

Année universitaire 2019-2020
Polytech Nice Sophia – Université Nice Sophia Antipolis

RAPPORT DE PROJET D'INGENIERIE

Simulation de la crue de l'Aude, octobre 2018.



Figure 1 - Photographie aérienne de la ville de Trèbes pendant l'inondation d'octobre 2018. (Ladepeche, Sylvain Thomas)

Présenté par Nicolas GUERIN, Souad KHAILIA, Johanna AUDAM, Corentin ROCHETTE
et Hugo MORACCHINI
Le 19 février 2020

Encadrants : Christelle CASTET et Amiel SITRUK – AXA Climate, Paris

*Polytech Nice-Sophia : 930, Route des Colles BP145 06903 Sophia-Antipolis Cedex France
Tel : 04 89 15 40 00*

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Axa Climate et notre école Polytech Nice pour nous avoir donné la possibilité d'effectuer un projet d'ingénierie aussi intéressant. Ce projet nous a permis de nous enrichir sur le plan scientifique en mettant en application ce que nous avons appris sur les bancs de l'école ces dernières années.

Plus particulièrement, nous remercions chaleureusement Christelle CASTET et Amiel SITRUK pour tout le temps qu'ils nous ont consacré semaine après semaine. Ils ont su se rendre disponibles pour nous aider, nous aiguiller sur le chemin à prendre pour réaliser à bien ce projet.

Finalement, nous remercions également Pierre BRIGODE et Oliver DELESTRE d'avoir pris le temps de nous aider lorsque l'on rencontrait des difficultés.

Résumé

Les 14 et 15 octobre 2018, un épisode pluvieux particulièrement intense a touché les départements de l'Aude, de l'Hérault et du Tarn. Ceci a engendré des crues éclairs dévastatrices sur plusieurs cours d'eau, impactant principalement la commune de Trèbes. Afin de rendre compte de l'événement, une série de modélisation effectuée à partir de TELEMAC2D, HEC-RAS et de la méthode HAND permet de visualiser l'extension de la crue. Ces simulations produites grâce aux débits et hauteurs d'eau enregistrées par la Banque HYDRO, prennent en compte uniquement les inondations par débordement des cours d'eau. À partir des débits de l'Aude à Marseillette et des cumuls de précipitations à Carcassonne, l'épisode est considéré comme ayant dépassé la période de retour centennial. Cependant, quantifier une période de retour exacte est délicat de par la nature dite "extrême" de l'événement.

Mots-clés : modélisation hydraulique, inondation, crue Aude 2018, période de retour, TELEMAC2D, HAND, HEC-RAS.

Abstract

On 14 and 15 October 2018, a particularly intense rainy episode affected the departments of Aude, Hérault and Tarn. This led to devastating flash floods on several rivers, mainly impacting the town of Trèbes. In order to account for the event, a series of modelling using TELEMAC2D, HEC-RAS and the HAND method make it possible to visualise the extent of the flood. These simulations produced using flows and water heights recorded by Banque HYDRO, only take into account flooding by river overflow. Based on flows of the Aude at Marseillette and the cumulative rainfall at Carcassonne, the episode is considered to have exceeded the centennial return period. However, quantifying an exact return period is delicate due to the so-called "extreme" nature of the event.

Keywords : hydraulic modelling, flood, Aude 2018 flood, return period, TELEMAC2D, HAND, HEC-RAS.

REMERCIEMENTS	3
RESUME / ABSTRACT	5
INTRODUCTION	9
I. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUES	10
1. PRESENTATION DE L'EVENEMENT	10
2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	12
I. CHOIX DE LA ZONE D'ETUDE	12
II. CAS PARTICULIER DE LA ZONE : LE CANAL DU MIDI	12
3. PRESENTATION DES OBJECTIFS DU PROJET	13
4. PRESENTATION DES DONNEES	13
II. ELABORATION D'UN MODELE D'INONDATION SIMPLE : METHODE HAND	14
1. METHODOLOGIE	14
2. RESULTATS	16
3. DISCUSSION	17
III. ELABORATION D'UN MODELE D'INONDATION PLUS COMPLEXE : HEC-RAS 1D	19
1. METHODOLOGIE	19
I. EQUATIONS MISES EN JEU	19
II. PREPARATION DES DONNEES	19
III. ESSAI MODE INSTATIONNAIRE	20
IV. SIMULATION MODE STATIONNAIRE	21
2. RESULTATS	22
3. DISCUSSION	23
IV. SIMULATION NUMERIQUE AVEC TELEMAC2D	24
1. METHODOLOGIE	25
I. RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES MANQUANTS	25
II. CREATION DU DOMAINE DE SIMULATION	25
2. RESULTATS	26
3. DISCUSSION	27
V. COMPARAISON DES MODELES AVEC LES DONNEES AXA	29
1. DEFINITIONS DES TERMES EMPLOYES	29
2. ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION	29
VI. ESTIMATION DES PERIODES DE RETOUR DE L'EVENEMENT	31
1. NOTION DE PERIODE DE RETOUR	31
2. OUTILS ET DONNEES UTILISES	31
3. METHODOLOGIE POUR L'ANALYSE DES PRECIPITATIONS	32
I. CUMULS DE PRECIPITATIONS	32
II. ANALYSE FREQUENTIELLE DES PRECIPITATIONS	32
III. COMMENTAIRES SUR L'ANALYSE FREQUENTIELLE AVEC LA LOI NORMALE	34
IV. COMMENTAIRES SUR L'ANALYSE FREQUENTIELLE AVEC LA LOI DE GUMBEL	36
4. METHODOLOGIE POUR L'ANALYSE DES DEBITS	36
I. DEBITS MAXIMAUX ENREGISTRES	36
II. ANALYSE FREQUENTIELLE DES DEBITS MAXIMAUX	37
III. COMMENTAIRES SUR L'ANALYSE FREQUENTIELLE AVEC LA LOI NORMALE	38
IV. COMMENTAIRES SUR L'ANALYSE FREQUENTIELLE AVEC LA LOI DE GUMBEL	39
5. CONCLUSION SUR LES PERIODES DE RETOUR	40
CONCLUSION GENERALE	40
REFERENCES / ANNEXES	40

Introduction

Le projet CYMO est un service d'AXA Climate qui s'intéresse aux différents types de catastrophes naturelles, dont les inondations. Le but est de fournir un service de prévision, d'action, assistance et de constatation des dégâts dans les plus brefs délais. L'idée est de s'appuyer sur des outils qui permettent d'obtenir rapidement ces données, que ce soit des images satellites aussi bien que des simulations sur la base de données météo. Une autre partie d'AXA Climate fait de l'assurance paramétrique, un type d'assurance où le remboursement est réalisé sans avoir à constater un sinistre, mais simplement en se basant sur la valeur prise par un indice. Ce dernier correspond en général à une grandeur météorologique, comme la température. Ces différents services aimeraient voir les potentialités de différentes approches hydrologiques et hydrauliques qui pourraient être implémentées dans leur traitement des inondations. Dans cette optique, ce projet d'ingénierie s'intéresse à la crue de l'Aude d'octobre 2018.

Dans la nuit du 14 au 15 octobre 2018, un épisode méditerranéen très intense s'est mis en place sur le département de l'Aude. Des cumuls importants ont été enregistrés aux alentours de Carcassonne, avoisinant les 300 mm. Ces pluies extrêmes ont causé des crues violentes sur le fleuve de l'Aude, se rapprochant fortement de la crue historique de référence de 1891. Le département est caractérisé par un réseau hydrographique très dense autour de l'Aude, dont les affluents ont joué un rôle majeur pendant l'inondation. En effet, ces derniers ont réagi très fortement avec des débits intenses qui sont venus gonfler ceux de l'Aude déjà en crue, provoquant en aval de Carcassonne, des hauteurs d'eau de près de 7 m. Cette inondation a touché de nombreuses communes, engendrant une dizaine de pertes humaines et des dégâts matériels se chiffrant en millions d'euros.

I. Contexte et problématiques

1. Présentation de l'événement

Les 14 et 15 octobre 2018, un épisode pluvieux particulièrement intense a touché le département de l'Aude. Cela a engendré des crues éclair dévastatrices sur plusieurs cours d'eau, impactant principalement la commune de Trèbes. Le bilan de cet épisode est lourd, avec 14 victimes et plus de 130 millions d'euros de dégâts assurés¹.

Les épisodes méditerranéens sont habituels dans le Sud de la France et notamment dans ce département, mais n'entraînent d'habitude pas de tels dégâts. Les inondations dramatiques qui ont touché l'Aude sont dues à un événement météorologique d'une intensité exceptionnelle et d'une localisation inhabituelle. En effet, d'ordinaire les lignes de pluies sont situées sur l'est du département. Dans la nuit du 14 au 15 octobre, l'orage s'est mis en place au-dessus du centre de l'Aude avec une quasi-stationnarité de l'axe des pluies (Ministère de l'Intérieur, 2019). Cela a causé des cumuls de pluies importants autour de Carcassonne, aux alentours de 250 mm en 24h (figure 2), dépassant la période de retour centennale (Ministère de l'Intérieur, 2019). Ces pluies exceptionnelles ont entraîné des crues sur le fleuve l'Aude et ses affluents comme l'Orbiel, le Trapel ou encore le Fresquel. Les débits ont augmenté rapidement après le début de l'épisode météorologique, ce qui est dû à l'intensité de l'événement et au temps de concentration très court qui caractérise les bassins versants des petits affluents de l'Aude.

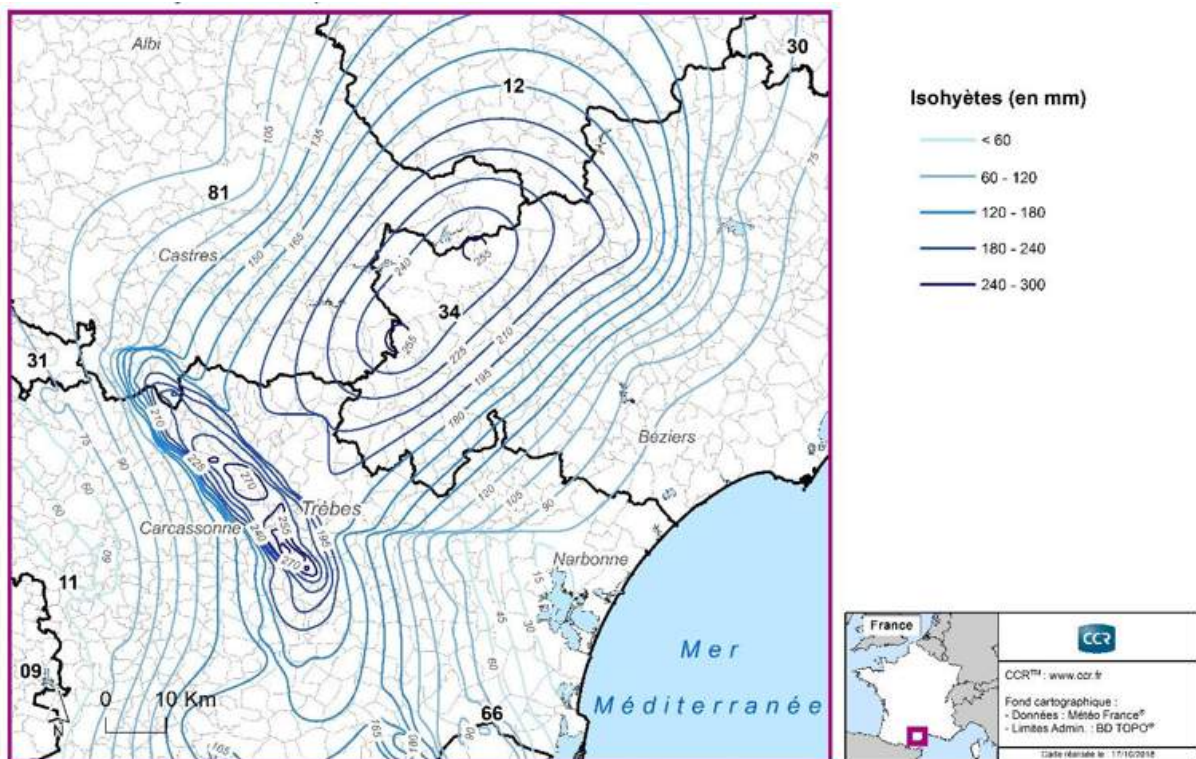


Figure 2 - Carte des isohyètes sur la période du 14 au 15 octobre 2018 sur le Languedoc (données : Météo France).²

¹ Source : AXA.

² Source : CCR.

Le pic de l'événement pluviométrique a été enregistré à Trèbes avec 300 mm dont 244 en 6h seulement (CCR, 2018).

Au niveau de la commune de Trèbes, l'Aude est rejointe par de nombreux affluents, comme le Fresquel ou encore l'Orbiel (figure 3). A l'entrée de la ville, la confluence entre les affluents et l'Aude, tous déjà en crues, a engendré une augmentation des débits considérable. Ainsi, la hauteur d'eau maximale de l'Aude à Trèbes est enregistrée à 7,66 m à 5h25 le 15 octobre (figure 4), contre une hauteur normale de 40 cm 24h plus tôt. Trèbes est donc la ville qui a eu le plus de dégât avec notamment une hauteur d'eau de 3 m dans le quartier des Arènes (CCR, 2018) en centre-ville (figure 5).

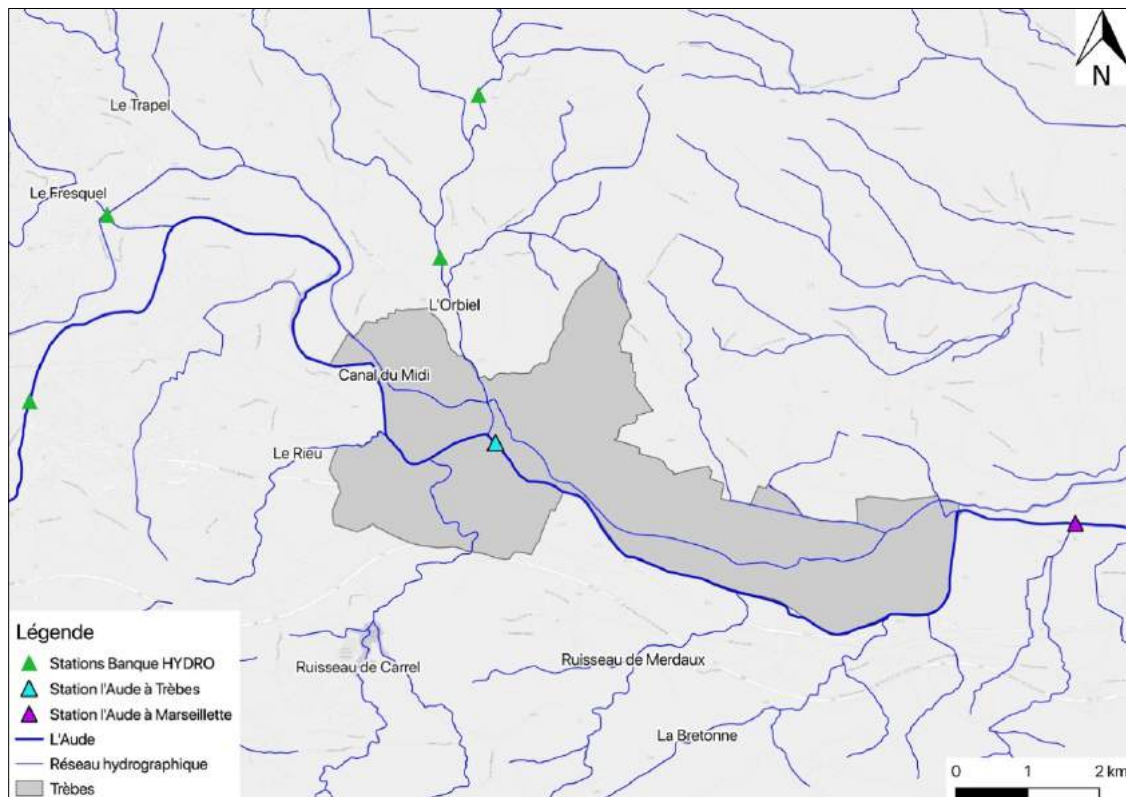


Figure 3 - Réseau hydrographique aux abords de la ville de Trèbes dans l'Aude.



Figure 4 - Hauteur d'eau (cm) enregistrée à station hydrométrique de l'Aude à Trèbes (figure 3) du 14 au 18 octobre 2018 (données : Banque HYDRO).



