été enrichissant : les échanges avec les autres stagiaires mais aussi les thésards et chercheurs m'ont permis notamment d'affiner mon projet professionnel.

Ce stage m'a aussi permis de développer des compétences techniques, j'ai pu :

- approfondir mes connaissances en langage Python, à travers la compréhension de scripts existants et le développement de nouveaux scripts,
- prendre en main le logiciel de SIG QGIS, assez proche du logiciel ArcGIS utilisé à l'ENSEEIH,
- me familiariser avec le logiciel GitLab que je n'avais jamais utilisé,
- en apprendre plus sur le module TELEMAC-2D de TELEMAC-MASCARET, à travers de nouveaux modèles.

Cela a également été l'occasion d'acquérir des compétences non techniques comme :

- des connaissances dans le domaine de l'observation spatiale à travers les différentes réunions avec les acteurs du projet FloodDAM,
- plus d'autonomie dans mon travail par l'aspect recherche (choix des paramètres du modèle, des simulations à effectuer).

J'ai apprécié sortir du cadre scolaire et la possibilité de travailler en présentiel deux jours par semaine après avoir suivi un semestre de cours à distance. Deux jours par semaine n'étaient toutefois pas suffisants, surtout pour commencer ce stage. Cela m'a paru compliqué de démarrer un nouveau projet, de devoir se familiariser avec de nouveaux outils et comprendre les attendus du stage à distance. Les premiers temps ont été déstabilisants, et un temps d'adaptation a été nécessaire.

## Références

- [1] SCO France. Flood-dam garonne. <https://www.spaceclimateobservatory.org/fr/flooddam-garonne>. Accessed : 2021-06-24.
- [2] S Grimaldi et al. Effective representation of river geometry in hydraulic flood forecast models. *Water Resources Research*, 54 :1031 – 1057, 2018.
- [3] S Ricci et al. Correction of upstream flow and hydraulic state with data assimilation in the context of flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2011.
- [4] Pierre Lang. Système de modélisation telemac / manuel de l'utilisateur. [http://www.opentelemac.org/downloads/Archive/v6p0/telemac2d\\_manuel\\_utilisateur\\_v6p0.pdf](http://www.opentelemac.org/downloads/Archive/v6p0/telemac2d_manuel_utilisateur_v6p0.pdf). Last Accessed : 2021-08-17.
- [5] Amelie Besnard et al. Intercomparaison de modèles hydrauliques 1d et 2d sur la garonne. 2007.
- [6] DREAL Midi-Pyrénées. Synthèse : données hydrologiques de synthèse (1913 - 2021). <http://www.hydro.eaufrance.fr/stations/09000010&procedure=synthese>, 2021.
- [7] Jean-François Pekel et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633) :418–422, 2016.
- [8] Melissa Wood et al. Calibration of channel depth and friction parameters in the lisflood-fp hydraulic model using medium-resolution sar data and identifiability techniques. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20 :4983–4997, 2016.
- [9] Préfet des Hauts-de Seine. Arrêté interpréfectoral n°2020-58. <https://www.prefectures-regions.gouv.fr/ile-de-france/content/download/70194/456229/file/AIP\%20barrage\%20Suresnes.pdf>. Last Accessed : 2021-08-20.

## 6 Annexe A - Analyse bibliographique

### Intercomparaison de modèles hydrauliques 1D et 2D sur la Garonne, *A. Besnard*

Le but de cette étude est de comparer les modèles 1D à casier et 2D sur le tronçon Tonneins-La Réole, pour l'étude de la plaine d'inondation. Ces modèles sont calés sur la crue de 1981. Le modèle étudié est celui de la Garonne Marmandaise, présenté plus tôt dans mon rapport. Un certain nombre de données que nous utilisons sont issues des données du modèle 2D présenté dans cet article.

- La modélisation 1D casier consiste à représenter les champs d'inondation d'une rivière en crue par un ensemble de bassines isolées du lit majeur qui se remplissent ou se vidangent par différents types de liaisons hydrauliques (remblais, digues, déversoirs, siphons, seuils,...).
- La modélisation 2D reprend les mêmes profils bathymétriques que le modèle 1D mais les données topographiques sont plus fines dans la partie aval du domaine. Le modèle 2D est plus précis que le modèle 1D mais la mise en oeuvre est plus longue.

