

Étude hydrodynamique des écoulements côtiers pour la
cartographie des risques d'inondation : application aux basses
côtes de la ville de Québec

par

Sara ABAIR

THÈSE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

MONTREAL, LE 23 FÉVRIER 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Sara Abair, 2026



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

Prof. Damien Pham Van Bang, directeur de thèse
Département de Génie de la Construction à l'École de Technologie Supérieure

Prof. Marlène Sanjosé, président du jury
Département de Génie Mécanique à l'École de Technologie Supérieure

Prof. Reda Snaiki, examinateur interne
Département de Génie de la Construction à l'École de Technologie Supérieure

Dr. Abdelkader Hammouti, membre du jury
Département de Génie de la Construction à l'École de Technologie Supérieure

Dr. Florian Cordier, examinateur externe indépendant
Dr-Ing, à Electricité de France EDF-R&D

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 12, FÉVRIER, 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes deux directeurs de recherche, le Professeur Damien Pham Van Bang et le Dr Abdelkader Hammouti. Leur accompagnement a été exceptionnel : ils ont su me guider avec patience, rigueur et bienveillance à chaque étape de ce parcours doctoral. Je leur suis particulièrement reconnaissante pour leur grande disponibilité, qui m'a permis de les consulter régulièrement, d'organiser de nombreuses réunions pour discuter de mes idées et d'obtenir leurs conseils avisés à tout moment. Leurs recommandations, toujours pertinentes et éclairées, m'ont aidée à surmonter les obstacles et à progresser avec confiance dans mes travaux. Je leur suis profondément reconnaissante pour la liberté intellectuelle qu'ils m'ont offerte, pour le temps qu'ils ont consacré à répondre à mes nombreuses interrogations, et pour leur soutien constant dans les moments de doute.

Je souhaite également remercier tous mes professeurs tout au long de mon parcours académique, pour leur disponibilité et leur engagement lors de nombreuses réunions et échanges, qui m'ont permis de mieux comprendre les concepts, de recevoir des conseils précieux et d'affiner ma démarche scientifique. Leurs enseignements et leur soutien m'ont non seulement transmis des connaissances solides, mais aussi le goût de la rigueur, de la curiosité et de l'effort, qui m'ont accompagnée tout au long de ma thèse.

Je tiens à remercier mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien sans faille et les sacrifices qu'ils ont consentis tout au long de ma vie. Leur confiance en moi et leurs encouragements ont été une source inestimable de motivation. À mes sœurs, Chaima et Hajar, je veux dire merci pour leur présence affectueuse et leurs mots réconfortants, qui ont illuminé mes journées les plus difficiles et m'ont rappelé l'importance de la famille, tant en moments de réussite que de doute. J'adresse également ma gratitude à ma famille élargie, en particulier mes oncles et mes tantes, pour leur soutien moral, leur présence et les encouragements qu'ils m'ont prodigués tout au long de ce parcours.

Je n'oublie pas mes collègues et amis des laboratoires de l'INRS et de l'ÉTS Montréal. Les discussions techniques, les échanges d'idées, les conseils pratiques et les moments de complicité ont enrichi mon expérience bien au-delà de la dimension scientifique. Leur soutien, leur esprit collaboratif et leur enthousiasme ont transformé ce travail exigeant en une aventure collective pleine de partage et d'apprentissage.

Je remercie également mes amis proches et éloignés, qui ont toujours su me rappeler de prendre du recul et de savourer les petites joies du quotidien. Leur humour, leurs encouragements et leur présence constante, parfois silencieuse mais toujours précieuse, ont été un véritable moteur pour persévérer dans les moments de fatigue ou de découragement.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette thèse. Chaque conseil, chaque geste d'aide, chaque mot d'encouragement a compté et a rendu ce parcours plus riche et plus humain. À tous ceux qui ont participé, directement ou indirectement, à cette expérience, je veux dire merci du fond du cœur.

Étude hydrodynamique des écoulements côtiers pour la cartographie des risques d'inondation : application aux basses côtes de la ville de Québec

Sara ABAIR

RÉSUMÉ

Les projections futures du climat indiquent que le niveau moyen de la mer est prévu de s'élever, ce qui augmente la fréquence et la sévérité des inondations côtières dans le monde et plus particulièrement au Canada. La cartographie du risque inondation constitue un outil essentiel pour appuyer la prise de décision dans les régions côtières. Ce travail de recherche vise à évaluer le risque de submersion côtière dans les basses côtes de la ville de Québec. En se basant sur un modèle hydrodynamique TELEMAC-2D pour représenter l'évolution du niveau d'eau et les vitesses d'écoulement pour évaluer le danger et définir les stratégies de gestion de crise et d'évacuation. Cette recherche vise à valider un modèle hydrodynamique 2D au niveau de l'estuaire fluviale du saint Laurent pour ensuite l'appliquer sur un événement réel d'inondation. Le modèle repose sur la fusion des données topographique et bathymétriques à haute résolution pour permettre de capturer l'écoulement en zone urbaine. Le traitement du front de sec/mouillée a été étudié, pour mettre en évidence la sensibilité de la stabilité numérique. Ensuite, différentes stratégies de représentation des bâtiments urbains, à savoir Building Hole (BH), Building Block (BB) ont été comparées afin de quantifier leurs effets sur l'écoulement et la distribution des vitesses dans les plaines inondables urbanisées. L'étude a également examiné le rôle de l'intégration du vent, uniforme et non-uniforme. Des mesures in situ et d'observations recueillies pendant l'événement ont aussi été intégrées dans le modèle. Les résultats illustrent que la modélisation hydrodynamique à haute résolution basée sur les événements peut soutenir efficacement la prévision opérationnelle des inondations côtières et la cartographie des risques.

Mots-clés: Inondation urbaine, modélisation hydrodynamique, données topo-bathymétriques, front sec/mouillé, représentation des bâtiments urbains, résolution du maillage, TELEMAC-2D

Hydrodynamic study of coastal flows for flood risk mapping : application to the lower coasts of Quebec

Sara ABAIR

ABSTRACT

Future climate projections indicate that average sea levels are expected to rise, increasing the frequency and severity of coastal flooding around the world, particularly in Canada. Flood risk mapping is an essential tool for supporting decision-making in coastal regions. This research aims to assess the risk of coastal flooding in the low-lying areas of Quebec City. It uses a TELEMAC-2D hydrodynamic model to represent water level changes and flow velocities to assess the danger and define crisis management and evacuation strategies. This research aims to validate a 2D hydrodynamic model at the level of the St. Lawrence River estuary and then apply it to a real flood event. The model is based on the fusion of high-resolution topographic and bathymetric data to capture flow in urban areas. The treatment of the wet/dry front was studied to highlight the sensitivity of numerical stability. Next, different strategies for representing urban buildings, namely Building Hole (BH) and Building Block (BB), were compared to quantify their effects on flow and velocity distribution in urbanised floodplains. The study also examined the role of wind integration, both uniform and non-uniform. In situ measurements and observations collected during the event were also incorporated into the model. The results illustrate that high-resolution event-based hydrodynamic modelling can effectively support operational coastal flood forecasting and risk mapping.

Keywords: Urban flooding, hydrodynamic modeling, topo-bathymetric data, wet/dry front, buildings representation, mesh resolution, TELEMAC-2D

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	7
1.1 Introduction à l'hydrodynamique des estuaires	7
1.2 Définition et classification des estuaires	8
1.2.1 Importance écologique et économique des estuaires	8
1.2.2 Processus physiques clés dans les estuaires	9
1.3 Modélisation des écoulements en milieux naturels	11
1.3.1 Les équations de Navier-Stokes	11
1.3.2 Les Équations de Saint-Venant	12
1.3.2.1 Les hypothèses en eau peu profonde	12
1.3.2.2 Formulation	13
1.3.3 Coefficient de frottement	14
1.4 Approches méthodologiques	14
1.5 Analyse comparative des approches de modélisation des inondations côtières	16
1.5.1 Approches méthodologiques pour la modélisation des inondations en milieu estuarien	16
1.5.1.1 Approches 1D, 2D et 3D	16
1.5.1.2 Approches 'Bathtub' et approche hydrodynamique	17
1.5.2 Principaux résultats issus de la littérature	18
1.5.3 Évaluation critique et comparée des approches de modélisation	19
1.6 Enjeux de modélisation des processus physiques en milieu estuarien	20
1.6.1 Traitement numérique du couvrant/découvrant	20
1.6.1.1 Définition du front sec/mouillé	20
1.6.1.2 Méthodes courantes de traitement du couvrant/découvrant	20
1.6.2 Représentation des structures urbaines dans les modèles hydrodynamiques	24
1.6.3 Modélisation de l'effet de vent	26
1.7 Synthèse	29
CHAPITRE 2 ÉTUDE DU MAILLAGE TOPO-BATHYMÉTRIQUE ET VALIDATION DU MODÈLE	31
2.1 Données du site (topométriques, bathymétrie, courant, marées)	31
2.1.1 Choix des frontières et conditions aux limites	31
2.1.1.1 Données bathymétriques	31
2.1.1.2 Données topographiques	34
2.1.2 Modèle TBDEM	35
2.1.3 Débits et hauteurs d'eau	37
2.2 Maillage et validation de l'hydrodynamique (débit, marée)	38
2.2.1 Le frottement	38
2.2.2 Effet de la résolution spatiale	41
2.2.3 Effet de la résolution temporelle	41
2.3 Extension du maillage pour couvrir les berges	47
2.3.1 Inclusion des berges des îles	47
2.3.2 Maillage urbain	49
2.3.3 Résolution et stratégie urbaine	51
2.3.4 Modèle hydrodynamique non-inondé	53
2.4 Synthèse	57
CHAPITRE 3 OUTILS DE SIMULATION DE LA DYNAMIQUE D'INONDATION	59

3.1	Étude du front sec/mouillé dans la simulation d'inondation	59
3.1.1	Description du cas test	59
3.1.2	Conditions aux limites du cas test	60
3.1.3	Analyse de sensibilité au seuil <i>H Clipping</i>	60
3.2	Méthodes de représentation des bâtiments appliquées au cas test	62
3.2.1	Maillage par la méthode BB (Building Block)	62
3.2.2	Maillage par la méthode BH (Building Hole)	63
3.2.3	Maillage par la méthode BR (Building Resistance)	64
3.3	Méthode de représentation des bâtiments appliquée au cas Québec	64
3.3.1	Maillage par la méthode BB	64
3.3.2	Maillage par la méthode BH	66
3.3.3	Comparaison maillage BB et BH	66
3.3.3.1	Présentation des données	66
3.3.3.2	Analyse des résultats	68
3.4	Impact du vent dans la simulation d'inondation	72
3.4.1	Représentation du vent et paramètres de simulation dans TELEMAC-2D	72
3.4.2	Scénario de vent homogène	73
3.4.2.1	Données et hypothèses de modélisation du vent	73
3.4.2.2	Analyse des résultats	73
3.4.3	Scénario vent non-homogène	75
3.4.3.1	Données des stations météorologiques	75
3.4.3.2	Interpolation des données	75
3.4.4	Synthèse	76
CHAPITRE 4 STRENGTHENING COASTAL FLOOD FORECASTING THROUGH EVENT-BASED DATA CAPITALIZATION : A CASE STUDY FROM THE DECEMBER 2022 STORM SURGE IN QUÉBEC CITY		79
4.1	Introduction	80
4.2	Description of the site	82
4.2.1	Consistent bathymetric data	83
4.2.2	Topographic Lidar data in urban area	84
4.2.3	Topo-bathymetric digital elevation model	84
4.3	Hydrodynamic model and verification	86
4.3.1	Governing equations	86
4.3.2	Computational meshing	88
4.3.3	Validation	89
4.4	Results	90
4.4.1	Input data to model the Elliott storm, December 23rd, 2022	90
4.4.2	Numerical results	94
4.4.3	Spatiotemporal analysis of the flood event	96
4.4.4	Discussion	97
4.4.4.1	Effect of wind	97
4.4.4.2	Effect of channelization	98
4.5	Conclusion	99
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		101
LISTE DES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		104

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Tableau comparatif des différentes méthodes de traitement du front sec mouillé 25
Tableau 2.1	Synthèse des données bathymétriques intégrées dans la production du TBDEM 34
Tableau 2.2	Synthèse des données topographiques utilisées dans la production du TBDEM 36
Tableau 2.3	Occupation du sol et coefficient de Manning choisis 39
Tableau 2.4	Caractéristiques des maillages réguliers utilisés pour le modèle de l'estuaire fluvial (MEF) 41
Tableau 2.5	Tableau de calculs des erreurs pour les maillages 250 et 180, avec les différents pas de temps 10s, 5s, 2s 47
Tableau 2.6	Caractéristiques du maillage et de la simulation incluant les berges 48
Tableau 2.7	Tableau des caractéristiques du maillage incluant les berges 49
Tableau 2.8	Performances du modèle pour différents pas de temps 55
Tableau 2.9	Performances du modèle pour différents pas de temps et sections 56
Tableau 4.1	Integration of multi-source bathymetric and topometric data. 84

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	La tripartition de l'estuaire du Saint-Laurent..... 2
Figure 1.1	Schéma conceptuel illustrant la structure hiérarchique de l'hydrodynamique estuarienne. Adaptée de Khojasteh (2021, p. 3) 10
Figure 1.2	Discrétisation en éléments finis 15
Figure 1.3	a) Règle de connectivité nulle qui montre que toutes les cellules du raster ayant une valeur d'élévation ≤ 1 m sont inondées; b) règle de connectivité hydrologique à quatre voies pour un SLR de 1 m où une cellule n'est inondée que si elle est connectée à un plan d'eau directement ou par l'intermédiaire de cellules adjacentes dans les directions cardinales; et c) règle de connectivité hydrologique à huit voies pour une hauteur de chute de 1 m, où une cellule est inondée uniquement si elle est reliée à une masse d'eau directement ou par l'intermédiaire de cellules adjacentes dans une direction cardinale ou diagonale Tirée de Yunus (2016, p. 371) 18
Figure 1.4	Représentation d'une frontière mobile : a) approche classique ; b) approche eulérienne ; c) écoulement à surface libre avec une zone sèche et une zone mouillée Tirée de Heniche (2000, p. 360) 21
Figure 1.5	Variation du coefficient de Manning n en fonction du signe de la profondeur d'eau H Tirée de Heniche (2000, p. 363) 21
Figure 1.6	(a) Représentation de la colonne d'eau, la profondeur réelle est donnée par $H = \eta + h$. (b1) lorsque s est inférieur au seuil de tolérance, et (b2) lorsque s est supérieur à ce seuil. Le fond est représenté par une ligne noire, la surface de l'eau par une ligne bleue, la surface de l'eau dans la cellule sèche par une ligne pointillée, et les nœuds de la cellule par des points. Adaptée de Le (2020, p. 927) 23
Figure 1.7	Illustration des segments secs et humides d'un élément de contrôle du traceur, (b) les définitions de H , ζ et h_B dans une vue transversale de la section latérale d'un chenal idéalisé, y compris la zone intertidale. Adaptée de Chen. (2022, p. 400-401) 24
Figure 1.8	Représentation schématique des différentes approches de représentation des bâtiments 26
Figure 1.9	Mécanismes de génération de la surcote éolienne dans un estuaire : effets combinés du vent, de la bathymétrie et de la marée 27
Figure 1.10	Composantes de la marée de tempête, terminologie des interactions Adaptée de Idier (2019, p. 1604) 28
Figure 2.1	Limites du domaine d'étude 32
Figure 2.2	Dispositif d'acquisition bathymétrique avec le sonar multifaisceaux 33
Figure 2.3	Données NONNA disponibles à la plateforme SHC du Canada 100 m (a), 10m(b) 33
Figure 2.4	Distribution des données bathymétriques sur la zone d'étude 35
Figure 2.5	Données Lidar haute résolution utilisée dans l'étude 36