Figure 5 - Inondation dans la ville de Trèbes, au niveau du quartier des Arènes.³

2. Présentation de la zone d'étude

i. Choix de la zone d'étude

En raison des dégâts et des hauteurs d'eau enregistrées dans la ville de Trèbes, nous avons choisi de placer cette commune au centre de l'étude. La station hydrométrique de l'Aude à Trèbes étant située en amont de la ville, l'ensemble des simulations ont été effectuées en prenant Marseillette en tant qu'exutoire, afin d'avoir l'intégralité de la ville de Trèbes dans la zone d'étude (figure 6). De plus à cette station, aucune donnée de débit n'est disponible, les hydrogrammes utilisés sont donc ceux des stations en amont et en aval de Trèbes. Nous avons pris pour zone d'étude le bassin versant de l'Aude à Marseillette d'une superficie de 3173 km².

ii. Cas particulier de la zone : le Canal du Midi

Le Canal du Midi est un ouvrage historique construit au cours du XVII^{ème} siècle reliant Toulouse à la Méditerranée. Ce dernier a pour objectif une circulation facilitée des marchandises et un tourisme naval. Son tracé coupe volontairement certains des affluents de l'Aude, le Trapel, l'Orbiel et le Fresquel (figure 3). Sa gestion dépend de l'Etablissement Public « Voies Navigables de France » (VNF).

Le Canal a été fortement touché par les précipitations d'octobre 2018 (Ministère de l'Intérieur, 2019). La zone entre Marseillette et Carcassonne a été particulièrement impactée. Notamment, VNF reconnaît que : « là où les cours d'eau croisent le canal, des débordements se sont produits, qui se sont ensuite propagés le long du canal ». Le secteur le plus touché se situe sur l'Orbiel dont la hauteur d'eau pendant la crue avoisinait les 6 m (Banque HYDRO). Cela a engendré la submersion du Pont-Canal de Trèbes par l'Orbiel. Le Canal du Midi a donc joué un rôle important dans les inondations catastrophiques de la ville de Trèbes.

Ce canal étant un cours d'eau artificiel, coupant des cours d'eau naturels, il n'a pas été possible de le prendre en compte dans les modélisations effectuées dans ce rapport.

³ Source : AFP.

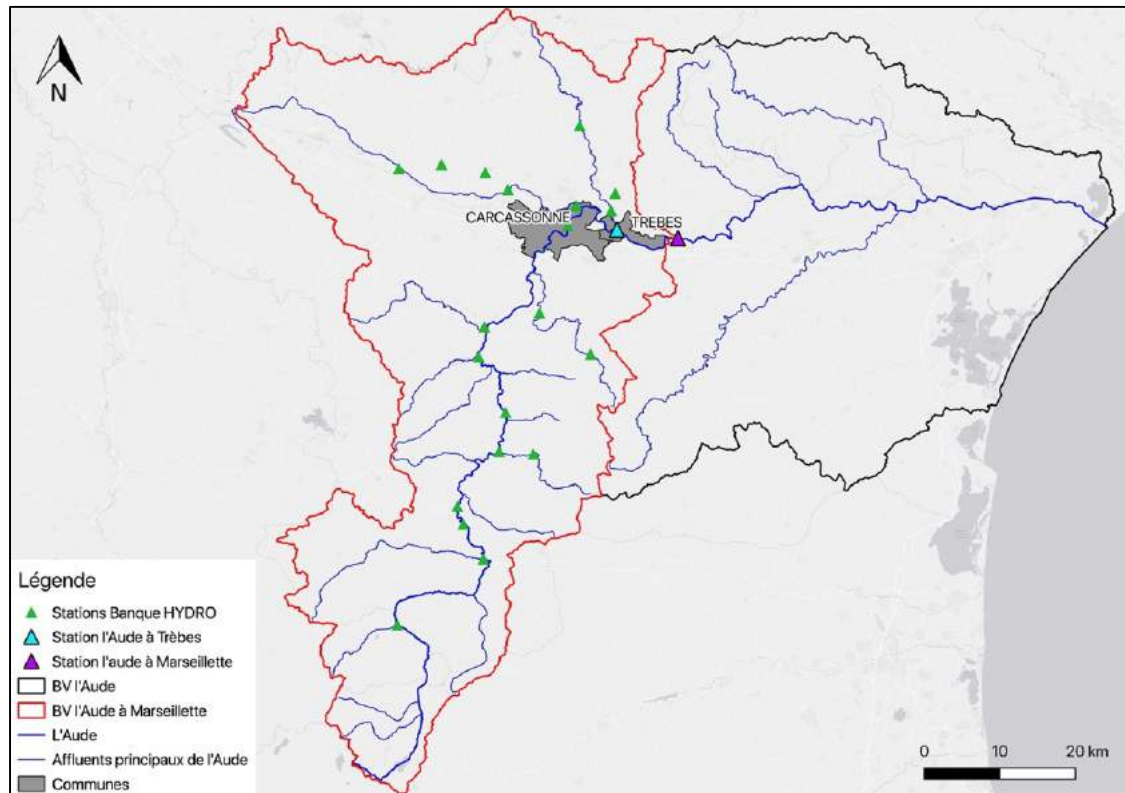


Figure 6 - Présentation de la zone d'étude.

3. Présentation des objectifs du projet

Ce projet tend, dans un premier temps, à simuler l'extension de l'inondation et son évolution temporelle, pic et décrue, du 14 au 18 octobre 2018. Pour faire cela, nous allons d'abord élaborer un modèle d'inondation simple, appelé HAND (Height Above Nearest Drainage), qui se base uniquement sur un MNT (Modèle Numérique de Terrain) et des hauteurs d'eau. Puis, nous allons ensuite simuler la crue et son évolution, avec des logiciels de modélisation hydraulique plus poussés, basés sur la résolution des équations de Saint Venant. Cela nous permettra de comparer les résultats obtenus avec différents types de modèles, puis de les valider en effectuant une comparaison avec les données observées disponibles.

Dans un second temps, ce projet tend à calculer la période de retour du cumul de précipitations sur la zone d'intérêt ainsi que la période de retour des débits mesurés aux stations Vigicrue.

4. Présentation des données

Toutes les données utilisées (tableau 1) pour réaliser l'étude sont disponibles en libre accès sur internet.

Tableau 1 - Présentation des données utilisées pour l'étude.

COUCHE	TYPE DE DONNEES	SOURCE
MNT 25 m	Raster (.tif)	Copernicus Land Monitoring Service
Réseau hydrographique Aude	Polyligne (.shp)	SANDRE
Débits et hauteurs d'eau	Tableau (.csv)	Banque HYDRO
Précipitations Carcassonne	Tableau (.csv)	Speedwell Weather
Communes	Polygone (.shp)	GEOFLA
Image satellite de Trèbes	Raster (.tif)	CCR/Météo-France

II. Elaboration d'un modèle d'inondation simple : méthode HAND

La première étape de cette étude consiste à essayer de reproduire l'inondation d'octobre 2018 sur l'Aude avec un modèle très simple, la méthode HAND (Height Above Nearest Drainage). Cette méthode se base sur des différences d'altitude entre chaque cellule du MNT et le cours d'eau le plus proche.

1. Méthodologie

Afin d'obtenir le raster HAND de différences d'altitude, nous créons un code R qui exécute un enchainement de fonction TauDEM (Liu, 2016). TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevations Models) est un ensemble d'outils qui permet, à partir d'un MNT, d'extraire et d'analyser des informations hydrologiques. La création du raster HAND demande en entrée, un MNT corrigé, la direction de l'écoulement dans chaque cellule ainsi que le réseau hydrographique. Ces différents éléments sont obtenus à l'aide des fonctions TauDEM (figure 7).

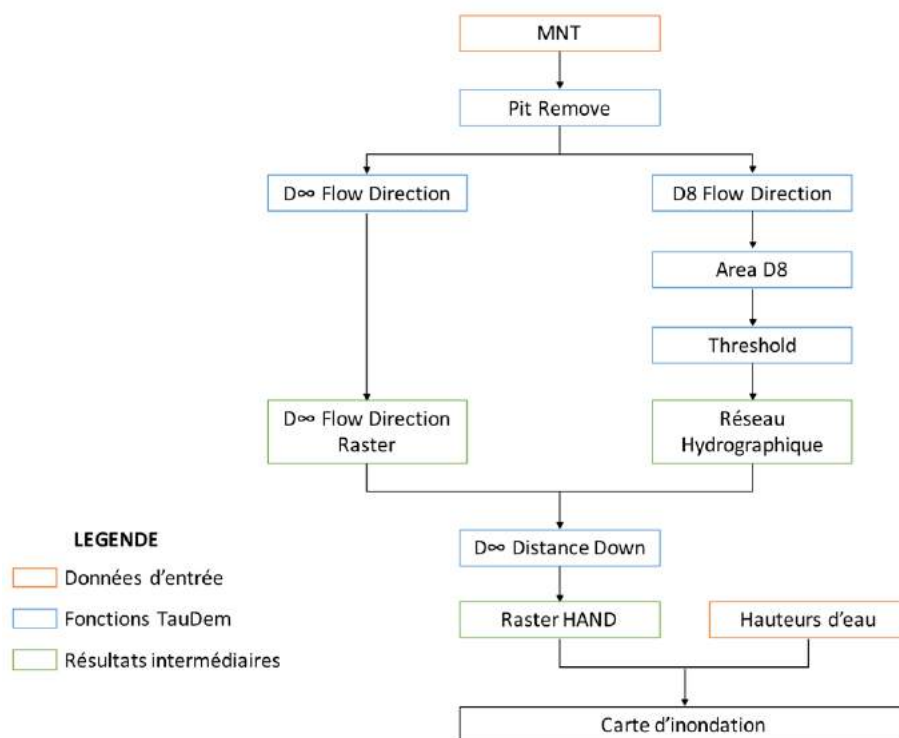


Figure 7 - Description des fonctions permettant l'obtention d'une carte d'inondation par méthode HAND.

La première étape consiste à corriger le MNT. En effet, il est possible que le MNT contienne des puits, c'est-à-dire des cellules entourées de cellules plus élevées, dans lesquels l'eau stagne au lieu de continuer à s'écouler. La fonction « PitRemove » permet donc d'augmenter l'altitude de la cellule au même niveau que les cellules voisines et d'éviter ce problème de stagnation. L'étape suivante, permet d'obtenir les directions d'écoulement en chaque point du MNT, afin d'avoir un modèle d'écoulement. On utilise la fonction « D8 Flow Direction », qui calcule la direction d'écoulement dans chaque cellule en se basant sur la direction de la plus grande pente parmi les 8 cellules voisines. On obtient un raster avec des entiers de 1 à 8 représentant les sens d'écoulement (figure 8).

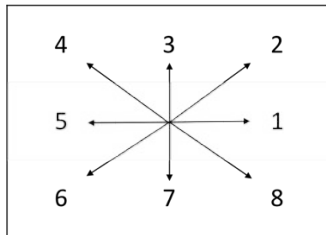


Figure 8 - Directions d'écoulement.

La fonction « D ∞ Flow Direction » permet d'avoir un modèle d'écoulement, comme précédemment, mais avec un nombre de directions infini.

En suivant les sens d'écoulement calculés, on peut obtenir les lignes d'accumulation de l'eau qui constituent le réseau hydrographique avec l'outil « Area D8 ». Dans chaque cellule, cette fonction suit les directions d'écoulement et calcule le nombre de cellules menant à elle.

Une fois que les points d'accumulation sont déterminés, on définit un seuil avec la fonction « Threshold ». Toutes les cellules qui ont une valeur dans le raster « Area D8 » supérieure à ce seuil définissent le réseau hydrographique. Plus le seuil est petit, plus le réseau est développé. On obtient alors un raster constitué de 1 et de 0 qui indique l'emplacement des cours d'eau.

La deuxième étape consiste à créer le raster HAND. Pour ce faire, nous utilisons les différents éléments obtenus précédemment. A partir du MNT corrigé, du réseau hydrographique et des directions d'écoulement, on utilise la fonction « D ∞ Distance Down ». Cette dernière calcule en chaque cellule, la différence d'altitude entre cette cellule et la cellule de cours d'eau la plus proche (figure 9).

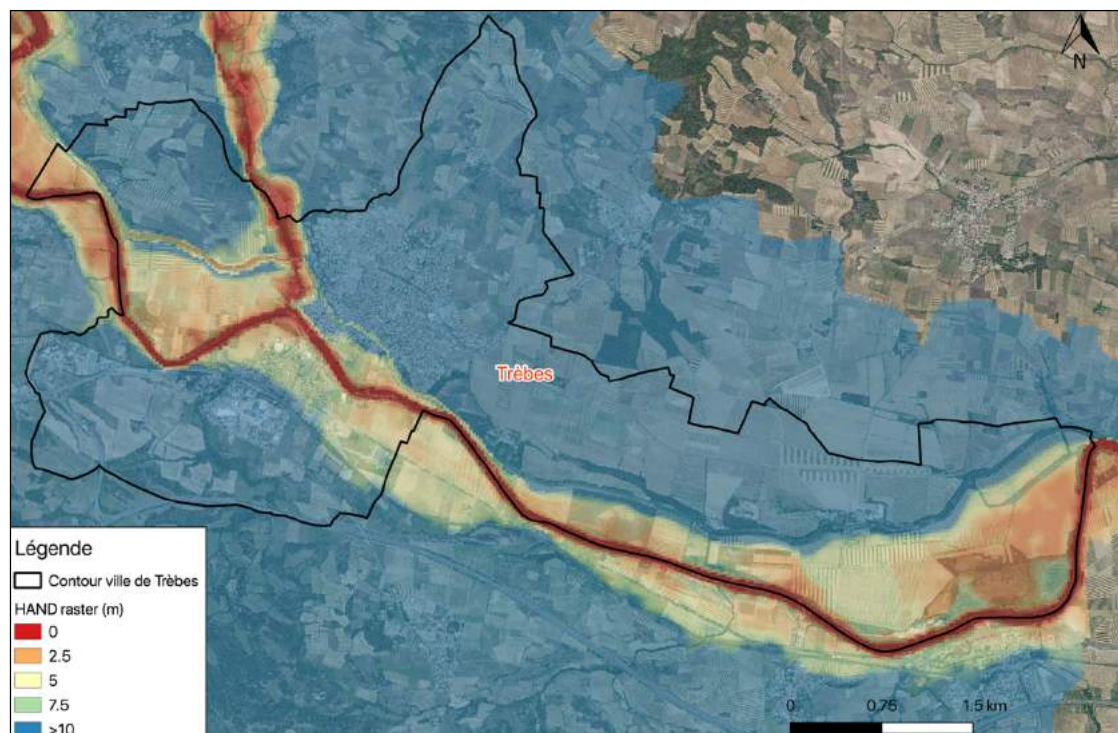


Figure 9 - Résultats des fonctions TauDEM - Raster HAND zoomé sur la ville de Trèbes.

Ainsi, les cellules peu élevées par rapport au cours d'eau sont susceptibles d'être inondées dans le cas où les précipitations dépassent la capacité de drainage du cours d'eau. La figure 9 présente le raster HAND obtenu au niveau de la ville de Trèbes.

La création d'une carte d'inondation à partir du raster HAND nécessite l'utilisation d'un raster de hauteurs d'eau. Un tel raster n'étant pas trouvable en libre accès, ce dernier a été créé grâce à une interpolation numérique. On commence par récupérer la hauteur d'eau maximale enregistrée par chaque station Banque HYDRRO durant l'événement (figure 10 en vert). Puis, pour obtenir la hauteur d'eau en chaque pixel, on effectue une interpolation numérique entre chacune de ces stations (figure 10).