La conclusion de l'étude sur la comparaison des modèles est la suivante :

- les côtes atteintes sont proches dans le lit mineur dans le cas d'une crue débordante,
- les dynamiques d'inondation dans la plaine d'inondation sont identiques,
- le débit dans le lit majeur issu du modèle 2D est globalement plus important,
- aucun modèle n'atteint les valeurs maximales mesurées.

Il en résulte que le modèle 1D casier converge bien vers les résultats du modèle 2D, et qu'il est adapté à ce type de modélisation.

### Correction of upstream flow and hydraulic state with data assimilation in the context of flood forecasting, *S. Ricci, et al.*

Cette étude présente l'assimilation de données (AD) dans le cadre de la prévision d'inondation et l'amélioration de la mesure de hauteur d'eau. L'AD s'appuie sur l'algorithme filtre de Kalman que l'on sépare en deux étapes : la première s'appuie sur trois paramètres de correction (moyenne, écart type et somme de leur différence), et la seconde consiste à

corriger directement l'état hydraulique  $x=(H,Q)$ .

L'algorithme de Kalman est appliqué à des événements ayant eu lieu sur les bassins versants de l'Adour et de la Marne.

On utilise le modèle 1D instationnaire MASCARET. La méthode d'AD consiste à déterminer la meilleure estimation de la véritable variable  $x$ , donc à minimiser la variance. L'algorithme propose un vecteur analyse en se basant sur un état précédent, l'observation sur la sortie, et les erreurs sur ces valeurs. Un algorithme en deux temps permet de prendre en compte les incertitudes du modèle : supposer que l'erreur sur les hauteurs d'eau proviendrait d'une mauvaise description des débits amonts et corriger les hauteurs d'eau et de débits sur l'ensemble du bassin lorsque des données sont disponibles. Ces deux étapes sont appliquées séquentiellement.

Une paramétrisation de la matrice de covariance d'erreur est ensuite réalisée pour propager les fonctions de covariance dans le modèle hydraulique puisque ce n'est pas fait dans l'algorithme de Kalman. Des fonctions anisotropiques<sup>1</sup> sont utilisées pour représenter les corrélations spatiales d'erreur pour la hauteur d'eau et le débit à la place des fonctions gaussiennes.

L'assimilation de données permet de réduire significativement les trois paramètres de correction entre la simulation et l'observation.

## **Effective Representation of River Geometry in Hydraulic Flood Forecast Models, *S. Grimaldi, et al.***

La prédiction des crues et des inondations dépend fortement de la représentation géométrique (forme, profondeur, largeur de la section transversale) de la rivière dans les modèles numériques. Or ces données ne sont pas toujours accessibles par télédétection (limitation aux eaux claires peu profondes) et les mesures de terrain sont compliquées (bassin versant trop grand, évolution de la morphologie sur une courte échelle de temps) voire trop cher à obtenir.

Dans le but d'évaluer l'impact de la géométrie des rivières sur les modèles de prévision des crues, cette étude se base sur l'utilisation du modèle hydraulique 2D LISFLOOD-FP et d'une base de données de terrain détaillée. Une expérience numérique a été menée en

---

1. Se dit des substances dont les propriétés physiques varient en fonction de la direction.

utilisant ce modèle pour simuler une inondation sur un tronçon d'une rivière australienne dont les données bathymétriques étaient disponibles.

- **Le schéma numérique de ce modèle** est basé sur une méthode des différences finies explicite en temps et du premier ordre en espace. Ce modèle s'est avéré précis par rapport aux solutions analytiques et aux modèles hydrodynamiques, tout en étant plus efficace en termes de calcul que les modèles diffusifs.
- **La bathymétrie fluviale de la base de données** a été interpolée à partir de relevées de coupes transversales pour les cours d'eau praticables à gué et les erreurs de mesure sont connues. La plupart de mesures ont été faites au début et à la fin des principales caractéristiques géomorphologiques (restrictions, élargissements, îles, virages, points d'inflexion et sommets de méandres).