Figure 2.6	Délimitation des rives droite et gauche du canal de la rivière Adaptée de Falcão (2016, p. 2)	37
Figure 2.7	Les hauteurs d'eau enregistrées dans les marégraphes Neuville et Saint Joseph de la rive pour la période 12-15 juin 2009 (a) et 21-24 juin 2009 (b).....	38
Figure 2.8	Les sections de débits utilisées pour la calibration et la validation du modèle	39
Figure 2.9	Les données de coefficient Manning utilisé au niveau du fleuve Saint-Laurent	40
Figure 2.10	Les données de coefficient Manning utilisées au niveau de la ville de Québec	40
Figure 2.11	Les valeurs de débits obtenues avec un maillage de 250 m, un maillage de 180 m et les données de débit mesurées à la station Québec pour un pas de temps de 5s pour la période (12-15 juin)	42
Figure 2.12	Les valeurs de débits obtenus avec un maillage de 250m, un maillage de 180m et les données de débit mesurées à la station Beauport pour un pas de temps de 10s pour la période (21-24Juin).....	42
Figure 2.13	Les valeurs de débits obtenus avec un maillage de 250m, un maillage de 180m et les données de débit mesurées à la station Lauzon pour un pas de temps de 5s pour la période (21-24Juin).....	43
Figure 2.14	Les valeurs de débits obtenus avec un pas de temps de 10s, 5s, 2s et les données de débit mesurées à la station Québec pour la période (12-15Juin)	44
Figure 2.15	Les valeurs de débits obtenus avec un pas de temps de 10s, 5s, 2s et les données de débit mesurées à la station Beauport pour la période (21-24Juin)	45
Figure 2.16	Les valeurs de débits obtenus avec un pas de temps de 10s, 5s, 2s et les données de débit mesurées à la station Lauzon pour la période (21-24Juin)	45
Figure 2.17	Figure montrant la résolution du modèle après l'ajout des points topographiques dans les berges de l'île d'Orléans et de l'île-aux-Coudres, avec une densification de maillage de 50 m et les piles de pont.	48
Figure 2.18	Une comparaison des débits résultants entre une simulation avec berges des îles et une simulation sans berges des îles	49
Figure 2.19	Résolution des maillages choisis pour le modèle MEFT.....	50
Figure 2.20	Comparaison de débit entre différentes valeurs de Manning de topographie	51
Figure 2.21	Maillage de calcul pour le modèle non-inondé : raffinement du maillage autour de l'île d'Orléans	52
Figure 2.22	Maillage utilisé dans les zones basses de la ville de Québec comprenant le bassin Louise interne/externe (ILB/ ELB respectivement).	52
Figure 2.23	Carte des différents marégraphes, stations météorologiques, stations de hauteurs d'eau et sections de débit utilisées dans l'étude de cas.	53
Figure 2.24	Coefficients de Manning utilisés dans cette étude en fonction de la composition du substrat et de l'occupation des sols.	54

Figure 2.25	Comparaison entre la simulation et l'observation (série temporelle) dans les différentes sections : (a) Estuaire Saint-Charles, (b) Saint-François, (c) Rocher-Neptune pour les différents pas de temps 10s, 5s et 2,5s entre le 12 et le 15 juin 2009 en heure normale de l'Est (HNE).	55
Figure 2.26	Comparaison entre les simulations et les observations dans les différentes sections : (a) Québec, (b) Beauport et (c) Lauzon, pour les pas de temps de 10 s, 5 s et 2,5 s, durant les 15 et 24 juin 2009.	56
Figure 3.1	Dimensions géométriques du canal et du domaine urbain utilisés pour le cas test	60
Figure 3.2	Hauteurs d'eau imposées au niveau de frontières du cas test	61
Figure 3.3	Vue en plan de la position des deux points de contrôle utilisés pour l'extraction des résultats (maillage triangulaire de type BB).	61
Figure 3.4	Hauteurs d'eau obtenues en utilisant les différentes valeurs de <i>H Clipping</i> pour les deux méthodes de maillage BB (a) et BH (b) extraits au niveau du point 1	62
Figure 3.5	Hauteurs d'eau obtenues en utilisant les différentes valeurs de <i>H Clipping</i> pour les deux méthodes de maillage BB (a) et BH (b) extraits au niveau du point 2	62
Figure 3.6	Maillage BB appliqué au cas test	63
Figure 3.7	Maillage BH appliqué au cas test	64
Figure 3.8	Maillage BR appliqué au cas test	65
Figure 3.9	Maillage BB appliqué au cas Québec	65
Figure 3.10	Zone tampon utilisée pour la génération du maillage BH	67
Figure 3.11	Maillage BH appliqué au cas Québec	67
Figure 3.12	Localisation des points OBS et du point A dans le domaine urbain	68
Figure 3.13	Localisation des points OBS et du point A dans le domaine urbain	69
Figure 3.14	Localisation des points OBS et du point A dans le domaine urbain	69
Figure 3.15	Comparaison des vitesses simulées avec BB et BH au niveau des points OBS et du point A	70
Figure 3.16	Répartition des erreurs absolues de vitesses sur le domaine urbain entre simulation BH et simulation BB	71
Figure 3.17	Comparaison des étendues des inondations simulées avec BB (à gauche) et avec BH (à droite)	71
Figure 3.18	Données de vitesse de vent pour la période 21-25 décembre 2022 et direction du vent pour le 23 décembre 2022	74
Figure 3.19	(a) Localisation du point A ; (b) Comparaison du niveau d'eau simulé au point A avec ou sans vent.	74

Figure 3.20	Les différentes stations de vent disponibles dans la zone d'étude : Aéroport International Québec (INTL), Beauport, Île d'Orléans, Îles aux-Grues, Cap-Tourmente, La Pocatière, Forêt Montmorency.....	76
Figure 3.21	La zone d'influence 50% selon les poids IDW dans la zone d'étude.....	77
Figure 3.22	Hauteurs d'eau simulées au niveau du point A pour les différentes simulations, sans vent, avec vent homogène, vent non homogène et interpolation IDW ($p=1$, $p=2$, $p=0.5$)	78
Figure 4.1	Layout map of the study area (Quebec, Canada)	83
Figure 4.2	High resolution Lidar data (1m) in greyscale elevation (a), and in a classified version (b)	85
Figure 4.3	The final topo-bathymetric digital elevation model, the topography is shown in red, and bathymetry is shown in blue (46 million points)	87
Figure 4.4	Computational mesh of the interpolated TBDEM with refinement around Île d'Orléans and lower Québec City, including the internal and external Louise basins (ILB/ELB) and water level observation points	89
Figure 4.5	Manning coefficients based on substrate composition (a) and land use cover (b)	90
Figure 4.6	Comparison between simulation and observation (time series) in the different sections : (a) Estuaire Saint-Charles, (b) Saint-François, (c) and Rocher-Neptune for the different time steps timestep 10s, 5s and 2.5s between 12 and 15 June 2009 in Eastern standard time (HNE).	91
Figure 4.7	Comparison between simulation and observation in the different sections : (a) Quebec, (b) Beauport, and (c) Lauzon for different time steps 10s, 5s and 2.5s during the 15th June 2009 and 24th June 2009.	92
Figure 4.8	Meteorological parameters during the flood event of 23 December 2022 : Wind speed (a), atmospheric pressure (b), and wind direction (c) registered in the station Aéroport Intl Jean-Lesage.	93
Figure 4.9	Spatial distribution and temporal sequence of water depth measurement : (a) 47 points measured by Municipality of Quebec (OBS points) and Point A (social media); (b) chronological sequence of measurement	93
Figure 4.10	Water level observed in the tide gauges Saint-Joseph-de-La-Rive (a) and Neuville (b) on 23 December 2022.	94
Figure 4.11	Observed and simulated water level at OBS points without adding wind velocities for the simulation with a water elevation of 1m in the marina, observed and simulated water level at OBS points with adding wind with a water elevation of 1m in the marina.	95
Figure 4.12	Time evolution of the iso-contours of water level in Quebec City on 23rd December 2022 according to the simulation with a water elevation of 1 m in the marina.	95
Figure 4.13	Spatiotemporal evolution of the velocity during coastal inundation on 23 December 2022 according to the simulation with a water elevation of 1 m in the marina..	96
Figure 4.14	Temporal description of flooding in Quebec City during the Elliott storm : location of observation points (a), time series of water level (b), and flow velocity (c).....	97

Figure 4.15	Comparison of simulated water level with no wind, homogeneous and non-homogeneous wind : (a) wind speed (IDW) interpolation; (b) water level at point A.....	97
Figure 4.16	Flow pattern in the low land of Quebec City at 18 :40 (a), time series of flow in sections : OBS25, LB section, right branch, and left branch (b).	98

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BAG	Bathymetric Attributed Grid
BB	Building Block
BH	Building Hole
BR	Building Resistance
CMQ	Communauté métropolitaine de Québec
CSAR	Données brutes archivées canadiennes
EBK	Kriging bayésien empirique
ELB	Bassin Louise Externe
FVCOM	Modèle océanique communautaire à volumes finis
HLLC	Harten–Lax–van Leer avec restauration de l’onde de contact
IDW	Pondération inverse de la distance
ILB	Bassin Louise Interne
MEF	Modèle de l’Estuaire Fluvial
MEFT	Modèle de l’Estuaire Fluvial
MNE	Modèle Numérique d’Élévation
MNS	Modèle Numérique de Surface
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NHW	Vent Non Homogène
NONNA	Données bathymétriques non-navigacionales
NRC	Ressources naturelles Canada
RMAE	Erreur moyenne absolue relative
RMSE	Erreur quadratique moyenne
SHC	Service Hydrographique du Canada
SLE	Estuaire Saint-Laurent
SLFE	Estuaire fluvial du Saint-Laurent
SLIM	Second-generation Louvain-la-Neuve Ice-ocean Model
TBDEM	Modèle numérique d’élévation topo-bathymétrique

INTRODUCTION

Au Canada, le changement climatique constitue un facteur essentiel d'accentuation de la fréquence, de l'intensité et de la répartition des aléas hydrométéorologiques, notamment les inondations, qui constituent l'un des risques naturels les plus onéreux (Bush & Lemmen, 2019). Le pays se réchauffe à un rythme assez rapide (Bush & Lemmen, 2019) ce qui entraîne une hausse des événements extrêmes (précipitations intenses, montée du niveau de l'eau de mer, tempêtes extrêmes) notamment dans les régions littorales et riveraines. Le Québec est spécialement exposé à ces dynamiques comme le montrent les événements significatifs survenus au cours des dernières années, impactant gravement les infrastructures, les écosystèmes et les communautés urbaines (Azhar, Kane, Vahedifard & AghaKouchak, 2025). L'évolution des régimes hydrologiques, conjuguée à l'urbanisation croissante des territoires, complexifie la gestion des zones inondables et accentue les enjeux liés à la planification territoriale et à la résilience climatique (Amback, Magalhães, Siva, de Sousa & Miguez, 2025 ; Mignot, Li & Dewals, 2019).

Dans ce contexte, la modélisation hydrodynamique s'impose comme un outil essentiel pour analyser la propagation des crues, simuler les interactions complexes entre les forçages hydrologiques (débits, vents, marées) et les caractéristiques physiques du territoire (topographie, occupation du sol, réseaux d'infrastructure), et produire des cartes de risques fiables pour la prise de décision. De plus, la capacité des modèles à représenter finement la dynamique des fronts secs/mouillés, l'effet des vents ou encore la présence de structures anthropiques (bâtiments, digues, routes) constitue un enjeu majeur pour la fiabilité des résultats de simulation des inondations en zone urbaine dans un contexte de changement climatique (Sarchani, Seiradakis, Coulibaly & Tsanis, 2020 ; Schubert & Sanders, 2012). Ces travaux de recherche s'inscrivent dans cette perspective en ciblant une meilleure compréhension des phénomènes hydrodynamiques associés aux inondations côtières et fluviales et à travers l'étude de cas des basses côtes de la ville de Québec, un territoire exposé à la conjonction de plusieurs aléas (fluvial, côtier, météorologique) et nécessitant des outils de simulation adaptés pour anticiper les scénarios futurs.

Le fleuve Saint-Laurent est l'un des plus vastes en Amérique. L'estuaire du Saint-Laurent (SLE) est une dépression naturelle que l'érosion a creusée au fil des âges entre les anciens massifs montagneux que sont les Appalaches et le Bouclier canadien, et que les glaciations successives du Quaternaire et l'érosion glaciaire postglaciaire ont comblée (El-Sabh & Silverberg, 1990). Il est caractérisé par une longueur de 400 km, une largeur jusqu'à 70 km et des profondeurs allant jusqu'à 350 m.

La structure de l'estuaire du Saint-Laurent (Figure 0.1) se segmentant en trois parties aux objets hydrologiques et écologiques distincts :

- L'estuaire fluvial, qui commence en aval du lac Saint-Pierre, près de la ville de Trois-Rivières, et finit à la pointe Est de l'île d'Orléans, près de la ville de Québec, se caractérise par une eau douce influencée par les marées.
- L'estuaire moyen, qui commence depuis la pointe Est de l'île d'Orléans à l'embouchure du Saguenay (pointe ouest de l'île-Verte) au nord (au sud, respectivement), se caractérise par une zone de mélange des eaux douces du fleuve avec les eaux salées du golfe.
- L'estuaire maritime, depuis Tadoussac jusqu'à Pointe-des-Monts, est caractérisé par le chenal Laurentien, de grande profondeur dans lequel circulent les eaux salées du golfe riches en nutriments, denses et provenant de l'Atlantique.

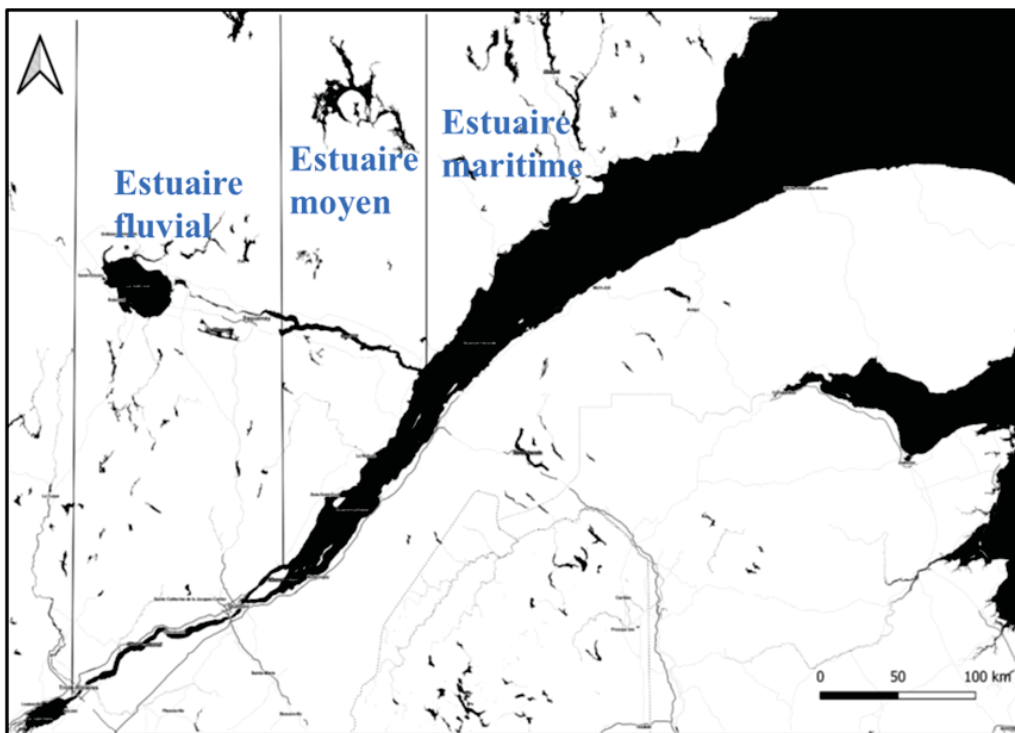


FIGURE 0.1 La tripartition de l'estuaire du Saint-Laurent

La tripartition de l'estuaire (fluvial, moyen, maritime) est également reflétée par les profondeurs moyennes : la profondeur dans l'estuaire fluvial varie entre 10 et 60 m ; elle est entre 20 et 110 m dans la partie moyenne ; elle est entre 100 et 500 m dans la partie maritime.

