

# Mémoire de travail de fin d'études

Présenté par

Ethan MICHAUD

Promotion 69

## Contribution à l'amélioration des données hydrométriques et de la prévision des inondations au sein du réseau Vigicrues Réunion

Réalisé au sein de la

Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de la Réunion

Du 1er avril au 15 août 2024

**Jury :** Florent Baby, Responsable de la Cellule de Veille Hydrologique Tuteur  
Brice Mourier, Chercheur à l'ENTPE, Tuteur-école  
Laurent Bonnifait, Expert



L'école de l'aménagement durable des territoires

## **Remerciements**

*Je souhaite tout d'abord exprimer ma gratitude à Florent Baby, ancien chef de service de la Cellule de Veille Hydrologique, pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser mon stage au sein de son équipe. Son accompagnement, ainsi que la confiance qu'il m'a témoigné tout au long de cette expérience, ont été grandement appréciés.*

*Je tiens également à remercier Stéphane Martel, adjoint au chef de l'unité et responsable de l'hydrométrie, pour son soutien et ses précieuses orientations sur les différents travaux auxquels j'ai contribué durant ce stage. C'est grâce à lui que j'ai pu avancer tout au long de mon stage.*

*Enfin, mes remerciements s'adressent à toute l'équipe de la Cellule de Veille Hydrologique, dont l'accueil chaleureux et la collaboration m'ont permis de vivre cette expérience dans une atmosphère agréable et enrichissante. Travailler au sein de la CVH a été une opportunité formatrice que j'ai grandement appréciée.*

## Table des matières

Table des illustrations .....	C
Table des acronymes .....	E
Introduction .....	6
Objectifs.....	9
Jaugeage Vidéo .....	10
Etat de l’art.....	10
Méthodologie .....	12
Données utilisées .....	16
Résultats .....	17
Critiques .....	21
Modélisation Hydraulique .....	27
HEC-RAS : Modèle hydrodynamique 2D.....	27
Méthode par différences finies .....	29
Maillage et structures hydrauliques .....	29
Avantages du modèle .....	29
TELEMAC-2D : Modèle hydrodynamique 2D .....	30
Présentation de TELEMAC-2D.....	30
Méthode éléments finis .....	30
Maillage et structures hydrauliques .....	30
Avantages du modèle .....	31
Calibration .....	31
Analyse de Sensibilité .....	31
Données utilisées .....	35
Résultats .....	36
Critiques .....	39
Conclusion.....	40
Bibliographie.....	43

## Table des illustrations

Figure 1 - Cartographie de la pluie moyenne à la Réunion de 1981 à 2010.....	6
Figure 2 - Cartographie des risques inondations pour des crues centennales à la Réunion ....	7
Figure 3 – Valeur de l’index de vitesse en fonction de la distance par rapport à une paroi verticale (Rantz et al., 1982, p.137).....	12
Figure 4 - Champ de vitesse FUDAA-LSPIV à la station Marsouins Bethléem après filtrage et moyennage des vitesses, le cours d’eau est ortho-rectifié .....	15
Figure 5 - Représentation 3D du débit en associant e champ de vitesse obtenu par LSPIV à la bathymétrie de la rivière.....	15
Figure 6 - Caméra Fixe à la station Saint-Denis Amont.....	17
Figure 7 - Station St-Denis Amont .....	17
Figure 8 - Jaugeages et courbe de Tarage actuelle Langevin passerelle .....	18
Figure 9 - Jaugeages et courbe de Tarage actuelle Butor Bowling .....	18
Figure 10 - Jaugeages et courbe de Tarage actuelle petite Saint Jean Délice .....	19
Figure 11- Jaugeages et courbe de Tarage actuelle Durand Vélodrome.....	19
Figure 12 - Jaugeages et courbe de Tarage jusqu'au 15/01/2024 à St-Denis Amont .....	20
Figure 13 - Carte du bassin versant de la Rivière de Saint-Denis .....	21
Figure 14 - Recommandations pour les jaugeages mobiles par LSPIV – (Dramais et al. 2011)23	
Figure 15 - Champs de vitesses à Saint-Denis Amont, la conduite créer une zone morte dans le champ .....	24
Figure 16 - Schéma longitudinal d'une séquence mouille-radier .....	25
Figure 17 - Modélisation HecRas de la rivière des Marsouins, Zoom de la station Bethléem, Représentation de la hauteur d'eau .....	28
Figure 18 - Photo aérienne, station Bethléem sur la rivière des Marsouins.....	28
Figure 19 – Graphique Débit/Surface libre (courbe de tarage) de l'analyse de sensibilité HEC-RAS pour le pas de temps .....	32
Figure 20 - Tableau de l'analyse de sensibilité des équations .....	33
Figure 21 - Tableau de l'analyse de sensibilité de la surface de maillage .....	33
Figure 22 - Tableau de l'analyse de sensibilité pour le pas de temps .....	34
Figure 23 - Tableau de l'analyse de sensibilité pour la durée de simulation.....	35
Figure 24 - Bassin versant de la rivière des Marsouins .....	36
Figure 25 - Jaugeages et Courbes de Tarage Avant et Après le passage du cyclone Belal .....	37
Figure 26 - Modélisation de crue majeure à la rivière des Marsouins avec un débit nominale de 1300 m <sup>3</sup> /s .....	38
Figure 27 - Différences TELEMAC-2D et HEC-RAS .....	38
Figure 28 - Comparaison courbes de tarage de référence TELEMAC-2D et HEC-ARS....	39
Figure 29 - Laisses de crue en aval de la station Marsouins Bethléem (201X) .....	40



## Table des acronymes

**CVH** : Cellule de Veille Hydrologique

**DEAL** : Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

**SPRINR** : Service Prévention des Risques Naturels et Routiers

**LSPIV** : Large-Scale Particle Image Velocimetry, méthode de jaugeage vidéo.

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain

**HEC-RAS** : Hydrologic Engineering Center's River Analysis System

**SWE** : Shallow Water Equations, désignant les équations de Barré de Saint-Venant

**EF** : Éléments Finis

**VF** : Volumes Finis

**TELEMAC-2D** : Système de Modélisation Hydrodynamique en 2D

**LIDAR** : Light Detection and Ranging, technique de mesure de distance

**GRP** : Points Géoréférencés

## Introduction

L'île de la Réunion, zone volcanique très montagneuse au cœur de l'océan Indien, est l'une des régions les plus exposées aux aléas naturels extrêmes. Parmi les événements climatiques qui illustrent cette vulnérabilité, l'île est connue pour détenir plusieurs records mondiaux en termes de précipitations extrêmes. Lors du cyclone Denise en janvier 1966, l'île a enregistré des records mondiaux d'intensité de pluie sur des périodes de 12 heures et de 24 heures, avec des cumuls atteignant respectivement 1 144 mm et 1 825 mm. Ces chiffres témoignent de la violence des événements météorologiques qui frappent régulièrement l'île.

Quelques décennies plus tard, en 2007, le cyclone Gamède a établi un autre record mondial de précipitations cumulées sur une période de 3 à 8 jours, avec des pluies intenses qui ont dévasté une grande partie de l'île. La Réunion complète ses records avec le cyclone Hyacinthe en 1980, qui a cette fois-ci établi un record mondial de précipitations sur une période de 10 à 15 jours. Hyacinthe a déversé jusqu'à 6 083 mm de pluie à certains endroits.

Ces records successifs font de la Réunion l'un des points chauds mondiaux en matière d'intensité et de cumul des précipitations, insistant les enjeux de gestion des inondations sur l'île.

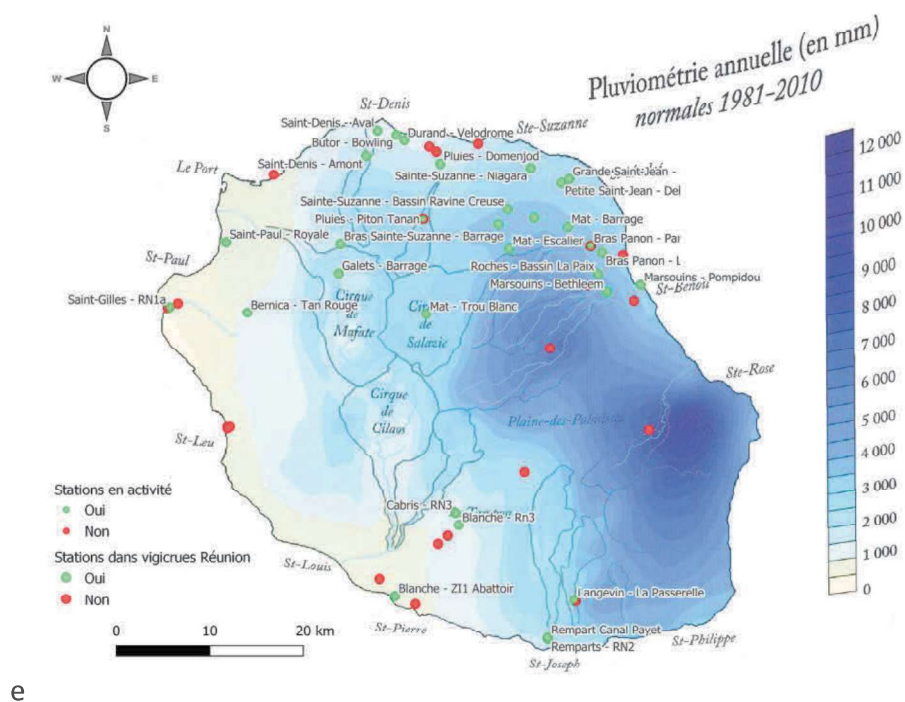


Figure 1 - Cartographie de la plume moyenne à la Réunion de 1981 à 2010

Ce contexte météorologique extrême s'inscrit dans un cadre où l'île est confrontée à sept des huit principaux risques naturels recensés au niveau national : les inondations, les séismes, les éruptions volcaniques, les mouvements de terrain, les houles et tsunamis, les feux de forêt, ainsi que les cyclones et vents forts. La situation est aggravée par une forte pression foncière due à une croissance démographique rapide et au développement urbain, souvent dans des zones identifiées comme étant

à risque. En effet, le nombre d'habitants ne cesse d'augmenter, et devrait atteindre le million en 2050 (Dehon M. 2022).

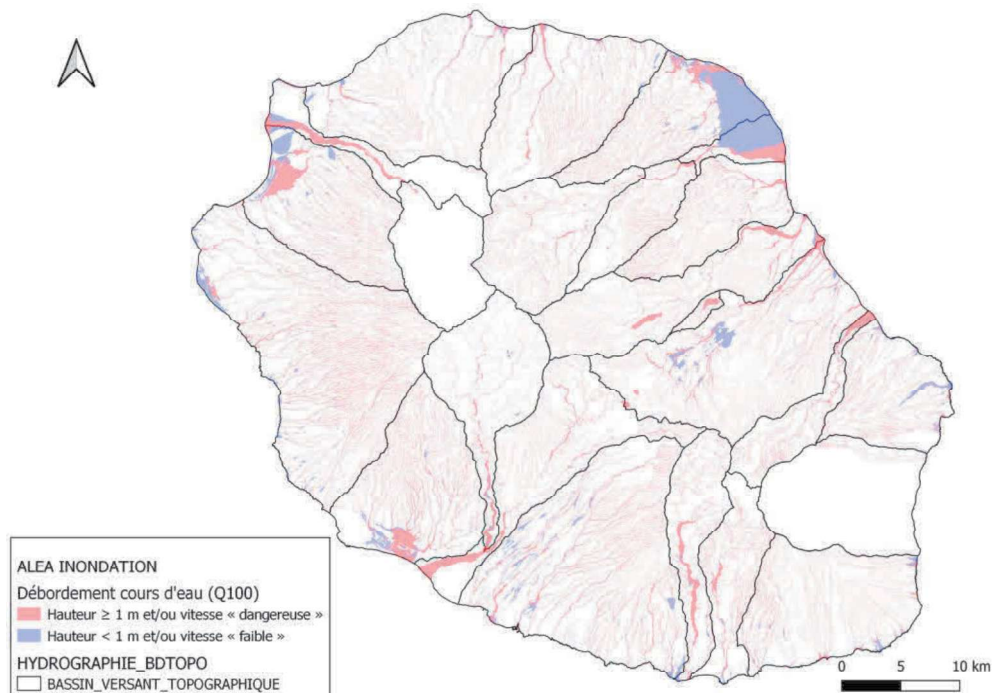


Figure 2 - Cartographie des risques inondations pour des crues centennales à la Réunion

Face à ces défis, la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL) joue un rôle central, et au sein de cette structure, le Service Prévention des Risques Naturels et Routiers (SPRINR) assume une responsabilité sur ces risques. Composé d'une soixantaine d'agents répartis en sept unités spécialisées, dont la Cellule de Veille Hydrologique (CVH) où se situera l'étude.

La CVH se distingue par son expertise dans la gestion des risques de crues sur les bassins versants à enjeux. Elle assure la veille hydrologique en temps réel et la production des alertes de Vigilance Crue.

Ce réseau Vigicrues Réunion, sous la responsabilité de la CVH, joue un rôle clé dans ce dispositif. Il comprend 31 stations hydrométriques qui surveillent 17 bassins versants à travers l'île. Ces stations enregistrent la hauteur d'eau toutes les cinq minutes, permettant ainsi de calculer les débits en temps réel grâce à des courbes de tarage issues de modélisations hydrauliques 1D et 2D. Pour faire face aux difficultés liées au jaugeage en période de crue, la CVH a mis en place une stratégie basée sur une modélisation hydraulique 2D systématique pour chaque secteur couvert par une station hydrométrique, utilisant le logiciel HEC-RAS. Cette approche est complétée par l'installation de capteurs "radar vitesse" et de caméras vidéo aux stations hydrométriques, permettant un jaugeage continu, y compris en post-traitement lors des épisodes de crue.