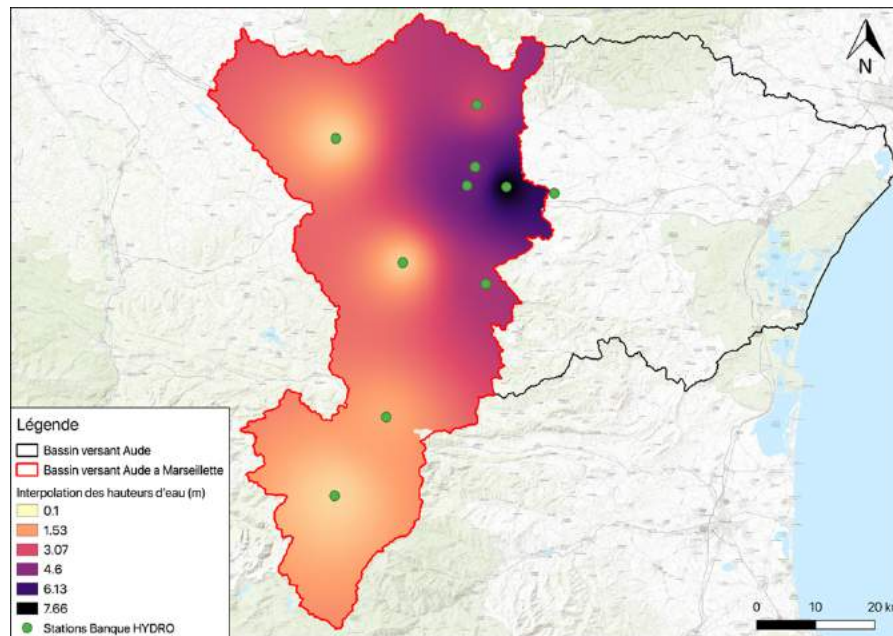


Figure 10 - Interpolation des hauteurs d'eau entre les stations Banque HYDRO.

La dernière étape consiste à soustraire le raster HAND à la carte des hauteurs d'eau (David Tarboton, 2018), tel que :

Si la hauteur d'eau dans la cellule est supérieure à son altitude dans le raster HAND alors :

- Hauteur inondée = hauteur d'eau – altitude HAND
- Sinon hauteur inondée = 0.

Toutes ces étapes ont été réalisées avec un script R et ont permis l'obtention d'une carte d'inondation à l'échelle du bassin versant de l'Aude à Marseille (figures 11 et 12).

2. Résultats

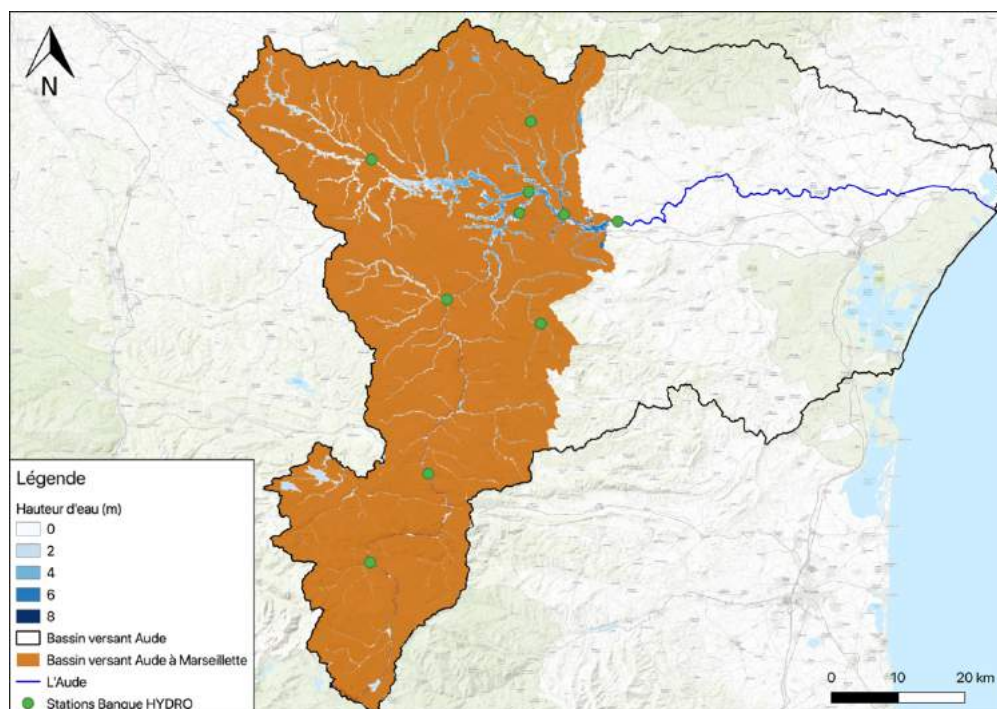


Figure 11 - Carte d'inondation sur le bassin versant de l'Aude à Marseille pendant la crue d'octobre 2018.

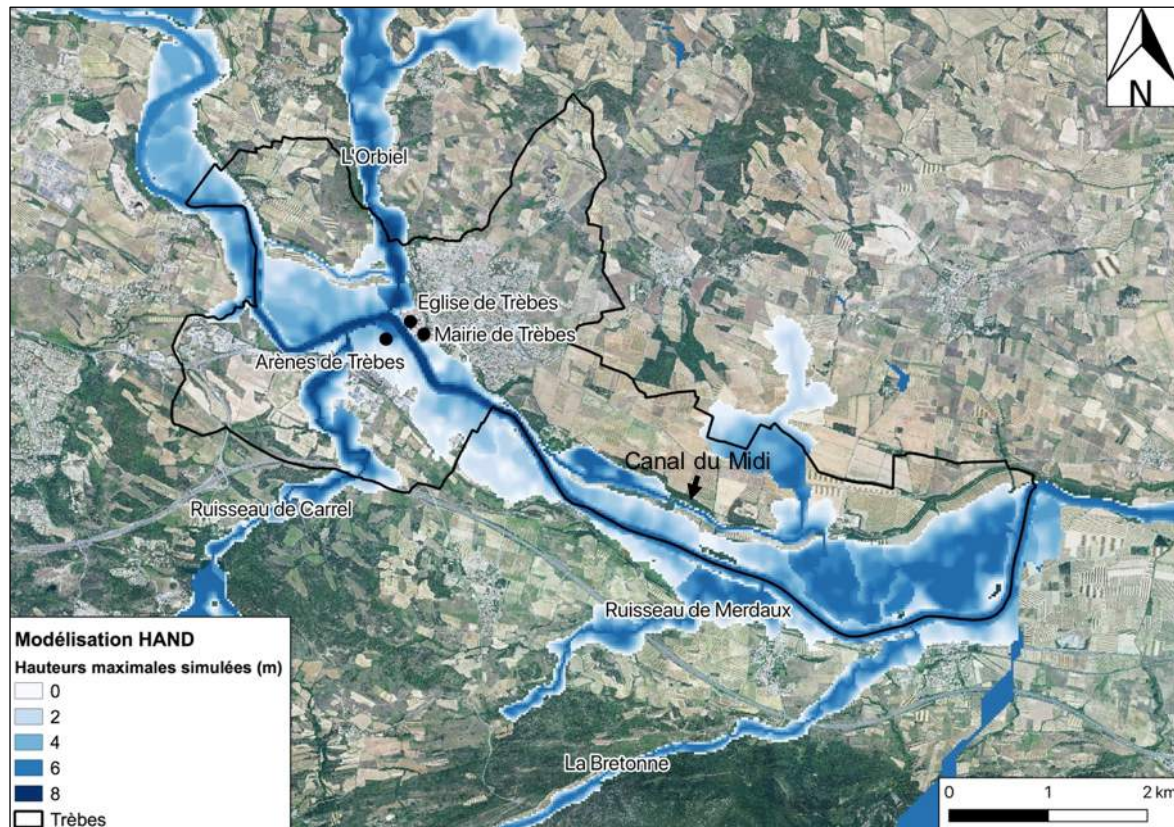


Figure 12 - Carte d'inondation centrée sur la ville de Trèbes pendant l'événement d'octobre 2018.

Les résultats obtenus sont sous la forme de raster de hauteurs d'eau. La figure 11 présente l'ensemble de l'extension de la crue à l'échelle du sous bassin versant de l'Aude à Marseillette. Conformément à la figure 10, l'extension la plus importante se situe au Nord-Est du sous bassin versant choisi, autour du fleuve. La figure 12 permet de faire un zoom à l'échelle de la ville de Trèbes qui a été la plus impactée. Le pic de hauteur d'eau atteint 8 m dans l'Aude au niveau du centre-ville, à l'embouchure de l'Orbiel et du Carrel. Historiquement, il a été enregistré 3 m d'eau dans le Quartier des Arènes de Trèbes. La simulation HAND approche cette valeur, avec une hauteur simulée d'environ $3,5 \pm 0,5$ m. Au niveau du Sud-Est de la carte, l'extension simulée est la plus importante avec environ 1,5 km au plus large. Il s'agit d'une zone composée de plaine agricole propice à la propagation de l'eau.

La figure 12 met aussi en relief la présence d'artéfacts de calcul au niveau des hauteurs d'eau, notamment au Sud-Est de la carte. Ceux-ci peuvent être largement expliqués par la faible résolution du MNT (25 m) qui ne peut pas représenter toutes les subtilités topographiques du terrain.

3. Discussion

HAND est une méthode simple et rapide à mettre en place étant donné qu'elle ne nécessite que deux données d'entrée : un MNT et des hauteurs d'eau. Il y a cependant certaines limites.

Premièrement, le modèle représente une extension spatiale mais pas temporelle. Celui-ci se base uniquement sur les hauteurs maximales enregistrées aux stations Banque HYDRO. De plus, il est fait une interpolation linéaire entre chaque station, ce qui ne représente pas fidèlement la variabilité spatiale des hauteurs d'eau dans les rivières. Ceci explique les hauteurs d'eau importantes en aval de Trèbes au niveau des champs. Par ailleurs, la méthode HAND ne prend pas en compte les zones de stagnation d'eau éloignées des rivières. C'est un modèle, ni hydraulique, ni hydrologique, mais seulement géométrique. Il s'agit uniquement de traitement de données géographiques par SIG qui ne tient pas compte des paramètres physiques liés aux différentes natures de sol, comme l'infiltration et les coefficients de frottement. Malgré ses limites, HAND permet d'obtenir une idée générale sur

l'extension d'une inondation étant donné qu'elle se base sur les hauteurs d'eau réellement observées. La figure 13 présente la différence entre l'extension enregistrée par le satellite optique Sentinel-2 le 15/10/2018 avec celle simulée par la méthode HAND. Globalement l'extension simulée au niveau de l'Aude est assez représentative de ce qu'à observé le satellite. L'Orbiel au niveau de Bouilhonnac est aussi très bien modélisé. Cependant, les affluents en rive-droite de l'Aude, ne montrent pas de crue sur l'image satellite. Ceci étant, d'après les observations de terrain (Lebouc et al., 2019), de forts débits ont été enregistrés durant l'événement à ces endroits. Les cours d'eau situés dans des végétations très denses ne sont pas visibles en vue satellite, car ce dernier prend des clichés en lumière visible. Aussi, le Canal du Midi est en partie pris en compte dans cette simulation comme le montre l'extension en rive gauche de l'Aude qui est identique à l'image aérienne. Cela s'explique par le fait que la méthode HAND ne simule pas des écoulements mais applique simplement des hauteurs d'eau sur le MNT. Certaines parties du Canal sont visibles sur le MNT ce qui explique que HAND a pu les prendre en compte comme étant un cours d'eau (figure 12).

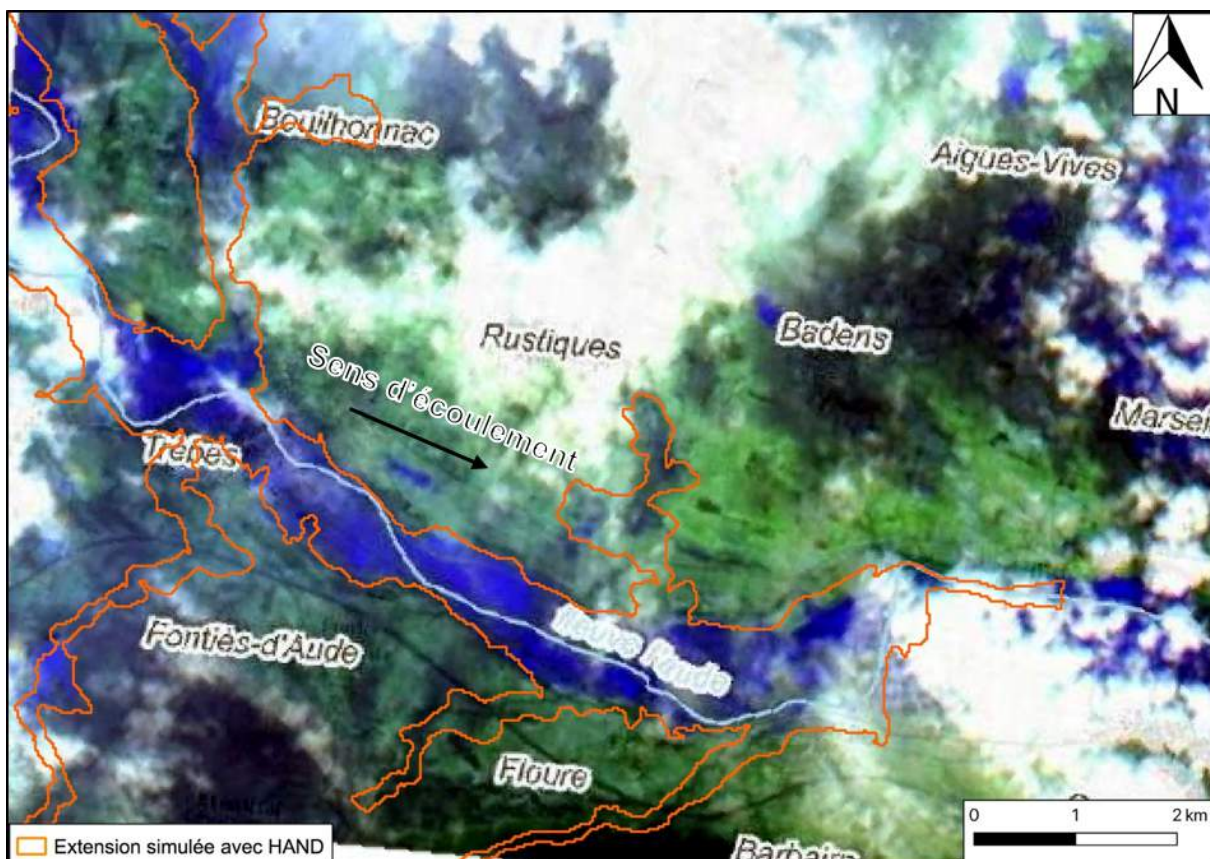


Figure 13 - Comparaison de l'extension simulée de la crue de l'Aude par la méthode HAND avec une image satellite Sentinel-2 du 15/10/18.⁴

⁴ Source : CCR.

III. Elaboration d'un modèle d'inondation plus complexe : HEC-RAS 1D

La deuxième étape de cette étude consiste à essayer de reproduire l'inondation d'octobre 2018 sur l'Aude avec un logiciel permettant des modélisations plus poussées, à savoir, HEC-RAS 1D. Ce dernier est un logiciel de modélisation hydraulique créé par le ministère américain de la Défense en 1995 et qui permet de représenter l'écoulement dans les cours d'eau.

Les modélisations sont effectuées uniquement sur la ville de Trèbes.

1. Méthodologie

i. Equations mises en jeu

L'écoulement stationnaire décrit des conditions dans lesquelles la profondeur et la vitesse à un endroit donné du cours d'eau ne changent pas avec le temps. Dans ce cas là, la principale procédure utilisée par HEC-RAS pour calculer les profils de surface libre, est basée sur une solution itérative de l'équation de conservation de l'énergie.

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Z_1, Z_2 : élévation du lit de la rivière

Y_1, Y_2 : hauteur d'eau à la section transversale considérée

V_1, V_2 : vitesse moyenne

a_1, a_2 : coefficient de pondération de la vitesse

g : gravité

h_e : perte de charge

Cette équation stipule que l'énergie totale à un endroit donné le long du cours d'eau est la somme de l'énergie potentielle ($Z + Y$) et de l'énergie cinétique ($aV^2/2g$). La variation d'énergie entre deux sections transversales est appelée perte de charge (h_e).

Étant donné le débit et l'élévation de la surface de l'eau dans une section transversale, le but de la méthode est de calculer l'élévation de la surface de l'eau dans la section transversale adjacente. Le régime d'écoulement détermine si les calculs se font de l'amont vers l'aval ou inversement. Pour un régime fluvial, les calculs commenceraient à l'extrémité aval du cours d'eau, et progresseraient en amont entre les sections adjacentes. Pour un écoulement torrentiel, les calculs commenceraient à l'extrémité amont du cours d'eau et se poursuivraient en aval. Dans notre cas nous avons utilisé un régime mixte.