L'histoire du Vieux-Port à Québec illustre la relation entre la ville et son cadre fluvial. Des panneaux comme celui affiché sur la rue Saint-Pierre montrent que la ligne maritime au XVII^e siècle se trouvait plus en amont qu'aujourd'hui. À partir du XVIII^e siècle, la demande accrue d'espaces portuaires et d'infrastructures commerciales a conduit à de vastes travaux de remblai sur le Saint-Laurent, remodelant progressivement le littoral naturel en

une façade urbaine artificialisée. L'expansion maritime, en s'enfonçant progressivement, a ciselé le Vieux-Port à l'aspect que l'on lui prête aujourd'hui.

Au cours des dernières années, la ville de Québec a été confrontée à une augmentation de la fréquence et de la sévérité des épisodes de submersion côtière, touchant particulièrement les secteurs bas situés le long du fleuve Saint-Laurent, tels que la Basse-Ville, Cap-Blanc et les abords de Beauport. Ces phénomènes ne sont pas nouveaux, mais leur récurrence semble s'intensifier avec le temps. Des événements majeurs ont été documentés depuis le début du XX^e siècle, notamment le 18 novembre 1918 (Journal Action Catholique), le 4 mars 1971 et le 14 mars 1993 (Québec Urbain), puis des épisodes plus récents tels que le 17 mars 2007 et le 6 décembre 2010 (Port de Québec). Parmi les submersions les plus significatives, on compte le 26 mai 2013, relayé par plusieurs médias (Journal de Québec, La Voix du Sud, TVA Nouvelles, Radio-Canada, Port de Québec), le 11 mars 2015 (Port de Québec), le 30 mars 2021 (INRS) et le 22 décembre 2022 lors de la tempête Elliot. Ces événements illustrent une tendance à l'augmentation des risques liés aux inondations urbaines et côtières, renforcée par l'urbanisation croissante et les effets du changement climatique, et soulignent la nécessité d'outils de modélisation hydrodynamique pour la prévention et la gestion des risques.

Ce type d'inondation résulte de la superposition de plusieurs facteurs hydrométéorologiques, incluant les grandes marées, les surcotes de tempêtes causées par les vents et les dépressions atmosphériques, et parfois les débits fluviaux lors des crues printanières. Sous l'effet des changements climatiques, ces composantes sont appelées à s'intensifier : les projections indiquent une élévation moyenne du niveau marin de 40 à 90 cm d'ici 2100 sur le littoral est du Canada (James, Henton, Leonard, Darlington, Forbes & Craymer, 2014), accompagnée d'une augmentation des événements extrêmes liés aux tempêtes et aux surcotes.

Dans ce contexte, il est crucial de développer des outils de simulation capables de représenter avec précision l'interaction entre les forçages météorologiques et hydrologiques (signal de marée, pression-vent atmosphérique et débits fluviaux) et la topographie urbaine complexe, incluant les effets du bâti sur la dynamique de l'inondation. Une telle modélisation hydrodynamique détaillée est indispensable pour anticiper les scénarios d'inondation, élaborer des cartes de risque précises et des stratégies de gestion de crise pour guider des politiques d'aménagement ou d'adaptation vers une plus grande résilience aux effets climatiques.

L'objectif principal de cette thèse est de contribuer à une meilleure compréhension et à une modélisation plus réaliste des processus d'inondation en milieu urbain côtier, en prenant comme terrain d'étude les basses côtes de la ville de Québec. Cette zone est particulièrement vulnérable aux submersions marines en raison de sa faible altitude

relative au plan d'eau, et de sa proximité directe avec le fleuve Saint-Laurent qui présente en ce lieu une très forte convergence estuarienne. Les scénarios en matière de changements climatiques, notamment l'élévation du niveau marin et l'augmentation des fréquences et des intensités des événements extrêmes, viennent renforcer l'importance de notre travail.

La recherche s'inscrit dans ce contexte et s'appuie sur l'utilisation d'un code de calcul hydrodynamique TELEMAC-2D, afin de proposer des simulations numériques de débordement de fleuve et des descriptions temporelles d'inondation en zone urbaine tenant compte des particularités urbaines, topographiques et météorologiques du site d'étude. Plus spécifiquement, les travaux se construisent par des étapes qui permettent de :

- Réaliser un état de l'art sur la modélisation hydrodynamique des inondations côtières et fluviales, et présenter les différentes approches utilisées pour reproduire les événements de crue. Ce qui permet d'identifier les lacunes dans les modèles existants et de définir le cadre théorique sur lequel se base le modèle numérique.
- Développer un modèle numérique pour simuler le débordement et la propagation de l'inondation. L'intégration des données topo-bathymétriques à haute résolution, la gestion de la dynamique front sec/mouillé et la bonne représentation des structures urbaines vont permettre de concevoir un outil numérique robuste pour la reproduction des processus hydrodynamiques d'inondation dans les basses côtes de la ville de Québec.
- Étudier l'influence des différentes hypothèses sur la précision et la fiabilité des simulations. Une analyse des différents facteurs liés à la représentation des bâtiments, à l'impact du vent et le front sec/mouillé va être faite pour mieux comprendre les paramètres critiques qui conditionnent la dynamique de l'inondation.
- Appliquer le modèle à un cas réel d'inondation du 23 décembre 2022, afin de valider sa capacité à reproduire l'hydrodynamique de l'inondation, d'évaluer la performance du modèle et d'illustrer son utilité pour la gestion du risque d'inondation.

À travers cette démarche multidimensionnelle, la thèse vise à renforcer la capacité de reproduire et, à plus long terme, de prédire des événements d'inondation dans les zones urbaines côtières, et à fournir des outils utiles à la résilience climatique locale, à la gestion durable du risque et à la prise de décision fondée sur la modélisation.

Cette thèse est structurée en quatre chapitres qui s'articulent autour des principaux défis liés à la modélisation des inondations en milieu urbain côtier.

Le chapitre 1 propose une revue de littérature qui pose les fondements scientifiques de la thèse et justifie la décomposition des travaux en différentes étapes successives. Il commence par une introduction aux caractéristiques physiques et aux rôles des estuaires, avant de présenter les équations fondamentales utilisées pour modéliser les écoulements en milieux naturels. Ce chapitre examine ensuite les principales approches méthodologiques existantes, avec une attention particulière portée aux défis posés par la modélisation de l'effet du vent, du front sec/mouillé et des structures urbaines. Une analyse critique des travaux antérieurs permet de situer cette recherche dans le contexte plus large des études sur les inondations côtières.

Le chapitre 2 expose le développement du modèle topo-bathymétrique destiné à la simulation hydrodynamique de la zone étudiée. Il détaille la construction du maillage numérique en fusionnant les données topographiques et bathymétriques, tout en appliquant les ajustements nécessaires pour présenter fidèlement les zones urbaines et le fleuve. La résolution du maillage est ensuite mise à l'épreuve au cours d'une phase de validation du modèle, basée sur la comparaison avec les données observées lors de divers épisodes hydrodynamiques. Cette validation confirme la fiabilité du modèle TELEMAC-2D avant qu'il ne soit utilisé dans les simulations d'événements extrêmes.

Le chapitre 3 présente et évalue les outils de simulation numérique employés pour modéliser l'hydrodynamique des inondations dans notre zone d'étude. Il se concentre sur les principaux facteurs qui influencent l'inondation en milieu urbain, à savoir le traitement du front sec/mouillé, la représentation des bâtiments dans les maillages ainsi que l'effet du vent sur la submersion (homogène et non-homogène), à travers un cas test et aussi le cas d'application de la ville de Québec. Il vise à identifier les stratégies numériques les plus robustes capables de reproduire fidèlement les mécanismes de submersion côtière.

Le chapitre 4 constitue une application scientifique et concrète sous forme d'article scientifique : "Strengthening Coastal Flood Forecasting through Event-Based Data Capitalization : A Case Study from the December 2022 Storm Surge in Québec City". Il met en pratique la méthodologie et les outils développés précédemment pour étudier l'événement de la tempête du 23 Décembre 2022. Il présente une étude spatiotemporelle détaillée de l'événement ; il discute de l'effet du vent, de la chenalisation de l'inondation urbaine, ce qui consolide les capacités de prévision et de cartographie des risques d'inondation.

Enfin, une conclusion avec des recommandations pour les travaux futurs est présentée.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

L'objectif principal de ce chapitre est d'examiner de manière critique les connaissances scientifiques existantes relatives à l'hydrodynamique des estuaires et à la modélisation des inondations côtières. Il vise à identifier les fondements théoriques, les approches méthodologiques dominantes, ainsi que les enjeux spécifiques associés à la simulation des processus physiques en milieu estuarien. Ce travail de synthèse permet de dégager les avancées majeures, les limites des approches actuelles, ainsi que les lacunes de la littérature afin d'orienter les choix méthodologiques adoptés dans cette thèse.

1.1 Introduction à l'hydrodynamique des estuaires

Les estuaires sont définis comme des zones de transition dynamique et d'évolution constante entre les systèmes fluviaux d'eau douce et les environnements maritimes salés, ils attirent depuis longtemps l'attention des scientifiques et des chercheurs. Ces écosystèmes distincts sont le résultat d'interactions complexes entre des facteurs physiques, chimiques et biologiques, dont chacun est essentiel à la nature et au fonctionnement de l'écosystème estuarien.

L'hydrodynamique des estuaires est un système complexe caractérisé par l'interaction de divers facteurs externes et internes. Les principaux moteurs de la dynamique estuarienne sont les marées, les apports d'eau douce, le vent et les vagues. Leur influence dépend de la morphologie spécifique de chaque estuaire (Iglesias, Avilez-Valente, Pinho, Bio, Vieira, Bastos & Veloso-Gomes, 2019b ; Khojasteh, Glamore, Heimhuber & Felder, 2021). Les propriétés physiques de l'eau, telles que la densité et la viscosité, ainsi que la topographie du fond, jouent un rôle important dans la formation des schémas de circulation et des processus de mélange (Khojasteh, Hottinger, Felder, De Cesare, Heimhuber, Hanslow & Glamore, 2020 ; Tanaka & Chanson, 2018). Un estuaire peut aussi présenter différents régimes de stratification selon le rapport entre l'apport d'eau douce et l'intensité des marées (Khojasteh *et al.*, 2021 ; Tanaka & Chanson, 2018).

L'évolution temporelle de tous ces facteurs peut avoir un effet significatif sur les concentrations de nutriments, la pénétration de la lumière et les niveaux de turbidité dans l'environnement, qui affectent tous la distribution et l'abondance du plancton et d'autres biotes (Piranti, Setyaningrum, Widyartini & Ardli, 2021). L'enrichissement excessif en nutriments des estuaires, souvent appelé eutrophisation, est un problème grave dans de nombreuses régions du monde, entraînant des changements significatifs dans la structure et la fonction de l'écosystème. L'afflux d'eaux de ruissellement riches en nutriments en provenance des zones urbaines et agricoles peut perturber l'équilibre délicat entre les différentes composantes du réseau trophique estuarien, entraînant fréquemment l'émergence d'espèces opportunistes qui prospèrent dans des environnements riches en nutriments tandis que des organismes

plus sensibles luttent pour s'adapter à des conditions environnementales modifiées (Flindt, Ângelo Pardal, Lillebø, Martins & Marques, 1999).

La compréhension approfondie de ces dynamiques est cruciale pour une gestion environnementale efficace, notamment en ce qui concerne la dispersion des polluants, la prévision des inondations et la restauration écologique (Ganju, Brush, Rashleigh, Aretxabaleta, Del Barrio, Grear & O'Donnell, 2016; Iglesias, Almeida, Teixeira, Mucha, Magalhães, Bio & Bastos, 2020; Iglesias, Bio, Bastos & Avilez-Valente, 2021). Les modèles hydrodynamiques numériques sont devenus des outils indispensables pour simuler et prédire ces processus complexes (Iglesias, Avilez-Valente, Bio & Bastos, 2019a; Ji, Moustafa & Hamrick, 2024). Ces modèles contribuent non seulement à améliorer notre compréhension fondamentale des estuaires, mais fournissent également des informations essentielles pour la prise de décision en matière de gestion côtière, de protection de l'environnement et d'adaptation aux changements climatiques.

1.2 Définition et classification des estuaires

1.2.1 Importance écologique et économique des estuaires

Les enjeux économiques et écologiques sont d'une portée considérable dans les écosystèmes estuariens (Gedan, Kirwan, Wolanski, Barbier & Silliman, 2011; Kennish, 2016) et ils présentent des différences importantes. En soutenant l'économie locale et régionale grâce à diverses activités humaines, les estuaires subissent des pressions qui menacent l'équilibre de leurs écosystèmes.

Sur le plan écologique, les estuaires abritent une grande diversité d'habitats (marais, mangroves, herbiers) et constituent des zones de nurserie et de reproduction pour plusieurs espèces de poissons et crustacés d'importance commerciale (Booi, Mishi & Andersen, 2022; Dowdall, Bowe & Kirby, 2022; Sheaves, Baker, Nagelkerken & Connolly, 2015). Les estuaires sont également importants pour la séquestration du carbone qui limite les effets du changement climatique (Ouyang & Lee, 2014), et ils assurent le transfert de nutriments entre les milieux terrestres et marins (Chilton, Hamilton, Nagelkerken, Cook, Hipsey, Reid & Brookes, 2021; Savage, Thrush, Lohrer & Hewitt, 2012).

En outre, les estuaires contribuent au développement économique à travers une diversité d'usages et de services. D'une part, ils soutiennent des pêcheries essentielles à la sécurité alimentaire et à la création d'emplois locaux dans les communautés riveraines (Barbier, Hacker, Kennedy, Koch, Stier & Silliman, 2011; Blaber, Cyrus, Albaret, Ching, Day, Elliott & Potter, 2000; Priya, Bhavan, Bella, Bijji, Velayudhan, Sahadevan & Kutty, 2023). D'autre part, la richesse écologique et paysagère de ces estuaires constitue une attraction touristique générant des revenus et créant plusieurs emplois (Barbier, 2017; Martin, Momtaz, Gaston & Moltschaniwskyj, 2020; Yee, Sharpe, Branoff, Jackson, Cicchetti, Jackson & Shumchenia, 2023).

Le cumul des efforts de protection et de restauration en faveur des estuaires, incluant la lutte contre la pollution, les nuisances, la dégradation des habitats ou encore les impacts du changement climatique, est très important pour garantir l'intégrité et la continuité de la fourniture de leurs précieux services économiques et écologiques. Leur durabilité à long terme exige des efforts globaux pour préserver ce foyer qui représente à la fois un corridor de navigation, une plateforme de pêche commerciale et un centre d'écotourisme (Assani, Landry, Labrèche, Frenette & Gratton, 2014).

1.2.2 Processus physiques clés dans les estuaires

Les estuaires sont des systèmes hydrodynamiques complexes où interagissent plusieurs processus physiques contrôlant la circulation, la stratification et le mélange des masses d'eau. Ces processus résultent principalement de la combinaison des forçages de marée, des apports d'eau douce, du vent et de la morphologie du chenal (Figure 1.1).

La marée constitue souvent le principal moteur de la dynamique estuarienne, générant des courants bidirectionnels responsables du transport sédimentaire et du renouvellement des eaux (Valle-Levinson, 2010). L'apport fluvial, quant à lui, impose un gradient de densité entre les eaux douces continentales et les eaux salées marines, conduisant à une stratification verticale plus ou moins marquée selon le rapport entre la force de la marée et le débit fluvial (Hoitink & Jay, 2016). Lorsque l'énergie de la marée domine, l'estuaire tend vers un état bien mélangé, tandis qu'un fort débit fluvial favorise une stratification stable et limite le mélange vertical (Savenije, 2005). Le vent intervient principalement dans les zones peu profondes ou à large ouverture vers la mer, où il peut modifier la circulation résiduelle, influencer la répartition de la salinité et favoriser la remise en suspension des sédiments (Chicharo, Chicharo & Wolanski, 2008).

Cependant, l'hydrodynamique d'un estuaire dépend aussi de sa morphologie et des forces motrices influençant la propagation des ondes de marée. Ainsi, le rétrécissement de l'estuaire, aussi nommé *funneling*, ou la diminution progressive de sa profondeur (*shoaling*), peuvent produire une amplification des marées, causant une augmentation des amplitudes des marées en amont de l'estuaire, l'énergie des vagues étant constante (van Rijn, 2010,1).