Cependant, mesurer les débits pendant les crues avec les méthodes traditionnelles reste un défi important. Ces méthodes nécessitent généralement d'intervenir directement dans le cours d'eau, ce qui devient quasi impossible en situation de crue. Pour pallier ces limitations, la CVH explore des méthodes comme la Large Scale Image Particle Velocimetry (LSPIV), une technique basée sur l'analyse

vidéo du flux d'eau. En utilisant des caméras pour capturer des vidéos du cours d'eau, associées à quelques relevés de terrain, il est possible d'estimer le débit avec précision.

Cette approche est particulièrement prometteuse pour la Réunion, avec l'utilisation de caméras fixes ou de vidéos à la volée pour les stations non équipées. Le but est d'évaluer l'impact de cette méthode d'un point de vue pratique. Une attention particulière sera portée à la régularisation des vidéos mobiles (i.e prise à la volée) afin de réduire l'incertitude liée à la capture. L'étude s'appuiera sur quelques vidéos enregistrées par des caméras fixes et mobiles dans les différentes stations de la Réunion, depuis plusieurs années sauf pour les stations qui ont eu une lourde modification du terrain après le cyclone Belal en janvier 2024, où là, seules les vidéos les plus récentes pourront être traitées. Enfin, des améliorations seront apportées aux courbes de tarages si les jaugeages montrent une inadéquation.

Ainsi, cette étude s'inscrit dans une démarche globale visant à renforcer l'efficacité des prévisions de crues et à fournir des fiches de jaugeages plus précises grâce à une modélisation optimisée. Il aborde l'ensemble des efforts mis en place par la CVH pour moderniser la surveillance des cours d'eau à la Réunion, avec pour objectif final de mieux anticiper les crues et de sécuriser les populations face à ces aléas naturels récurrents.

## Objectifs

L'île de la Réunion est fortement exposée aux inondations, particulièrement durant la saison cyclonique. La Cellule de Veille Hydrologique doit anticiper ces crues pour limiter les dommages, mais cela s'avère complexe en raison de la rapidité de réaction des bassins versants et des conditions météorologiques souvent imprévisibles. La collecte de données en temps réel et le jaugeage pendant les crues sont en constante évolution. Chaque passage cyclonique peut altérer les cours d'eau, rendant les courbes de tarage obsolètes. Il est donc essentiel de réaliser des jaugeages réguliers, y compris en période de crue, pour améliorer la précision des estimations de débit.

L'utilisation de jaugeages vidéo et de fiches jaugeages détaillées pourrait améliorer la régularité et la précision des mesures, permettant une meilleure surveillance des rivières. Parallèlement, la modélisation hydrodynamique avec des outils adaptés à la région permettrait de simuler les crues plus précisément et de mieux anticiper les risques. Cela renforcerait la capacité de réponse face aux inondations, tout en optimisant la gestion des ressources et des infrastructures hydrauliques de l'île.

---

Cette étude vise à améliorer la précision des prévisions de crue à la Réunion en se concentrant sur l'actualisation des courbes de tarage et la modélisation des zones à risque d'inondation. L'objectif est de développer des outils plus précis pour anticiper les crues en utilisant des données récentes et des techniques de modélisation avancées. Les logiciels HEC-RAS et TELEMAC-2D seront comparés afin de déterminer lequel est le plus adapté à la gestion des crues dans les contextes spécifiques de l'île.

Dans un premier temps, l'étude se focalisera sur la collecte de données à l'aide de jaugeages vidéo, une technique qui permet de mieux capturer les débits élevés dans des conditions difficiles, comme celles rencontrées durant les crues cycloniques. Le logiciel FUDAA-LSPIV sera utilisé pour traiter ces vidéos et fournir des mesures de débit plus précises. Ces données permettront d'apporter un jugement sur les courbes de tarage, en intégrant des mesures récentes pour ajuster les estimations de débit.

Ensuite, des modélisations hydrauliques seront réalisées pour simuler les crues potentielles. Les premières simulations seront effectuées avec HEC-RAS, en prenant en compte les imprécisions du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et en ajustant les paramètres en fonction des particularités locales. Ces modélisations seront comparées aux résultats obtenus avec TELEMAC-2D afin d'analyser les performances respectives des deux logiciels. L'objectif final est de déterminer le modèle le plus efficace pour anticiper les inondations, et ainsi optimiser la gestion des risques à la Réunion.

# Jaugeage Vidéo

## Etat de l'art

La méthode LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry) est une technique utilisée pour mesurer la vitesse de l'eau en surface, souvent appliquée au jaugeage de crues dans les cours d'eau. Elle repose sur l'analyse d'images vidéo pour suivre le mouvement des particules flottantes à la surface de l'eau, permettant ainsi d'estimer les vitesses d'écoulement.

La PIV (Particle Image Velocimetry) classique, utilisée initialement en laboratoire pour mesurer les écoulements de fluides, initialement développée pour les canaux expérimentaux en laboratoire et les souffleries (Adrian, 1991). Elle a ensuite été étendue à des environnements moins contrôlés et à des applications à plus grande échelle, telles que les cours d'eau (Fujita et al., 1998) sous le nom de LSPIV à la fin du XXème siècle. Cette adaptation permet d'analyser les écoulements naturels, en particulier lors des crues, où l'accès direct à la rivière peut être dangereux.

Cette technique repose sur la capture d'une séquence vidéo de la surface de l'eau, souvent à l'aide de drones, de caméras stationnaires ou de vidéos filmées à la volée. Un logiciel dédié analyse ces vidéos pour suivre les particules (comme des bulles, des débris flottants, des remous) et en déduire la vitesse de surface. Cette information, combinée à la bathymétrie du cours d'eau, permet de calculer le débit global à l'aide d'un coefficient de vitesse qui convertit la vitesse de surface en moyenne de surface verticale. Les études précédemment publiées ont généralement utilisé la valeur standard de  $\alpha$  (0,85), en se basant sur une distribution logarithmique de la vitesse verticale (Le Coz et al., 2010) ou bien en dérivant un exposant pour la loi puissance.

La méthode est appréciée pour sa capacité à fournir des mesures en temps réel, même lors de conditions extrêmes comme les crues et assez fiables. Elle a été utilisée avec succès dans plusieurs études de cas pour surveiller les crues de rivières et de torrents (Le Coz et al., 2010).

LSPIV présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes traditionnelles de jaugeage de crue, comme la mesure directe du débit par jauges de débit ou par radar. Elle n'exige pas de capteurs ou de dispositifs dans l'eau pendant l'événement de crue. Cependant, elle nécessite des conditions de visibilité suffisantes, ce qui peut être un défi lors d'intempéries ou de crues nocturnes.

La méthode a continué d'évoluer avec la création de la plateforme FUDAA-LSPIV dont le développement a été exécuté par DeltaCAD depuis août 2010 avec le financement et sous la direction d'EDF et de l'INRAE. Elle permet de traiter les images de manière semi-automatique et d'obtenir des résultats plus précis grâce à des algorithmes améliorés.

Dans le cadre du jaugeage optique de fluide, plusieurs méthodes de traitement d'images peuvent être utilisées pour analyser les écoulements de surface dans les cours d'eau. La Particle Tracking Velocimetry (PTV) est une technique qui suit les trajectoires des particules individuelles pour estimer les vitesses

locales. Contrairement à la Particle Image Velocimetry (PIV), qui mesure les champs de vitesse en corrélant les motifs de particules dans des zones prédéfinies, la PTV adopte une approche lagrangienne, se concentrant sur les mouvements des particules sur de longues trajectoires plutôt que sur les schémas globaux d'écoulement. Il y a aussi la Space-Time Image Velocimetry, qui estime la vitesse de l'écoulement en une dimension (1D). Cette méthode se base sur l'analyse de la texture de la surface de l'eau à partir d'une séquence d'images pour déterminer les vitesses d'écoulement.

Pour utiliser le logiciel FUDAA-LSPIV, le traitement des images capturées est une étape clé pour garantir la précision des mesures de vitesse. La stabilisation des images est nécessaire lorsque la caméra utilisée pour capturer la séquence vidéo n'est pas fixe. Cela permet de dissocier les mouvements liés au déplacement de la caméra de ceux de l'écoulement de l'eau. Cette étape est optimisée par l'utilisation d'algorithmes sophistiqués qui identifient des points fixes sur les berges pour aligner correctement les images successives.

L'orthorectification est l'étape qui arrive ensuite dans le traitement des images. Elle permet de corriger la perspective des images pour donner une vue comme si elles avaient été prises à la verticale, ce qui facilite grandement l'analyse des vitesses de surface. Cette technique est particulièrement importante dans les environnements où les images sont prises sous des angles variables (Hauet, 2006).

L'estimation des vitesses de surface est ensuite réalisée par corrélation d'images successives. Cette méthode consiste à détecter les déplacements des particules à la surface de l'eau entre deux instants précis, ce qui permet de calculer la vitesse de l'écoulement. Cependant, cette estimation brute des vitesses peut contenir des erreurs étant donné que les traceurs utilisés dans cette étude seront les remous et bulles de la rivière. Un filtrage des résultats est donc nécessaire pour éliminer les vitesses aberrantes. Ce filtrage est basé soit sur les valeurs des vecteurs vitesse obtenue, soit sur l'indice de corrélation des vecteurs, garantissant ainsi des résultats plus fiables.

Après avoir estimé les vitesses de surface, il est essentiel de les convertir en vitesses moyennes en profondeur pour obtenir des valeurs représentatives de l'écoulement total. Cette conversion s'effectue à l'aide d'un coefficient aux alentours de 0.85. Mais ce coefficient va largement varier selon le cours d'eau et sera un élément essentiel pour estimer précisément le débit.

Dans le cas d'un canal comme pour ceux du canal de Patates à Durand ou du Butor, Rantz et al. (1982, p.137), préconisent de se référer à la Figure 3.

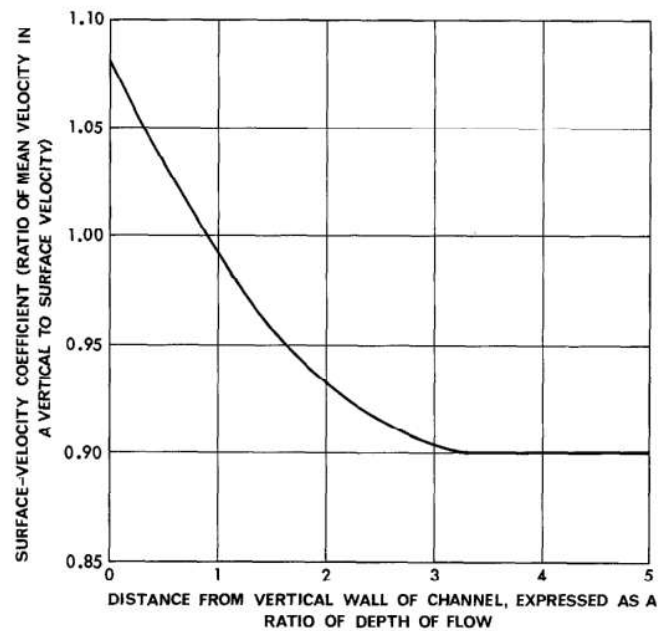


Figure 3 – Valeur de l'index de vitesse en fonction de la distance par rapport à une paroi verticale (Rantz et al., 1982, p.137)

Une fois les vitesses moyennes calculées, le débit est déterminé en combinant ces vitesses avec la bathymétrie du cours d'eau, c'est-à-dire la configuration de son fond (Hauet, 2006).

La méthode LSPIV utilise principalement deux types de caméras : les caméras mobiles et fixes. Les caméras mobiles, telles que les téléphones et les drones, offrent une grande flexibilité pour capturer des images dans des zones difficiles d'accès ou lors d'événements imprévus comme des crues. Cependant, elles nécessitent des techniques d'orthorectification et de stabilisation des images pour garantir la précision des mesures, particulièrement lorsque des citoyens participent à la collecte des vidéos (Le Coz et al., 2016).

En revanche, les caméras fixes, installées sur des structures à proximité des cours d'eau, comme des ponts ou des bâtiments, assurent une surveillance continue et stable sur le long terme. Ces systèmes sont idéaux pour des mesures régulières et permettent de surveiller simultanément plusieurs sites, ce qui les rend particulièrement utiles pour les projets de surveillance environnementale à long terme (Hauet, 2006).

## Méthodologie

### 1. Acquisition des Données Vidéo

L'acquisition des données vidéo est la première étape dans l'application de la méthode LSPIV, car elle conditionne la qualité et la précision des résultats finaux. Le positionnement de la caméra est un élément clé à prendre en compte pour minimiser les distorsions liées à la perspective lors de l'orthorectification. La caméra doit être installée à une hauteur suffisante et si possible orientée perpendiculairement au flux pour capturer de manière optimale l'écoulement. Cette configuration permet de garantir que la zone d'intérêt est filmée avec une vision claire et dégagée, sans interférence d'obstacles tels que la végétation ou les infrastructures. Il faudra veiller à avoir au moins 6 points géoréférencés (GRP) à l'intérieur de la vidéo. La création de fiche d'aide au jaugeage est une solution pour régulariser cette prise de vidéo. Ces GRP doivent couvrir toute la zone d'écoulement à analyser afin de permettre un étalonnage spatial précis des images. Une résolution élevée est préférable pour distinguer clairement les particules ou les structures présentes à la surface du fluide, ce qui est indispensable pour obtenir une précision optimale lors de l'analyse des vecteurs de vitesse. Enfin, il faut tenir compte des conditions d'éclairage lors de la capture des vidéos. L'éclairage doit être uniforme et suffisant pour éviter les ombres et les reflets qui pourraient interférer avec la détection des particules. Dans des conditions de faible luminosité, l'utilisation de marquages lumineux ou de particules fluorescentes peut s'avérer nécessaire pour améliorer la visibilité des éléments suivis. Tous ces aspects combinés garantissent une acquisition vidéo de haute qualité, qui est la base d'une analyse LSPIV fiable.