Cette expérience a permis :

1. d'identifier les **simplifications géométriques** adaptées  
→ forme rectangulaire à largeur variable avec une pente longitudinale uniforme
2. d'établir **une méthodologie** pour mettre en place la géométrie simplifiée  
→ dérivation des données de télédétection pour la largeur,  
→ bases de données globales et données de terrain pour la profondeur,
3. d'étudier **les effets des écarts** entre les modèles simplifiés et les données de référence **sur les erreurs** dans la mise en oeuvre du modèle

Cette étude met en évidence l'importance d'une représentation adéquate de la géométrie du canal et de la comparaison entre les niveaux d'eaux modélisés et issus de l'acquisition d'images satellites. L'étude n'a cependant pas pris en compte l'impact des incertitudes liées aux observations satellites sur le diagnostic des erreurs du modèle.

### **Calibration of channel depth and friction parameters in the LISFLOOD-FP hydraulic model using medium-resolution SAR data and identifiability techniques, *Melissa Wood, et al.***

Le déclin du nombre de stations de jaugeage opérationnelles et l'inaccessibilité de nombreux bassins fluviaux favorisent la combinaison des observations in situ et satellites dans

les modèles numériques d'inondation. Les satellites radar à synthèse d'ouverture (SAR) sont particulièrement intéressants car ils distinguent les surfaces inondées à grande échelle, de jour comme de nuit et par tout temps. Cela inclut TerraSAR-X, Sentinel 1a et 1b et les données issues de satellites maintenant hors service tel que ENVISAT.

Le but de cet article est de présenter une méthode permettant d'étalonner simultanément les paramètres de profondeur de berge et de rugosité d'un canal dans le cas d'un modèle hydraulique 2-D LISFLOOD-FP en utilisant des cartes d'inondation satellites couvrant le confluent des rivières Severn et Avon au Royaume-Uni et une mesure de classification de modèle binaire basée sur l'étendue de l'inondation.

- La production des cartes d'inondations à partir des images SAR se fait en 3 étapes :
  1. Identifier la valeur seuil de rétrodiffusion à partir de laquelle la fonction de densité de probabilité (pdf) des valeurs de rétrodiffusion en eau libre dans les données SAR issue d'un histogramme des valeurs de rétrodiffusion commence à diverger de celui-ci. Production d'une carte d'inondation préliminaire à partir des pixels de valeurs de rétrodiffusion inférieures à la valeur seuil.
  2. Application d'une approche de croissance régionale pour faire croître les zones inondées dans la carte d'inondation préliminaire jusqu'à ce qu'un niveau de seuil de tolérance soit atteint.
  3. Utilisation d'une image de référence pour supprimer les pixels de la carte d'inondation identiques entre les images d'inondation et de non-inondation (plans d'eau permanents, parkings ou toits plats).
- Les cartes d'inondations produites sont alors comparées pixel à pixel aux cartes d'inondation générées à partir de la sortie LISFLOOD-FP. Une mesure de performance basée sur l'indice de succès critique (CSI) est utilisée. Les échelles CSI vont de 1 (compétence parfaite dans le modèle) et 0 (aucune compétence dans le modèle).

L'étalonnage du paramètre de rugosité du canal  $nc$  et du paramètre de profondeur du canal  $r$  (rapport entre la profondeur du canal et la largeur à plein débit) se base sur l'analyse d'identifiabilité dynamique (DYNIA) permettant de déterminer les images satellites optimales pour l'étalonnage du modèle. Cette méthode est appliquée à l'ensemble des résultats des scores CSI pour déterminer les valeurs les plus probables de  $r$  et  $nc$ .

Méthode DYNIA (IC + identifiabilité) :

1. Déterminer la valeur du contenu informationnel (IC) : normaliser les scores CSI, calculer la distribution cumulative de la fonction objectif rééchelonnée, appliquer une limite de confiance à cette dernière, normaliser le résultat.