Dans le cas d'un écoulement instationnaire, les équations mises en jeu sont les équations de Saint-Venant 1D.

ii. Préparation des données

Avant de procéder à la mise en place du modèle hydraulique, il faut préparer les données d'entrée. Pour cela, l'extension HEC-GeoRAS sur ArcGis est utilisée. Elle permet de créer la géométrie de la rivière à partir d'un MNT et de l'exporter ensuite sur HEC-RAS. Tout d'abord, il faut digitaliser le centre de la rivière par une polyligne en allant de l'amont vers l'aval. A chaque intersection avec un affluent, il faut arrêter la construction, tracer l'affluent de la même manière, puis reprendre le tracé de la rivière principale. De cette manière, HEC-RAS connaîtra le sens d'écoulement des différents cours d'eau. Il faut ensuite créer deux lignes correspondant aux berges droite et gauche, de la même manière que pour la rivière. Puis, la digitalisation se termine par la construction des limites de la plaine d'inondation en rive droite et gauche.

L'étape suivante consiste en la création des différentes sections transversales, perpendiculairement aux différentes lignes tracées précédemment. Ces dernières représentent une coupe transversale de la rivière et de ses berges en certains points le long du cours d'eau. La topographie est ensuite interpolée sur la rivière et sur les sections. Cette étape permet de créer deux tableaux contenant les informations dont HEC-RAS a besoin, notamment les différentes longueurs de segment, les distances entre chaque section etc. Une fois ces étapes terminées, le modèle est exporté vers le format de géométrie lu par HEC-RAS, à savoir « .sdf ».

Une fois le fichier de géométrie importée dans HEC-RAS, il faut attribuer des coefficients de frottement à la rivière et aux berges. Dans notre cas, la loi de Strickler est utilisée.

L'étape finale consiste à créer les fichiers de conditions initiales et conditions aux limites. Il faut alors choisir quel type d'écoulement est représenté : stationnaire ou instationnaire. Un écoulement stationnaire est un écoulement qui ne varie pas en temps. Pour le cas instationnaire, des hydrogrammes sont mis en entrée du modèle.

iii. Essai mode instationnaire

Pour la simulation, le cas stationnaire a été privilégié. En effet, lors des différents tests de simulations en régime non-stationnaire, nous n'avons pas réussi à stabiliser le modèle avec plusieurs cours d'eau. Dans un premier temps, une simulation prenant en compte seulement l'Aude, avec un hydrogramme à l'amont du modèle, a donné des résultats en mode non-stationnaire. Ceux-ci n'ont pas d'utilité dans notre cas car les affluents ont joué un rôle important. Ne pas les prendre en compte ne recrée pas l'inondation observée, en termes d'extension et de hauteurs d'eau.

Dans un second temps, une simulation prenant compte également deux affluents de l'Aude et leur hydrogramme a été lancée. Cette simulation n'a pas marché car le modèle est instable. Il y a de multiples problèmes qui peuvent expliquer une instabilité, dont des valeurs de débits avec des variations rapides ou des problèmes liés aux sections transversales. Un test avec un faible débit de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ a été utilisé aux trois entrées pour vérifier la première hypothèse. Cet essai fonctionne mais toutefois HEC-RAS affiche plusieurs messages d'instabilité. Même si le code arrive à passer outre ces erreurs, le résultat n'est pas concluant.

Pour les problèmes liés aux sections transversales, il pourrait y avoir plusieurs hypothèses :

- Certaines sections tracées à partir du MNT n'ont pas un profil normal de rivière en « U » mais ont des tracés ne permettant pas forcément à l'eau de s'accumuler. Cela est probablement due à la résolution de MNT qui est de 25 m, et qui ne permettrait donc pas de représenter certaines subtilités du terrain, notamment au niveau des petits affluents d'une largeur inférieure à 25 m.
- La présence de diverses infrastructures, comme des ponts, ou d'ouvrages hydrauliques. Dans ce cas, on aurait pu essayer de mettre des sections avant, après et au milieu de l'ouvrage.
- Au niveau des jonctions entre un affluent et la rivière principale, il faudrait placer une section au plus proche de la jonction. Dans notre cas, cela n'a pas été possible pour le ruisseau de Carrel car, au vu de son tracé, pour construire une section à cet endroit là il aurait fallu qu'elle traverse la plaine d'inondation de l'Aude et coupe d'autres sections, ce qui est impossible.

L'instabilité pourrait être causée par une seule de ces hypothèses comme par un mélange de plusieurs ou d'autres non évoquées. Le temps imparti ne nous a pas permis de nous attarder sur la stabilisation du modèle.

iv. Simulation mode stationnaire

Pour la simulation en mode stationnaire, le fichier de géométrie prend en compte l'Aude et les deux affluents les plus conséquents au niveau de la ville de Trèbes, l'Orbiel et le Carrel (figure 14). Les deux derniers affluents, Bretonne et Merdaux, n'ont pas été pris en compte car la précision du MNT (25 m) rend compliquée le tracé de la géométrie pour les petits affluents. L'utilisation d'une orthophoto a permis la construction des deux affluents présents, mais la végétation cachant les deux autres, leur géométrie n'a pas pu être définie.

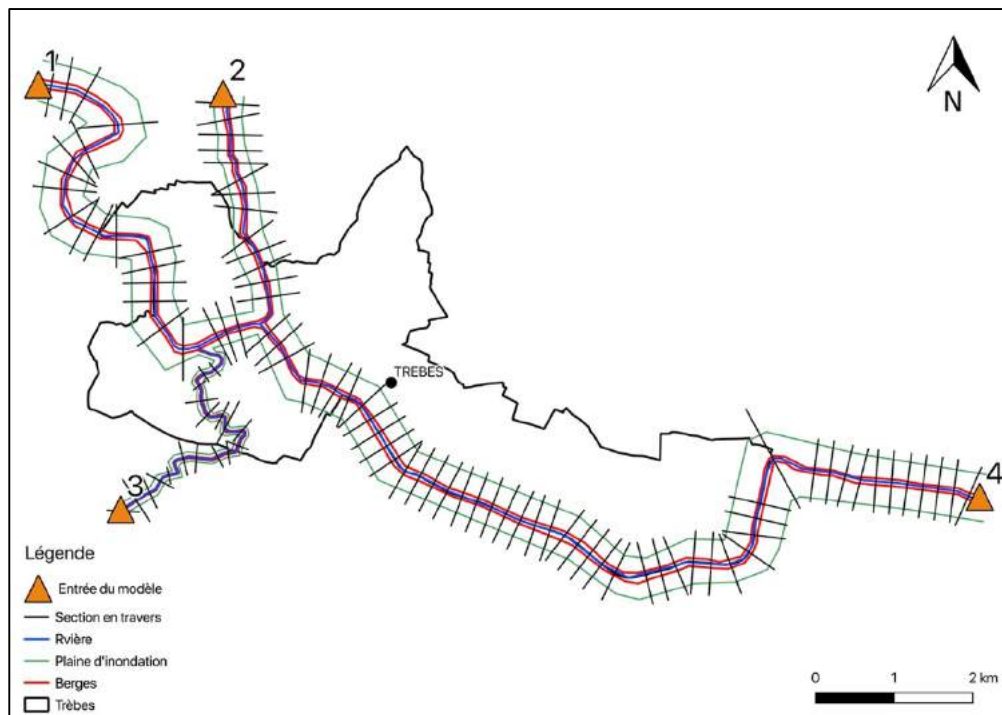


Figure 14 - Géométrie utilisée pour la simulation en cas stationnaire.

Pour la simulation, des coefficients différents ont été utilisés pour la rivière et les berges (tableau 2) pour rendre compte des différents types d'environnement.

Tableau 2 - Coefficients de frottement de Strickler utilisés pour la simulation⁵.

Cours d'eau	Description cours d'eau	K rivière	K berges
Aude	Rivière principale	K = 30 Rivière large, végétation peu dense	K = 15 Zones avec lit majeur urbanisé ou en taillis/vignes
Carrel (3) et Orbiel (2)	Affluents	K = 15 Rivière à berges étroites	K = 15 Zones avec lit majeur urbanisé ou en taillis/vignes

⁵ Source : <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/projnum/book/export/html/1447>

En régime stationnaire, la modélisation nécessite la définition d'un débit fixe à chaque bord (matérialisé par un triangle orange sur la figure 13). Les débits utilisés ici correspondent aux débits maximaux enregistrés pendant l'événement d'octobre 2018 (tableau 3). Le ruisseau de Carrel ne possédant pas de station hydrométrique, la valeur utilisée correspond au débit de pointe reconstitué lors d'une enquête de terrain (Lebouc et al., 2019). Toutes les autres valeurs, débits et hauteurs, sont obtenus sur la Banque Hydro.

Tableau 3 - Conditions initiales et conditions aux limites utilisées pour la première simulation.

	Emplacement des sections	Débits appliqués (m ³ /s)	Conditions aux limites
1	Aude à Carcassonne (Pont Neuf)	922	Hauteur d'eau connue : 5,87 m
2	Orbiel	481	Hauteur d'eau connue : 6,16 m
3	Ruisseau de Carrel	75	Pente : 3%
4	Aude à Marseillette	1010	Hauteur d'eau connue : 6,45 m

Les conditions aux limites en amont de l'Aude et de l'Orbiel sont de type « hauteur connue », de même que pour la condition limite en aval de l'Aude. Ces valeurs correspondent aux hauteurs maximales enregistrées en ces points pendant l'événement. Pour le ruisseau de Carrel, la condition limite utilisée est de type « pente connue ». La pente est obtenue grâce à un traitement raster sur ArcGIS à partir du MNT.

2. Résultats

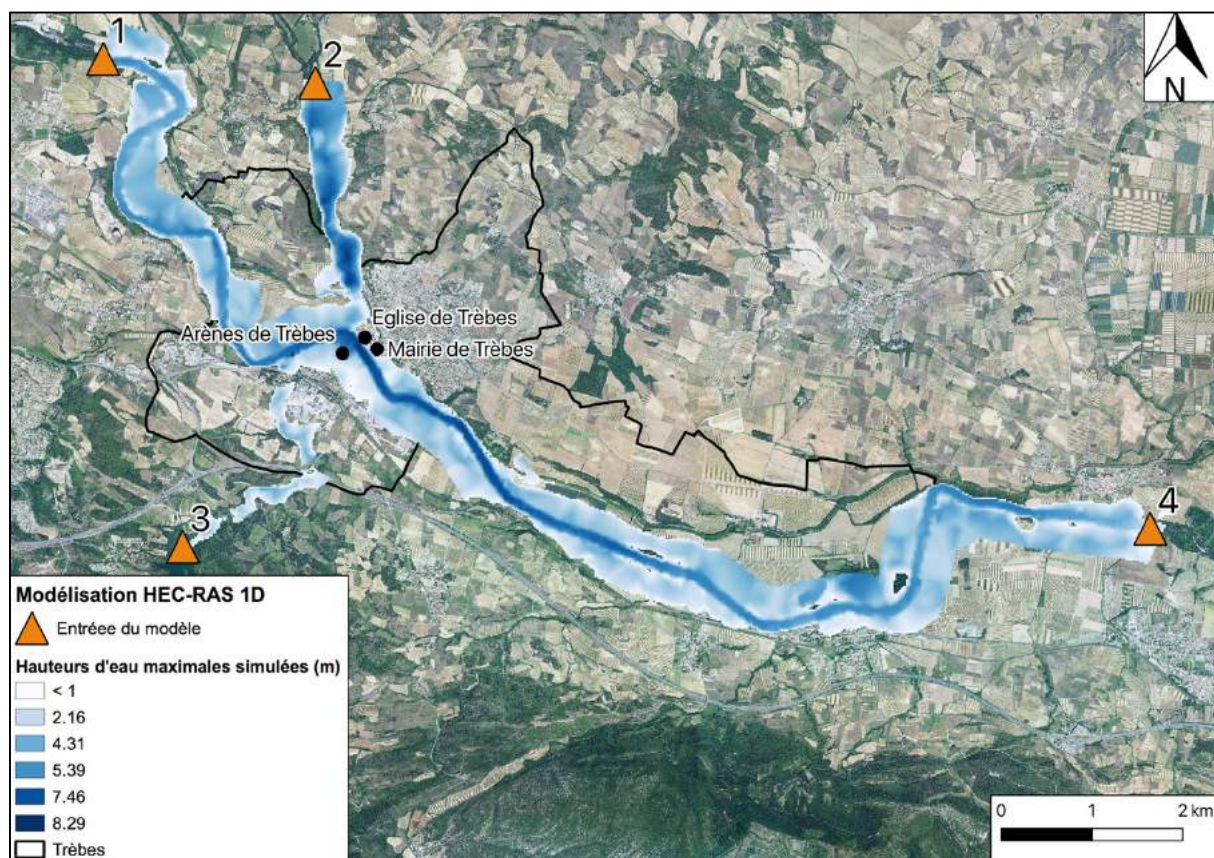


Figure 15 - Carte d'inondation de Trèbes pendant l'événement d'octobre 2018.

Le pic de hauteur d'eau dans l'Aude est à 7,95 m au niveau de la Mairie et de l'Eglise de Trèbes (figure 15). Cela se rapproche de la valeur de 7,66 m enregistrée par la station de l'Aude à Trèbes positionnée à ce même endroit. Ce pic intervient à la jonction entre l'Aude et deux de ses affluents, ce qui met en relief leur fort impact pendant cette crue.

Dans le quartier des Arènes, HEC-RAS simule une hauteur d'eau de $3,7 \pm 0,7$ m, contre une valeur observée à 3 m.

Au niveau de l'Est de la carte, l'étendue de la crue est limitée par la longueur des sections transversales (figure 14). L'eau s'est arrêtée à la frontière de la limite de la plaine d'inondation tracée sur ArcGis.

3. Discussion

En ce qui concerne la simulation 1D de HEC-RAS, il faut prendre en considération certaines limites du modèle.

Lors de la création des fichiers de géométrie il faut avoir une connaissance de la morphologie de la zone d'étude. Sur les orthophotos la délimitation des berges et de la plaine d'inondation est sujette à interprétation. En effet, la végétation, parfois très dense, ne permet pas de voir précisément les limites de chaque zone. Force est de constater, que les sections transversales trop courtes (figure 13) limitent l'extension de la crue (figure 16). Dans le cas de l'Aude et de ses affluents, il est difficile d'agrandir et de densifier les sections, de part la nature méandreuse de ces cours d'eau, car les sections ne peuvent se croiser.

Il n'a pas été possible de stabiliser un modèle en mode instationnaire. La simulation effectuée en stationnaire (figure 15) ne prend donc pas compte les variabilités temporelles de la crue.

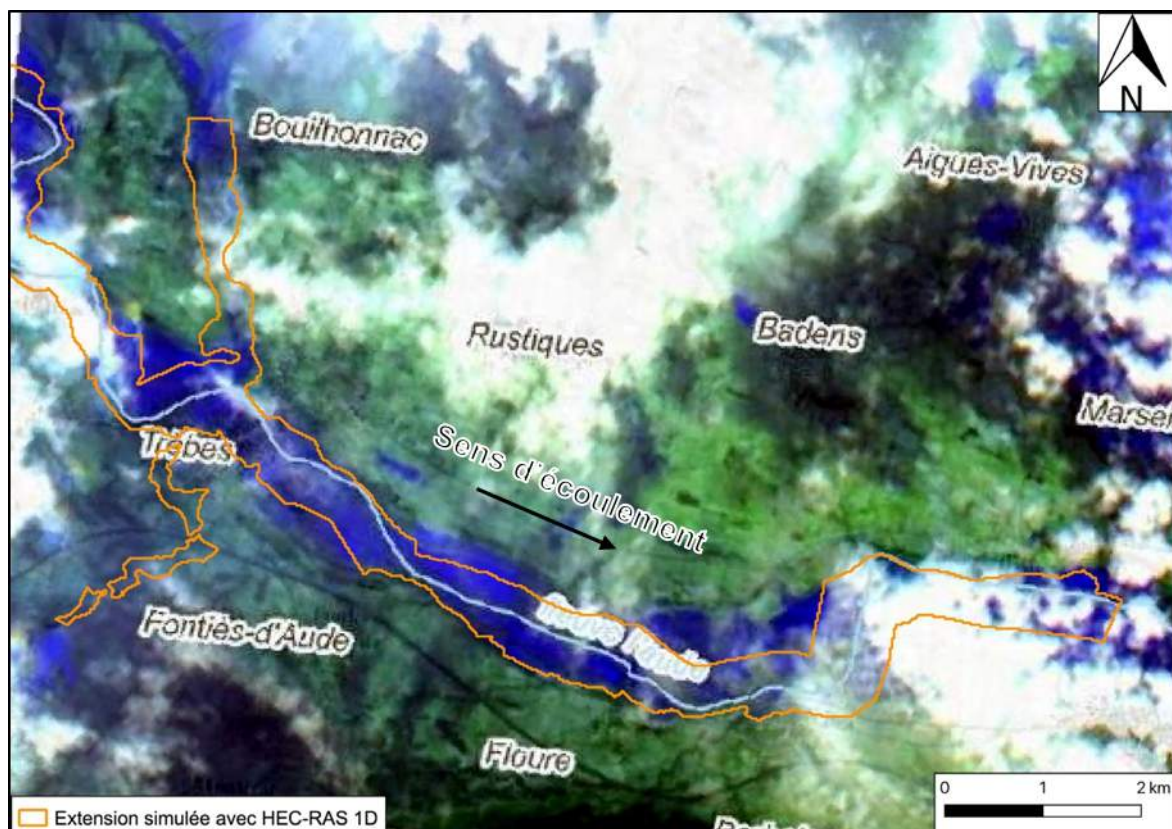


Figure 16 - Comparaison de l'extension simulée de la crue simulée en HEC-RAS 1D avec une image satellite Sentinel-2 du 15/10/18.⁶

⁶ Source : CCR.