La morphologie d'un estuaire joue un rôle déterminant dans sa dynamique hydro-sédimentaire et sa vulnérabilité aux inondations. Ainsi, les caractéristiques morphologiques (taille, profondeur, etc.) influencent directement les processus d'érosion côtière et la propagation de la marée (Grabemann, Uncles, Krause & Stephens, 1997; Wang, Jeuken, Gerritsen, de Vriend & Kornman, 2002). Une bonne compréhension de ces paramètres est essentielle pour caractériser les impacts des variations hydrodynamiques et proposer des approches de gestion adaptées aux risques climatiques et environnementaux.

Les estuaires en forme d'entonnoir, à l'instar de l'estuaire du fleuve Saint-Laurent, connaissent des interactions complexes entre les forces tidales et leur géométrie, ce qui peut influencer le risque d'inondation. Les estuaires

resserrés possèdent des caractéristiques morphologiques plus favorables au risque d'inondation, en raison de leurs courants plus lents et de leurs forces de cisaillement plus faibles (de Ruiter, Mullarney, Bryan & Winter, 2017). Une convergence transversale et une profondeur de chenal accrue amplifient les vagues de tempêtes et les surcotes dans ce type d'estuaire. Ainsi, la configuration physique de l'estuaire fluvial du Saint-Laurent peut le rendre particulièrement vulnérable aux inondations dues à l'élévation du niveau de la mer et aux tempêtes intenses (Saucier, Roy, Senneville, Smith, Lefavre, Zakardjian & Dumais, 2009).

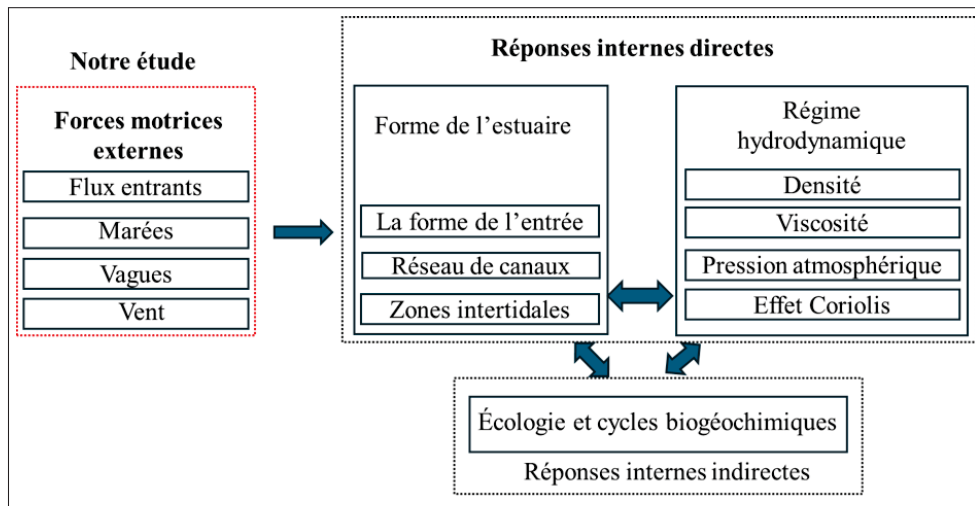


FIGURE 1.1 Schéma conceptuel illustrant la structure hiérarchique de l'hydrodynamique estuarienne.
Adaptée de Khojasteh (2021, p. 3)

Les quatre principaux facteurs climatiques qui agissent sur l'hydrodynamique des estuaires sont le courant, les marées, la pression atmosphérique et le vent, ils confèrent des caractéristiques qui, avec la géomorphologie, sont propres à chaque estuaire. Ainsi, l'hydrodynamique des estuaires est aussi influencée par les propriétés intrinsèques du fluide (densité et viscosité de l'eau) qui dépendent principalement de la température, de la salinité et peuvent ainsi varier dans l'espace et le temps, par les caractéristiques de l'écoulement induites notamment par les effets de géométrie, les courants de densité ou les effets de la turbulence (Savenije, 2005).

Chaque estuaire est distingué par un régime et des caractéristiques de marée spécifiques à lui, issus d'une combinaison de facteurs naturels et d'activités anthropiques (Du, Shen, Zhang, Ye, Liu, Wang & Wang, 2018). En effet, selon des récentes études (Müller, 2012; Müller, Arbic & Mitrovica, 2011), des changements significatifs des caractéristiques de marée ont été observés au cours des 20e et 21e siècles suite à certaines interventions humaines qui ont modifié soit la profondeur de l'eau, soit la largeur du chenal (Haigh, Pickering, Green, Arbic, Arns, Dangendorf & Idier, 2020; Talke & Jay, 2020).

De même, les apports d'eau douce entrant dans un estuaire ont, dans certains cas, subi des modifications en raison des activités humaines (barrages, urbanisation) ou d'événements naturels (sécheresse, inondations ou érosions). Ces

variations peuvent aussi influencer l'hydrodynamique estuarienne (Haigh *et al.*, 2020 ; Uncles, Stephens & Harris, 2013).

Enfin, les vagues de vent peuvent affecter l'écoulement estuarien et modifier la distribution ou le déplacement des sédiments (Bricker Jeremy D. & G., 2005 ; French, French, Clifford & Watson, 2000 ; Kench, 1999). Ainsi, de manière plus générale, les forçages atmosphériques (pression, vent) peuvent influencer les niveaux d'eau et les courants (Cho, 2007).

1.3 Modélisation des écoulements en milieux naturels

1.3.1 Les équations de Navier-Stokes

La modélisation des écoulements de fluides repose sur les équations de Navier-Stokes. Ces équations constituent le pilier de la mécanique des fluides, et proviennent des travaux fondamentaux de Claude-Louis Navier et Sir George Gabriel Stokes au XIX^e siècle. Elles découlent des principes essentiels de la conservation de la masse et de la conservation de la quantité de mouvement (Batchelor, 1989 ; Landau & Lifshitz, 2013).

L'équation de conservation de la masse, souvent appelée équation de continuité, indique que la divergence du champ de vitesse est égale à zéro, ce qui est mathématiquement formulé par l'équation (1.1) :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1.1)$$

L'équation de la quantité de mouvement, une équation vectorielle, décrit comment la quantité de mouvement du fluide évolue dans le temps. L'équation (1.2) décrit l'équation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (1.2)$$

où :

- $\mathbf{u}$: champ de vitesse (m/s)
- p : champ de pression (Pa)
- ρ : densité (kg/m³)
- ν : viscosité cinématique du fluide (m²/s)
- $\mathbf{f}$: forces extérieures (gravité, vent, etc.)

L'équation de la quantité de mouvement résulte de l'interaction de plusieurs forces, dont les gradients de pression ($-\nabla p$), qui déplacent le fluide des zones de haute pression vers celles de basse pression ; les forces visqueuses, issues de la friction interne du fluide, qui freinent le mouvement et sont proportionnelles à la viscosité et au taux de cisaillement ; et les forces externes, qui peuvent inclure la gravité, la force de Coriolis, le frottement, la turbulence et le vent (Sun, Lei & Wang, 2023). Le terme visqueux, représenté par $\nu \nabla^2 \mathbf{u}$, décrit la diffusion de la quantité de mouvement dans le fluide, adoucissant les gradients de vitesse et contribuant à la stabilité globale de l'écoulement (Hrma, Ferkl & Kruger, 2023).

La viscosité est une grandeur physique qui traduit la résistance interne d'un fluide à l'écoulement. Elle se manifeste par des forces de frottement entre couches fluides adjacentes, jouant un rôle essentiel dans la dissipation de l'énergie cinétique. On distingue généralement la viscosité moléculaire, intrinsèque au fluide et liée aux interactions microscopiques entre molécules (valeur de l'ordre de 10^{-6} m²/s pour l'eau), et la viscosité turbulente, qui traduit l'effet macroscopique des tourbillons et structures turbulentes sur le mélange et la dissipation d'énergie. En modélisation numérique, et plus particulièrement dans les modèles 2D comme TELEMAC-2D, ces deux contributions sont regroupées dans un coefficient de viscosité effective qui conditionne directement la diffusion des vitesses et la stabilité des simulations (Hervouet, 2007).

Le paramétrage de la turbulence constitue un aspect délicat de la modélisation hydrodynamique, car il influe sur la représentation des structures d'écoulement et sur la robustesse numérique du calcul. Ainsi, le calibrage de la viscosité turbulente représente une étape essentielle afin de garantir un compromis entre stabilité numérique et fidélité physique de la simulation.

Dans le cadre de notre modélisation du fleuve Saint-Laurent, le recours au modèle $k-\varepsilon$ se justifie par la complexité hydrodynamique du site d'étude, notamment la présence de zones de recirculation, de forts gradients de vitesse et d'interactions marée-débit, nécessitant une représentation réaliste des processus turbulents afin d'améliorer la fiabilité des résultats de simulation.

1.3.2 Les Équations de Saint-Venant

1.3.2.1 Les hypothèses en eau peu profonde

Les équations de Saint-Venant, souvent désignées sous le nom d'équations en eaux peu profondes, sont largement utilisées pour la simulation numérique des écoulements à surface libre, notamment pour les inondations fluviales et côtières. Issues des équations tridimensionnelles de Navier-Stokes, elles découlent d'un ensemble de simplifications reposant sur l'hypothèse d'une pente faible, d'une pression hydrostatique et d'un très faible rapport entre la hauteur de l'eau et les dimensions horizontales de l'écoulement (Catella Michele & Luca., 2008).

1.3.2.2 Formulation

Ces hypothèses permettent de simplifier le calcul des moyennes des paramètres hydrodynamiques sur la verticale, convertissant le système 3D initial en un modèle 2D horizontal, plus facilement gérable sur le plan numérique et sur le temps de calcul (Miyamoto, Itoh, Komatsu, Baker, Dohm, Tosaka & Sasaki, 2006 ; Osborne & Whiteley, 2010). Cette simplification est particulièrement utile pour représenter les dynamiques hydrauliques à grande échelle, tout en maintenant une représentation précise des phénomènes de propagation des crues, des débordements et des inondations temporaires. Les équations de Saint-Venant sont ainsi souvent utilisées dans les programmes de simulation hydrodynamique pour évaluer les risques d'inondation, concevoir des infrastructures de protection et analyser des situations d'événements extrêmes en contexte fluvial, urbain ou côtier.

Le système d'équations est composé de :

Équation de conservation de la masse décrite dans l'équation (1.3) :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1.3)$$

Équations de conservation de la quantité de mouvement selon x et y décrites par les équations (1.4) et (1.5) :

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + S_{fx} + S_{mx} \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + S_{fy} + S_{my} \quad (1.5)$$

où :

- z_b : topographie du fond (m)
- h : profondeur de l'eau (m)
- u, v : composantes de la vitesse moyenne en profondeur dans les directions x et y (m/s)
- g : accélération due à la gravité (m/s^2)
- ρ : densité du fluide (kg/m^3)
- S_{fx}, S_{fy} : termes de frottement (m^2/s^2)
- S_{mx}, S_{my} : termes de forçage atmosphérique

1.3.3 Coefficient de frottement

Le coefficient de frottement est un paramètre essentiel dans les modèles hydrodynamiques, influençant la précision de l'écoulement, la morphodynamique et le transport sédimentaire. Sa valeur dépend fortement des conditions locales (nature du fond, rugosité, régime d'écoulement). Ainsi, ce coefficient contrôle la dissipation d'énergie à l'interface fluide-solide, affectant la hauteur d'eau, la vitesse des courants et la dynamique sédimentaire (Arrieta-Pastrana, Coronado-Hernández & Fuertes-Miquel, 2025 ; Saichenthur, Murali & Sundar, 2022). Il est souvent ajusté par calibration, en comparant les résultats du modèle aux observations (Hsu, Kuo, Kuo & Liu, 1999 ; Mendez-Rios, Le Coz, Benjamin & Théophile, 2023).

Pour représenter le frottement en pratique, des coefficients empiriques sont utilisés, parmi lesquels le coefficient de Manning (n), fréquemment appliqué en modélisation hydraulique des inondations (Kirstetter, Hu, Delestre, Darboux, Lagrée, Popinet & Josserand, 2016 ; Paquier, Mignot & Bazin, 2015). Sa valeur peut être estimée à partir des données de terrain issues de la télédétection montrant l'occupation du sol.

L'équation de Saint-Venant de conservation de quantité de mouvement 1D s'écrit :

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) = gh(S_0 - S_f) + q(u_q - u) \quad (1.6)$$

où : q désigne le débit latéral par unité de largeur et u_q représente la vitesse associée à ce débit latéral.

avec le terme de frottement exprimé par :

$$S_f = \frac{n^2 u |u|}{R^{4/3}} \quad (1.7)$$

où :

- n : coefficient de Manning ($\text{s/m}^{1/3}$)
- u : vitesse moyenne (m/s)
- R : rayon hydraulique (m)

1.4 Approches méthodologiques

La modélisation hydrodynamique repose sur la résolution d'équations aux dérivées partielles, qui servent à décrire le mouvement et la répartition de l'eau dans le temps et dans l'espace. Pour résoudre numériquement ces équations,

différentes approches ont été utilisées. Les méthodes des volumes finis, des différences finies et des éléments finis comptent parmi les stratégies de discrétisation les plus couramment utilisées.

Le choix de la méthode dépend de plusieurs facteurs : la complexité géométrique du domaine, la nature des phénomènes physiques impliqués, le niveau de précision attendu et les contraintes en matière de calcul (Juretić, & Gosman, 2010).

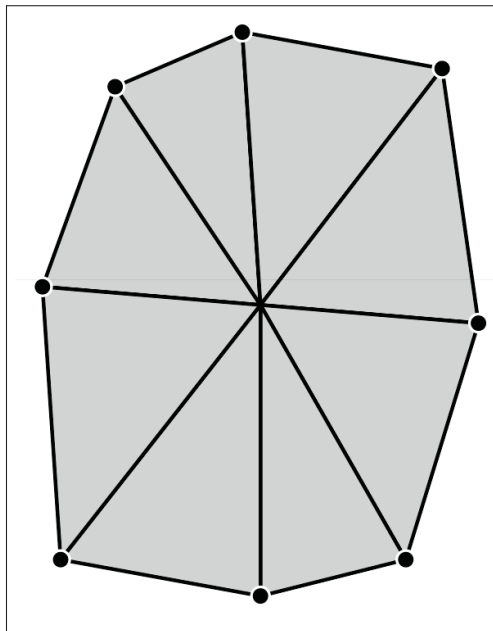


FIGURE 1.2 Discrétisation en éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF), en particulier, se distingue par sa grande flexibilité dans la représentation des géométries complexes (Heinemann, Isopescu & Maxineasa, 2021). Ces traits en font un outil adapté pour modéliser l'hydrodynamique, surtout dans des environnements naturels ou urbains qui ne suivent pas une topographie régulière (Chamoïn & Legoll, 2021).

Le principe de cette méthode consiste à diviser la zone étudiée en formes géométriques simples, comme des triangles ou des quadrilatères (Figure 1.2). Ensuite, on utilise des fonctions d'interpolation pour approcher la solution à l'intérieur de ces formes. La MEF facilite également l'implémentation de conditions aux limites diverses, telles que des hauteurs d'eau, des débits imposés ou des profils de vitesse, tout en offrant une base mathématique solide pour l'analyse de la convergence et de l'erreur (Mnassri, & Triki, 2022).

Un autre avantage notable de cette méthode réside dans sa capacité à intégrer, de manière cohérente, d'autres processus physiques, tels que le transport de sédiments, la qualité de l'eau ou encore les interactions fluide-structure

(Castro-Bolinaga, Diplas & Bodnar, 2020). Cette aptitude au couplage multiphysique est essentielle pour une modélisation réaliste et complète de nombreux phénomènes hydrodynamiques.

La méthode des volumes finis est en revanche utilisée plus fréquemment pour la conservation des flux. Elle est également employée pour les écoulements à surface libre, offrant une robustesse numérique même en présence de discontinuités telles que les ressauts hydrauliques (Kang, 2009).

La méthode des différences finies, quant à elle, résout les équations différentielles partielles en discrétisant le domaine d'étude en une grille régulière (Paquier *et al.*, 2015), ce qui la rend moins flexible que les éléments finis pour gérer les géométries complexes. Elle est souvent plus simple à implémenter dans des domaines réguliers (Diaz & Grote, 2015).