*L'IC compris entre 0 (aucune information dans cette observation à des fins d'identification du paramètre) et 1 (l'observation est la plus informative pour le paramètre).*

2. Examiner un graphique de support cumulé par rapport à une valeur de paramètre. Tout écart par rapport à un gradient en ligne droite de ce support cumulatif indique si le paramètre est conditionné par la fonction objectif ou non. Plus la déviation est forte, plus le conditionnement/l'identifiabilité de la variable paramètre est fort.
3. Organiser les données et calculer le gradient du support cumulé

Il en résulte que le contenu d'information le plus élevé se trouve dans les cartes d'inondation SAR acquises près du pic de l'hydrogramme d'inondation, et s'améliore lorsque plus d'images sont combinées. La sensibilité du modèle à la variation de la profondeur du canal est supérieure à celle de la rugosité du canal et un étalonnage réussi de la profondeur ne peut être obtenu que lorsque les valeurs de rugosité du canal sont confinées à une plage plausible. La profondeur moyenne du chenal du tronçon calibrée est à moins de 0,9 m (erreur de 16 %) de la valeur équivalente déterminée à partir des données d'étude de la section transversale de la rivière, démontrant qu'une série de données SAR à résolution modérée peut être utilisée pour étalonner avec succès les paramètres de profondeur d'un modèle hydraulique 2D.

### **Reduction of the uncertainties in the water level-discharge relation of a 1D hydraulic model in the context of operational flood forecasting, *J. Habert, et al.***

Cette étude s'appuie sur l'hypothèse que les erreurs de hauteur d'eau sont issues de la relation débit-hauteur d'eau (soit la courbe de tarage (CT)), et présente deux stratégies permettant d'améliorer cette relation dans le cas d'un modèle hydraulique 1D :

- Ajouter des données (mesures de bathymétrie et topographie) pour améliorer la géométrie de la rivière (BATHY).
- Utiliser des mesures de hauteur d'eau pour corriger localement les coefficients de frottement dans le lit de la rivière et dans la plaine d'inondation. Cette stratégie se

base sur l'algorithme du filtre de Kalman étendu (ASSIM). On peut la décomposer en deux parties :

- correction des flux amont et latéraux (ASSIM1)
- correction des coefficients de friction du lit mineur et de la plaine d'inondation (ASSIM2)

Ces stratégies sont mises en place sur le bassin versant de la Marne et validées sur 8 évènements, et les erreurs de CT sont d'autant plus importantes pour des hauts débits car le modèle n'est pas suffisamment bien calibré et la topographie de la plaine d'inondation est mal connue.

Les résultats des deux stratégies sont les suivants :

- BATHY : l'ajout de 4 mesures de bathymétrie et topographie apporte :
  - une augmentation de Nash-Sutcliffe-hauteur d'eau de 0.773 à 0.923,
  - une sous-estimation de 10cm pour la hauteur d'eau (inchangée),
  - aucune modification pour le Nash du débit
  - une légère surestimation du pic de crue
- ASSIM : diminuer le coefficient de frottement dans le lit de la rivière permet d'augmenter la hauteur d'eau, l'effet du coefficient de frottement dépend donc de l'écoulement. Il faut estimer correctement le débit d'eau entrant puis les coefficients de frottement en fonction de ce débit sur l'entièreté de l'évènement.
- ASSIM1 : augmentation de Nash-débit de 0.894 à 0.976
- ASSIM2 : augmentation de Nash-hauteur d'eau de 0.784 à 0.97

## **Flood depth estimation by means of high-resolution SAR images and lidar data, *Fabio Cian, et al.***

Les méthodes d'évaluation des impacts économiques pour une rapide estimation des pertes et le développement des plans d'évacuation d'urgence nécessitent la connaissance des hauteurs d'eau des zones inondées.

Cet article présente donc une méthode permettant de calculer rapidement et précisément la hauteur d'eau en cas d'inondation, en utilisant les données SAR (déjà vu dans l'article

précédent) et un modèle d'élévation numérique LiDAR<sup>2</sup> haute résolution. Il s'appuie sur un évènement de crue ayant eu lieu en Italie en 2010.