## *2. Pré-Traitement des Vidéos*

Une fois la vidéo enregistrée, elle doit être prétraitée pour que les données soient prêtes à être analysées de manière précise et fiable. La stabilisation de la vidéo est une étape importante pour les vidéos à la volée. Les mouvements parasites de la caméra peuvent introduire des erreurs dans l'analyse des images. Il est donc nécessaire d'appliquer des algorithmes de stabilisation pour éliminer les décalages et les rotations indésirables de la caméra. Cette stabilisation garantit que les variations observées dans l'écoulement sont réelles et non dues à des mouvements de la caméra.

## *3. Étapes d'orthorectification*

L'orthorectification dans FUDAA-LSPIV consiste à corriger les distorsions des images et à les aligner avec des coordonnées géoréférencées réelles. Lorsque plus de six points géoréférencés (GRP) sont utilisés, cela peut améliorer la précision comme la détériorer si la mesure d'un point est défectueuse. Le processus commence par la sélection de GRP dans l'image et l'acquisition de leurs coordonnées précises sur le terrain. Ensuite, le logiciel applique une transformation géométrique, telle qu'une homographie ou une transformation affine, pour aligner l'image avec le système de coordonnées réel. La validation de l'orthorectification se fait en comparant les positions corrigées des GRP à leurs positions réelles. Ce processus peut nécessiter plusieurs itérations pour minimiser l'erreur résiduelle et garantir des résultats précis. Une bonne orthorectification est essentielle pour transformer les déplacements observés dans l'image en distances et vitesses réelles, ce qui assure des mesures fiables des écoulements. Pour orthorectifier l'image, il faut aussi donner la hauteur d'eau au logiciel, pour cela nous prenons la hauteur transmise par la sonde hydrométrique la plus proche au moment de la vidéo.

#### 4. Analyse LSPIV

L'analyse LSPIV elle-même repose sur l'utilisation d'un algorithme de corrélation croisée qui suit les déplacements des particules visibles à la surface du fluide entre deux images successives. Ce processus est divisé en plusieurs étapes essentielles pour garantir des résultats précis et cohérents. La première étape de cette analyse consiste à segmenter les images en petites zones, appelées "fenêtres de recherche". Chaque fenêtre représente une portion de l'écoulement pour laquelle la vitesse sera estimée. La taille et la disposition des fenêtres de recherche doivent être adaptées à la résolution des images et à la complexité de l'écoulement afin de maximiser la précision de l'analyse. Ensuite, l'algorithme est appliqué pour chaque fenêtre de recherche. Cet algorithme détecte les déplacements des structures visuelles, telles que les particules ou les motifs, comme les remous, entre deux images successives. L'algorithme identifie la position la plus probable des structures dans l'image suivante. Ce processus génère un ensemble de vecteurs de déplacement pour chaque fenêtre de recherche, fournissant ainsi une estimation de la vitesse dans chaque zone analysée. Une fois les vecteurs de déplacement calculés, une interpolation spatiale est utilisée pour produire un champ de vitesse continu. Ce champ vectoriel représente la distribution des vitesses sur toute la surface de l'écoulement analysé. Pour améliorer la précision des résultats, des filtres sont généralement appliqués pour éliminer les vecteurs aberrants ou les bruits susceptibles de fausser l'analyse. Enfin, les déplacements observés sont convertis en vitesses en tenant compte du temps écoulé entre les images successives et des coefficients d'étalonnage calculés précédemment. Le résultat final est un champ vectoriel des vitesses de surface, qui constitue la base pour une analyse du débit.

Enfin, la visualisation des résultats est ce qui importe dans cette étude. FUDAA-SPIV permet de visualiser les résultats sous forme de champs vectoriels comme la Figure 4, et le débit lié, Figure 5.

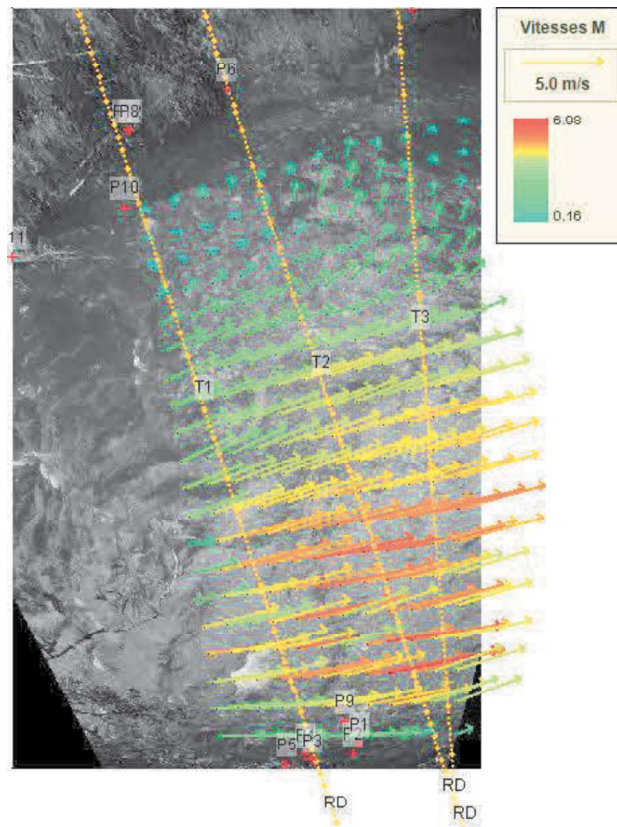


Figure 4 - Champ de vitesse FUDAA-LSPIV à la station Marsouins Bethléem après filtrage et moyennage des vitesses, le cours d'eau est ortho-rectifié

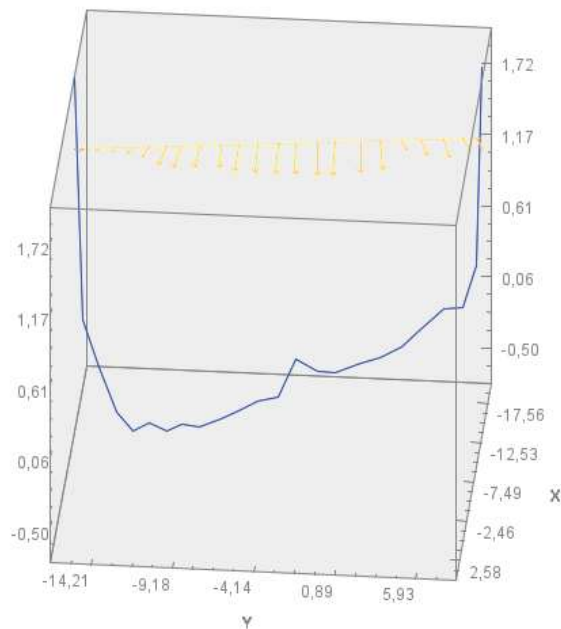


Figure 5 - Représentation 3D du débit en associant le champ de vitesse obtenu par LSPIV à la bathymétrie de la rivière

## Données utilisées

Les données utilisées dans cette étude proviennent principalement de vidéos capturées manuellement à l'aide de caméras portables, et quelques-unes de caméra fixes comme la Figure 6. Pour les stations où l'altimétrie n'a pas changé de manière significative depuis plusieurs années, les vidéos plus anciennes ont pu être réutilisées, notamment dans les zones où les variations évènementielles sont limitées, telles que les canaux. Si aucune exploitation intérieure n'avait été réalisée, il a fallu aller relever les points géoréférencés sur le terrain.

Cependant, dans les stations où les évènements météo majeurs ont modifié le terrain, comme à Saint-Denis amont, des relevés supplémentaires ont été indispensables pour mettre à jour les points géoréférencés et améliorer ainsi la précision des analyses. Ces nouvelles données, incluant uniquement des vidéos capturées après le passage du cyclone Belal, permettent un traitement plus complet des informations hydrologiques récentes.

Toutefois, dans certains cas, les enregistrements vidéo sont intraitables en raison de la météo, des mouvements de caméra ou de l'angle de la vidéo. Ces limitations restreignent l'analyse précise des flux dans certaines stations, voire la rendent impossible. En conséquence, il est nécessaire de renforcer la mise à jour régulière des données de terrain et d'investir dans un équipement vidéo plus performant pour les futures campagnes d'acquisition.

Enfin, de nombreuses stations manquent encore de données vidéo de qualité suffisante, ce qui empêche la possibilité d'une analyse complète sur l'ensemble du territoire.



Figure 6 - Caméra Fixe à la station Saint-Denis Amont

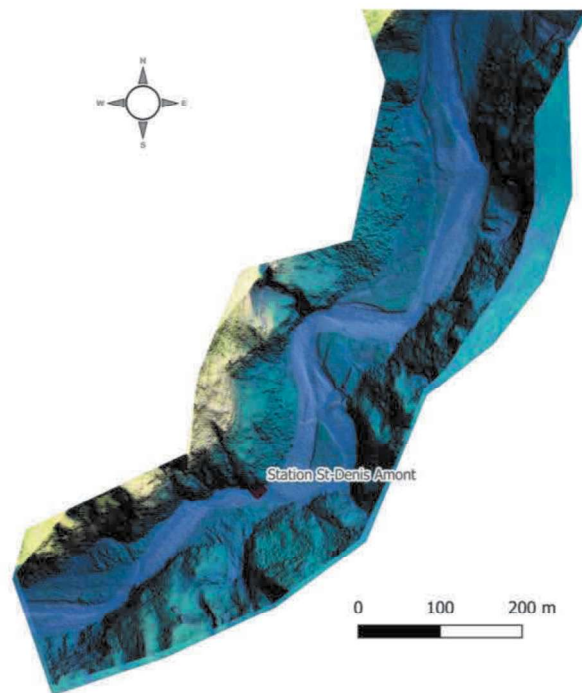


Figure 7 - Station St-Denis Amont

## Résultats

Tous les jaugeages suivants ont été réalisés avec des paramètres similaires, conformément à la bibliographie existante et aux travaux du stage de (I. Rocamora, 2021). En effet, ses travaux étaient précisément orientés sur le jaugeage vidéo des stations de la CVH.

Il est possible de conforter dans une certaine mesure ou de remettre en question les courbes de tarage existantes.

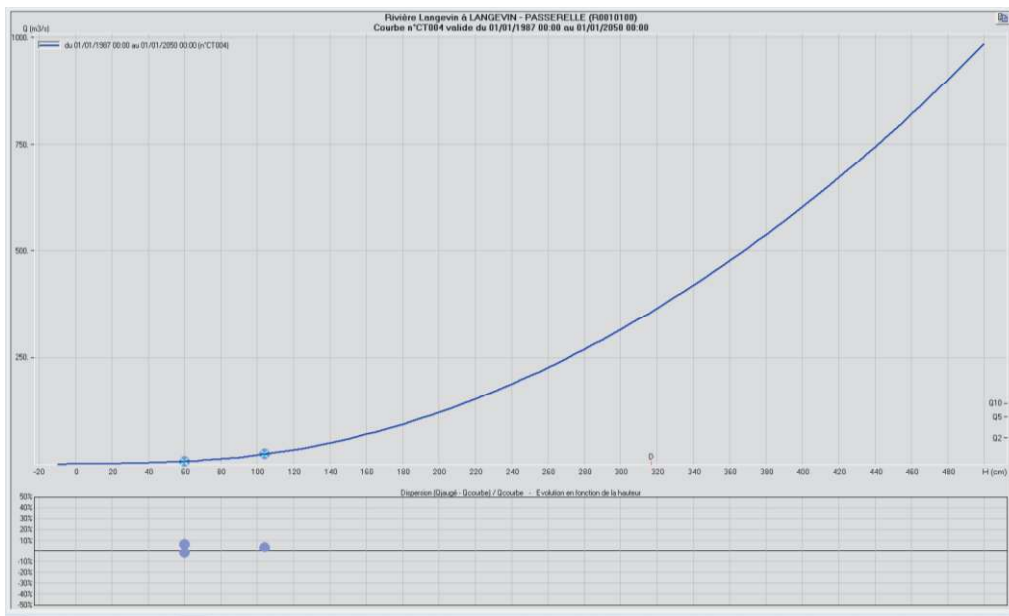


Figure 8 - Jaugeages et courbe de Tarage actuelle Langevin passerelle

Pour la station Langevin Passerelle, Figure 8, nous retrouvons des jaugeages en accord avec la modélisation existante en prenant en compte qu'un petit seuil bloque le flux de la rivière sur 20cm. Si les conditions de la vidéo et de la station sont bonnes, et que la courbe de tarage est toujours d'actualité, alors il devrait y avoir une erreur inférieure à 20%.