IV. Simulation numérique avec TELEMAC2D

Le modèle TELEMAC-2D a été développé par LNHE-EDF. Il est utilisé pour permettre une modélisation numérique bidimensionnelle hydrodynamique de l'extension de la crue de l'Aude entre Carcassonne et Trèbes. En utilisant la technique des éléments finis, le système TELEMAC-2D résout les équations à surface libre moyennées par rapport à la profondeur, c'est-à-dire les équations de Saint-Venant 2D.

Pour la mise en œuvre de la modélisation, on dispose des données suivantes (tableau 4) :

Tableau 4 - Présentation des données utilisées.

Données	Type de données	Résolution	Source	Format des données
Topographique	Modèle numérique de Terrain (MNT) de l'Aude	5 m	Copernicus Land Monitoring Service	.tif
Hydrologique	Hydrogramme	Pas de temps : 1h	Banque HYDRO	.csv

Certains hydrogrammes requis pour la simulation ne sont pas disponibles sur la Banque HYDRO. Il est donc nécessaire de les reconstituer à partir des débits estimés sur le terrain après la crue (Lebouc et al., 2019). La méthodologie utilisée pour reconstituer les hydrogrammes manquants est décrite dans le chapitre suivant (section IV.1.i).

Les hydrogrammes de crue utilisés sont répertoriés dans le tableau 5 :

Tableau 5 - Descriptif des hydrogrammes utilisées.

Localisation	Code Station	Coordonnées (L 93)	Source
Aude à Carcassonne (Pont neuf)	Y1232010	648013, 6235208	Banque HYDRO
Carrel à Sainte-Claire	NA	652712, 6230293	(Lebouc et al., 2019)
Merdaux à Fontiès d'Aude	NA	657063, 6231803	(Lebouc et al., 2019)
Bretonne à Floure	NA	658866, 6231020	(Lebouc et al., 2019)
L'Orbiel à Bouilhonnac (Villedubert)	Y1415020	653738, 6237217	Banque HYDRO
Trapel à Villegailhenc	NA	647641, 6241255	(Lebouc et al., 2019)
Fresquel à Carcassonne (Pont rouge)	Y1364010	649093, 6237811	Banque HYDRO

1. Méthodologie

i. Reconstitution des hydrogrammes manquants

Certains affluents de l'Aude ayant une influence sur la crue de 2018 ne disposent pas de stations de mesures de débits. Cependant, après l'événement, une campagne organisée par l'IFSTTAR a permis de reconstituer les débits de pointes sur certains cours d'eau (Lebouc et al., 2019).

Afin de reconstituer les hydrogrammes manquants, nous avons utilisé l'hydrogramme de l'Aude à Carcassonne. Chaque valeur de débit de l'hydrogramme est divisée par la moyenne des débits sur l'événement, pour obtenir un hydrogramme adimensionnel. Puis, chaque valeur est multipliée par un même coefficient afin que le pic de l'hydrogramme passe par le débit de pointe estimé par Lebouc (2019).

ii. Création du domaine de simulation

La première étape consiste à définir le contour de la zone d'étude à partir du MNT et du tracé des cours d'eau. Cette zone est bornée en amont par les coordonnées des hydrogrammes utilisés (tableau 5) et en aval par la ville de Marseillette. Ces limites sont choisies selon la disponibilité des débits. La Figure 17 présente le domaine de calcul, soit le contour du maillage.

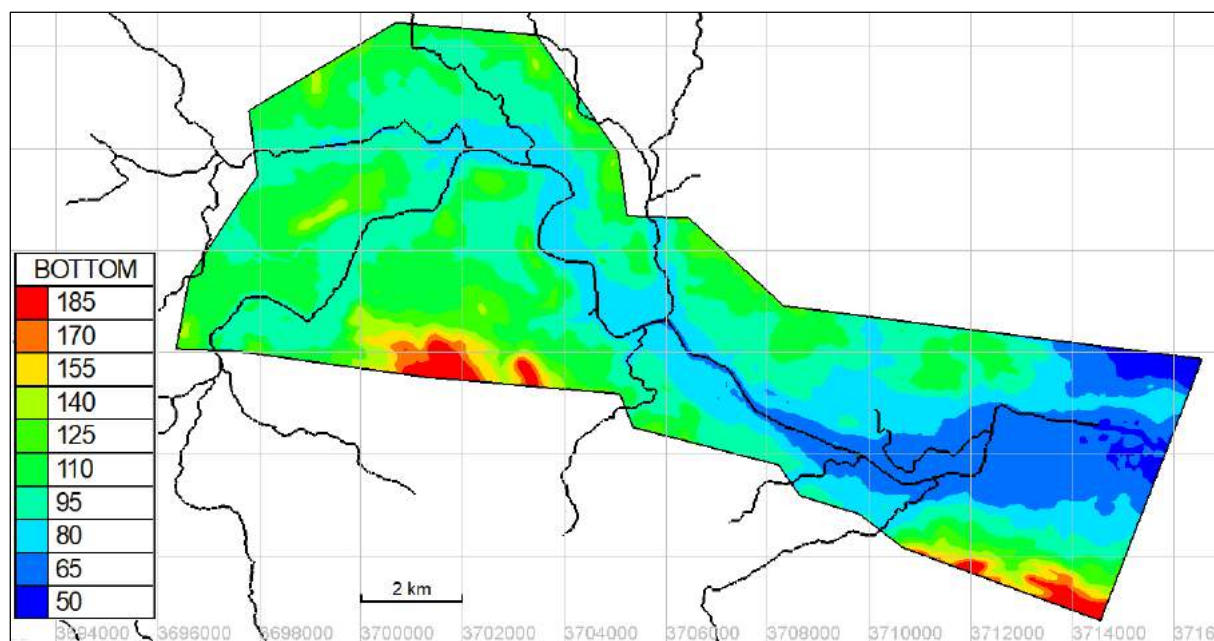


Figure 17 - Délimitation du contour du maillage (bottom en m).

La résolution du maillage est un compromis entre la précision du modèle et le temps de calcul. Pour cette simulation, le maillage compte 167 241 nœuds et la résolution est de 25 m (identique à celle du MNT). Pour prendre en compte la topographie, celle-ci est interpolée sur le maillage afin de représenter la bathymétrie.

Par la suite, il est nécessaire d'imposer des conditions aux limites de notre zone d'étude (figure 18). On impose en amont les hydrogrammes au pas de temps horaire. En aval, on impose une hauteur d'eau (côte).

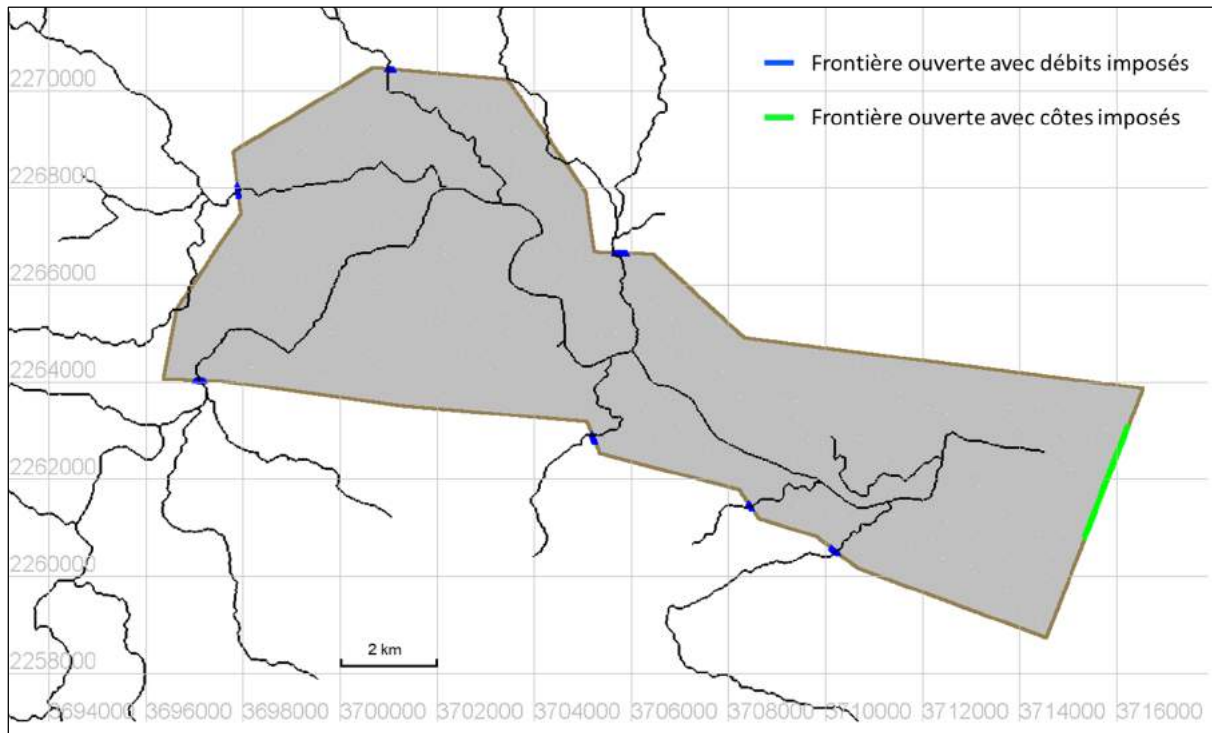


Figure 18 - Conditions aux bords du domaine.

Il est par ailleurs nécessaire de renseigner un certain nombre de paramètres physiques afin de produire une simulation satisfaisante. Ceux-ci sont résumés dans le tableau 6.

Tableau 6 - Récapitulatif des paramètres du modèle TELEMAC2D.

Période pour les sorties graphiques	1 image toutes les 200 sec (3 min 20 sec)
Durée du calcul	342000 sec (3 jours 23 h)
Coefficient de frottement	K = 15 Zones avec lit majeur urbanisé ou en taillis/vignes
Hauteur d'eau initiale sur le domaine	1 cm
Profil de vitesse	4 = Vitesse en racine carrée de h

2. Résultats

La simulation obtenue est au format selafin. Il s'agit de maillages de hauteur d'eau avec un pas de temps d'environ 3 minutes pour chaque sortie graphique. Ceux-ci peuvent être animés grâce au logiciel Bluekenue développé par le Conseil national de recherche Canada. La figure 19 montre la crue à son niveau maximum.

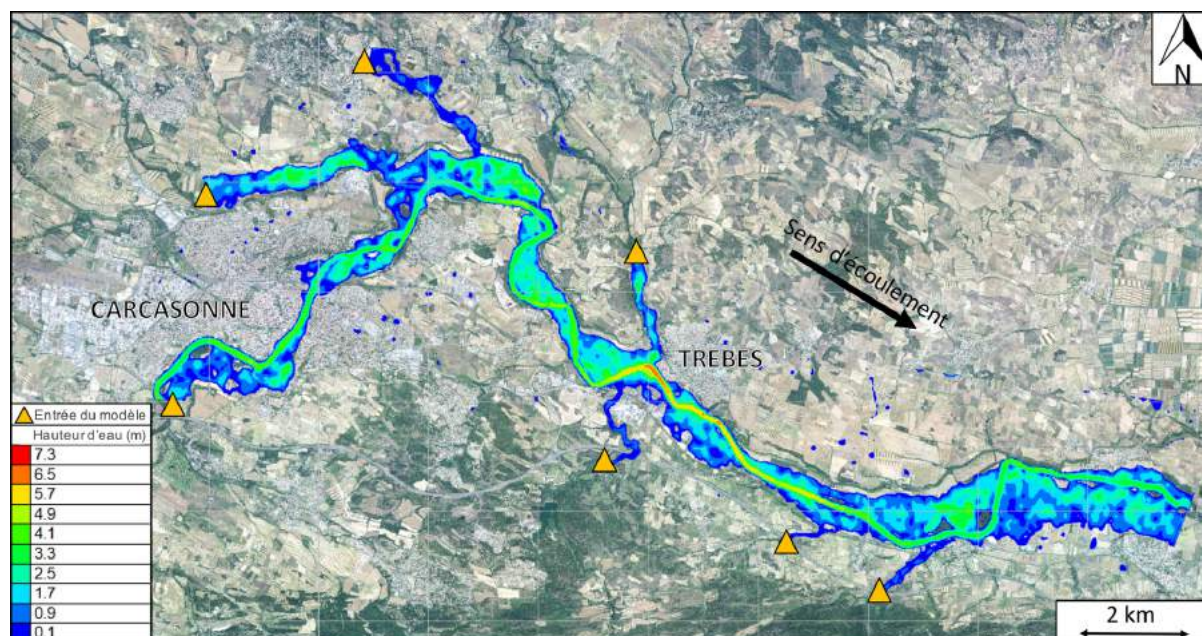


Figure 19 - Pic de la crue de l'Aude à Carcassonne et Trèbes.

La modélisation prédit le pic de la crue aux alentours de 11h du matin le 15 octobre 2018. La hauteur d'eau maximale sur l'événement est calculée à 6,88 m au niveau de la ville de Trèbes. Ce sont principalement au niveau des champs entre Trèbes et Carcassonne et en aval de Trèbes que l'extension de la crue est la plus large avec environ 1,5 km de part et d'autre de l'Aude. Les hauteurs d'eau enregistrées durant l'événement par les stations sur notre domaine d'étude sont récapitulées et comparées avec les hauteurs simulées avec TELEMAC2D, dans le tableau 7. Le modèle sous-estime les hauteurs d'eau de 0,88 m en moyenne.

Tableau 7 - Comparaison entre les hauteur d'eau observées et simulées.

	Hauteur d'eau observée lors de l'événement	Hauteur d'eau simulée par TELEMAC2D
Aude à Trèbes	7,66 m	6,88 m
Carcassonne [Pont-Neuf]	5,87 m	4,50 m
Carcassonne [Pont-Vieux]	5,27 m	4,76 m
Quartier des Arènes de Trèbes	~3 m	3,00 ± 0,5 m

3. Discussion

Il est à noter qu'il existe certaines limites à prendre en compte pour ce type de simulation. Tout d'abord, le coefficient de frottement est considéré unique sur tout le domaine. Cela ne permet pas de refléter l'hétérogénéité spatiale du terrain qui est composé de champs agricoles, de vignes, de quartiers urbanisés, etc. Il faut également noter que le cadastre n'est pas pris en compte lors des simulations. Or, les bâtiments et la bétonisation des sols modifient radicalement les profils de vitesses des lames d'eau. Enfin, la faible résolution du modèle numérique de terrain (25 m) ne permet pas de représenter fidèlement la topographie de notre domaine d'étude. Ces différents éléments peuvent expliquer en partie les différences de hauteur d'eau entre les observations historiques et la simulation (tableau 7 & figure 20).