En résumé, la méthode des éléments finis (MEF) est une technique numérique flexible, bien adaptée aux exigences de la modélisation hydrodynamique. Sa capacité à représenter les géométries compliquées, à gérer différents types de conditions et à s'associer avec d'autres modèles en fait une option privilégiée pour l'étude des inondations en zones urbaines.

Dans cette optique, *Telemac-Mascaret* a été retenu comme outil dans cette étude. Le choix revient principalement à son caractère open source, à l'utilisation des éléments finis, à sa modularité 2D et 3D, qui permet d'offrir la possibilité d'utiliser les simulations pour d'autres processus comme le transport sédimentaire et les vagues. De plus, la renommée internationale du code garantit un cadre scientifique bien soutenu par une communauté active.

1.5 Analyse comparative des approches de modélisation des inondations côtières

1.5.1 Approches méthodologiques pour la modélisation des inondations en milieu estuarien

1.5.1.1 Approches 1D, 2D et 3D

Les approches de modélisation des inondations côtières ont évolué pour intégrer des modèles allant d'approches unidimensionnelles (1D) à des simulations bidimensionnelles (2D) et tridimensionnelles (3D) (Vojinovic & Tutulic, 2009).

Les modèles unidimensionnels, bien que limités dans leur capacité à représenter la complexité spatiale des écoulements, trouvent leur utilité dans la modélisation des systèmes fluviaux principaux, en particulier lorsque les données sont rares et que la puissance de calcul est limitée (Bates & De Roo, 2000).

En revanche, les modèles bidimensionnels offrent une représentation plus réaliste de la propagation des inondations sur les plaines inondables côtières, en tenant compte des variations spatiales de la topographie et de la rugosité de la surface (Ravazzani, Mancini & Meroni, 2009). Ces modèles sont cruciaux pour cartographier l'étendue des inondations et évaluer les risques dans les zones côtières densément peuplées (Teng, Jakeman, Vaze, Croke, Dutta & Kim, 2017).

Les modèles tridimensionnels, quant à eux, sont utilisés dans des contextes plus spécifiques, tels que l'étude localisée sur les interactions fluide-structure complexes, les interactions vagues-structures côtières, ou les écoulements turbulents autour des obstacles (Hurtado-Herrera, Uh Zapata, Hammouti, Pham Van Bang, Zhang & Nguyen, 2024; Teng *et al.*, 2017).

1.5.1.2 Approches 'Bathtub' et approche hydrodynamique

Les modèles « Bathtub » (par exemple CoastalDEM, Eczeco-Cerema) sont les plus simples et supposent qu'une zone est inondée jusqu'à une certaine altitude, sans tenir compte des processus dynamiques (Miyamoto *et al.*, 2006).

Le modèle d'inondation « Bathtub » suppose qu'une zone dont l'élévation est inférieure au niveau d'inondation projeté sera inondée. Les zones d'inondation dans cette approche sont déterminées par une procédure de calcul simple dans un environnement SIG (Système d'Information Géographique), où l'élévation de chaque cellule d'un MNE (Modèle numérique d'élévation) est comparée à un niveau de la mer prévu et toutes les cellules dont les valeurs sont inférieures au niveau de la mer projeté sont considérées comme inondées (Yunus, Avtar, Kraines, Yamamuro, Lindberg & Grimmond, 2016). La Figure 1.3 décrit les approches Bathtub.

Selon (Poulter & Halpin, 2008), deux approches peuvent être adoptées pour simuler l'inondation en utilisant un MNE :

1. La première approche, qui ne tient pas compte de la connectivité hydrologique, est une approche de type passage à zéro dans laquelle une cellule matricielle est inondée si son élévation est inférieure au niveau de la mer projeté.
2. La seconde approche prend en compte la connectivité hydrologique en simulant qu'une cellule matricielle sera inondée si son élévation est inférieure au niveau de la mer projeté, et si elle est connectée à une cellule qui est soit inondée, soit en eau libre. Dans ce cas, la règle de connectivité à huit voies est utilisée, donc une cellule raster est considérée comme connectée aux huit cellules environnantes dans ses directions cardinales et diagonales.

Plusieurs études comparatives (Gallien, Sanders & Flick, 2014; Seenath, Wilson & Miller, 2016; Zhang, 2020) ont documenté les limites de l'approche « Bathtub », qui mènent principalement à une surestimation de la vulnérabilité

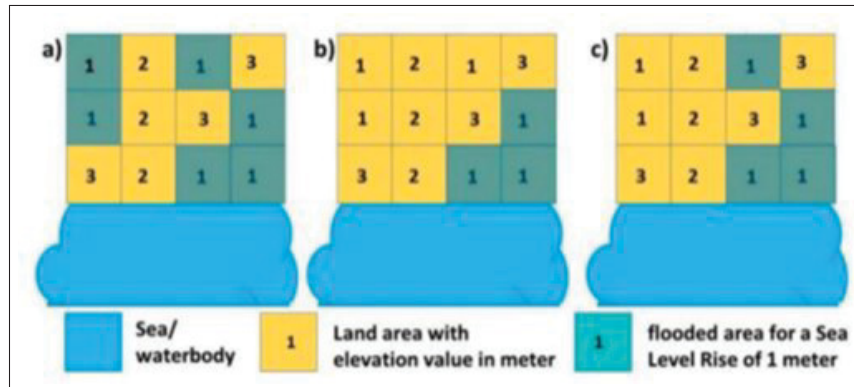


FIGURE 1.3 a) Règle de connectivité nulle qui montre que toutes les cellules du raster ayant une valeur d'élévation ≤ 1 m sont inondées ; b) règle de connectivité hydrologique à quatre voies pour un SLR de 1 m où une cellule n'est inondée que si elle est connectée à un plan d'eau directement ou par l'intermédiaire de cellules adjacentes dans les directions cardinales ; et c) règle de connectivité hydrologique à huit voies pour une hauteur de chute de 1 m, où une cellule est inondée uniquement si elle est reliée à une masse d'eau directement ou par l'intermédiaire de cellules adjacentes dans une direction cardinale ou diagonale
Tirée de Yunus (2016, p. 371)

aux inondations. Malgré ces problèmes potentiels de surestimation, l'approche « Bathtub » peut être utilisée pour obtenir une indication générale des zones susceptibles d'être vulnérables aux inondations. Cependant, il convient de rester prudent lors de l'utilisation des résultats issus de cette catégorie de modèles.

En contraste, les modèles de propagation d'inondation basés sur la physique, s'appuyant sur la résolution des équations de Saint-Venant ou des équations de Navier-Stokes, offrent une représentation plus détaillée des processus hydrauliques complexes. Ces modèles nécessitent néanmoins des données d'entrée détaillées et une puissance de calcul importante, ce qui peut limiter leur application à de grandes échelles. Les modèles hydrodynamiques jouent un rôle essentiel dans la gestion contemporaine des risques d'inondation, en fournissant des preuves via des prévisions numériques, sur lesquelles repose la quantification des risques et la planification d'investissements futurs (Mckenna, Glenis & Kilsby, 2023).

1.5.2 Principaux résultats issus de la littérature

La modélisation hydrodynamique des inondations est un champ de recherche en pleine évolution, essentiel pour la compréhension et la gestion des risques associés aux événements extrêmes. Plusieurs études récentes ont mis en lumière l'importance cruciale des données topographiques et bathymétriques de haute résolution, notamment pour calibrer les coefficients de rugosité et améliorer la représentation des bâtiments et des terrains, ce qui contribue à réduire les incertitudes des simulations (Safari, 2018 ; Watson, Gyawali, Creed & Elliott, 2024 ; Zhou, Mou, Ao, Huang & Yang, 2025).

Le choix du type et de la résolution du maillage influence la précision de l'inondation (hauteur d'eau, étendue, temps d'arrivée de la crue), surtout dans les zones urbaines complexes (Alipour, Jafarzadegan & Moradkhani, 2022 ; Schubert, Sanders, Smith & Wright, 2008). Par ailleurs, l'évaluation des risques sur des cours d'eau non jaugés bénéficie d'approches innovantes combinant bases topographiques et catalogues d'emprises inondées, renforçant ainsi la qualité des diagnostics (Payraastre, Bourgin, Hocini & Lebouc, 2018).

L'avancée des outils numériques, illustrée par la comparaison entre modèles 1D et 2D dans la propagation des inondations, démontre que les modèles 2D permettent une représentation spatiale plus détaillée des dynamiques d'écoulement (Negretto, 2019). Cette complexité est d'autant plus prononcée en milieu urbain, où les interactions entre écoulements de surface et infrastructures souterraines exigent des améliorations méthodologiques, comme le soulignent (Mignot *et al.*, 2019) à travers leur revue d'études expérimentales.

La représentation fine des bâtiments dans les modèles hydrodynamiques urbains apparaît indispensable pour simuler avec précision la propagation des inondations et leurs impacts, ce que confirment (Mustafa & Szydłowski, 2021) dans leurs travaux sur HEC-RAS 2D, mettant en avant la pertinence des équations de Saint-Venant pour capturer les multiples chemins d'écoulement en zone bâtie. Ces contributions illustrent l'importance d'une modélisation intégrée et adaptée aux contextes spécifiques pour améliorer la cartographie des risques d'inondation, notamment dans les zones côtières urbaines vulnérables.

1.5.3 Évaluation critique et comparée des approches de modélisation

La modélisation hydrodynamique des inondations a connu des avancées majeures ces dernières années, grâce à une meilleure représentation physique des phénomènes, notamment par le traitement amélioré des fronts secs/mouillés et l'intégration des données météorologiques (Dewals, Detrembleur, Archambeau, Erpicum, Ernst & Piroton, 2011 ; Gonzalez, 2016). Ces progrès permettent de simuler avec plus de réalisme les écoulements en milieux naturels et urbains, bien que des limites subsistent liées au manque de données précises pour certaines calibrations, à l'imprécision relative des modèles numériques de terrain (MNT) et aux difficultés inhérentes à la représentation fine des zones bâties et des infrastructures (Mignot *et al.*, 2019 ; Safari, 2018).

Un débat important porte également sur le compromis nécessaire entre précision des modèles et coûts computationnels, qui conditionne leur applicabilité opérationnelle (Favre, 2018). Dans cette thèse, une approche fondée sur l'utilisation de données de très haute précision et d'un modèle hydrodynamique robuste est adoptée afin de limiter les incertitudes tout en garantissant une bonne représentation physique des phénomènes. Cette démarche vise à développer un cadre adapté aux spécificités des inondations côtières en milieu urbain, conciliant rigueur scientifique et contraintes pratiques sur la qualité des données et la robustesse numérique. Elle répond ainsi aux besoins croissants de gestion efficace des risques dans des environnements complexes et vulnérables.

1.6 Enjeux de modélisation des processus physiques en milieu estuarien

1.6.1 Traitement numérique du couvrant/découvrant

1.6.1.1 Définition du front sec/mouillé

La gestion du front sec/mouillé constitue un élément crucial dans la modélisation hydrodynamique lors des inondations. Le front sec/mouillé est la limite mobile entre une zone saturée, totalement recouverte par l'eau, et une zone non saturée ou asséchée, exposée à l'air (Chen, Qi, Liu, Beardsley, Lin & Cowles, 2022). Cette interface est sujette à des déplacements rapides sous l'effet des marées, des ondes de tempête ou des apports fluviaux, compte tenu des faibles pentes, ce qui rend sa modélisation numérique particulièrement complexe.

Les principaux défis résident dans le caractère transitoire et non linéaire du front, les fortes hétérogénéités du milieu (obstacles naturels ou urbains, rugosité, infiltration, pente) ainsi que les risques d'instabilités numériques, notamment liés à la génération de profondeurs d'eau négatives ou à la perte de conservation de masse (Bradford & Sanders, 2002 ; Vorobeyskii, Al Janabi, Schneebeck, Bellera & Krebs, 2020).

1.6.1.2 Méthodes courantes de traitement du couvrant/découvrant

Pour représenter avec précision les transitions entre zones humides et sèches dans les simulations d'inondation, plusieurs méthodes numériques ont été développées afin d'assurer la stabilité, la conservation de la masse et la fidélité physique du front sec/mouillé.

La technique *H clipping* est utilisée pour modéliser les écoulements peu profonds, en particulier dans le contexte des fronts sec/mouillé, où la variation du niveau de l'eau change l'état des zones traversées par le front sec/mouillé. En pratique, lorsque la hauteur d'eau devient négative, le *H clipping* restreint cette valeur à zéro, permettant de traiter les zones concernées comme des nœuds secs. Dans les modèles numériques aux éléments finis, cette technique joue un rôle central en préservant la cohérence des simulations, notamment en différenciant efficacement les éléments humides, secs et de transition, tout en assurant une application rigoureuse des équations de conservation dans des environnements complexes. Ainsi, cette approche renforce la robustesse et la fiabilité des prédictions, contribuant à une modélisation hydrodynamique plus réaliste et adaptée à des environnements où les niveaux d'eau varient dynamiquement.

La méthode proposée par Heniche, Secretan, Boudreau & Leclerc (2000) pour le traitement du front sec/mouillé repose sur une approche eulérienne (Figure 1.4) adaptée à la prévision des zones de séchage et de mouillage. La méthode repose sur la résolution des équations de Saint-Venant sur tout le domaine d'étude. Simple en

implémentation, elle est capable de s'adapter aux différentes conditions hydrodynamiques, stationnaires ou non-stationnaires, en utilisant un maillage fixe. Cette approche permet d'utiliser des hauteurs d'eau positives et négatives pour distinguer les zones sèches et mouillées.

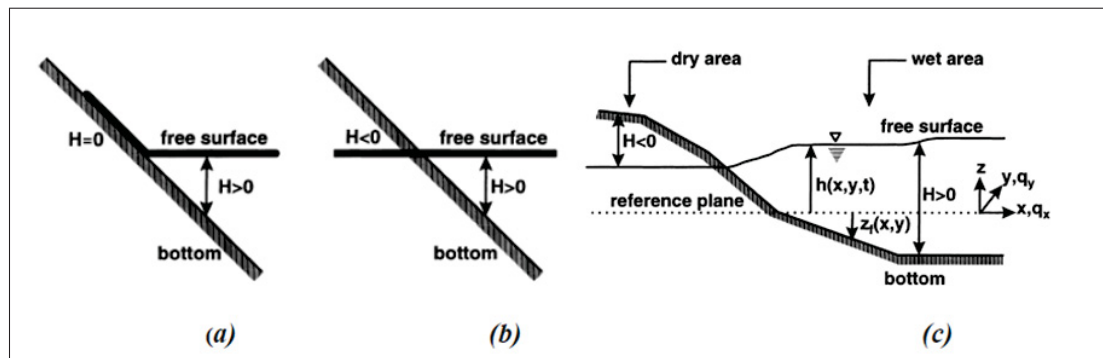


FIGURE 1.4 Représentation d'une frontière mobile : a) approche classique ; b) approche eulérienne ; c) écoulement à surface libre avec une zone sèche et une zone mouillée
Tirée de Heniche (2000, p. 360)

Dans les zones sèches, pour empêcher tout mouvement irréaliste de l'eau, la méthode implémente un mécanisme de «gel» de l'écoulement. Ce «gel» est obtenu par une modification du coefficient de Manning. Ainsi, dans les zones humides, le coefficient de Manning est déterminé de manière conventionnelle en fonction de la rugosité du fond et de la végétation, tandis que dans les zones sèches, il est imposé de manière paramétrique afin d'augmenter artificiellement le frottement (Figure 1.5).