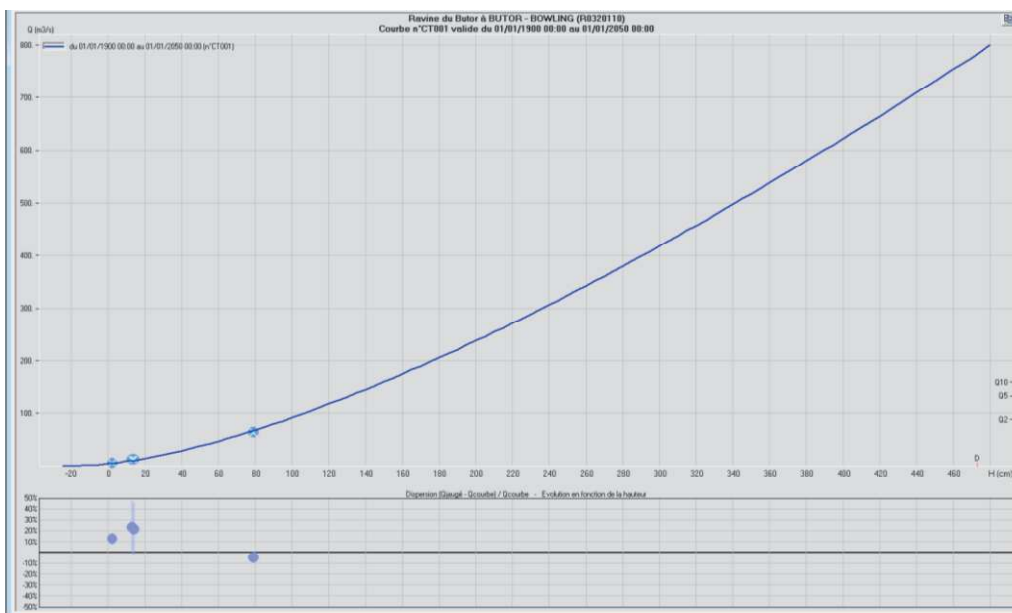


Figure 9 - Jaugeages et courbe de Tarage actuelle Butor Bowling

La ravine du Butor est un canal situé à Saint-Denis, les résultats des jaugeages réalisés, Figure 9, ont montré une excellente adéquation avec la modélisation existante même aux petits débits.

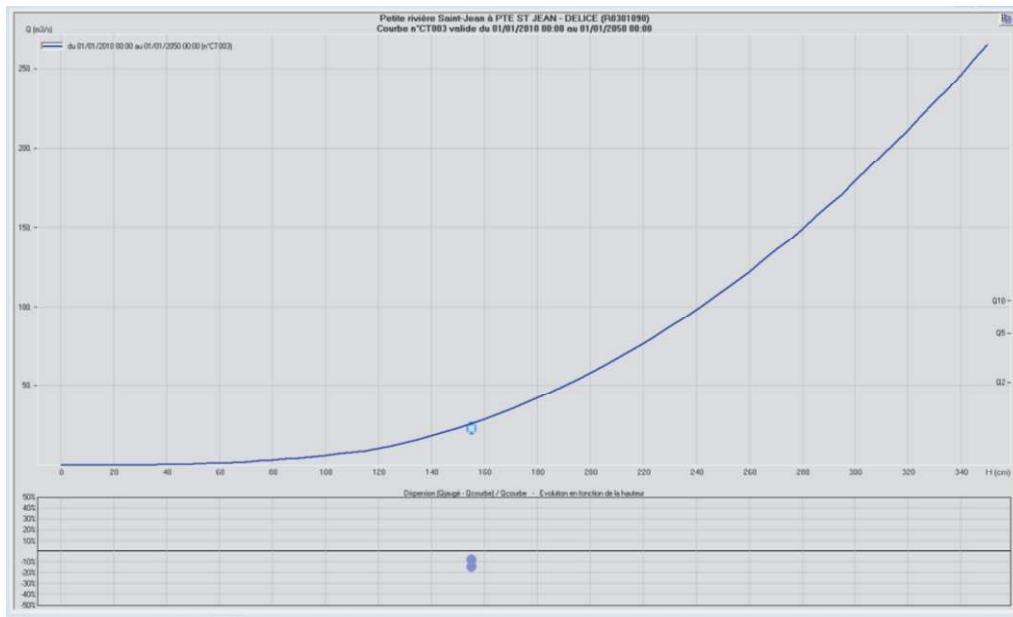


Figure 10 - Jaugeages et courbe de Tarage actuelle petite Saint Jean Délice

Pour la station Délice à la petite rivière Saint Jean, Figure 10, le jaugeage satisfait aussi la courbe de tarage.

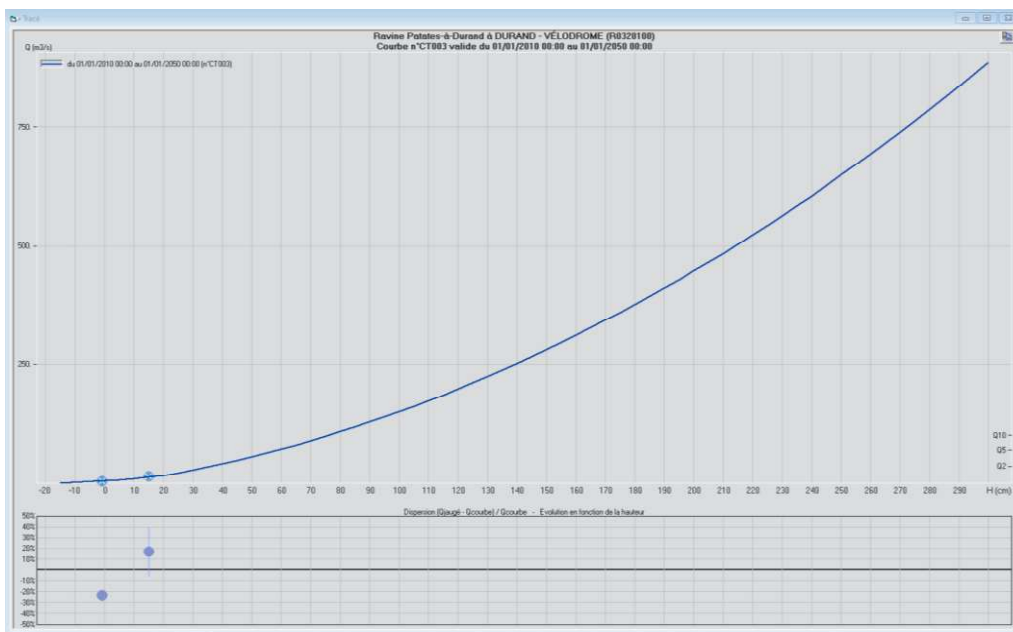


Figure 11- Jaugeages et courbe de Tarage actuelle Durand Vélodrome

La ravine de Patate à Durand est un canal avec une forte pente, le jaugeage, Figure 11, a initialement permis de relever une inadéquation de la courbe de tarage aux petits débits. La modélisation avait tendance à sous-estimer la surface mouillée. Cela était dû à une mauvaise représentation du profil en travers du canal, qui présente une forme particulière avec une crevasse au centre formé par l'érosion. Bien que cet ajustement soit mineur, la CVH se concentrant principalement sur les crues, cela n'aura que peu d'impact sur l'aspect opérationnel. Dans le cas général, les modélisations ne sont pas toujours précises à petit débit, due notamment à l'impossibilité d'avoir la bathymétrie du fond de l'eau de façon précise uniquement avec le Lidar. C'est pourquoi un apport des données de l'office de l'eau qui réalisent des jaugeages au courantomètre aux petits débits est appréciable.

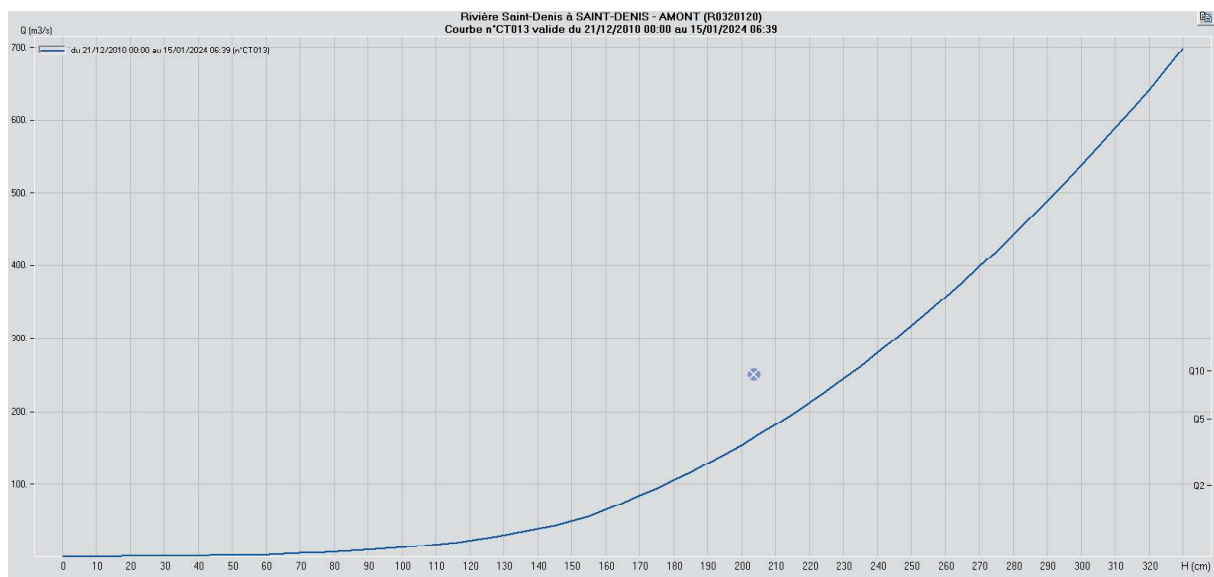


Figure 12 - Jaugeages et courbe de Tarage jusqu'au 15/01/2024 à St-Denis Amont

Enfin, la station St-Denis Amont, Figure 12, ou de même pour la station Marsouins Bethléem, le jaugeage est très éloigné de la courbe existante. Afin de palier à ce problème soulevé par le jaugeage nous procéderons à une modélisation hydraulique pour mettre à jour les courbes problématiques.

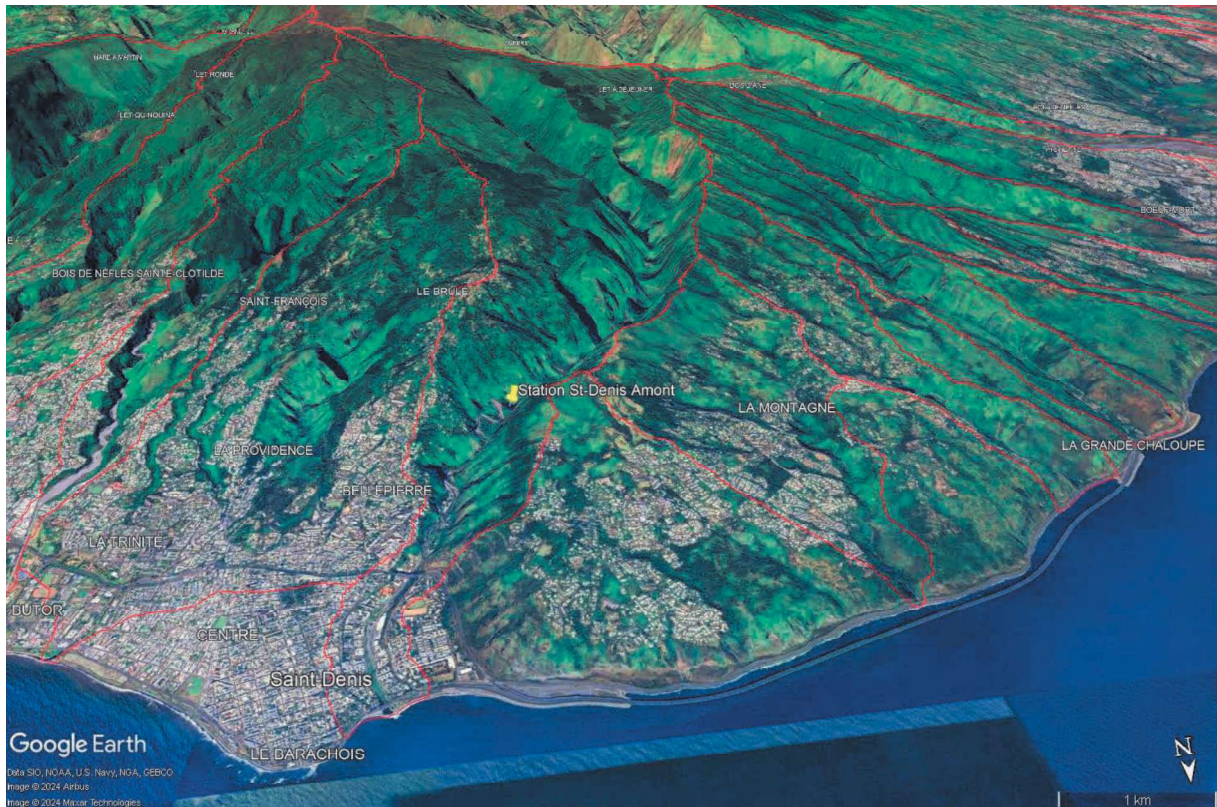


Figure 13 - Carte du bassin versant de la Rivière de Saint-Denis

## Critiques

L'un des principaux axes d'amélioration pour les prochaines campagnes de mesure, i.e, préférablement pendant la saison cyclonique réside dans l'augmentation du nombre de vidéos disponibles, en particulier celles réalisées à l'aide de caméras fixes. L'utilisation d'une caméra fixe présente plusieurs avantages indéniables : elle permet de capturer des séquences en continu sans avoir à mobiliser une équipe sur le terrain à chaque événement, tout en garantissant une cohérence temporelle et spatiale dans les données récoltées. Plus précisément, il est possible d'utiliser toujours les mêmes paramètres et les mêmes repères pour automatiser la mise en œuvre du jaugeage. Cela permettrait de générer des séries temporelles de vidéos, facilitant ainsi le suivi en temps réel des variations hydrologiques et leur analyse approfondie.

Le stage de (Rocamora I., 2021) a montré que la collecte de vidéos en continu, surtout en mode fixe, permet d'accumuler un grand volume de données, favorisant des analyses statistiques plus robustes. Cette stratégie permet de capturer à la fois des événements de faible intensité, comme les débits de base, et des événements plus rares mais critiques, comme les crues importantes.