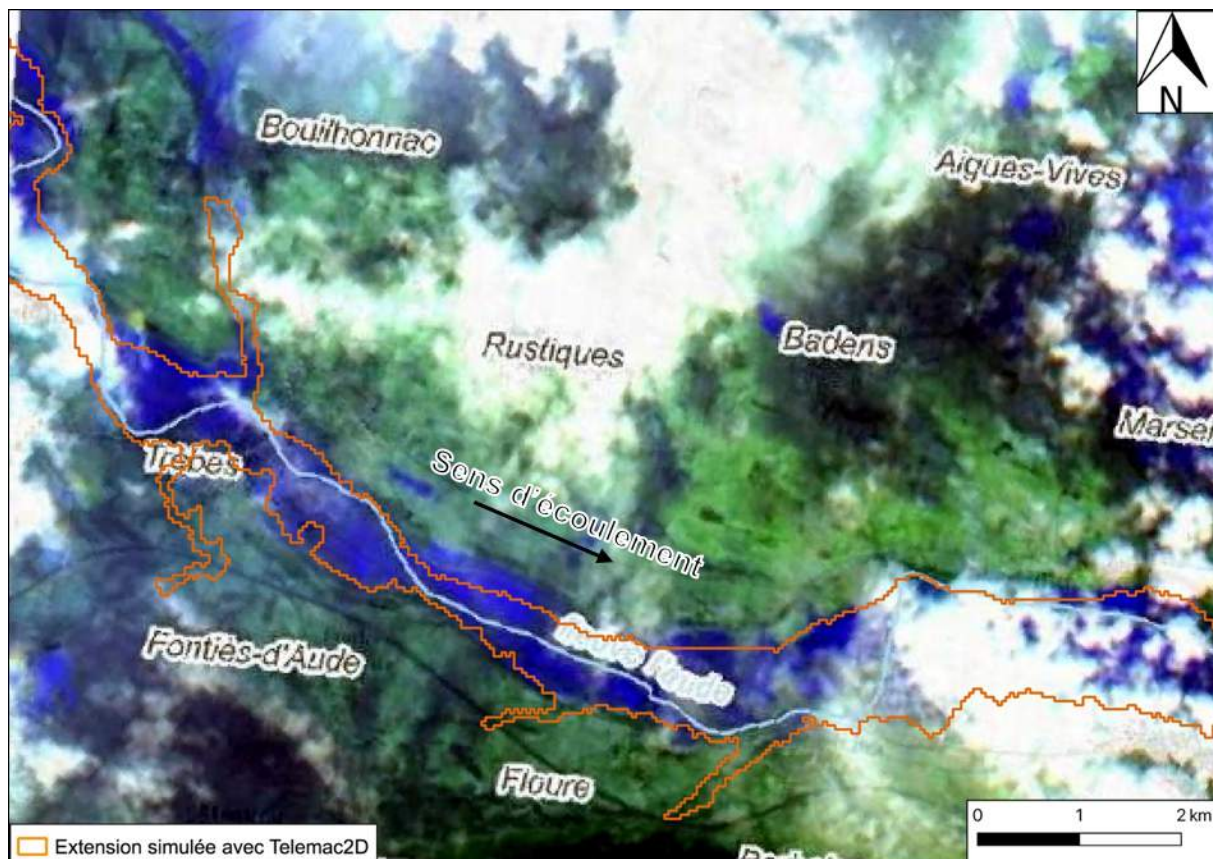


Figure 20 - Comparaison de l'extension simulée de la crue simulée en Telemac2D avec une image satellite Sentinel-2 du 15/10/18.⁷

Sur la figure 20, l'extension simulée est fidèle à la photographie aérienne, notamment au niveau de l'Aude. Telemac a aussi pris en compte l'aval du domaine d'étude, à la différence des deux autres méthodes HAND et HEC-RAS. Cependant, il est possible de constater qu'au centre de la carte, au niveau de l'Aude rive gauche, l'extension modélisée est plus petite que l'observation. Ceci s'explique par la présence du Canal du Midi, parallèle à l'Aude, qui est un cours d'eau artificielle, difficile à prendre en compte dans le cadre des simulations 1D/2D. Néanmoins, ce dernier a joué un rôle lors des inondations de 2018 étant donné qu'il a également débordé (Ministère de l'Intérieur, 2019).

⁷ Source : CCR.

V. Comparaison des modèles avec les données AXA

A partir des simulations effectuées dans le cadre de cette étude, M. Sitruk du service CYMO d'AXA a produit une analyse statistique de nos résultats. Le backtesting est une méthode qui permet de tester la pertinence d'une modélisation en s'appuyant sur un ensemble de données réelles. Les données utilisées ici sont un ensemble de 702 points recensant les sinistres ayant eu lieu à cause des intempéries d'octobre 2018 dans l'Aude. Le tableau 8 présente les résultats obtenus après backtesting.

Tableau 8 - Résultats du backtesting pour les 3 modèles utilisés.

	Vrai positif	Faux positif	Vrai négatif	Faux négatif	Précision	Rappel
HECRAS	27	14	516	145	65,85 %	15,70 %
HAND	31	15	515	141	67,39 %	18,02 %
TELEMAC	16	8	522	156	66,67 %	9,30 %

1. Définitions des termes employés

Vrai positif : « Le modèle prédit que c'est inondé (le point est dans l'eau), et il y a bien un sinistre ».

Vrai négatif : « Le modèle prédit que ce n'est pas inondé (le point est hors de l'eau), et il n'y a pas de sinistre ».

Faux positif : « Le modèle prédit que c'est inondé, mais il n'y a pas de sinistre ».

Faux négatif : « Le modèle prédit que ce n'est pas inondé, mais il y a un sinistre ».

Précision et rappel sont deux notions statistiques qui permettent de mesurer la pertinence d'un modèle.

Précision : lorsque le modèle prédit une inondation, dans combien de pourcent des cas a-t-il raison ?

Rappel : quel pourcentage des zones inondées le modèle récupère-t-il ?

$$\text{Précision} = \frac{\text{Vrais positifs}}{\text{Vrais positifs} + \text{Faux positifs}} \quad \text{Rappel} = \frac{\text{Vrais positifs}}{\text{Vrais positifs} + \text{faux négatifs}}$$

2. Analyse des résultats et discussion

Dans un premier temps, il est possible de constater que les trois modèles possèdent la même précision de 66 ± 1 % contre un rappel moyen de $14,3 \pm 4,5$ %. Ce qui en font des modèles plus précis que performants. Donc, dans environ 66% des cas nos modèles sont justes lorsqu'ils prédisent une inondation mais, ils ne récupèrent qu'une faible partie du total des sinistres.

Il est aisé d'expliquer les performances faibles de ces modèles. En effet, il existe plusieurs types d'inondation : inondation par ruissellement, débordement de cours d'eau, remontée de nappe et submersion marine par déferlement. Dans le cadre de notre zone d'étude, les deux types d'inondation ayant le plus d'impact lors d'événement pluvieux sont les deux premiers. Les modélisations effectuées ici reposent uniquement sur l'analyse du comportement des cours d'eau et ne prennent pas en compte les inondations causées par le ruissellement lié aux précipitations. Nos méthodes recoupent les sinistres ayant été directement causés par le débordement de l'Aude et ses affluents, soit les habitations situées en bord de rivière. Or, dans le cas des inondations de l'Aude, une grande partie des sinistres ont sans doute été causés par les ruissellements de surface dus à l'importance des précipitations et aux conséquences engendrées par celles-ci. Par exemple, de nombreux cas de glissements de terrain ont été répertoriés à la suite de cet événement (Ministère de l'Intérieur, 2019)

ou encore des zones de stagnation des eaux. Il est donc normal que nos modèles ne récupèrent qu'une faible partie des sinistres.

Afin d'améliorer la performance de modèles hydrauliques il faudrait prendre compte de nombreux autres paramètres pour que le modèle représente le plus fidèlement possible le terrain :

- Un coefficient de frottement adaptatif aux types de sols.
- Un MNT avec une meilleure résolution (5 m ou mieux).
- Le cadastre des communes.
- Dans ce cas, le Canal du Midi.
- Les réseaux d'assainissements des villes qui participent aux inondations de par leur débordement.
- La prise en compte des précipitations afin de représenter les inondations dues au ruissellement.

En contrepartie l'ensemble de ces paramètres nécessitent une grande connaissance de la zone, l'accessibilité à des données de bonnes qualités, du temps pour créer un modèle complet, et certainement de grandes ressources de calculs.

Dans le cas présent, le backtesting nous permet de voir que les trois modèles créés ont des statistiques de performance équivalentes. En l'occurrence si l'on souhaite modéliser des inondations liées au débordement des cours d'eau, la méthode HAND semble être à la fois la plus performante (avec le rappel le plus élevé) et la plus simple et rapide à mettre en place. En effet, avec le code R disponible en annexe, il suffit de fournir un MNT et les coordonnées de diverses stations hydrométriques avec les hauteurs maximales enregistrées, pour obtenir une carte d'inondation. En définitif, la méthode HAND propose le meilleur rapport performance/simplicité.

La méthode HAND pourrait être un outil opérationnel dans le cadre de la détection des zones inondées par débordement des rivières. Après un événement pluvieux intense, il est possible de récupérer les hauteurs d'eau enregistrées dans l'Aude et ses affluents et ainsi, connaître rapidement l'extension de la crue associée. Cet outil pourrait être utilisé dans le cadre de dédommagement des infrastructures (habitations, champs agricoles, vignes, etc.) en bordure de cours d'eau.

VI. Estimation des périodes de retour de l'événement

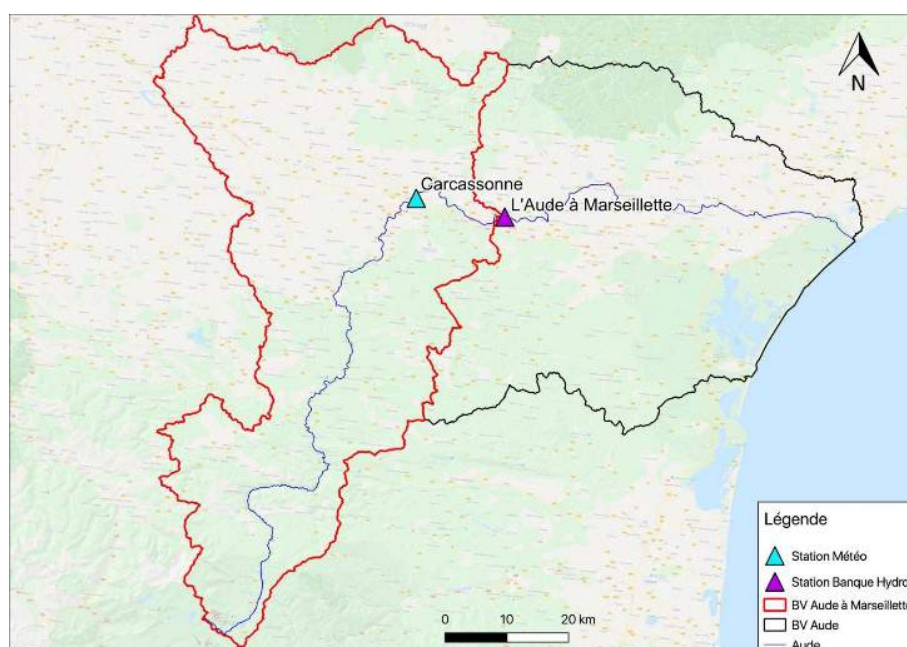
1. Notion de période de retour

Cette dernière partie du projet consiste à réaliser une analyse fréquentielle des cumuls de pluie ainsi que des débits sur le bassin versant de l'Aude, dans le but d'estimer la période de retour des inondations de 2018. Pour ce faire, nous utilisons des données provenant de la banque HYDRO et de Speedwell Weather.

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédétermination consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné, afin d'en définir les probabilités futures. En hydrologie, cette prédétermination vise à estimer, pour une section donnée d'un cours d'eau, soit la probabilité de dépassement d'un paramètre donné (débit par exemple), ou de façon symétrique, une valeur de ce même paramètre ayant une probabilité donnée d'être dépassée. Autrement dit, une période de retour est un temps de retour qui caractérise la fréquence d'apparition d'un phénomène. Connaître ces périodes peut être intéressant pour des futurs projets d'aménagement d'ouvrages sur des cours d'eau. Par exemple, pour la construction de barrages ou pour constituer différents documents tels que le DICRIM (Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs) ou bien le DDRM (Dossier Départemental des Risques Majeurs), nécessaires à la prévention des inondations dans les zones à haut risque.

2. Outils et données utilisés

Dans le cadre de cette étude, les calculs sont réalisés grâce au logiciel R (R Core Team, 2013). Ce dernier est un logiciel de programmation qui permet de traiter des données et de faire des calculs statistiques. Les données utilisées sont constituées des séries temporelles de précipitations de 1999 à 2019 (21 ans de mesures) et de débits journaliers de 1986 à 2019 (33 ans de mesures). La première station utilisée est la station pluviométrique de l'Aude à Carcassonne [Y1232010], mise en service en 1912 et drainant un bassin versant de 1754 km². La seconde, est la station hydrométrique de l'Aude à Marseillette, mise en service en 1920 et drainant un bassin versant de 3127 km². La figure 21 montre l'emplacement de ces deux stations.



L'analyse statistique est effectuée à partir de deux lois statistiques souvent utilisées en hydrologie :

- La loi Normale (Abramowitz et Stegun, 1972)
- La loi de Gumbel (Gumbel, 1935)

Ainsi, nous obtenons différents résultats, avec les mêmes séries de données, selon ces deux méthodes de calculs. Il est nécessaire de préciser que les périodes de retour sont calculées en traitant les données de différentes manières. Les résultats sont d'abord affinés avec les périodes annuelles, puis mensuelles et enfin journalières. Nous discuterons de la pertinence des résultats et des précautions à prendre sur leur analyse.

3. Méthodologie pour l'analyse des précipitations

i. Cumuls de précipitations

Afin d'obtenir les périodes de retour à partir des précipitations, l'ensemble des cumuls journaliers d'une même année sont sommés pour obtenir 21 cumuls annuels. Ensuite, la même démarche est effectuée en sommant cette fois-ci l'ensemble des cumuls journaliers d'un même mois. Nous avons dans ce cas-là 243 cumuls mensuels de précipitation au total. Enfin, nous avons les données de précipitations journalières, soit 7359 cumuls journaliers pour faire une troisième analyse. Cette première étape permet de sortir les graphiques suivants (figure 22), avec les trois séries de cumuls de précipitation : annuelles, mensuelles et journalières en fonction du temps, de 1986 à 2019.

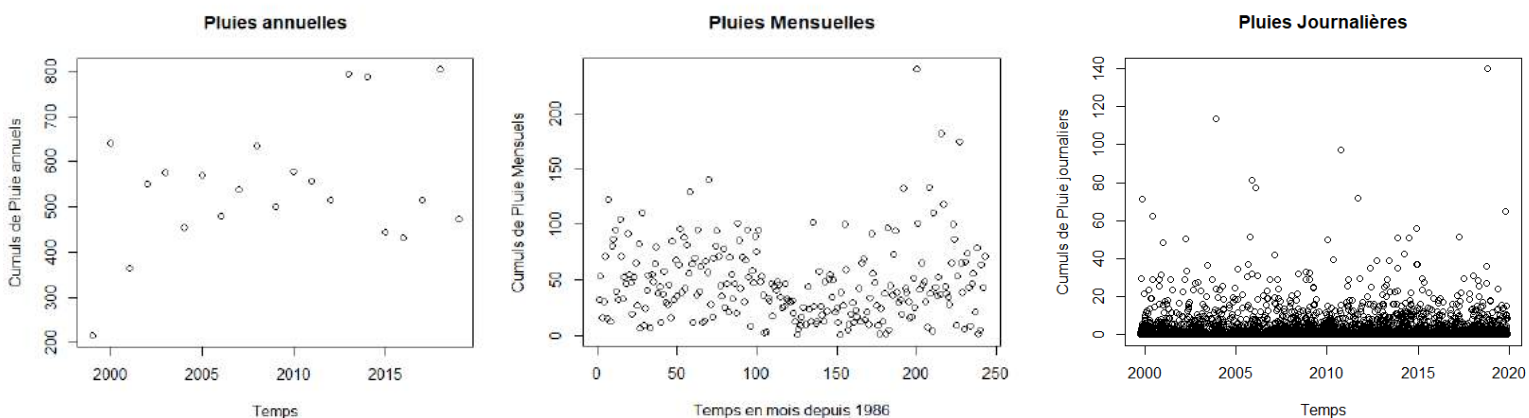


Figure 22 - Cumuls de précipitation annuels, mensuels et journaliers de 1999 à 2019 à Carcassonne.

On observe sur la figure 22 que le cumul journalier maximal est de 139 mm le 15 octobre 2018. Dans l'ensemble, les cumuls journaliers se trouvent sous les 20 mm. Par ailleurs, le cumul annuel de précipitation moyen sur le bassin versant est de 543,8 mm. Les valeurs extrêmes sont de 803 mm en 2018 pour la valeur la plus haute et de 214 mm sur l'année 1999 pour la plus basse.

ii. Analyse fréquentielle des précipitations

Afin de réaliser l'analyse fréquentielle, nous devons nous baser, comme souvent en hydrologie, sur un modèle fréquentiel pour valider nos résultats. Il s'agit de choisir une équation décrivant le comportement statistique du processus. Nous utilisons deux méthodes pour notre étude : la loi normale et la loi de Gumbel, pour les précipitations mesurées à Carcassonne et les débits mesurés à la station hydrométrique de Marseillette.