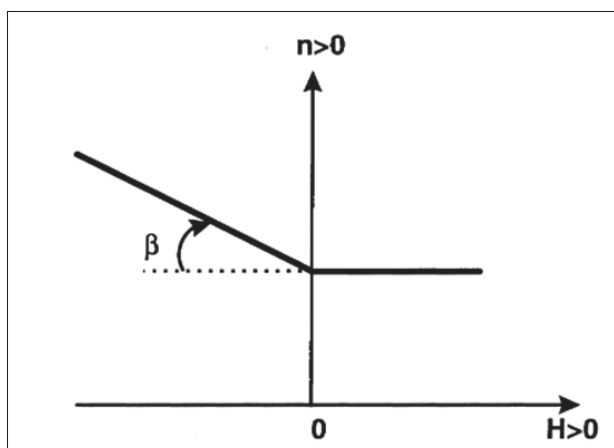


FIGURE 1.5 Variation du coefficient de Manning n en fonction du signe de la profondeur d'eau H
Tirée de Heniche (2000, p. 363)

La méthode de Galerkin introduite en 1989 (Cockburn, Lin & Shu, 1989) est une technique numérique permettant de résoudre les équations aux dérivées partielles. Elle offre une grande flexibilité pour représenter des géométries complexes.

La méthode de Galerkin continue est une approche classique utilisée en modélisation hydrodynamique pour la résolution des équations d'eau peu profonde. Elle repose sur la continuité des fonctions d'interpolation pour obtenir des solutions précises. Cependant, certaines limites apparaissent lorsqu'il s'agit de discontinuités ou de transitions abruptes, comme dans le cas des fronts sec/mouillé. C'est pour pallier ces limitations que la méthode de Galerkin discontinue a été introduite. L'étude de Le, Lambrechts, Ortleb, Gratiot, Deleersnijder & Soares-Frazão propose une méthode basée sur le Galerkin discontinu pour résoudre implicitement les équations d'eau peu profonde.

L'approche présentée dans cette étude est intégrée dans le modèle Second-génération Louvain-la-Neuve Ice-Ocean Model (SLIM). La gestion du front sec/mouillé permet d'éviter les profondeurs négatives, de maintenir la stabilité du modèle et de garantir la conservation de la masse et des vitesses. La détection des cellules sèches se fait à l'aide d'une valeur seuil prédéfinie ε : une cellule est considérée comme sèche si la profondeur d'eau est inférieure à ce seuil (Figure 1.6). On calcule le paramètre s est défini par l'équation (1.8)

$$s = \max(\eta) + \min(h) \quad (1.8)$$

où :

η : élévation de la surface libre

h : profondeur de référence

Lorsque s est inférieur à ε , l'élément est considéré sec et la gravitation est annulée pour éviter des profondeurs négatives. Dans le cas contraire, l'eau peut s'écouler depuis les nœuds mouillés vers les nœuds secs proches. Pour rendre cette transition progressive et compatible, un paramètre de mélange α est introduit, variant de 0 à 1 selon la valeur de s , il est défini par la formule (1.9) :

$$\alpha = \min \left(1, \max \left(0, \frac{s - \varepsilon}{4\varepsilon} \right) \right) \quad (1.9)$$

Cette approche garantit que les transitions sec vers mouillé sont douces, que les profondeurs restent positives et que la masse est conservée localement et globalement, tout en réduisant le coût de calcul grâce à l'utilisation de schémas implicites.

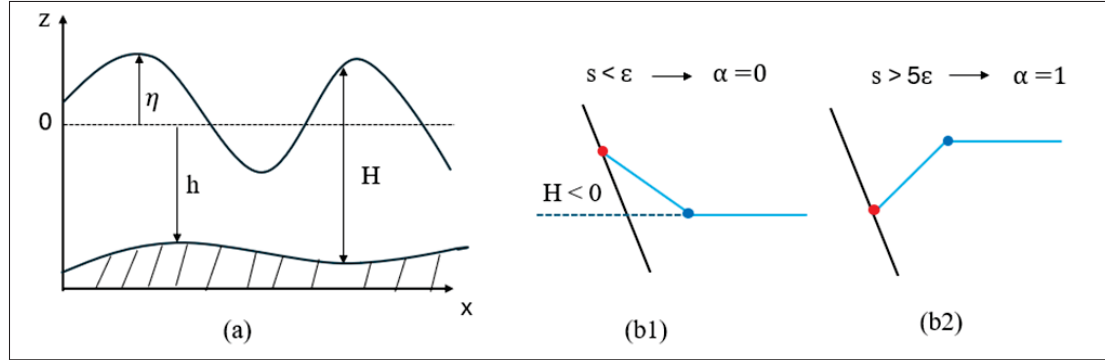


FIGURE 1.6 (a) Représentation de la colonne d'eau, la profondeur réelle est donnée par $H = \eta + h$. (b1) lorsque s est inférieur au seuil de tolérance, et (b2) lorsque s est supérieur à ce seuil. Le fond est représenté par une ligne noire, la surface de l'eau par une ligne bleue, la surface de l'eau dans la cellule sèche par une ligne pointillée, et les nœuds de la cellule par des points.

Adaptée de Le (2020, p. 927)

Par ailleurs, certains modèles tels que FVCOM (Finite Volume Community Ocean Model) introduisent un lissage du problème en considérant une sous-couche visqueuse d'épaisseur faible ou minimale $D_{\min}$ permettant d'éviter ou lisser les singularités numériques lorsque la profondeur devient nulle (Chen *et al.*, 2022). Les nœuds dont la hauteur d'eau dépasse $D_{\min}$ sont considérés comme «humides», tandis que les autres sont exclus du calcul des flux et leur vitesse est annulée pour préserver la conservation du volume (Figure 1.7). La stabilité de cette méthode repose notamment sur le choix du pas de temps, influencé par la topographie intertidale, l'intensité des marées et l'épaisseur de $D_{\min}$ (Chen *et al.*, 2022).

Le critère de détermination est calculé en fonction de la profondeur d'eau totale D :

$$D = H + \zeta - h_B \quad (1.10)$$

avec :

- H : la profondeur de référence (m),
- ζ : l'élévation de la surface d'eau(m),
- h_B : la hauteur bathymétrique(m).

Le choix entre ces différentes méthodes dépend fortement du contexte de modélisation (zones urbaines, marais intertidaux, plaines alluviales), des objectifs de la simulation et des contraintes numériques spécifiques, ce qui souligne l'importance d'une analyse comparative adaptée au site étudié. Ces méthodes emploient des stratégies appropriées pour des géométries compliquées, en utilisant des maillages structurés et non structurés, et incorporent des modifications dans le calcul de certains paramètres physiques (comme le coefficient de Manning) afin d'avoir

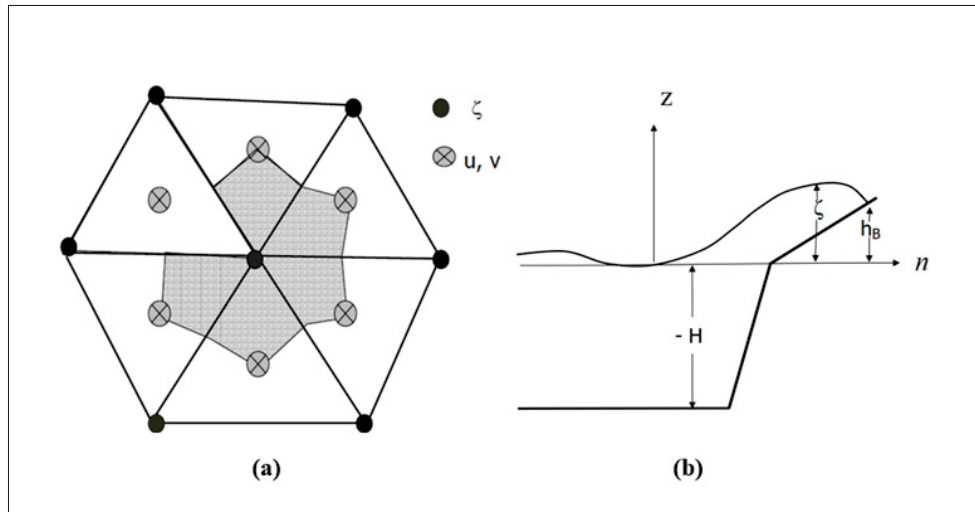


FIGURE 1.7 Illustration des segments secs et humides d'un élément de contrôle du traceur, (b) les définitions de H , ζ et h_B dans une vue transversale de la section latérale d'un chenal idéalisé, y compris la zone intertidale. Adaptée de Chen. (2022, p. 400-401)

plus de précision dans les simulations. En matière de formulation numérique, certaines méthodes sont aussi bien applicables en éléments finis qu'en volumes finis, alors que d'autres sont spécifiques à une seule approche. Le Tableau 1.1 représente un récapitulatif de ces différentes méthodes.

La méthode *H Clipping* du modèle TELEMAC-2D se distingue par sa gestion spécifique des transitions humides-secs sur des maillages structurés, avec une attention particulière à l'évitement des singularités numériques, contrastant avec l'approche décrite à (Heniche *et al.*, 2000) qui repose sur l'ajustement du coefficient de Manning pour annuler la vitesse dans les zones sèches. Ainsi, cette approche évite les instabilités en modifiant les hauteurs d'eau inférieures au seuil critique, ce qui empêche l'apparition des valeurs négatives. C'est pour cela que cette méthode va être employée dans cette étude.

1.6.2 Représentation des structures urbaines dans les modèles hydrodynamiques

Les modèles hydrodynamiques sont devenus des outils essentiels pour simuler les inondations urbaines, mais leur application se heurte encore à des défis liés à la prise en compte de la complexité des zones urbaines, des bâtiments et des infrastructures (Zhang, Wu, Hu, Hu, Li, Hao & Liu, 2021). Cette complexité est exacerbée par la difficulté -voire l'impossibilité- d'obtenir des mesures en quantité et en qualité fiables sur les zones impactées par les inondations en zone urbaine : ceci tend à justifier le recours aux simulations numériques pour appréhender ces phénomènes complexes (Vorobevskii *et al.*, 2020).

TABLEAU 1.1 Tableau comparatif des différentes méthodes de traitement du front sec mouillé

Méthodes	Caractéristiques principales	Traitement des zones sèches	Avantages	Inconvénients
H-Clipping (TELEMAC-2D)	Seuil de profondeur minimal pour déterminer les cellules sèches. Les flux sont calculés uniquement dans les cellules humides.	Les cellules sèches sont exclues des flux et leur vitesse est fixée à zéro.	Très stable numériquement, adaptée aux fonds irréguliers.	Peut ne pas être adapté à des zones très grandes ou à haute variabilité.
Heniche et al. (2000)	Méthode simple, utilisent des hauteurs d'eau positives et négatives pour distinguer les zones sèches et mouillées. Ajustement du coefficient de Manning en fonction de la hauteur d'eau.	Mise de vitesse à zéro dans les zones sèches en ajustant Manning.	Simple à implémenter, gestion des zones inondables et côtières.	Moins adaptée aux géométries complexes.
Galerkin (1989), Le et al. (2020)	Méthode par éléments finis avec un paramètre de mélange pour gérer les transitions. Approche implicite pour résoudre les équations d'eau peu profonde.	Les cellules sèches sont intégrées, mais avec un risque de fuites artificielles entre cellules adjacentes.	Flexibilité dans la représentation des géométries complexes.	Problèmes de fuites artificielles affectant la conservation de la masse.
FVCOM (Chen et al., 2022)	Utilisation d'une couche visqueuse (D_{min}) pour éviter les singularités numériques. Calcul des flux uniquement dans les cellules humides pour préserver la masse.	Les cellules sèches sont exclues des calculs de flux et leur vitesse est fixée à zéro.	Précision dans les dynamiques des zones inondées, stabilité numérique.	Moins de flexibilité pour des géométries très complexes.

La représentation précise des infrastructures urbaines est cruciale pour obtenir des prédictions fiables des profondeurs, étendues et durées d'inondation (Ravazzani *et al.*, 2009; Shen, Tan & Zhang, 2018). Traditionnellement, les modèles hydrauliques physiques basés sur la résolution numérique des équations de Saint-Venant ont été employés pour prédire les inondations en milieu urbain, mais leur usage est limité par des exigences principalement en termes de résolution sur les obstacles (Kim, Keum & Han, 2019).

Afin de pallier ces limitations, diverses stratégies ont été mises au point pour représenter l'effet des constructions dans les simulations hydrodynamiques. Parmi ces méthodes, l'approche dite du « Building-Hole » se distingue par

sa simplicité, consistant à soustraire complètement les cellules de calcul coïncidant avec l’emprise des bâtiments, ce qui allège la complexité du maillage numérique (Bates & De Roo, 2000). L’approche “Building-Block” assimile les bâtiments à des blocs imperméables qui obstruent l’écoulement, tandis que “Building Resistance” introduit une résistance accrue à l’écoulement dans les zones bâties pour simuler leur effet obstructif (Mckenna *et al.*, 2023). Des études expérimentales menées en laboratoire sur des modèles physiques réduits de quartiers urbains ont permis de comparer différentes méthodes de représentation des bâtiments et d’approximation des équations de Saint-Venant, en vue de reproduire un événement d’inondation réel. Les résultats ont montré qu’avec un modèle 2D combiné à un paramètre de rugosité élevée pour les bâtiments, c’est une approche efficace pour estimer l’inondation (Beretta, Ravazzani, Maiorano & Mancini, 2018). La Figure 1.8 illustre ces différentes méthodes.

Bien que des progrès considérables aient été réalisés dans la modélisation des inondations urbaines, des lacunes significatives persistent en ce qui concerne la représentation adéquate des bâtiments, ce qui peut compromettre la précision globale des simulations hydrodynamiques. Les modèles opérationnels actuels éprouvent des difficultés à reproduire avec fidélité les interactions hydrauliques complexes qui se manifestent autour des structures bâties, notamment les phénomènes de sillage caractérisés par des zones de turbulence et de recirculation, les zones de stagnation où l’eau tend à s’accumuler en raison d’une faible vitesse d’écoulement, ainsi que les variations locales de la hauteur d’eau induites par la présence des bâtiments.

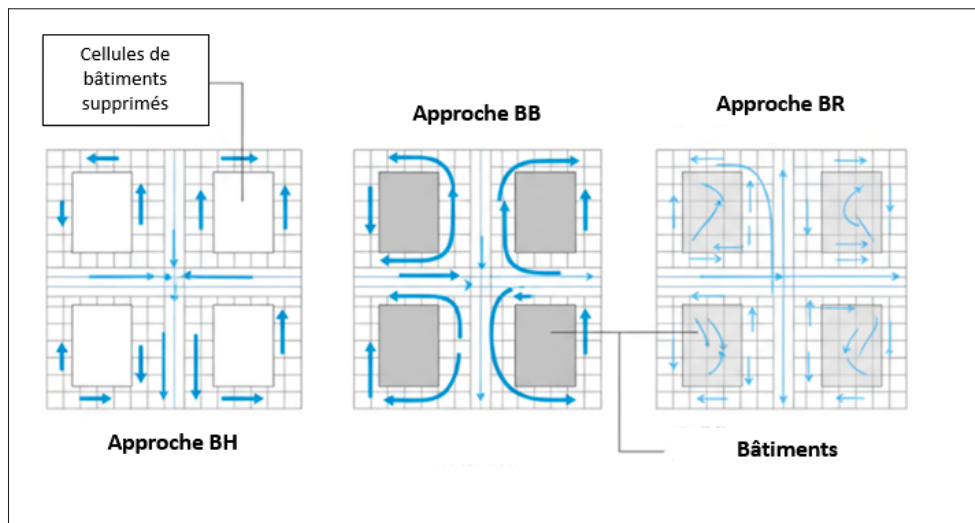


FIGURE 1.8 Représentation schématique des différentes approches de représentation des bâtiments

1.6.3 Modélisation de l’effet de vent

Modéliser l’effet du vent en milieu estuarien constitue un défi majeur en raison de la complexité des processus physiques impliqués et de leur forte variabilité spatio-temporelle. La surcote induite par le vent résulte de la

tension exercée par le vent à la surface de l'eau (Figure 1.9) transférant le mouvement ou l'énergie de l'écoulement atmosphérique à la colonne d'eau et générant un courant de surface qui tend à accumuler l'eau contre les berges ou les structures côtières (Dodet, Melet, Ardhuin, Bertin, Idier & Almar, 2019). Il résulte de ce processus une pente non négligeable de la ligne d'eau conduisant à un phénomène de seiche dans les plans d'eau clos (retenues de barrages, lacs, ports par exemple). L'inclinaison de la surface ou de la ligne d'eau peut être amplifiée dans les estuaires en raison de leur morphologie particulière, notamment leur forme en entonnoir, la pente bathymétrique ascendante, et les interactions non linéaires avec la marée (Anh, Trung, Nguyen, Liou & Phan, 2021 ; Patrick, Kominoski, McDowell, Branoff, Lagomasino, Leon & Zou, 2022)