Pour les caméras à la volée, il sera toujours bon d'avoir un maximum de vidéos pour pouvoir filtrer les non traitables. L'automatisation de leur traitement est améliorable en définissant à l'aide d'une fiche l'emplacement où se placer et quels repères inclure dans sa vidéo. Mais l'automatisation ne pourra être parfaite due à la non-régularité spatiale des vidéos.

### Comparaison avec les données de terrain

Un des aspects à développer dans l'utilisation de la méthode LSPIV est la possibilité de valider les résultats obtenus avec des données de terrain réelles. La comparaison avec des mesures in situ reste souhaitable pour garantir la fiabilité des analyses LSPIV, surtout lorsque les conditions hydrologiques sont complexes ou que le relief et la végétation perturbent la capture des images vidéo.

Dans les cas où des comparaisons avec des données de terrain sont possibles, comme avec la présence d'un radar de vitesse, il serait souhaitable d'établir un protocole standardisé de validation croisée entre les mesures vidéo et celles effectuées directement sur le terrain ou par radar. La comparaison régulière entre ces différentes sources de données permettrait d'ajuster les paramètres du modèle LSPIV et de réduire les incertitudes associées à l'analyse vidéo.

### Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité des paramètres est un outil essentiel pour comprendre comment les différentes variables influencent les résultats de la méthode LSPIV. Comme l'ont montré (Dramais et al. 2011), Figure 14, la mesure des points géoréférencés, et la mesure de la hauteur d'eau auront un impact significatif sur les mesures de vitesse et de débit.

	Recommendations / Steps	Importance
LSPIV velocity measurement	Straight and uniform reach	***
	Choice of the cross-section (piers...)	**
	The camera viewpoint and site angle	**
	The GRP measurement and distribution	****
	Seeding of artificial tracers	*
	Water level measurements	**
Discharge measurements using LSPIV	Water level measurements	****
	Bathymetry before/after the flood	**
	Choice of discharge transects	**
	Concurrent stream gauging	***
	Velocity coefficient	**

Figure 14 - Recommandations pour les jaugeages mobiles par LSPIV – (Dramais et al. 2011)

L'analyse de sensibilité permet également de détecter les sources d'erreurs potentielles et de proposer des ajustements pour minimiser leur impact sur les résultats finaux.

Dans notre cas, il n'a pas été possible de calculer précisément le coefficient de vitesse est donc son importance pourrait être supérieure. Similairement, comme le montre la Figure 15, un détail sur la vidéo pourra lourdement fausser les différents calculs.

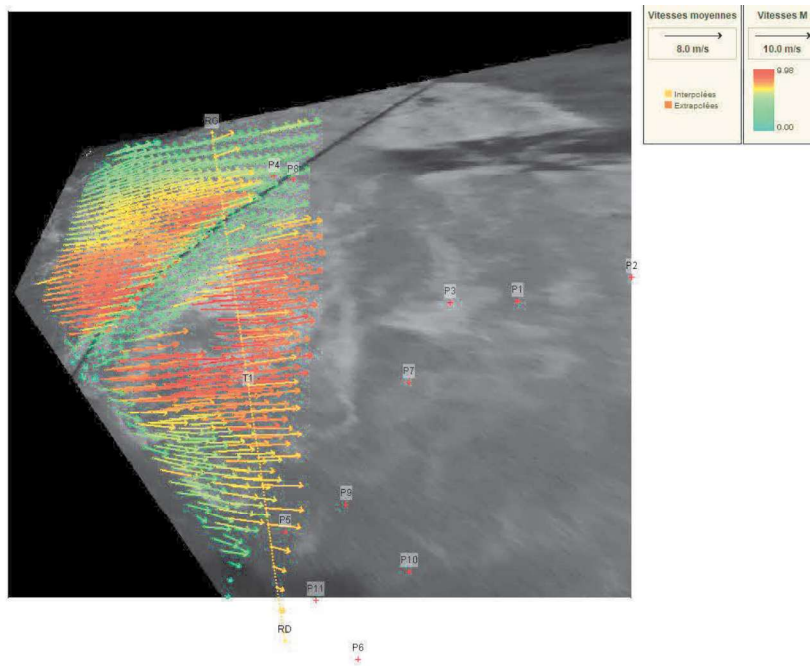


Figure 15 - Champs de vitesses à Saint-Denis Amont, la conduite créer une zone morte dans le champ

### Nécessité d'une mise à jour des courbes de tarage

La mise à jour régulière des courbes de tarage est essentielle pour garantir la précision des mesures de débit. Ces courbes, qui établissent la relation entre le niveau d'eau et le débit, doivent être recalibrées chaque fois que des modifications significatives du terrain surviennent. À la station de Saint-Denis Amont, par exemple, l'installation d'une caméra a permis de réaliser des jaugeages qui ont conforté la précédente courbe de tarage. Cependant, lors de la crue de Belal, le terrain a été profondément modifié par un charriage important, et une grande partie de la végétation a été emportée. Cela a nécessité la création d'une nouvelle courbe de tarage pour tenir compte de ces changements, accompagné de nouveaux jaugeages.

Pour améliorer cette précision, il serait nécessaire de disposer de plus de vidéos, capturées à des intervalles réguliers pendant toute la durée de la crue. Cela permettrait de suivre plus finement les modifications du terrain et d'ajuster la courbe de tarage en temps réel. Actuellement, avec seulement deux vidéos disponibles, il est difficile d'obtenir une vue d'ensemble suffisante pour être parfaitement précis. Cette situation souligne l'importance cruciale d'un plus grand nombre de vidéos pour le jaugeage vidéo, notamment dans des contextes où les changements morphologiques sont rapides et importants.

## Problématique des coefficients de vitesse et des séquences mouilles-rapides

Le calcul des coefficients de vitesse reste un défi, surtout en l'absence de mesures à différentes profondeurs afin d'obtenir un profil vertical de vitesse. Ces coefficients sont essentiels pour convertir les vitesses de surface mesurées par la LSPIV en vitesses moyennes dans la colonne d'eau. En général, en l'absence de données spécifiques pour chaque rivière, il est courant d'utiliser le coefficient standard de 0,85 pour les cours d'eau classiques. Cependant, ce coefficient peut varier en fonction des caractéristiques locales, notamment pour les rivières peu profondes, où un coefficient de 0,8 serait plus approprié.

Dans certaines rivières, notamment celles situées dans des régions montagneuses comme la Réunion, une nouvelle problématique apparaît liée à la séquence mouilles-rapides (riffle-pool sequences). Ces successions de rapides (zones de pente plus forte avec une granulométrie plus importante) et de mouilles (zones où la pente diminue et où la granulométrie est plus fine) créent des variations significatives dans les vitesses d'écoulement. Dans ces zones, les écoulements peuvent être torrentiels dans les radiers et beaucoup plus calmes dans les mouilles. Cela complique l'analyse des vitesses et des débits, car la simple application d'un coefficient de vitesse moyen ne suffit plus à décrire correctement la dynamique de l'écoulement.

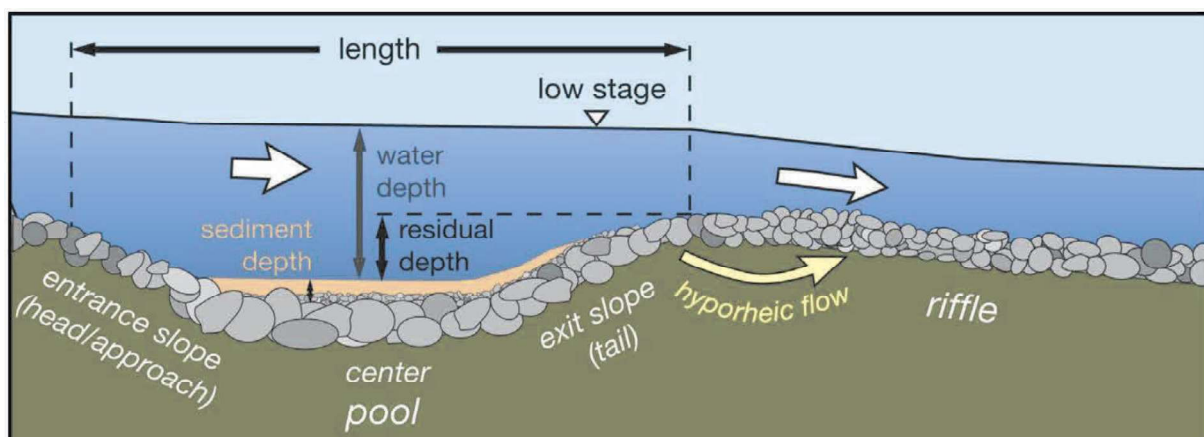


Figure 16 - Schéma longitudinal d'une séquence mouille-radier

Dans certaines configurations, nous observons même des inversions de vitesse (velocity reversal) en fonction du débit. Cette situation se produit lorsque, à débit élevé, les zones de rapides deviennent plus lentes que les zones de mouilles, ce qui inverse la répartition des vitesses par rapport aux débits plus faibles. Ces inversions compliquent encore davantage l'estimation des coefficients de vitesse, et nécessitent une calibration spécifique pour chaque type de séquence mouille-rapide. Il est difficile d'estimer le lien de vitesses entre les deux zones sans analyse plus approfondie car ce renversement n'intervient que dans des situations précises (C. F. Byrne et al, 2021).

Un exemple typique de ce phénomène peut être observé dans le bassin versant de la rivière des Marsouins. Cette rivière, comme beaucoup d'autres à la Réunion, présente une alternance de radiers et de mouilles, avec des variations rapides de pente et de granulométrie. La présence de ces séquences oblige à revoir les méthodes classiques d'estimation des vitesses et des débits, en prenant en compte les spécificités locales à chaque point de mesure. Pour ces rivières, il est recommandé de réaliser des mesures sur le terrain pour ajuster les coefficients de vitesse en fonction de la dynamique locale des écoulements. La hauteur d'eau étant assez importante, un coefficient de 0,85 sera tout de même pris à défaut.

## Modélisation Hydraulique

Nous avons constaté que certains jaugeages ne correspondaient pas aux courbes de tarage précédemment établies. Cela suggère, que la courbe de tarage pourrait être inexacte ou tout du moins plus à jour. En comparant ces observations avec les données hydrologiques, notamment les précipitations enregistrées lors d'un évènement météorologique, il devient possible d'évaluer si les débits modélisés sont cohérents avec la dynamique réelle de la crue.

Pour cela, nous utiliserons les logiciels HEC-RAS et TELEMAC-2D qui résolvent tous deux les équations de Saint-Venant en deux dimensions, qui sont dérivées des équations tridimensionnelles de Navier-Stokes par une intégration verticale. Et par extension, cette appellation a été étendue aux écoulements en eau peu profond (SWE). Les SWE supposent un champ de pression hydrostatique, des pentes de surface libre modérées et des vitesses verticales faibles, en négligeant les termes de dispersion. Actuellement, la CVH utilise uniquement le logiciel HEC-RAS pour toutes les modélisations hydrauliques.

L'apport de TELEMAC-2D sera surtout d'un point de vue comparatif et permettra de vérifier si l'utilisation de différentes méthodes numériques conduit à des résultats qui convergeraient avec ceux d'HEC-RAS ou non. Une analyse de sensibilité sera effectuée qui consistera à faire varier certains paramètres-clés, tels que la rugosité du lit de la rivière, les paramètres de calcul ou encore la forme du maillage, afin de tester la robustesse des modèles. L'objectif est de déterminer dans quelle mesure les résultats sont influencés par ces variations et si une méthode offre une meilleure stabilité ou précision par rapport à l'autre.

Enfin, en comparant les simulations avec les données de jaugeage disponibles, nous pourrons évaluer la capacité de chaque logiciel à reproduire fidèlement les phénomènes hydrologiques observés, notamment lors d'événements de crue. Cette démarche devrait nous permettre de déterminer lequel de ces outils est le mieux adapté à la modélisation hydraulique dans le contexte de notre étude, tout en identifiant les limites éventuelles de chaque approche (Nathaly A, et al. 2023).

### HEC-RAS : Modèle hydrodynamique 2D

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) est un modèle hydraulique développé par le Corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis. Il est utilisé pour simuler les écoulements fluviaux, les inondations, ainsi que les processus de transport sédimentaire. HEC-RAS peut modéliser les écoulements en une dimension (1D) et en deux dimensions (2D), permettant ainsi une analyse détaillée des systèmes hydrologiques complexes. Il est possible de faire des couplages entre 1D et 2D, néanmoins, dans cette étude, seul des modélisations uniquement en deux dimensions seront traitées. Le modèle est couramment utilisé pour des applications comme la gestion des crues. L'une des forces de HEC-RAS est son interface conviviale et sa capacité à intégrer différents types de données, y compris les modèles numériques de terrain et les données de précipitation, facilitant ainsi la modélisation des crues dans des environnements complexes comme les zones montagneuses (Brunner, 2016).