Loi Normale : méthode et résultats

La fonction de répartition de la Loi Normale $F(x)$ s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad \text{Où la moyenne } \mu \text{ et l'écart-type } \sigma \text{ sont deux paramètres de la Loi Normale.}$$

Nous trions ainsi les trois séries de cumuls de précipitation dans l'ordre croissant et attribuons un rang à chaque valeur. C'est-à-dire, attribuer le rang 1 au cumul le plus petit, le rang 2 au second cumul et donc le rang 21 au cumul le plus grand (avec la série annuelle). Ce tri est effectué sur les deux autres séries de cumuls (mensuelles et journalières). Ceci nous permet de déterminer la fréquence de non-dépassement de chaque valeur de cumul de pluie grâce à la formule d'Hazen (Hazen et Williams, 1920): $F(X_i) = r - 0.5 * n$

Où r est le rang dans la série de données classées par valeurs croissantes, et n la taille de l'échantillon, donc 21 si l'on prend la série annuelle.

Calculs de deux paramètres de la Loi Normale (moyenne μ , et l'écart-type σ)

Prenons l'exemple de la série annuelle.

La moyenne μ de notre échantillon est de 543,8 mm et l'écart-type de 140 mm. L'écart-type est donné par la formule suivante : $\sigma = \sqrt{\sum (X_i - \mu)^2 / n}$

où X_i est la valeur de précipitation dans la série de données, μ la moyenne de l'échantillon (543,8) et n la taille de l'échantillon (21).

Rappelons que la période de retour T d'un événement est définie comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement, soit : $T = \frac{1}{1-F(X_i)}$.

Ce qui nous permet alors de tracer le graphique suivant, sur lequel on retrouve les cumuls annuels de précipitation en fonction des variables centrées réduites U de la loi Normale. Nous avons ajouté dans le même temps la droite de Henry (Armatte et Gibrat, 1995). De plus nous calculons les valeurs X_i de pluie pour les périodes de retour (T) de 10, 100 et 1000 ans représentées par les points rouges sur le graphique (figure 23).

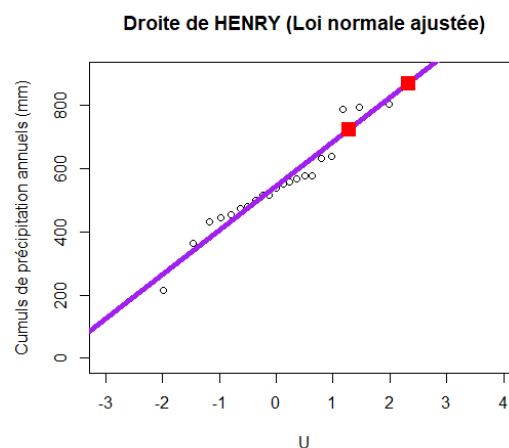


Figure 23 - Analyse fréquentielle des cumuls annuels de précipitations avec la loi Normale.

Exemple de calculs pour la période de retour de 10 ans :

$$X = \mu + U * \sigma$$

$$F(X_i) = 1 - \frac{1}{T}$$

Variable centrée réduite U :

- Table de gauss
- Commande « qnorm » sur R Studio

$$X_T = \mu + U * \sigma$$

$$F(X_{10}) = 1 - \frac{1}{10} = 0.9 \longrightarrow U = 1.2815 \longrightarrow X_{10} = 543.8 + 1.2815 * 140 = 723 \text{ mm}$$

Les calculs sont identiques pour les périodes retour de 100 et 1000 ans, en remplaçant T par 100 et 1000. Rappelons tout de même que la fréquence calculée est la fréquence de non-dépassement du cumul annuel de pluie.

Nous réalisons les mêmes démarches pour les cumuls mensuels et journaliers. Ils sont d'abord triés dans l'ordre croissant, avec un rang attribué à chacun (1 au plus petit cumul ainsi que 243 et 7359 respectivement au cumul mensuel et journalier les plus élevés). Ensuite, leur fréquence de non-dépassement est déterminée avec la formule d'Hazen (Hazen et Williams, 1920) pour trouver les variables centrées réduites respectives. Nous obtenons les graphiques suivants selon ces deux autres traitements de données (figure 24).

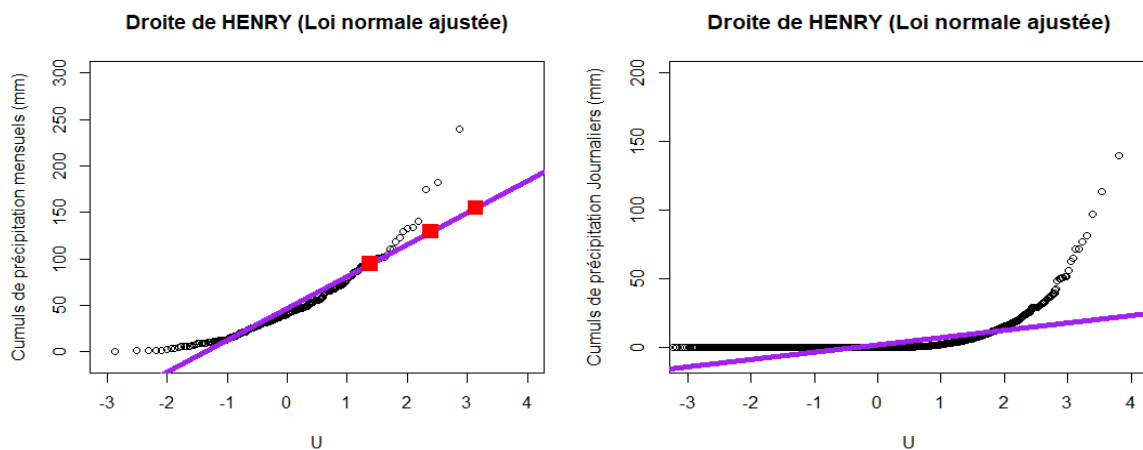


Figure 24 - Analyse fréquentielle sur les cumuls de précipitation mensuels et journaliers avec la loi Normale.

iii. Commentaires sur l'analyse fréquentielle avec la loi Normale

En observant ces graphiques, nous constatons que la droite d'Henry s'ajuste très bien sur les cumuls de précipitations annuels. En effet, l'ensemble des points sont proches, voire confondus, avec la droite (figure 23). Pour les cumuls mensuels, les valeurs extrêmes basses et hautes (supérieures à 110 mm) ont tendance à s'écarter de la droite (figure 24). Enfin, pour les cumuls journaliers, les points ne s'ajustent pas avec la droite d'Henry (figure 24). Ce constat s'explique du fait qu'il y ait un très grand nombre de jours où il a plu très peu voire pas du tout. Le cumul moyen journalier est de 1,55 mm sur la période de mesures alors que le cumul journalier maximal enregistré est de 139 mm le 15 octobre 2018.

Pour l'événement du 14 et 15 octobre 2018, les périodes de retour calculées à Carcassonne avec la loi normale sont les suivantes (tableau 9) :

- Le cumul de précipitation de l'**année 2018** est de **804 mm** et correspond à un cumul annuel de pluie de période de retour de **31 ans**,
- Le cumul de précipitation **d'octobre 2018** est de **239,5 mm** et correspond à cumul mensuel de pluie de période de retour de plus de **8 millions d'années**,

- Le cumul de précipitation du **15 octobre 2018** est de **139 mm** et correspond à un cumul journalier de pluie de période de retour **INFINI**.

Tableau 9 - Résultats de l'analyse fréquentielle des précipitations avec la loi Normale.

Evénement	Pluie (mm)	Période de retour de l'événement (an)	Cumul de pluie associé à une période de retour de 1 an	10 ans	100 ans	1000 ans
Cumul de pluie de 2018	804	31	-	723	870	977
Cumul octobre 2018	239,5	8112746	94	129	154	176
15 octobre 2018	139	INFINI	-	-	-	-

L'exploitation des données étant faite sur une période de seulement 21 ans, il est difficile de pouvoir visualiser une pluie de période de retour 100 ans ou bien 1000 ans. Il serait intéressant de faire la même démarche sur une période plus longue.

L'utilisation de la loi Normale donne des cumuls de précipitations proches de la droite d'Henry pour les cumuls annuels, mais il y a tout de même des incertitudes. De plus, l'analyse fréquentielle mensuelle et journalière donne des périodes de retour infinies, puisque le cumul de pluie d'octobre 2018 est largement supérieur aux autres mois de mesures (moyenne mensuelle de 47 mm).

Loi de Gumbel : méthode et résultats

Nous effectuons maintenant la même analyse fréquentielle des précipitations avec loi de Gumbel. La fonction de répartition de la Loi de Gumbel $F(x)$, s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right)$$

Posons la variable réduite suivante, $u = \frac{x-a}{b}$. La distribution s'écrit alors : $F(x) = \exp(-\exp(-u))$ et $u = -\ln(-\ln(F(x)))$.

Comme avec la Loi normale, les cumuls de pluies sont à nouveau triés et associés à une fréquence grâce à la formule d'Hazen (Hazen et Williams, 1920). Ensuite, nous calculons les variables réduites u de Gumbel avec la formule ci-dessus. Ainsi, l'ensemble des cumuls annuels, mensuels et journaliers sont tracés sur un graphique en fonction de leur variable réduite (figure 25).

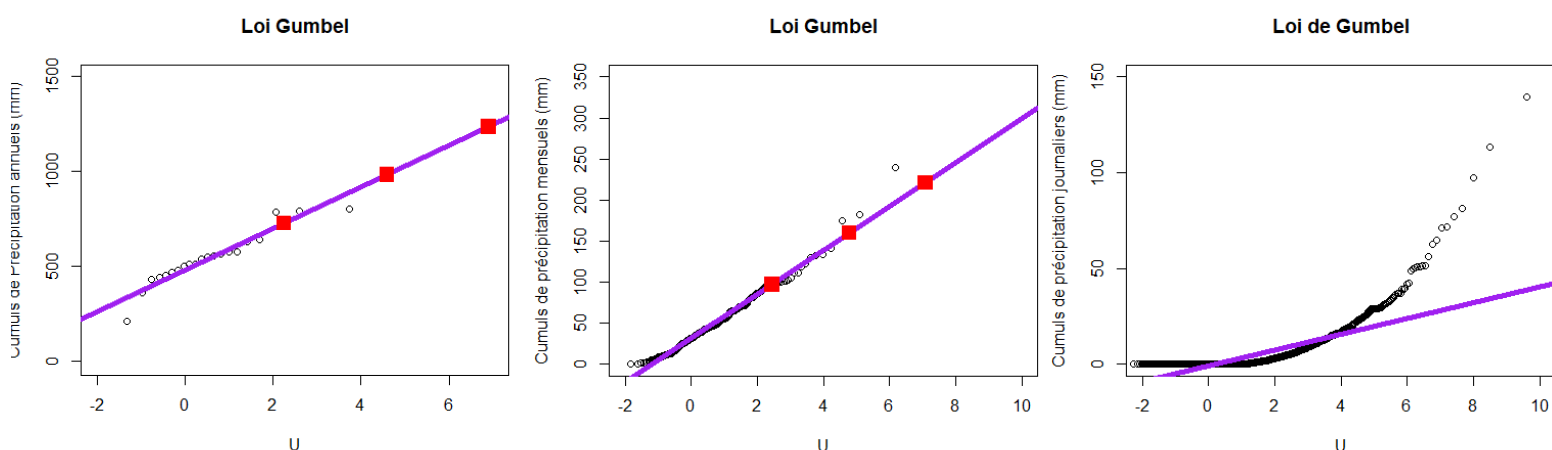


Figure 25 - Analyse fréquentielle sur les cumuls de précipitations annuels, mensuels et journaliers avec la loi de Gumbel.

iv. Commentaires sur l'analyse fréquentielle avec la loi de Gumbel

En observant les graphiques figure 25, nous constatons que la droite de corrélation s'ajuste très bien sur les cumuls de précipitations annuels et mensuels, avec l'ensemble des points proches voire confondus avec la droite. En revanche, l'observation sur les cumuls journaliers n'est pas aussi juste, avec des points qui ne suivent pas la droite de corrélation. Nous en déduisons que les journées avec de forts cumuls de pluie ne permettent pas d'avoir une répartition linéaire des précipitations.

Pour l'événement du 14 et 15 octobre 2018, les périodes de retour calculées à Carcassonne avec la loi de Gumbel sont les suivantes (tableau 10) :

- Le cumul de précipitation de l'**année 2018** est de **804 mm** et correspond à un cumul annuel de pluie de période de retour de **20 ans**,
- Le cumul de précipitation **d'octobre 2018** est de **239,5 mm** et correspond à cumul mensuel de pluie de période de retour de **197 ans**,
- Le cumul de précipitation du **15 octobre 2018** est de **139 mm** et correspond à un cumul journalier de pluie de période de retour **INFINI**.

Tableau 10 - Résultats de l'analyse fréquentielle des précipitations avec la loi de Gumbel.

Événement	Pluie (mm)	Période de retour de l'événement (an)	Cumul de pluie associé à une période de retour de 1 an	10 ans	100 ans	1000 ans
Cumul de pluie de 2018	804	20	-	726	983	1235
Cumul octobre 2018	239,5	197	97	159	221	282
15 octobre 2018	139	INFINI	-	-	-	-

L'analyse fréquentielle avec la loi de Gumbel donne visiblement des résultats plus précis que la loi Normale. Elle semble plus adaptée pour faire l'analyse sur les maximaux d'une variable.

4. Méthodologie pour l'analyse des débits

i. Débits maximaux enregistrés

Pour l'analyse fréquentielle des débits mesurés à la station hydrométrique de Marseillette, nous décidons de ne prendre en compte que les débits maximaux mesurés. Cette décision se justifie car nous nous intéressons à un événement extrême, de ce fait, il doit être comparé avec des débits maximaux enregistrés au cours de la période de mesure. Nous réalisons tout de même l'analyse fréquentielle journalière pour visualiser les résultats obtenus.

A partir des 33 ans de données disponibles à la station de l'Aude à Marseillette (banque HYDRO), nous calculons les débits maximaux annuels, mensuels et journaliers. Il faut toutefois prendre en compte le fait que des lacunes sont présentes dans la plage de données, avec certaines années parfois manquantes.

Nous extrayons d'abord le débit maximal journalier de chaque année pour obtenir, au total, 30 débits maximaux annuels. Puis, nous faisons la même démarche en prenant cette fois-ci le débit maximal de chaque mois. Nous obtenons ainsi 339 débits maximaux mensuels. Finalement, nous gardons l'ensemble des débits journaliers mesurés de 1986 à 2019 pour faire une troisième analyse, soit 10208 débits journaliers.

Cette première étape permet de tracer les graphiques suivants (figure 26), représentant les trois séries de débits maximaux, annuelles, mensuelles et journalières, en fonction du temps, de 1986 à 2019.

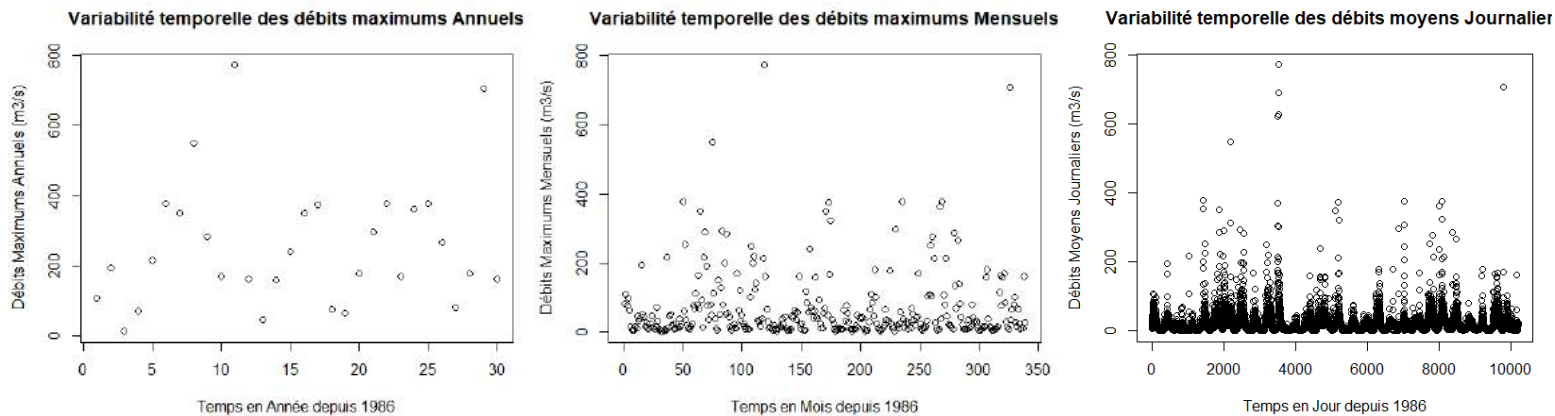


Figure 26 - Débits maximaux annuels, mensuels et journaliers de 1986 à 2019 à la station de Marseillette.