Cette méthode se décompose en trois étapes principales :

1. **Déterminer la carte d'étendue de l'inondation** en se basant sur l'analyse statistique multitemporelle de deux ensembles d'images SAR, l'un contenant uniquement les images avant l'évènement et l'autre contenant des images à la fois de l'évènement et d'avant l'évènement. Grâce au calcul de l'indice d'inondation de différence normalisé NDFI, une détection de changement est effectuée et des cartes d'inondation sont extraites. L'index met en évidence les zones inondées et nous permet de séparer facilement les pixels inondés de ceux non inondés au moyen d'un seuil constant.
2. **Estimer l'altitude de la surface de l'eau** en utilisant un modèle d'élévation numérique (DEM) LiDAR à haute résolution et une analyse statistique de l'élévation du terrain le long de la ligne de démarcation de chaque zone inondée.
3. **Calculer la profondeur d'inondation** pour chaque pixel inondé en soustrayant sa valeur DEM et l'élévation de l'eau estimée.

La méthode se montre rapide et robuste comparée aux modèles hydrodynamiques et ne nécessite que deux données en entrée (la carte d'inondation et un DEM). Elle se base sur un algorithme simple qui ne nécessite pas une forte capacité de calcul et qui est capable de gérer les incertitudes issues des cartes d'inondations à partir d'une analyse statistique et prend en compte le changement de hauteur d'eau dû à la pente naturelle du cours d'eau.

---

2. Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est une méthode de télédétection et de télémétrie émettant des impulsions de lumière infrarouge dans le but de déterminer la distance entre le capteur et l'obstacle visé.