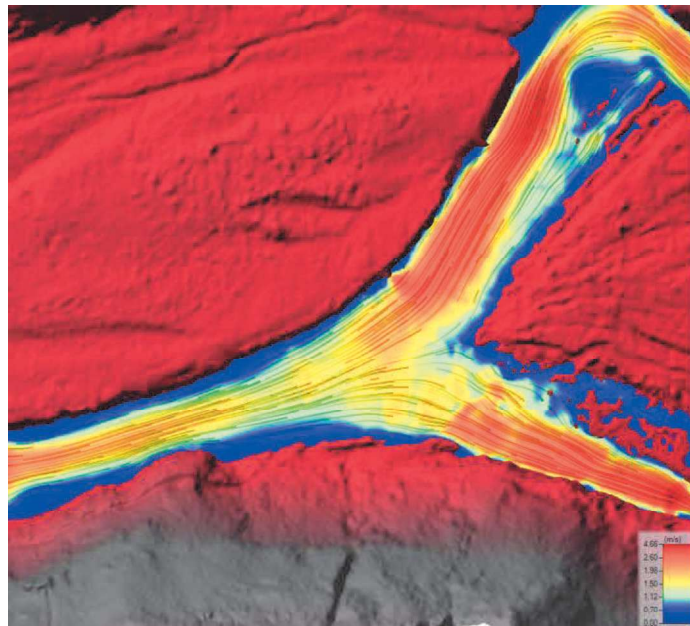


Figure 17 - Modélisation HecRas de la rivière des Marsouins, Zoom de la station Bethléem, Représentation de la hauteur d'eau

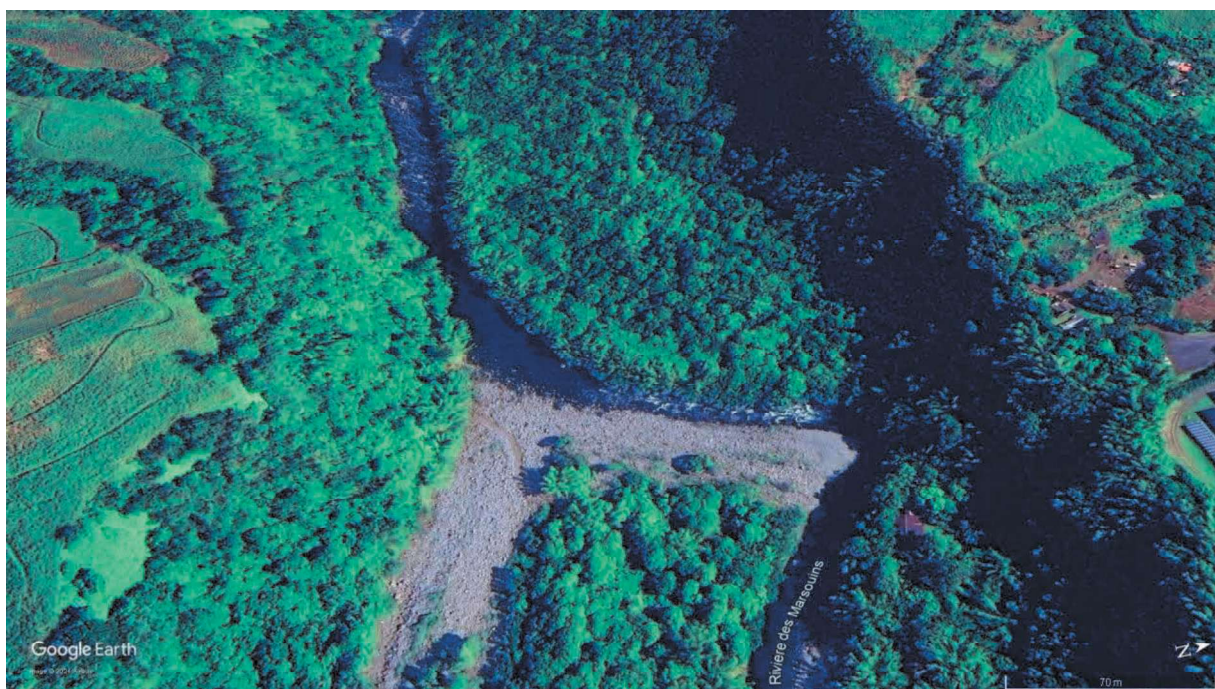


Figure 18 - Photo aérienne, station Bethléem sur la rivière des Marsouins

HEC-RAS est parfois utilisé conjointement avec des outils SIG pour améliorer la précision de la modélisation et pour faciliter l'interprétation des résultats. Ce couplage permet de prendre en compte des données topographiques de haute résolution, cruciales pour les simulations en terrains accidentés.

## Méthode par différences finies

Contrairement à TELEMAC-2D qui utilise la méthode des éléments finis, HEC-RAS utilise principalement la méthode des différences finies pour la résolution numérique des équations de Saint-Venant. Cette méthode consiste à discrétiser le domaine en segments réguliers. Bien que la méthode des différences finies soit souvent considérée comme moins flexible que celle des éléments finis pour gérer des géométries complexes, elle offre des avantages en termes de simplicité et de rapidité de calcul, ce qui en fait un choix populaire pour de nombreuses applications hydrauliques (Brunner, 2016). Pour la discrétisation, HEC-RAS adopte des volumes finis qui utilisent une interpolation linéaire ou d'ordre supérieur, offrant un avantage dans la représentation des chocs et simplifiant la structure du modèle.

## Maillage et structures hydrauliques

HEC-RAS 2D permet de modéliser les écoulements à travers des terrains divers, y compris les zones montagneuses où les rivières peuvent avoir des lits irréguliers et des pentes abruptes. Le logiciel permet de prendre en charge une gamme d'infrastructures hydrauliques large telles que les barrages, les seuils et les ponts, qui peuvent être intégrés directement dans le maillage pour simuler leur impact sur les écoulements. Pour les simulations en 2D, HEC-RAS utilise un maillage régulier composé de cellules polygonales allant jusqu'à huit côtés, où les équations sont résolues sur chaque cellule. Cela permet de simuler les écoulements sur de larges zones inondables avec une précision raisonnable, bien que la représentation des terrains très complexes puisse nécessiter un raffinement important du maillage (Brunner, 2016). Ces mailles ont une technologie sous maillage qui permet de redécouper automatiquement les mailles lorsque nécessaire.

En outre, HEC-RAS permet de modéliser les interactions entre les écoulements et les structures à différentes échelles spatiales, facilitant ainsi l'évaluation des impacts locaux et régionaux des crues.

## Avantages du modèle

HEC-RAS est largement reconnu pour sa facilité d'utilisation et son intégration avec d'autres outils logiciels, notamment les systèmes d'information géographique (SIG). Ce couplage SIG permet une visualisation précise des résultats de la modélisation, ainsi qu'une meilleure intégration des données topographiques et hydrologiques. De plus, HEC-RAS est un logiciel gratuit et régulièrement mis à jour par le Corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis, ce qui en fait un outil accessible et fiable pour les études hydrauliques (Brunner, 2016).

Sa capacité à traiter à la fois des simulations 1D et 2D en combinée est appréciable, cela en a fait le choix par défaut pour la modélisation hydraulique à la CVH.

## TELEMAC-2D : Modèle hydrodynamique 2D

### Présentation de TELEMAC-2D

TELEMAC-2D est un modèle hydrodynamique bidimensionnel qui simule les écoulements à surface libre dans des environnements variés, tels que les rivières, les estuaires et les zones côtières. Ce modèle fait partie de la suite logicielle TELEMAC-MASCARET, développée par EDF (Électricité de France) et maintenue par une communauté internationale d'utilisateurs. TELEMAC-2D est open source et permet aussi traiter des situations hydrodynamiques complexes. (Lang, P et al, 2014).

TELEMAC-2D est largement utilisé pour la modélisation des crues, la gestion des ressources en eau, et l'analyse des risques d'inondation.

### Méthode éléments finis

Le modèle TELEMAC-2D, également basé sur les équations de conservation du moment, propose plusieurs méthodes numériques pour la résolution des équations de Saint-Venant. La méthode des éléments finis est la méthode classique de TELEMAC-2D, où les équations sont résolues sur des grilles non structurées à l'aide d'éléments triangulaires ou quadrilatéraux. Cette flexibilité permet une résolution élevée dans des zones spécifiques, telles que les pentes abruptes ou les canaux étroits, tout en maintenant une résolution plus faible là où moins de détails sont nécessaires. En plus des éléments finis, TELEMAC-2D permet également l'utilisation de la méthode des volumes finis, particulièrement utile pour capturer les discontinuités dans l'écoulement. Cette méthode impose une limitation sur le nombre de Courant à 1 pour assurer la stabilité du calcul.

### Maillage et structures hydrauliques

TELEMAC-2D prend en charge des maillages non structurés composés de triangles, ce qui permet une représentation détaillée des terrains à géométrie complexe. Cette flexibilité dans la génération des maillages est cruciale pour modéliser des environnements montagneux où les pentes peuvent être abruptes et les lits de rivières étroits et sinueux. Le modèle permet également de simuler des structures hydrauliques telles que des barrages, des seuils et des ponts, en intégrant ces éléments directement dans le maillage ou en utilisant des approches couplées pour mieux capturer les interactions entre l'écoulement et les infrastructures (Lang, P et al, 2014).

Toutefois, malgré l'ajout de lignes de forçage, le maillage peut être moins précis sur des digues étroites.

## Avantages du modèle

Le modèle est conçu pour fonctionner efficacement en architecture parallèles, ce qui permet de traiter de grandes quantités de données en un temps réduit. Cela est particulièrement utile pour les études en zones montagneuses, où les écoulements peuvent être rapides et imprévisibles. De plus, TELEMAC-2D est régulièrement mis à jour par la communauté internationale d'utilisateurs, garantissant ainsi l'intégration des dernières avancées en matière de modélisation hydrodynamique (Lang, P et al, 2014).

Contrairement à HEC-RAS, ce logiciel gère mieux les écoulements très rapides comme ceux dans les canaux. Un inconvénient de TELEMAC-2D est que l'expérience utilisateur est moins agréable que sur d'autres logiciels. Dans cette optique, il a été créé pendant cette étude un programme python qui en prenant en entrée les fichiers résultats et les paramètres des stations à étudier retourne les courbes de tarages, de vitesses et ajoute les données dans un CSV pour comparer ensuite toutes les simulations.

Un autre avantage primordial est que le logiciel étant open source permettant une personnalisation accrue lorsque les compétences suivent.

## Calibration

En utilisant des données topographiques précises et des observations in situ, nous avons calibré et validé deux modèles hydrodynamiques pour différents scénarios hydrologiques à la Réunion, afin d'évaluer leur précision dans la simulation des écoulements fluviaux, le temps de calcul requis pour chaque modèle, leur facilité de calibration et de préparation des fichiers d'entrée, ainsi que leur capacité à représenter fidèlement les caractéristiques hydrodynamiques locales comme les vitesses d'écoulement et les profondeurs d'eau. Pour calibrer le modèle hydrodynamique, aucun hydrogramme connu n'a été utilisé, l'objectif étant d'abord de mettre à jour la courbe de tarage jugée obsolète. Lors de la calibration, menée manuellement, le coefficient de Manning a été ajusté avec les valeurs typiques du cours d'eau, en faisant varier lors de simulations successives. Sur la base des données des stations hydrométriques disponibles, pour un événement de crue majeure avec un débit de pointe de supérieur au débit centennal.

## Analyse de Sensibilité

Tout au long du processus de modélisation, il est devenu évident que le choix des paramètres, tels que la taille du maillage, la sélection des équations ou encore le pas de temps, exerce une influence considérable sur les résultats de la simulation. Par conséquent, des analyses de sensibilité ont été effectuées, afin de permettre l'évaluation comparative des courbes de tarage.

Après avoir effectué les divers jaugeages sur la rivière Saint-Denis à partir des trois vidéos disponibles, une analyse de sensibilité a été réalisée sur le modèle HEC-RAS pour la rivière des Marsouins spécifiquement au niveau de la station Bethléem.

Cette analyse de sensibilité se concentre sur quatre paramètres principaux : l'équation utilisée, le maillage de surface, le pas de temps, et la durée de simulation. L'objectif est d'examiner l'impact de ces paramètres sur les écarts entre les courbes de tarage au niveau de la station Bethléem sur la rivière des Marsouins. Les pourcentages indiqués dans les tableaux ci-dessous représentent les écarts par rapport à la configuration de référence. Le coefficient de Manning ne sera pas varié étant donné que nous le faisons déjà varier pour estimer la courbe de tarage.

Nous utiliserons comme référence pour les deux modèles, des mailles de 3m<sup>2</sup>, un pas de temps adaptatif de 5s et une simulation et donc un hydrogramme de 10h allant jusqu'à un débit supérieur au centennale. Pour HEC-RAS et TELEMAC-2D, les équations de références seront utilisées ne pouvant pas avoir de parfaite équivalence. Ainsi, les équations de Saint Venant classiques pour HEC-RAS (SWE-Classic) et les équations de Saint-Venant avec éléments finis pour TELEMAC-2D.

Pour calculer l'écart, nous prendrons le rapport de la surface de différence entre les deux courbes par rapport à l'intégrale de la courbe de référence. Une fois ces écarts calculés pour chaque simulation, ils peuvent être représentés graphiquement. Le graphique doit avoir les hauteurs d'eau en abscisse et les écarts en pourcentage en ordonnée. Ce type de représentation permet de visualiser facilement les zones où les écarts entre les deux courbes sont les plus significatifs.

Cette analyse permet non seulement de quantifier les écarts entre les deux courbes de tarage, mais aussi de les visualiser de manière claire, facilitant l'interprétation des résultats. Les sections du graphique présentant les plus grands écarts peuvent être analysées plus en détail pour identifier les causes possibles des divergences primaires. Ces informations doivent ensuite être intégrées dans le rapport pour fournir une explication détaillée des écarts observés.