Sur la figure 26, il est possible de constater que le débit maximal journalier mesuré est de $772 \text{ m}^3/\text{s}$ le 9 décembre 1996. L'évènement du 15 octobre 2018, avec un débit de $707 \text{ m}^3/\text{s}$ n'est donc pas le débit maximal mesuré sur la période de mesures. Par ailleurs, on peut lire sur ces graphiques les observations suivantes (tableau 11) :

Tableau 11 - Statistiques des débits journaliers, mensuels et annuels avec la loi de Gumbel.

	Qmin (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)	Qmoyen (m ³ /s)	Ecart-type
Année	12	772	257	182
Mois	1,66	772	66,2	98,1
Jour	0,14	772	20,7	32,7

ii. Analyse fréquentielle des débits maximaux

Comme pour l'analyse fréquentielle des précipitations, nous réalisons une seconde analyse sur les débits maximaux, avec l'application de la loi Normale et de celle de Gumbel.

Loi Normale : méthode et résultats

La méthodologie d'application de la loi Normale sur les débits est identique à celle utilisée pour l'analyse des précipitations.

Les étapes à suivre sont les suivantes :

- Préparation de la série de données des débits de pointe,
- Tri des valeurs dans l'ordre croissant,
- Attribution d'un rang à chaque valeur,
- Calcul de la fréquence empirique pour chaque rang avec la formule d'Hazen,
- Calcul de la variable centrée réduite de Gauss « u »,
- Représentation graphique des couples (u_i, x_i) de la série à ajuster.

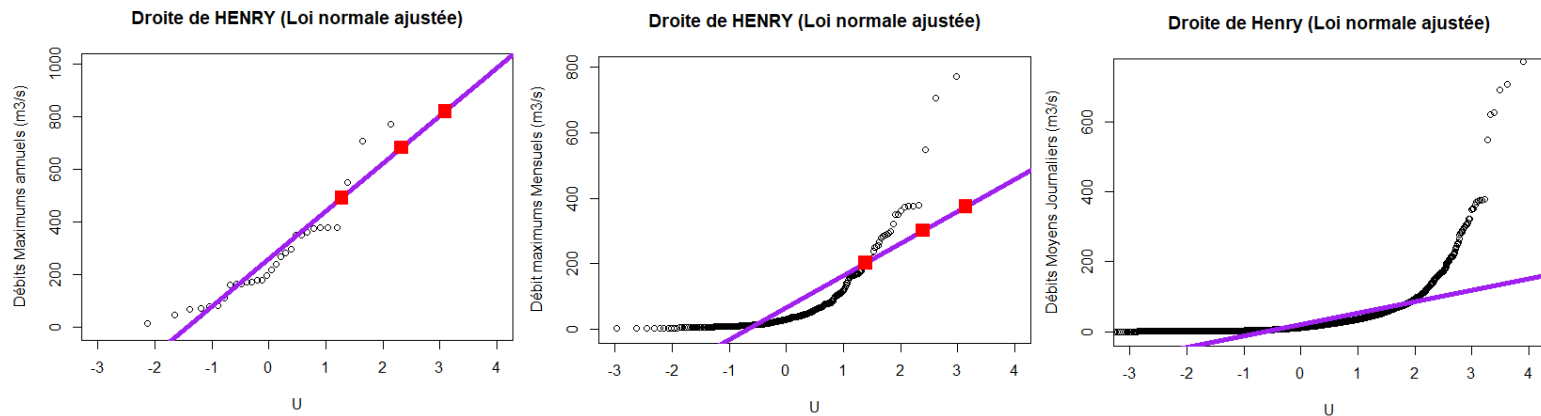


Figure 27 - Analyse fréquentielle des débits maximaux annuels, mensuels et journaliers avec la loi Normale.

iii. Commentaires sur l'analyse fréquentielle avec la loi Normale

Ces étapes nous permettent d'obtenir les graphiques précédents (figure 27). Nous constatons que la droite de corrélation s'ajuste très bien sur les débits maximaux annuels. En effet l'ensemble des points sont proches de la droite. Par ailleurs, les débits maximaux mensuels et journaliers ne permettent pas d'avoir une répartition linéaire des débits. Ainsi, les résultats des périodes de retour sur l'analyse des débits mensuels seront à utiliser avec précaution et d'autant plus avec les débits journaliers.

Pour l'événement du 14 et 15 octobre 2018, les périodes de retour calculées avec la loi Normale sont les suivantes (tableau 12) :

- Le débit maximal de l'**année 2018** est de **707 m³/s** et correspond à un débit maximal de période de retour de **145 ans**,
- Le débit maximal **d'octobre 2018** est de **707 m³/s** et correspond à un débit maximal de période de retour **INFINI**,
- Le débit maximal du **15 octobre 2018** est de **707 m³/s** et correspond à un débit maximal de période de retour **INFINI**.

Tableau 12 - Résultats de l'analyse fréquentielle des débits avec la loi Normale.

Événement	Débit (m ³ /s)	Période de retour de l'événement (an)	Cumul de pluie associé à une période de retour de 1 an	10 ans	100 ans	1000 ans
Débit max 2018	707	145	-	491	681	821
Cumul octobre 2018	707	INFINI	202	301	374	435
15 octobre 2018	707	INFINI	-	-	-	-

Nous avons eu la possibilité d'exploiter des données seulement sur une plage de 33 ans avec des lacunes dans les données brutes. Il n'y a notamment aucune donnée de débit entre le 28 mai 2000 et le 31 décembre 2004. Il serait intéressant de faire la même démarche sur une période temporelle plus longue. De plus, à partir de cette analyse, le logiciel R studio n'a pas pu calculer de période de retour pour le débit maximum mensuel et journalier.

Loi de Gumbel : méthode et résultats

La méthodologie d'application de la loi de Gumbel sur les débits est identique avec celle utilisée pour l'analyse des précipitations. La variable centrée réduite se calcule avec la formule suivante : $u = -\ln(-\ln(F(x)))$.

Nous obtenons ainsi les représentations graphiques des couples (u_i, x_i) des séries à ajuster (figure 28).

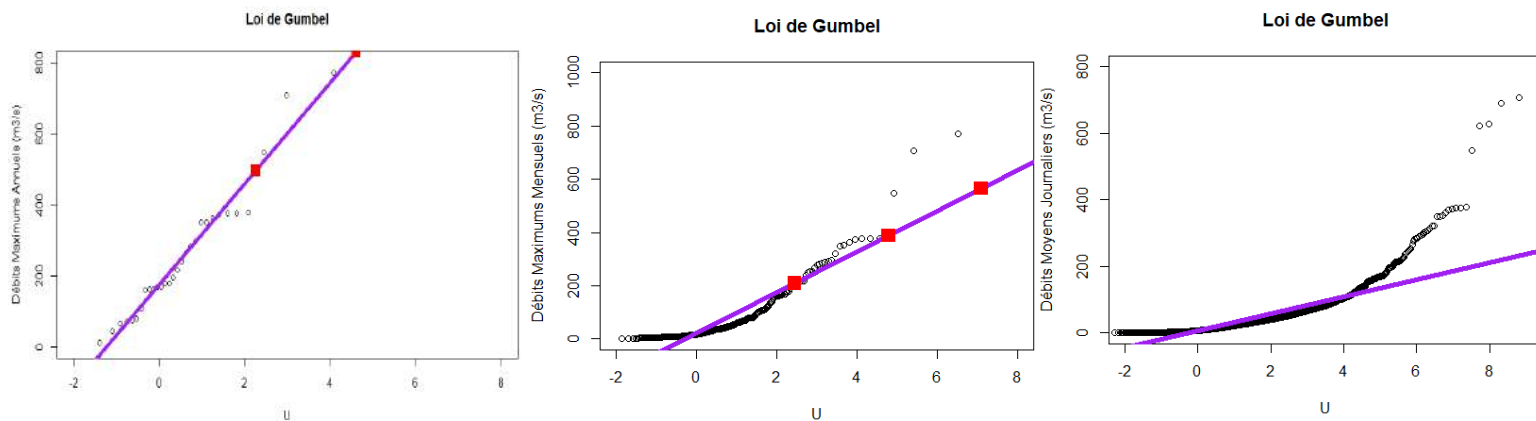


Figure 28 - Analyse fréquentielle des débits maximaux annuels, mensuels et journaliers avec la loi de Gumbel.

iv. Commentaires sur l'analyse fréquentielle avec la loi de Gumbel

En observant ces graphiques d'analyse fréquentielle (figure 28), nous constatons que la droite de corrélation s'ajuste à nouveau très bien sur les débits maximaux annuels. Les points sont davantage confondus avec cette méthode de Gumbel. De plus, les débits maximaux mensuels se rapprochent fortement de la courbe de régression linéaire, avec tout de même des écarts conséquents pour les valeurs extrêmes (au-dessus de $400 \text{ m}^3/\text{s}$). Enfin, pour l'analyse journalière, la droite s'ajuste bien pour les débits inférieurs à $200 \text{ m}^3/\text{s}$, mais elle sous-estime les débits supérieurs à cette valeur.

Pour l'événement du 14 et 15 octobre 2018, les périodes de retour calculées avec la loi de Gumbel sont les suivantes :

- Le débit maximal de l'**année 2018** est de **$707 \text{ m}^3/\text{s}$** et correspond à un débit maximal de période de retour de **42 ans** sur le bassin versant,
- Le débit maximal **d'octobre 2018** est de **$707 \text{ m}^3/\text{s}$** et correspond à un débit maximal de période de retour de **642 ans**,
- Le débit maximal du **15 octobre 2018** est de **$707 \text{ m}^3/\text{s}$** et correspond à un débit maximal de période de retour **INFINI**.

Tableau 13 - Résultats de l'analyse fréquentielle des débits avec la loi de Gumbel.

Événement	Débit (m^3/s)	Période de retour de l'événement (an)	Cumul de pluie associé à une période de retour de 1 an	10 ans	100 ans	1000 ans
Débit max 2018	707	42	-	495	829	1157
Cumul octobre 2018	707	642	208	388	564	740
15 octobre 2018	707	INFINI	-	-	-	-

L'analyse fréquentielle avec la loi de Gumbel est également plus précise sur cette analyse. De manière générale, la Loi de Gumbel semble plus adaptée pour analyser des valeurs extrêmes.

5. Conclusion sur les périodes de retour

L'ensemble des résultats est à prendre avec précaution. D'une part, nous avons des périodes de mesures courtes, 21 ans pour les précipitations et 33 ans pour les débits, avec de nombreux débits journaliers manquants (16 % manquants pour les débits). D'autre part, d'après les résultats obtenus, nous constatons que la loi de Gumbel est plus appropriée que la loi Normale pour calculer des périodes de retour d'évènement extrêmes. Par ailleurs, il est difficile de donner une période de retour pour les précipitations ou pour les débits du 15 octobre. En effet, ces valeurs sont tellement élevées par rapport aux autres valeurs mesurées sur la période qu'il est compliqué de les comparer entre elles. L'analyse fréquentielle donne des valeurs infinies pour l'analyse journalière. C'est pour cela que les résultats les plus fiables et pour lesquels nous avons le moins d'incertitude sont ceux avec l'analyse sur les périodes annuelles, car les valeurs extrêmes sont étudiées sur une plus grande période. Finalement, la dernière incertitude concerne le manque d'informations sur les appareils de mesures. Par exemple, avec un changement d'appareil l'étalonnage a pu légèrement modifier les mesures en sorties.

Conclusion générale

En conclusion, il est difficile de donner un chiffre exact en ce qui concerne la période de retour de l'évènement pluvieux qui a touché l'Aude en octobre 2018. Les incertitudes lors de ce type d'évènement dit "extrêmes" sont trop importantes. Le manque de données et l'intensité de l'épisode ne permettent pas de retourner la période de retour associée. Toutefois, les résultats obtenus et la bibliographie portant sur cet évènement supposent que la période de retour centennal a été dépassée. Les modélisations effectuées pour simuler la crue de l'Aude et de ses affluents prennent en compte uniquement les inondations par débordement des cours d'eau. La méthode HAND (Height Above Nearest Drainage) est celle qui présente le meilleur rapport simplicité d'utilisation / performance. On peut suggérer d'en faire un outil opérationnel pour les services d'AXA Climate afin de connaître rapidement les zones ayant pu subir des sinistres aux abords des cours d'eau. Notamment, les terrains agricoles et les domaines viticoles établis aux bords des rivières pour l'irrigation de leur champ. Finalement, il serait intéressant d'effectuer une modélisation permettant de simuler le ruissellement directement lié aux précipitations et incluant plus de paramètres, tel que la nature des sols et le cadastre. Une telle modélisation serait, certes plus coûteuses en ressources (temps pour adapter le modèle, données de qualité, temps de calculs, etc.), mais permettrait le développement d'un outil opérationnel permettant de dédommager les clients automatiquement à partir d'indices hydroclimatologiques atteints. Il serait alors possible de déterminer plus rapidement, les zones ayant eu un sinistre.

Références

Ministère de l'Intérieur, Mai 2019. Retour d'expérience des inondations du 14 au 17 octobre 2018 dans l'Aude. URL <http://www.interieur.gouv.fr/Publications/Rapports-de-l-IGA/Rapports-recents/Retour-d-experience-des-inondations-du-14-au-17-octobre-2018-dans-l-Aude>.

CCR. (22/10/2018). Aude - Les inondations du 14 et 15 octobre 2018 dans le Languedoc. Récupéré sur CCR : <https://www.ccr.fr/-/inondations-du-14-et-15-octobre-2018-aude-languedoc>

Liu, Y. Y., D. R. Maidment, D. G. Tarboton, X. Zheng, Ahmet Yildirim, N. S. Sazib and S. Wang, (2016), "A CyberGIS Approach to Generating High-resolution Height Above Nearest Drainage (HAND) Raster for National Flood Mapping," CyberGIS 16, The Third International Conference on CyberGIS and Geospatial Data Science, Urbana, Illinois, July 26-28.

Tarboton, D., X. Zheng, D. Maidment, Y. Liu, S. Wang (2018). Using Digital Elevation Model Derived Height Above the Nearest Drainage for flood inundation mapping and determining river hydraulic geometry.

Laurent Lebouc, Olivier Payraastre, François Bourgin. Reconstitution des débits de pointe des crues du 15 octobre 2018 dans le bassin de l'Aude. Convention DGPR-Ifsttar 2018 n°2201132931 du 22 mai 2018 - Action 7 appui au SCHAPI. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2019, 14 p. hal-02110612

Milton Abramowitz et Irene Stegun, Handbook of Mathematical Functions, New York, Dover, 1972, 9e éd., 1047 p. (ISBN 0-486-61272-4, lire en ligne [archive]), chap. 26 (« Probability Functions »), p. 927-996.

Gumbel, E.J. (1935), "Les valeurs extrêmes des distributions statistiques" (PDF), Annales de l'Institut Henri Poincaré, 5 (2) : 115–158.

A. Hazen et G.S. Williams, Hydraulic Tables, New York, John Wiley and Sons, 1920, 3e éd.

Michel Armatte, Robert Gibrat et la loi de l'effet proportionnel [archive], dans Mathématiques et sciences humaines, tome 129 (1995), p 16.

ANNEXES

Tous les livrables demandés peuvent être consultés et téléchargés en suivant le lien vers ce drive. Il contient :

- Les articles bibliographiques utilisés.
- L'ensemble des données utilisées.
- Les script R de la méthode HAND et des périodes de retour.
- Les résultats des simulations au format raster pour chaque méthode.
- Les différentes cartes produites.
- Le tutoriel de la méthode HAND.
- Les rapports et présentations.

https://unice-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/nicolas_guerin_etu_unice_fr/EsmmUoYCcdJLgg1clxIlw1UBwX1yvUztGzwMiUSgVvcYoA?e=cGpJFN