## 7 Annexe B - Résultats Garonne, crue Décembre 1981

### Diagnostic du modèle

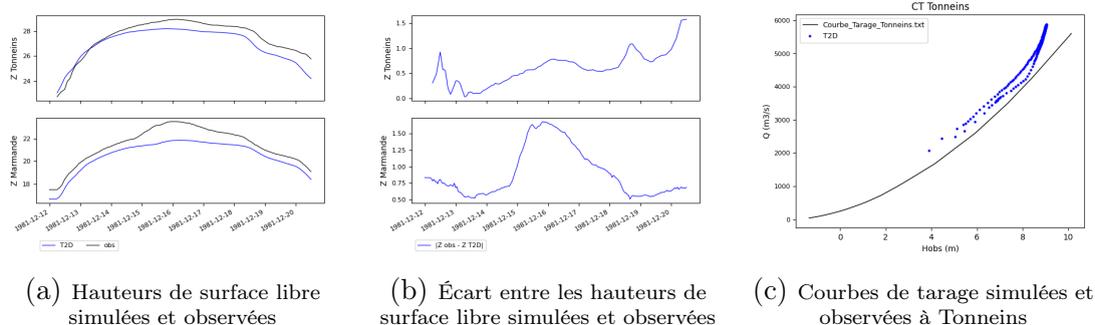


FIGURE 33 – Simulation T2D de référence - Garonne 1981

### Hydrogramme

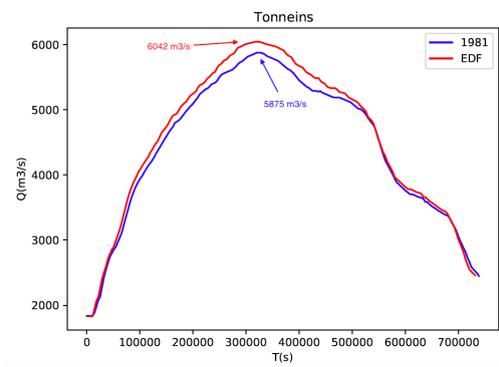


FIGURE 34 – Comparaison des hydrogrammes mesuré et modifié - Garonne 1981

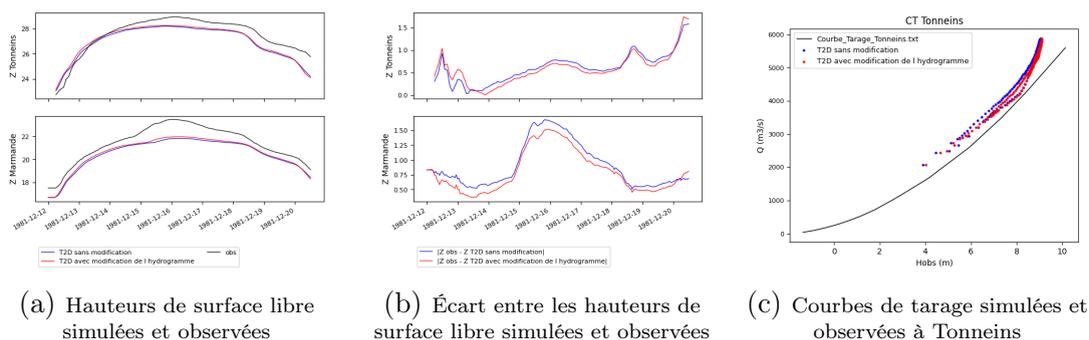


FIGURE 35 – Simulation avec modification de l'hydrogramme de crue - Garonne 1981

### Bathymétrie

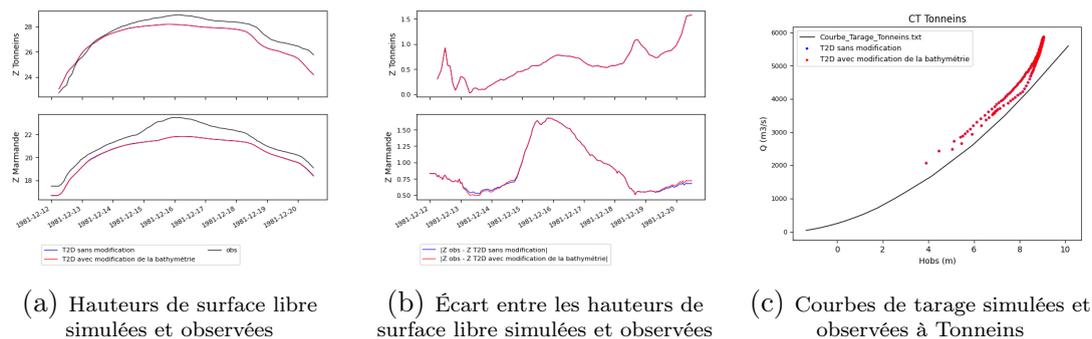


FIGURE 36 – Simulation avec modification de la bathymétrie - Garonne 1981

### Raffinement du maillage

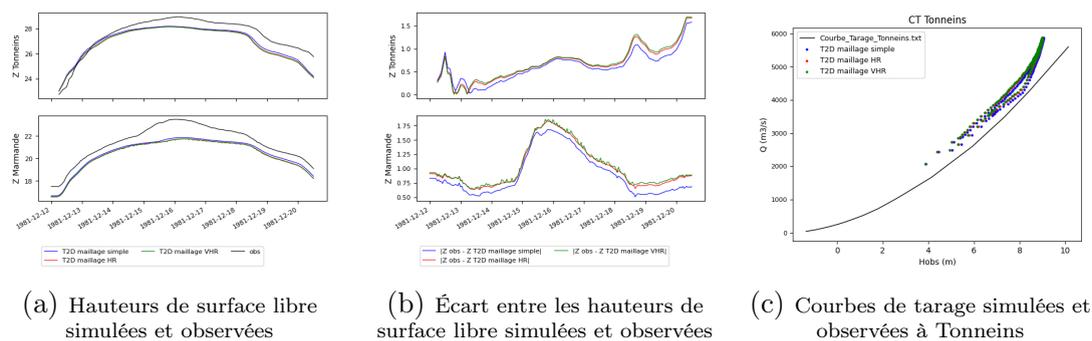