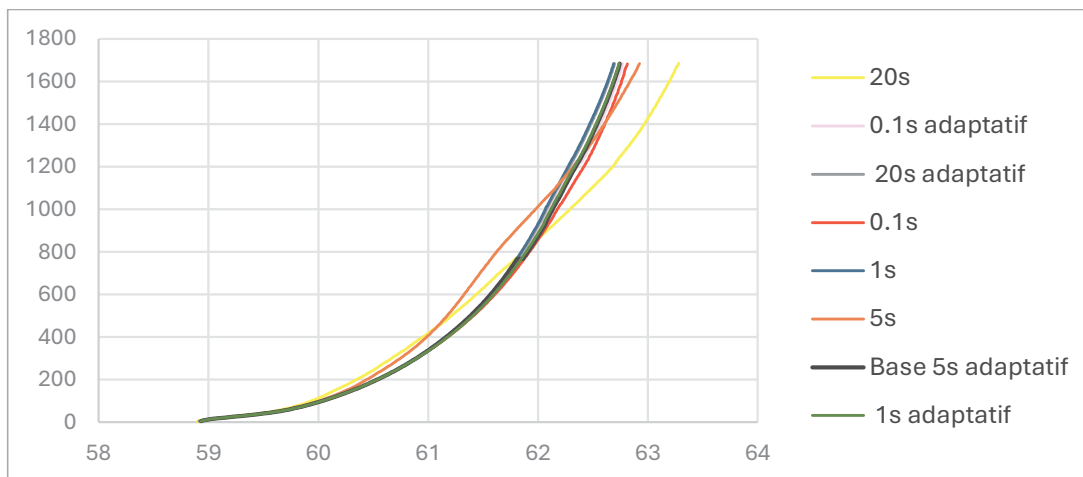


Figure 19 – Graphique Débit/Surface libre (courbe de tarage) de l'analyse de sensibilité HEC-RAS pour le pas de temps

Équation	Écart par rapport à la référence (%) HEC-RAS
----------	--

Equation Wave	28
Stricter Momentum (SWE)	20
Local Inertia (SWE)	28

Figure 20 - Tableau de l'analyse de sensibilité des équations

L'analyse de sensibilité réalisée montre que les équations utilisées pour la modélisation influencent fortement les résultats de la simulation hydrodynamique pour HEC-RAS.

Comparée à l'équation de référence, l'équation d'onde de diffusion montre une déviation de 24%, ce qui correspond à une différence significative. On constate que selon l'équation choisie la différence sera très importante.

Pour TELEMAC-2D, une différence notable de 10% a été observée entre les résultats obtenus en utilisant les méthodes des éléments finis et des volumes finis. Cet écart souligne que la méthode numérique utilisée pour résoudre les équations peut avoir un impact considérable sur les résultats de la simulation. L'approche par volumes finis peut être plus précise pour capturer des discontinuités dans les flux, tandis que l'approche par éléments finis est souvent plus souple pour les géométries complexes.

Ces méthodes de calcul restent le point principal qui séparera les deux modèles n'existant pas de parfaite équivalence.

## 2. Surface de Maillage

Surface du Maillage (m <sup>2</sup> ) : Référence : Maillage 3 m <sup>2</sup>	Écart par rapport à la référence (%) HEC-RAS	Écart par rapport à la référence (%) TELEMAC- 2D
Maillage 1 m <sup>2</sup>	7	6
Maillage 2 m <sup>2</sup>	4	4
Maillage 4 m <sup>2</sup>	2	2
Maillage 6 m <sup>2</sup>	12	10
Maillage 10 m <sup>2</sup>	21	56
Maillage 20 m <sup>2</sup>	32	

Figure 21 - Tableau de l'analyse de sensibilité de la surface de maillage

La taille du maillage est un paramètre influençant la précision et l'efficacité des simulations. HEC-RAS gère mieux les grandes mailles grâce à sa technologie de découpage de mailles, tandis que TELEMAC-2D montre une sensibilité accrue aux mailles plus grandes.

Pour des maillages de 1 m<sup>2</sup> à 4 m<sup>2</sup>, les écarts pour HEC-RAS et TELEMAC-2D restent proches, avec un écart maximum de 7% pour HEC-RAS et 6% pour TELEMAC-2D. Cependant, à mesure que la taille du maillage augmente, les différences deviennent plus marquées. À 6 m<sup>2</sup>, l'écart de HEC-RAS est de 12%, contre 10% pour TELEMAC-2D. Pour un maillage de 10 m<sup>2</sup>, TELEMAC-2D montre une sensibilité beaucoup plus importante avec un écart de 56%, contre 21% pour HEC-RAS. Cela justifie que HEC-RAS gère mieux les grandes mailles grâce à sa technologie de découpage.

### 3. Pas de Temps

Pas de Temps (s) Référence : 5s adaptatif	Écart par rapport à la référence (%) HEC-RAS	Écart par rapport à la référence (%) TELEMAC- 2D
Temps 1s adaptatif	1	5
Temps 20s adaptatif	2	
Temps 0.1s adaptatif	1	8
Temps 5s	14	
Temps 1s	3	13
Temps 0.1s	3	15
Temps 20s	25	

Figure 22 - Tableau de l'analyse de sensibilité pour le pas de temps

Le choix du pas de temps influe sur la précision des résultats, surtout en présence de phénomènes dynamiques rapides, comme dans les canaux. HEC-RAS montre une stabilité relative, tandis que TELEMAC-2D va diverger pour des pas de temps trop importants ne pouvant pas conclure la simulation. Nous remarquons ici la stabilité bien plus importante d'HEC-RAS.

Avec un pas de temps adaptatif, ce dernier présente peu de variation par rapport à la référence (1% à 2%), indiquant que le logiciel s'adapte efficacement aux conditions changeantes. HEC-RAS montre un écart de 14% pour un pas de 5s, tandis que TELEMAC-2D diverge à partir de ce pas de temps. Pour un pas de 20s, HEC-RAS présente un écart significatif de 25%, suggérant que des pas de temps plus longs peuvent dégrader la précision des résultats.

#### 4. Durée de simulation

Durée de Simulation : Référence : SWE-10h	Écart par rapport à la référence (%) HEC-RAS	Écart par rapport à la référence (%) TELEMAC- 2D
1h	2	6
20h	1	2
48h	1	2

Figure 23 - Tableau de l'analyse de sensibilité pour la durée de simulation

La durée de simulation influence peu les écarts par rapport à la référence, que ce soit pour HEC-RAS ou TELEMAC-2D.

Pour une durée de 1h, HEC-RAS présente un écart de seulement 2%, tandis que TELEMAC-2D montre un écart plus important de 6%. TELEMAC-2D est donc plus sensible aux simulations courtes. Pour des durées plus longues (20h à 48h), les écarts sont minimes pour les deux logiciels, pour des raisons de temps de calcul, faire plus rapidement varier un débit pourra être un choix intéressant.

Finalement, les deux modèles montrent une forte sensibilité aux équations utilisées, avec des écarts significatifs selon la formulation choisie, soulignant l'importance de sélectionner l'équation appropriée en fonction du contexte de la simulation. En ce qui concerne la gestion des maillages, HEC-RAS démontre une meilleure capacité à gérer les grandes mailles grâce à sa technologie de découpage de mailles, tandis que TELEMAC-2D devient plus imprécis avec des mailles plus grandes.

En termes de pas de temps, HEC-RAS montre une bonne stabilité avec des pas adaptatifs, alors que TELEMAC-2D semble diverger plus facilement. Enfin, pour la durée de simulation, les deux logiciels fournissent des résultats comparables sur de longues durées, bien que TELEMAC-2D montre une sensibilité accrue pour les simulations courtes.

## Données utilisées

Les données requises pour ce modèle incluaient les niveaux d'eau et les débits enregistrés à la station de Marsouins Bethlehem couvrant la période à partir du 15 janvier. Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) a été obtenue par Arcade Ingénierie à la suite du cyclone Belal avec une résolution de 50

centimètres pour la zone d'étude, ainsi que des données transversales du lit de la rivière, comprenant deux ensembles : l'un collecté avant l'année 2023 et l'autre après Belal.

D'anciens LIDAR sont utilisés pour les stations stables dans le temps. Néanmoins, comme ce dernier ne détecte pas le fond de l'eau ou des zones étroites, il a fallu aller faire des relevés sur le terrain pour calculer le fond du lit, les seuils, les ponts ou encore les digues artificielles parfois trop étroites pour le modèle numérique de terrain.



Figure 24 - Bassin versant de la rivière des Marsouins

## Résultats

Après le passage du cyclone Belal, la CVH a élaboré une nouvelle courbe de tarage à l'aide du logiciel HEC-RAS au niveau de la station St-Denis Amont. Les jaugeages Figure 25 correspondants aux vidéos jugées exploitables réalisés pendant et après le cyclone ont montré que cette nouvelle courbe correspond bien aux mesures obtenues par vidéo. Une incertitude majeure subsiste toutefois concernant la transition entre les différentes courbes de tarage lors des crues majeures (ici qui nécessitent une nouvelle modélisation). Le moment précis où basculer d'une courbe à l'autre reste imprécis, car cette transition se fait de manière progressive, ce qui peut provoquer des erreurs importantes dans l'estimation des débits en cas de crue majeure. Dans ce contexte, les vidéos aident à mieux comprendre l'évolution du terrain.

La question qui se pose alors est : à quel moment précis faut-il basculer vers une nouvelle courbe de tarage ? Ce changement doit-il être effectué au début de la crue, à son pic, ou à la fin ? L'utilisation du jaugeage vidéo peut aider à répondre à cette question, en permettant de suivre l'évolution du débit tout au long de l'événement. Par exemple, à la station de Belal, les vidéos capturées à 6h et 9h

montraient que le débit correspondait davantage à la nouvelle courbe de tarage, ce qui suggère que les modifications du terrain s'étaient principalement produites autour de 6h. Cependant, dans la réalité, le changement de morphologie du terrain se produit progressivement tout au long de la crue. Il est donc difficile de déterminer avec précision à quel moment la nouvelle courbe de tarage doit être appliquée. Plus de vidéos permettraient d'affiner ce changement.

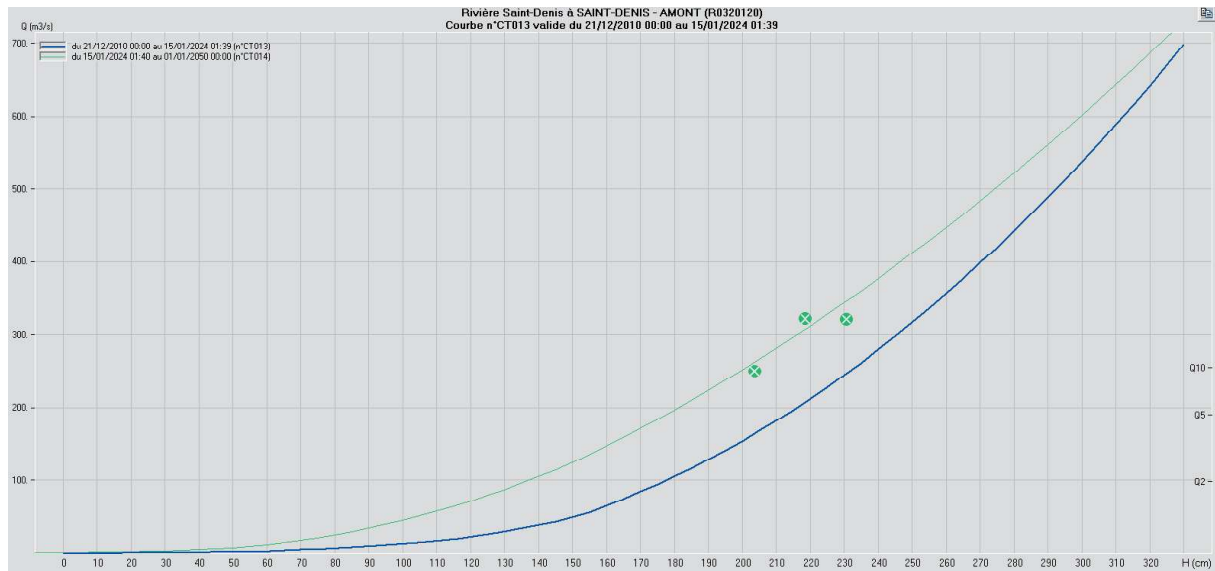


Figure 25 - Jaugeages et Courbes de Tarage Avant et Après le passage du cyclone Belal

En superposant les résultats des simulations, nous pouvons comparer les modèles. Le modèle TELEMAC-2D comme le montre la Figure 27, le modèle HEC-RAS prédit une zone d'inondation beaucoup plus étendue dans les secteurs où l'écoulement est large et lent, comparé à TELEMAC-2D. En revanche, dans les zones où l'écoulement est plus rapide, TELEMAC-2D simule des hauteurs d'eau supérieures à celles prévues par HEC-RAS. Ce dernier tant à avoir une plage de vitesse beaucoup plus importante, plus lent que l'autre modèle dans les zones lentes et plus rapides dans les zones rapides.