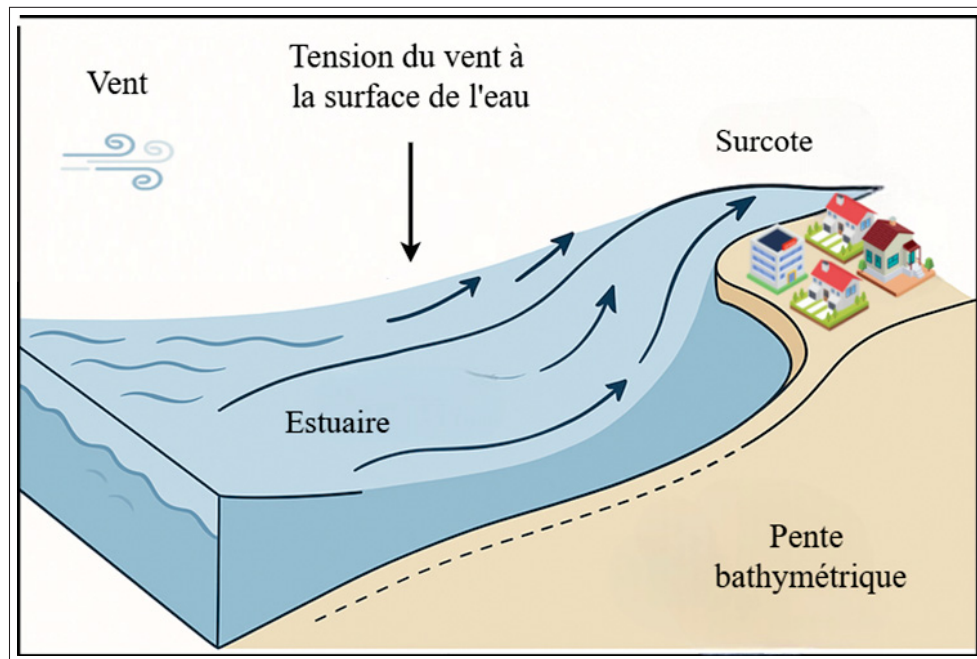


FIGURE 1.9 Mécanismes de génération de la surcote éolienne dans un estuaire : effets combinés du vent, de la bathymétrie et de la marée

Des recherches récentes tels que celle menés par (Idier, Bertin, Thompson & Pickering, 2019) ont identifié ces interactions dans le contexte des variations du niveau de la mer, des marées, des ondes de tempêtes et des inondations côtières (Figure 1.10). D'autres travaux comme ceux de (Pedreros, Idier, Muller, Lecacheux, Paris, Yates-Michelin & Sénéchal, 2018) ont également mis en évidence l'impact du vent sur le phénomène de setup des vagues, qui peut influencer la hauteur d'eau côtière lors des conditions météorologiques extrêmes. Par ailleurs, (Bertin & Olabarrieta, 2016) ont examiné les effets du vent sur la formation de vagues et leur propagation le long des plages, soulignant l'importance de ces interactions pour la modélisation des phénomènes côtiers. Ces études témoignent l'importance de comprendre les mécanismes d'interaction entre le vent et la surface de l'eau pour évaluer les risques liés aux événements extrêmes et aux variations du niveau de la mer.

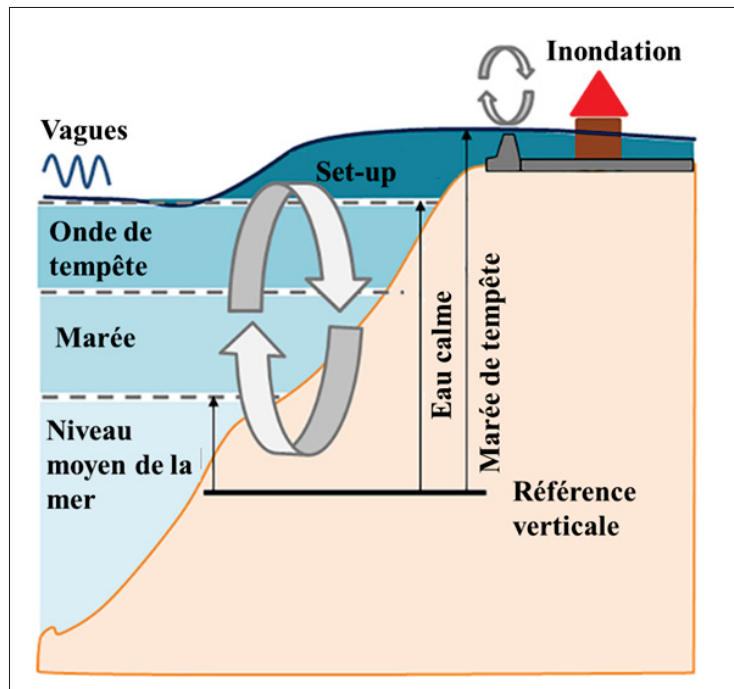


FIGURE 1.10 Composantes de la marée de tempête, terminologie des interactions
Adaptée de Idier (2019, p. 1604)

Les travaux de (Ma & Sun, 2022) ont mis en lumière les interactions entre le vent et les vagues. Leur modèle indique que les turbulences du vent accentuent l'effet des vagues sur les structures, selon la vitesse relative entre le vent et la phase des vagues. (Ayala, Sadek, Ferčák, Cal, Gayme & Meneveau, 2024) ont développé un modèle de simulation de surface mobile, capable de capturer de façon fine les flux turbulents à l'interface air-eau. Ce modèle, qui a fait ses preuves expérimentalement, ouvre des perspectives encourageantes pour la modélisation à grande échelle des écoulements influencés par le vent dans le cadre de la gestion des inondations et des ressources en eau.

La qualité de la modélisation hydrodynamique repose largement sur la disponibilité et la précision des données météorologiques, de vitesse du vent, de direction et leurs variations dans le temps (Paquier *et al.*, 2015). Ces données sont indispensables non seulement pour fixer les conditions aux limites des modèles, mais aussi pour les calibrer, les valider et analyser les interactions entre les forçages atmosphériques et les réponses hydrodynamiques. Dans le contexte du changement climatique, l'intégration de scénarios météorologiques projetés devient par ailleurs incontournable pour anticiper l'évolution des risques d'inondation dans les zones estuariennes (Lousada, Alves, Fernandes & Gonçalves, 2023; Sarchani *et al.*, 2020).

Bien que la modélisation de l'effet du vent ait franchi des étapes majeures, des lacunes importantes restent présentes, notamment lorsqu'il s'agit de rendre compte des interactions complexes entre le vent, les vagues et les structures. La modélisation précise de ces interactions représente un défi de taille, en raison de la nature hautement non

linéaire et transitoire des phénomènes impliqués à différentes échelles spatio-temporelles (Le Roy, Pedreros, André, Paris, Lecacheux, Marche & Vinchon, 2015 ; Polnikov, 2011). Les approches conventionnelles tendent à recourir à des simplifications de ces interactions multifactorielles, ce qui peut entraîner des artefacts importants dans les prédictions d'inondation, en particulier dans les environnements côtiers et urbains complexes.

1.7 Synthèse

Ce chapitre a pour objectif de poser les bases théoriques et méthodologiques nécessaires à la compréhension des dynamiques hydrodynamiques en milieu estuarien, en particulier dans le contexte des inondations côtières. Il s'ouvre par une introduction générale à l'hydrodynamique des estuaires, en exposant les caractéristiques particulières et des processus physiques clés de ces milieux.

Les fondements physiques de l'hydrodynamique en milieux naturels sont ensuite abordés, avec une présentation des équations de Navier-Stokes comme base générale, puis des équations de Saint-Venant, plus adaptées aux applications en modélisation environnementale à grande échelle. Ces équations constituent le socle des modèles numériques utilisés dans la prévision des crues et la simulation des processus hydrodynamiques et hydroenvironnementaux estuariens.

Une section est dédiée aux approches méthodologiques mobilisées dans la modélisation hydrodynamique, incluant les méthodes aux éléments finis, volumes finis, et les techniques de résolution associées. Les principaux enjeux de modélisation en milieu estuarien sont ensuite développés : effet du vent sur les surcotes, traitement du front sec/mouillé (phénomène de couvrant/découvrant), et représentation des structures urbaines. Ces aspects sont essentiels pour garantir une modélisation réaliste, notamment en contexte d'inondation côtière.

Enfin, une analyse comparative des approches de modélisation est présentée. Elle met en lumière les différentes stratégies adoptées dans la littérature scientifique pour simuler les inondations en milieu estuarien, tout en discutant de leurs forces et limites. Des résultats issus de cas d'étude réels sont mobilisés pour étayer cette évaluation critique. La synthèse de ce chapitre souligne la nécessité de choix méthodologiques adaptés au contexte local, tout en appelant à une intégration plus systématique de l'incertitude et des données d'observation pour améliorer la robustesse des modèles hydrodynamiques.

CHAPITRE 2

ÉTUDE DU MAILLAGE TOPO-BATHYMÉTRIQUE ET VALIDATION DU MODÈLE

Le présent chapitre vise à développer et valider le maillage topo-bathymétrique de la zone d'étude en vue de sa mise en œuvre dans le modèle hydrodynamique. Il s'agit tout d'abord de présenter les données du site, incluant les données topographiques, bathymétriques, hydrologiques et marégraphiques, ainsi que les conditions aux limites adoptées. Ensuite, le chapitre détaille la construction du TBDEM (modèle d'élévation numérique topo-bathymétrique), l'intégration des différentes sources de données et la production d'un modèle cohérent et continu. La validation de l'hydrodynamique est effectuée à travers l'analyse des effets du frottement et des résolutions spatiales et temporelles sur les écoulements simulés, en comparant les résultats aux observations disponibles. Enfin, le maillage est étendu pour couvrir la zone urbaine et les berges des îles, en définissant une stratégie de fusion et une résolution adaptée, afin d'obtenir un modèle capable de représenter les conditions hydrodynamiques réelles en cas non inondant.

2.1 Données du site (topométriques, bathymétrique, courant, marées)

2.1.1 Choix des frontières et conditions aux limites

Notre zone d'étude se situe dans l'estuaire fluvial du Saint-Laurent. La limite amont du domaine de simulation est fixée à la station marégraphique de Neuville, localisée entre Québec et Trois-Rivières, tandis que la limite aval est positionnée au marégraphe de Saint-Joseph-de-la-Rive, dans la zone de transition estuarienne du Saint-Laurent (Simons, Monismith, Saucier, Johnson & Winkler, 2010). Ce choix permet d'encadrer le domaine de modélisation par deux stations marégraphiques permanentes, assurant ainsi la disponibilité de conditions aux limites fiables. De plus, la limite aval est située suffisamment en amont de l'extrémité inférieure de l'estuaire afin de permettre une circulation hydrodynamique réaliste entre les bras nord et sud de l'île d'Orléans. Enfin, la définition de limites suffisamment éloignées de la ville de Québec garantit une meilleure représentation des processus d'inondation dans la zone urbaine ciblée. La Figure 2.1 montre les limites du domaine d'étude.

2.1.1.1 Données bathymétriques

La bathymétrie constitue une composante fondamentale de toute étude de modélisation hydrodynamique, puisqu'elle conditionne directement la représentation des fonds et, par conséquent, les processus de propagation, de dissipation et de concentration de l'énergie hydrodynamique. Cette variable est particulièrement critique dans les zones peu profondes, où de faibles variations d'élévation du fond peuvent entraîner des modifications significatives dans la simulation numérique de la surcote.

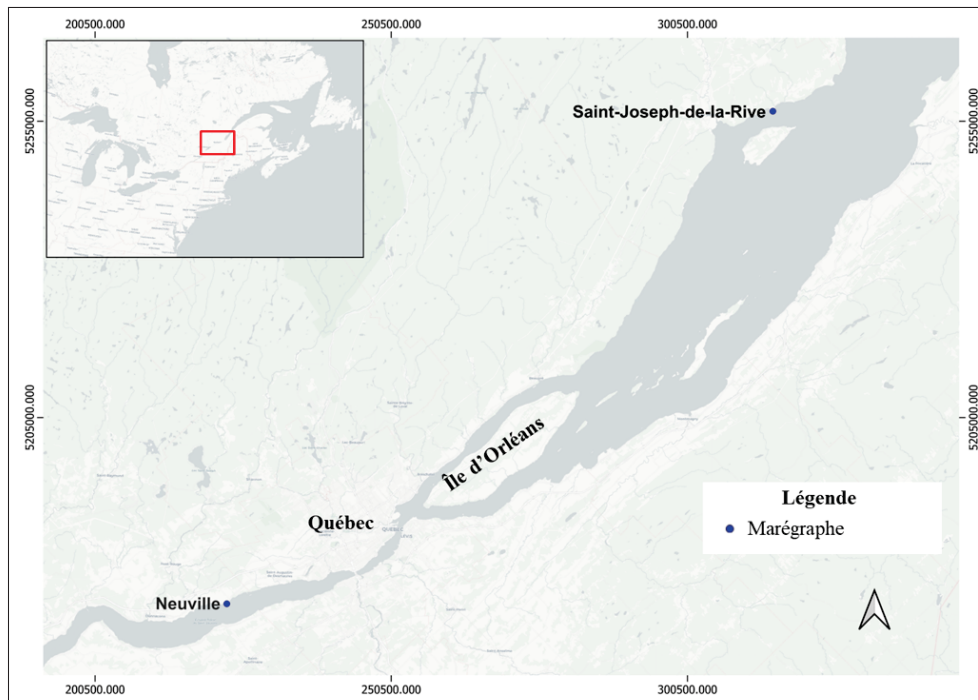


FIGURE 2.1 Limites du domaine d'étude

Une campagne de levés bathymétriques a été réalisée dans l'estuaire fluvial du Saint-Laurent (Figure 2.2), à l'aide d'un sonar multifaisceaux de haute précision. Les données ainsi acquises ont fait l'objet d'un traitement et d'un post-traitement rigoureux, permettant d'obtenir un nuage de points bathymétriques de qualité. Ces informations ont ensuite été intégrées au modèle hydrodynamique afin d'améliorer la représentation du domaine de calcul et d'assurer une meilleure fiabilité des résultats de simulation.

En complément des levés récents, des données bathymétriques historiques ont été utilisées pour améliorer le modèle bathymétrique numérique, notamment afin de combler les zones manquantes. Parmi celles-ci figure l'ensemble de données NONNA (données bathymétriques non navigables), qui compile l'ensemble des données mises à disposition par le Service hydrographique du Canada¹. Elles sont disponibles sous plusieurs formats, dont le GeoTIFF, l'ASCII, le BAG (Bathymetric Attributed Grid) et le CSAR (Canadian Soundings Archival Raw), ce qui permet de répondre à différents besoins, allant de l'intégration SIG classique jusqu'à l'exploitation de données brutes avec incertitudes. Deux résolutions principales sont proposées : NONNA-10 (10 m × 10 m, équivalente à 0,1° de latitude × 0,1° de longitude au sud de 68° N) et NONNA-100 (100 m × 100 m, soit 1° × 1°). Toutes les données sont référencées horizontalement au système géodésique mondial 1984 (WGS84, EPSG : 4326) et verticalement au zéro des cartes (ZC). La Figure 2.3 illustre les données NONNA mises à disposition par le Service hydrographique du Canada.