FIGURE 37 – Simulation avec raffinement du maillage - Garonne 1981

### Fichier .cas

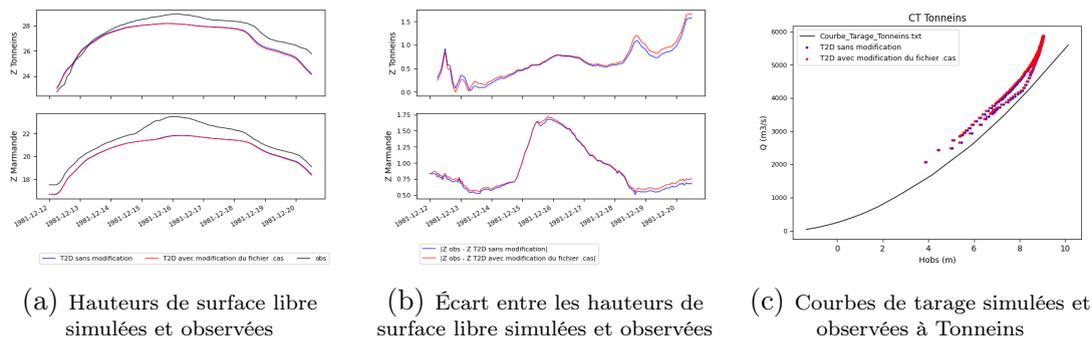


FIGURE 38 – Simulation avec modification du fichier cas - Garonne 1981

Modification du pas de temps

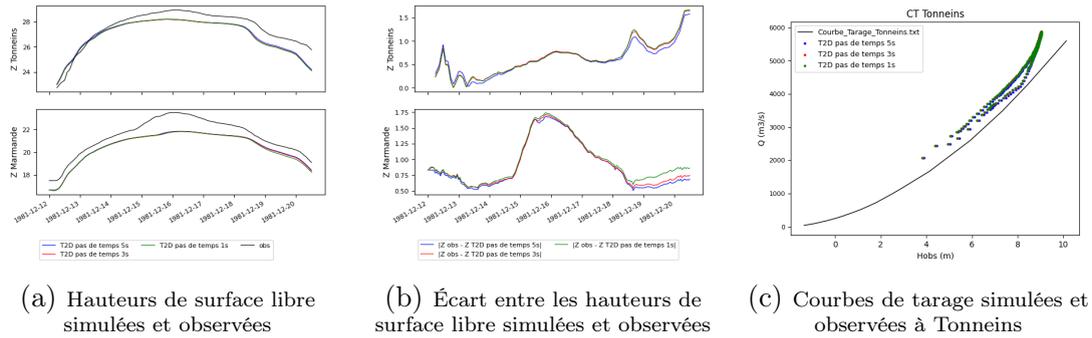


FIGURE 39 – Simulation avec raffinement du pas de temps - Garonne 1981

Description de la Condition limite amont

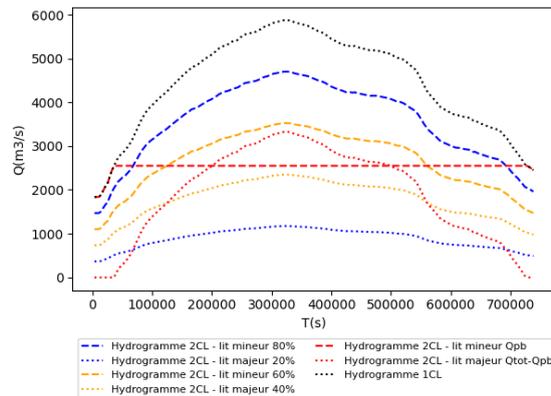


FIGURE 40 – Comparaison des hydrogrammes à deux conditions limites - Garonne 1981

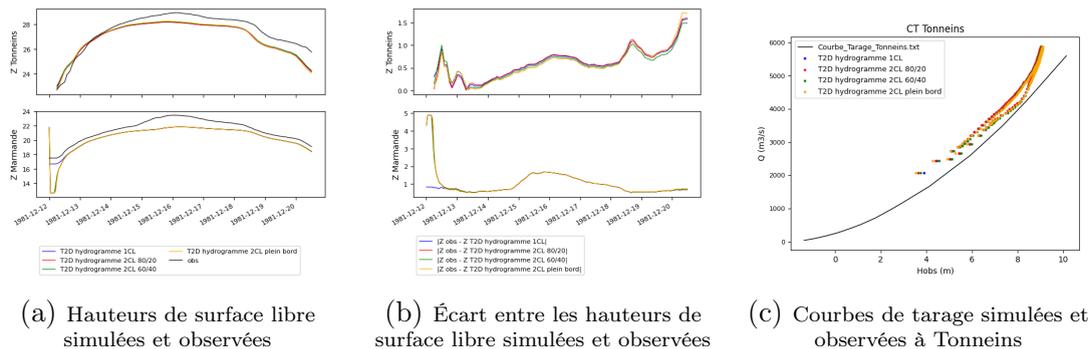


FIGURE 41 – Simulation avec modification des conditions limites amonts - Garonne 1981