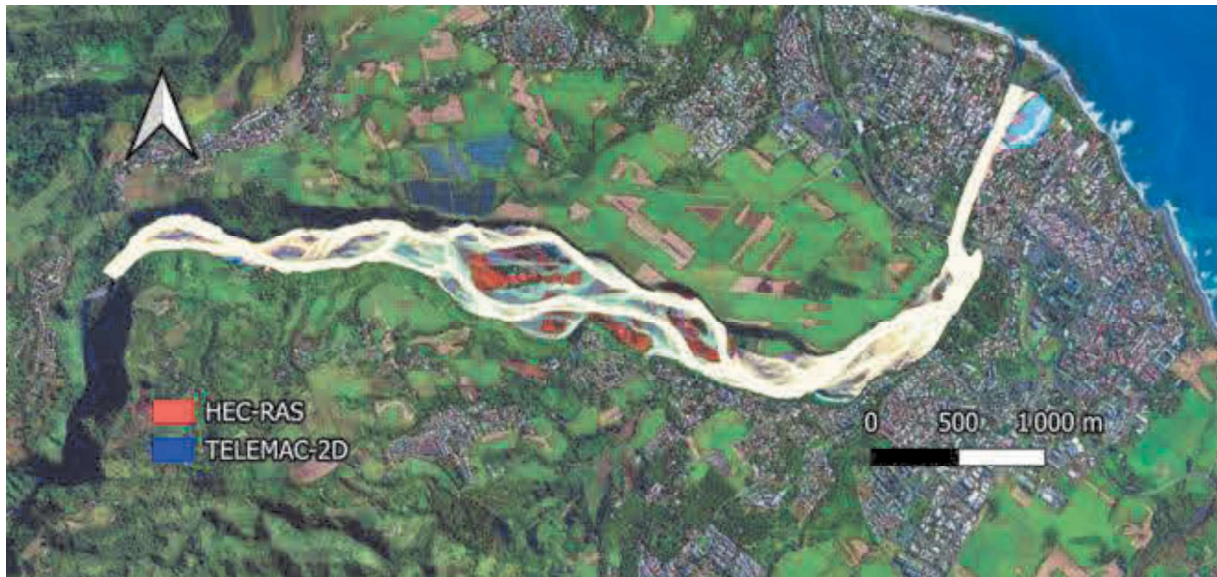


Figure 26 - Modélisation de crue majeure à la rivière des Marsouins avec un débit nominale de 1300 m<sup>3</sup>/s

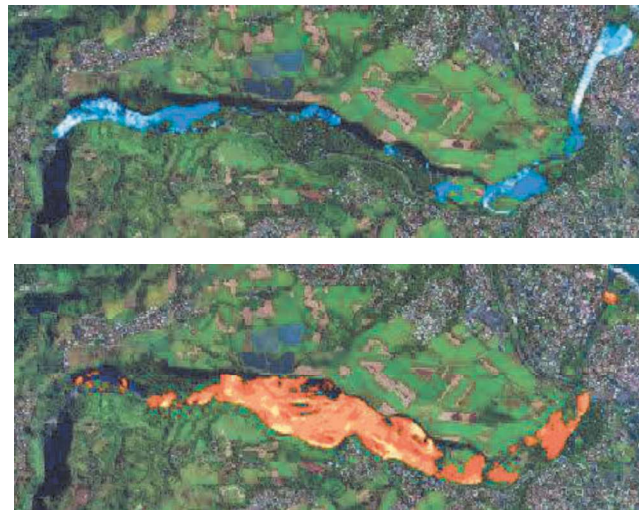


Figure 27 - Différences TELEMAC-2D et HEC-RAS

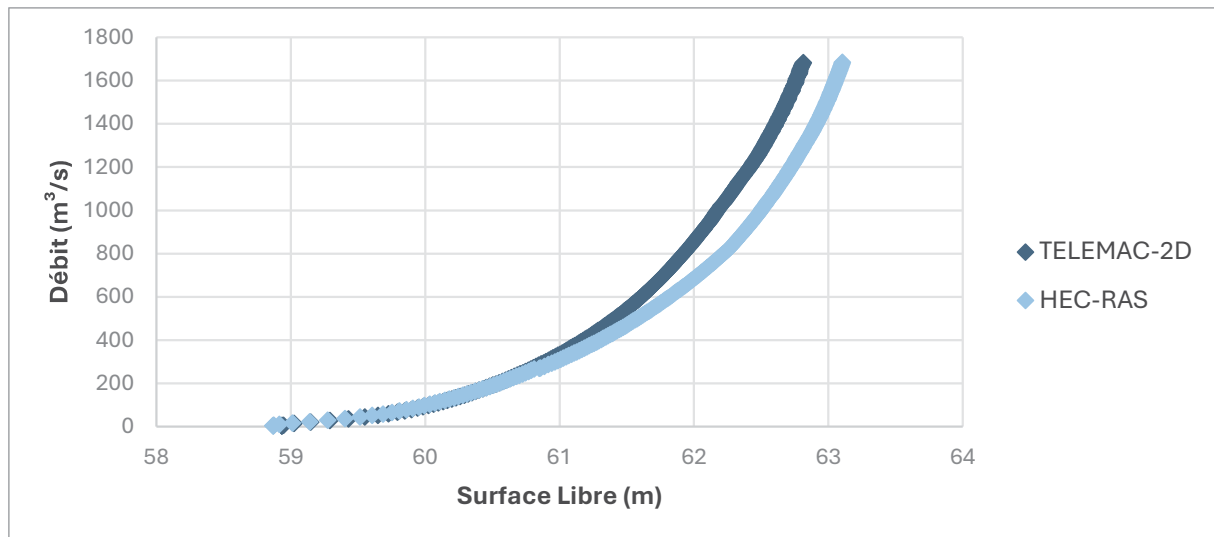


Figure 28 - Comparaison courbes de tarage de référence TELEMAC-2D et HEC-ARS

En traçant les courbes de tarages respectives, sur la Figure 28, nous retrouvons bien qu'au niveau de la station de Marsouins Bethléem, HEC-RAS tend à avoir une hauteur d'eau supérieure car c'est une zone plutôt lente.

## Critiques

Lors de l'élaboration des courbes de tarage sur HEC-RAS et TELEMAC-2D, plusieurs sources d'incertitudes et de limitations doivent être prises en compte pour évaluer la fiabilité des résultats obtenus.

Le manque de points de jaugeages introduit une incertitude sur la précision des courbes de tarage. Plus les jaugeages sont rares, plus il devient difficile de pouvoir élever le niveau de confiance.

Le choix des coefficients de Manning, qui représentent la rugosité du lit de la rivière, constitue une autre source d'incertitude. Ces coefficients sont souvent difficiles à calibrer avec précision, notamment en raison des variations naturelles du lit (végétation, dépôts sédimentaires, etc.) et de l'évolution du milieu au fil du temps.

Certaines stations hydrométriques sont difficiles, voire impossibles à modéliser en raison de leur emplacement ou de la complexité du milieu environnant. Par exemple, au niveau de la station Pluies-Domenjod, il y a au niveau du pont un verrou hydraulique faisant repasse. Les études estiment que le fond y est particulièrement mobile (Stumpf, 2016), ce qui constitue aussi une problématique pour les jaugeages vidéo. Des modélisations 3D ont été réalisées sur TELEMAC-3D, toutefois, sans fond mobile la rivière se remet toujours en fluvial au niveau de la station faussant lourdement la hauteur d'eau.

Le LIDAR, bien qu'il soit un outil performant pour le relevé topographique, ne capture pas les profondeurs sous l'eau, notamment le fond du lit de la rivière. Cela oblige à compléter les relevés par

des sondages manuels, au-delà d'être dépendant de l'exécutant, il n'est pas réaliste de faire l'intégralité du cours d'eau de cette manière.

La présence de structures humaines, telles que des digues, ponts, ou barrages, peut également compliquer la modélisation. Sur la rivière des Marsouins, plusieurs radiers sont présents, et leur modélisation est très différentes entre TELEMAC-2D et HEC-RAS.

Pour autant, ces radiers sont très rapidement submergés lors de crues importantes et sont éloignés des stations de mesure donc n'apporteront presque aucune erreur dans les résultats.

Enfin, une validation insuffisante des modèles, c'est-à-dire l'absence de comparaison avec des données réelles sur une période suffisante, peut entraîner des biais dans les simulations. C'est pourquoi l'identification de laisses de crue est importante comme dans la Figure 29 pour repérer si la modélisation, la hauteur d'eau mesurée et les laisses de crues sont cohérents entre eux.



*Figure 29 - Laisses de crue en aval de la station Marsouins Bethléem (201X)*

## Conclusion

Les travaux réalisés dans ce mémoire ont permis d'apporter des améliorations à la gestion des données hydrométriques et à la prévision des inondations à la Réunion, en particulier dans le cadre du réseau Vigicrues. L'intégration des jaugeages vidéo à travers la méthode LSPIV a démontré sa capacité à fournir des mesures précises et continues, même dans des conditions hydrologiques extrêmes où les méthodes traditionnelles de jaugeage deviennent impraticables. Cette approche récente a permis de mettre à jour et de conforter les courbes de tarage existantes.

Les modélisations hydrauliques réalisées avec HEC-RAS et TELEMAC-2D ont montré des résultats satisfaisants, chaque logiciel présente des avantages spécifiques et pourtant l'écart finale de hauteur d'eau reste assez étroit. Toutefois, les limitations liées à la collecte des données de terrain, notamment en ce qui concerne les relevés topographiques et bathymétriques, soulignent la nécessité d'améliorer les infrastructures de mesure sur l'île. Les résultats des deux modèles sont proches ce qui conforte les précédentes modélisations faites sous HEC-RAS.

Avec une méthodologie établie pour les jaugeages à la volée il sera plus simple de récupérer des vidéos afin de les traiter ultérieurement. Par ailleurs, l'installation de caméras fixes à des points stratégiques sur l'île pourrait considérablement augmenter la quantité et la qualité des données collectées, permettant d'automatiser davantage le processus de jaugeage et d'améliorer les prévisions hydrologiques en temps réel.

Une autre direction potentielle pour les futurs travaux serait d'intégrer les données issues des jaugeages vidéo dans des systèmes d'alerte précoce automatisés, combinant des techniques de modélisation hydrodynamique avec l'intelligence artificielle pour anticiper plus efficacement les crues soudaines. De plus, l'exploration de technologies telles que les drones pour la capture d'images aériennes en temps réel pourraient enrichir les jaugeages vidéo, en offrant des perspectives plus larges sur les rivières et les zones inondées.

Comme le montrent (Masafu et al. 2022), il est possible d'améliorer considérablement la précision des modèles hydrauliques en intégrant les résultats obtenus par la méthode LSPIV. Cependant cette approche requiert la détermination du coefficient de vitesse de façon plus précise en mesurant le courant du cours d'eau à différentes profondeurs.



## Bibliographie

[1]

M. Dehon , “Une population en hausse et vieillissante, malgré des naissances nombreuses - Insee Analyses Réunion - 77,” *Insee.fr*, 2022. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6664672> (accessed Aug. 26, 2024).

[2]

R. Adrian, “Particle-Imaging Techniques For Experimental Fluid-Mechanics,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 23, no. 1, pp. 261–304, Jan. 1991, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.23.1.261>.

[3]

I. Fujita, M. Muste, and A. Kruger, “Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications,” *Journal of Hydraulic Research*, vol. 36, no. 3, pp. 397–414, May 1998, doi: <https://doi.org/10.1080/00221689809498626>.

[4]

G. W. Brunner, “HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual,” 2016. Available: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>

[5]

P. LANG, “TELEMAC MODELLING SYSTEM 2D hydrodynamics TELEMAC-2D Software Release 7.0 USER MANUAL,” 2014. Accessed: Aug. 26, 2024. [Online]. Available: [https://www.opentelemac.org/downloads/MANUALS/TELEMAC-2D/telemac-2d\\_user\\_manual\\_en\\_v7p0.pdf](https://www.opentelemac.org/downloads/MANUALS/TELEMAC-2D/telemac-2d_user_manual_en_v7p0.pdf)

[6]

G. Dramais, J. Le Coz, B. Camenen, and A. Hauet, “Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage–discharge curves,” *Journal of Hydro-environment Research*, vol. 5, no. 4, pp. 301–312, Dec. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2010.12.005>.

[7]

Alexandre Hauet, “Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-Scale Particle Image Velocimetry,” *Hal.science*, Nov. 2006, doi: <https://theses.hal.science/tel-00116889>.

[8]

J. Le Coz, A. Hauet, G. Pierrefeu, G. Dramais, and B. Camenen, “Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers,” *Journal of Hydrology*, vol. 394, no. 1–2, pp. 42–52, Nov. 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.049>.

[9]

J. Le Coz *et al.*, “Crowdsourced data for flood hydrology: Feedback from recent citizen science projects in Argentina, France and New Zealand,” *Journal of Hydrology*, vol. 541, pp. 766–777, Oct. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.036>.

[10]

J. D. Creutin, M. Muste, A. A. Bradley, S. C. Kim, and A. Kruger, “River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River,” *Journal of Hydrology*, vol. 277, no. 3–4, pp. 182–194, Jun. 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(03\)00081-7](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(03)00081-7).

[11]

C. Masafu, R. Williams, X. Shi, Q. Yuan, and M. Trigg, “Unpiloted Aerial Vehicle (UAV) image velocimetry for validation of two-dimensional hydraulic model simulations,” *Journal of Hydrology*, vol. 612, p. 128217, Sep. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128217>.

[12]

A. Nathaly, R. Orozco, N. Bertrand, L. Pheulpin, A. Migaud, and M. Abily, “EasyChair Preprint Comparison Between HEC-RAS and TELEMAC-2D Hydrodynamic Models of the Loire River, Integrating Levee Breaches Comparison between HEC-RAS and TELEMAC-2D hydrodynamic models of the Loire River, integrating levee breaches,” 2023. Accessed: Aug. 26, 2024. [Online]. Available: <https://easychair.org/publications/preprint/T21X/open>

[13]

D. M. Thompson, “Pool–Riffle Sequences,” *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.11029-2>.

[14]

I. Rocamora, “Utilisation de la méthode LSPIV pour l’amélioration des données hydrométriques des bassins versants du réseau Vigicrues Réunion,” Aug. 01, 2021.

[15]

A. Stumpf, E. Augereau, C. Delacourt, and J. Bonnier, “Photogrammetric discharge monitoring of small tropical mountain rivers: A case study at Rivière des Pluies, Réunion Island,” *Water Resources Research*, vol. 52, no. 6, pp. 4550–4570, Jun. 2016, doi: <https://doi.org/10.1002/2015wr018292>.

[16]

Jérôme Le Coz *et al.*, “Développement d’outils pour la quantification des incertitudes des données hydrométriques,” *LHB*, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.1080/27678490.2024.2337704>.

[17]

C. F. Byrne, G. B. Pasternack, H. Guillon, B. A. Lane, and S. Sandoval-Solis, “Channel Constriction Predicts Pool-Riffle Velocity Reversals Across Landscapes,” *Geophysical Research Letters*, vol. 48, no. 20, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1029/2021gl094378>.