¹ <https://data.chs-shc.ca/dashboard/map>



FIGURE 2.2 Dispositif d'acquisition bathymétrique avec le sonar multifaisceaux

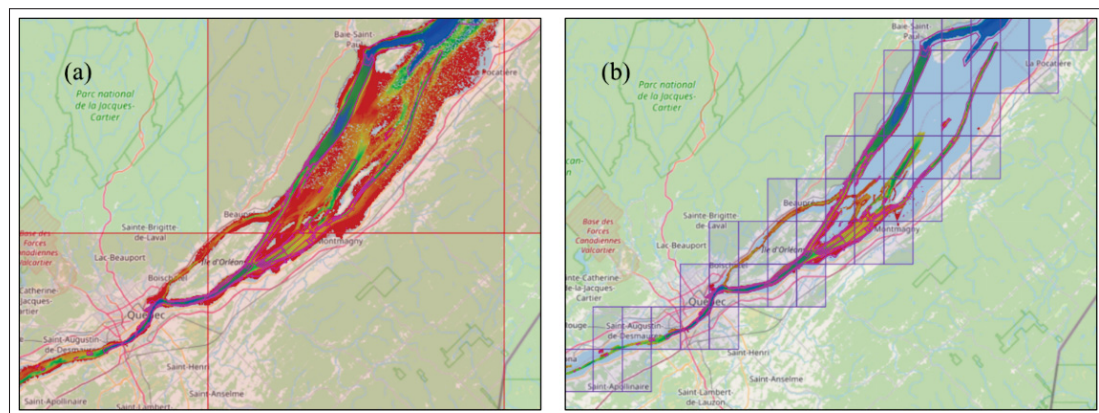


FIGURE 2.3 Données NONNA disponibles à la plateforme SHC du Canada 100 m (a), 10m(b)

Le Tableau 2.1 synthétise l'ensemble des données bathymétriques intégrées dans la production du TBDEM, en précisant pour chaque jeu de données la zone d'étude couverte, les limites spatiales, l'organisme producteur et distributeur, ainsi que la date de réalisation.

L'interpolation des données bathymétriques constitue une étape cruciale dans la génération du modèle numérique topo-bathymétrique. Plusieurs techniques existent pour le maillage des données d'élévation, parmi lesquelles les méthodes de spline, l'inverse distance weighting (IDW), les voisins naturels, la triangulation ou encore le krigeage (Eakins & Grothe, 2014). Cependant, ces différentes approches peuvent conduire à des surfaces interpolées sensiblement divergentes, même lorsqu'elles reposent sur les mêmes sources de données (Eakins & Grothe, 2014).

TABLEAU 2.1 Synthèse des données bathymétriques intégrées dans la production du TBDDEM

Bathymétrie	De	À	Produit et distribué par	Date
NONNA	Neuville	Baie Saint-Paul	Service hydrographique	2021
Faisceaux multiple	Ville de Québec	L'Isle d'Orléans	CMQ	2010
Faisceaux multiple	Ville de Québec	L'Isle d'Orléans	CMQ	2015
Faisceau unique	Beauport	Ste Anne de Beaupré	MTQ – Ville de Québec	2015
Faisceaux multiple	L'Île d'Orléans	Baie Saint-Paul	OSIRISQ	2021
Faisceaux multiple	Ville de Québec	Ville de Québec	Ville de Québec	2019

Dans le cadre de cette étude, la méthode retenue pour l'interpolation est le krigeage bayésien empirique (Empirical Bayesian Kriging, EBK), en raison de sa robustesse face à la variabilité des données multisources et de sa capacité à traiter un volume important de données. Contrairement aux méthodes classiques de krigeage qui supposent la stationnarité du champ spatial, l'EBK est une approche non-stationnaire : elle estime le semi-variogramme à travers un processus de simulations répétées, ce qui permet de mieux capturer les structures spatiales locales (Zhang, Li, Jia, Wang & Dong, 2015). Ainsi, la valeur interpolée dans chaque cellule est ajustée spécifiquement aux points de sondage qui lui sont associés, offrant une meilleure représentation des hétérogénéités du terrain sous-marin (Noman, Cassol, Daniel & Pham Van Bang, 2023).

De plus, l'EBK présente l'avantage de rectifier les tendances spatiales inhérentes aux données bathymétriques, notamment celles induites par les variations temporelles entre campagnes de mesure. Sa capacité à gérer efficacement des jeux de données hétérogènes en fait une méthode particulièrement adaptée pour l'intégration de sources multiples, telles que les levés multifaisceaux récents et les données historiques issues de la base NONNA. Cette approche garantit une surface interpolée cohérente et fiable, répondant aux exigences de la modélisation hydrodynamique. La Figure 2.4 illustre la distribution spatiale des données bathymétriques acquises sur la zone d'étude.

2.1.1.2 Données topographiques

Afin de garantir une représentation fidèle du relief urbain, cette étude s'appuie sur les données LiDAR les plus récentes disponibles pour les secteurs les plus densément urbanisés. Ces relevés, réalisés en 2019 par CMQuébec, présentent une densité de 4 points par mètre carré, offrant une description très détaillée de la topographie avec un total de 2 192 561 points et une taille de fichier d'environ 50 000 Ko. La précision annoncée est de 1 m en plan horizontal et 15 cm en plan vertical, répondant aux standards de haute résolution requis pour la modélisation hydrodynamique en milieu urbain. La Figure 2.5 illustre la distribution spatiale de ces données dans la ville de Québec, en particulier dans le secteur du port. La qualité altimétrique de ces données est essentielle pour simuler



FIGURE 2.4 Distribution des données bathymétriques sur la zone d'étude

avec fiabilité les dynamiques d'écoulement, identifier les zones de stagnation ou d'accumulation d'eau, et évaluer les impacts potentiels d'événements extrêmes, tels que les inondations côtières.

Le Tableau 2.2 récapitule l'ensemble des données topographiques utilisées pour la production du modèle numérique d'élévation topo-bathymétrique (TBDEM), en précisant pour chaque jeu de données la zone couverte, le type de levé, l'organisme producteur et la date de réalisation.

2.1.2 Modèle TBDEM

Après la présentation des données topographiques et bathymétriques, une étape clé consiste à les fusionner afin de produire un modèle numérique d'élévation topo-bathymétrique (TBDEM) continu. La principale difficulté réside dans l'hétérogénéité des jeux de données : les points LiDAR, denses et uniformément répartis, contrastent avec les données bathymétriques, dont la distribution est plus variable et parfois lacunaire, notamment dans les zones peu profondes ou issues de levés anciens. Pour pallier ces différences et assurer une intégration cohérente, une méthode d'interpolation adaptée est nécessaire. Dans ce travail, le krigeage bayésien empirique (Empirical Bayesian Kriging, EBK) a été retenu, car il permet de gérer la variabilité spatiale en tenant compte de l'incertitude dans l'estimation du semivariogramme à travers des simulations répétées (Pilz & Spöck, 2008 ; Zhang *et al.*, 2015). Cette approche présente l'avantage de fusionner directement les jeux de données sans devoir les homogénéiser préalablement en termes de densité ou de résolution, ce qui garantit une meilleure préservation de l'information. Elle favorise également une transition progressive entre les zones terrestres et marines, en particulier dans l'estran,

TABLEAU 2.2 Synthèse des données topographiques utilisées dans la production du TBDEM

Lidar	De	À	Distribué par	Date
Topographique	Saint Croix	Saint Jean Port Joli	CMQ	2017
Topo bathymétrique	Ville de Québec	Beauport	CMQ	2019
Topographique	L'Islet sur Mer	La Pocatière	MFFP	2020
Topographique	Cap Saint Ignace	Saint Jean Port Joli	MFFP	2019
Topographique	Beaupré	Baie Saint Paul	MFFP	2011
Topographique	Ville de Québec	Ville de Québec	MFFP	2017
Topographique	Ville de Québec	L'Île d'Orléans	MFFP	2016
Topographique	Portneuf	Neuville	MFFP	2012
Topographique	Neuville	Beaupré	MFFP	2013
Topographique	Ville de Québec	Ville de Québec	Ville de Québec	2017
Topographique	Mauricie	Neuville	Gouvernement du Québec	2012
Topographique	Neuville	Ville de Québec	Gouvernement du Québec	2012
Topographique	Beaupré	Baie Saint-Paul	Gouvernement du Québec	2011
Topographique	Saint Croix	Lévis	MFFP	2016

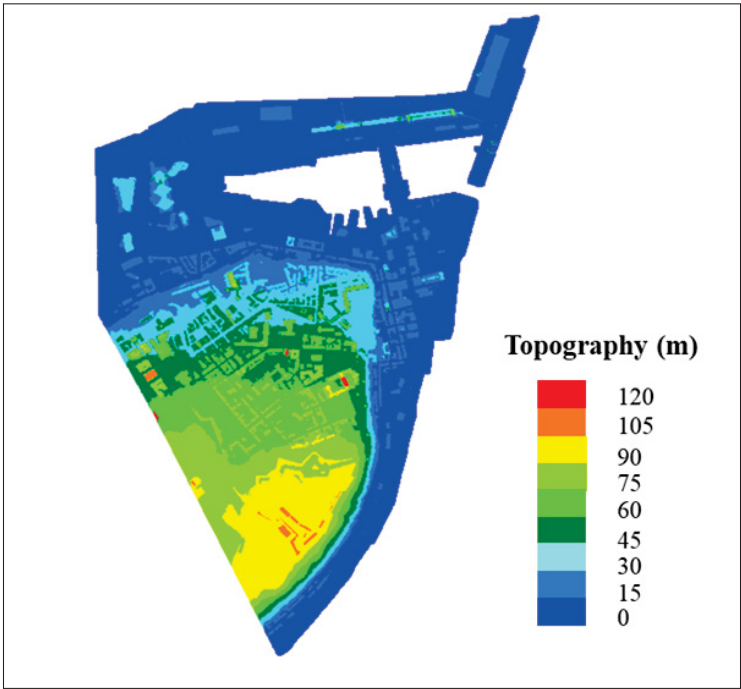


FIGURE 2.5 Données Lidar haute résolution utilisée dans l'étude

où la cohérence du TBDEM a été vérifiée par comparaison avec les cartes nautiques de référence (Noman *et al.*, 2023).

Ainsi, la méthodologie proposée s’inspire de et étend l’approche développée par Falcão AP & Pestana R (2016) (Figure 2.6), en remplaçant la délimitation manuelle par un processus entièrement automatisé. Afin de tenir compte des fluctuations du cours d’eau et de la variabilité inhérente à chaque jeu de données, la méthode des moindres carrés sera mise en œuvre pour assurer un ajustement optimal. L’évaluation de la robustesse de la méthodologie reposera sur l’analyse de la variation entre l’ajustement obtenu par la régression aux moindres carrés et l’ajustement théorique optimal, permettant ainsi de valider la pertinence des résultats.

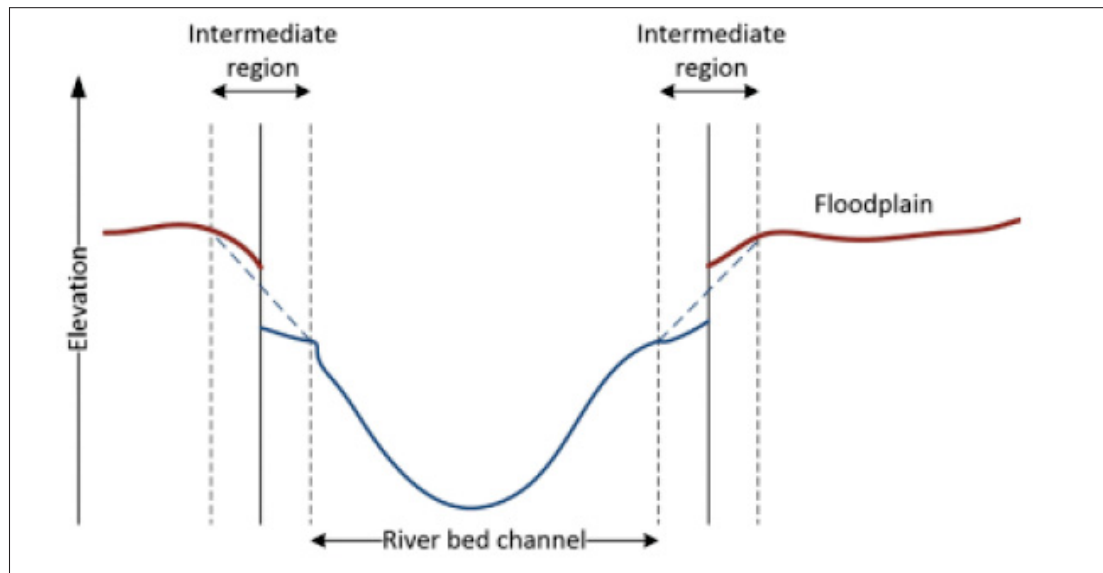


FIGURE 2.6 Délimitation des rives droite et gauche du canal de la rivière
Adaptée de Falcão (2016, p. 2)

2.1.3 Débits et hauteurs d’eau

La hauteur d’eau constitue un paramètre central dans toute étude hydrodynamique, car elle permet d’évaluer la dynamique des niveaux et leur variabilité spatio-temporelle. Dans ce travail, les données ont été obtenues à partir du portail en accès libre du Service hydrographique du Canada (SHC), qui met à disposition les enregistrements de plusieurs marégraphes répartis le long du fleuve Saint-Laurent.

Pour le cas d’étude, deux stations de référence ont été retenues : Neuville et Saint-Joseph-de-la-Rive, en raison de leur proximité avec la zone d’étude et de leur représentativité par rapport aux conditions hydrodynamiques locales. Les mesures ont été acquises à une fréquence d’un point toutes les 3 minutes, assurant un suivi fin et continu de l’évolution des niveaux d’eau.

Les données de hauteurs d’eau sont présentées en Figure 2.7.

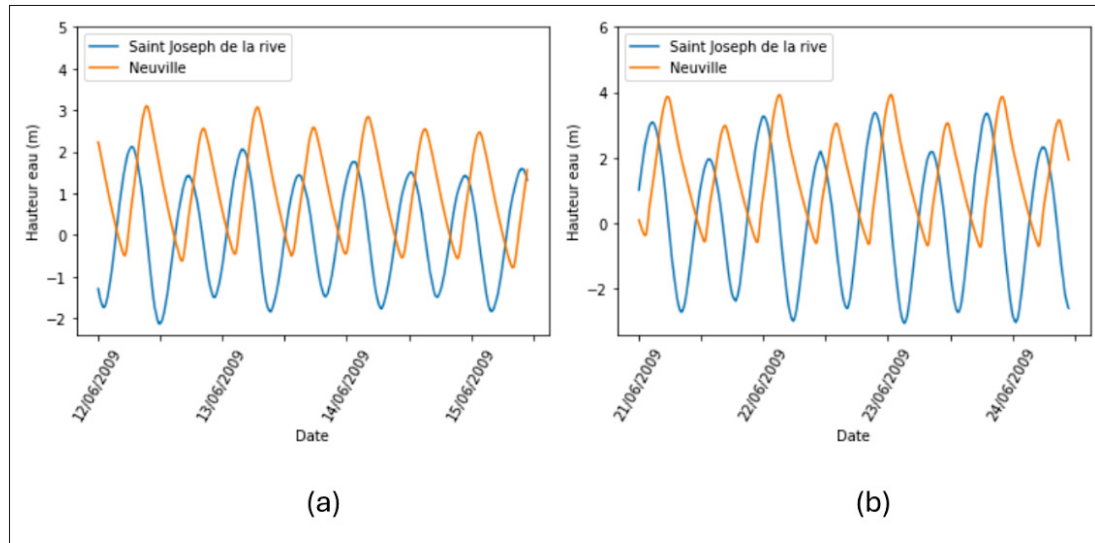


FIGURE 2.7 Les hauteurs d'eau enregistrées dans les marégraphes Neuville et Saint Joseph de la rive pour la période 12-15 juin 2009 (a) et 21-24 juin 2009 (b)

La validation du modèle hydrodynamique sera réalisée à partir des débits simulés, en les confrontant aux mesures de terrain disponibles. Ces observations proviennent de la campagne de jaugeages effectuée dans le cadre de la thèse de Pascale Matte Matte (2014).

Les mesures ont été acquises lors de deux périodes distinctes, soit du 12 au 15 juin 2009 et du 21 au 24 juin 2009, sur plusieurs sections stratégiques du fleuve : Québec, Beauport et Lauzon (Figure 2.8). Ces données constituent un jeu de référence essentiel pour évaluer la capacité du modèle à reproduire fidèlement la dynamique des écoulements.

2.2 Maillage et validation de l'hydrodynamique (débit, marée)

2.2.1 Le frottement

Le coefficient de frottement utilisé dans ce modèle est le coefficient de Manning, déterminé en fonction de la composition du substrat et réparti en zones homogènes de topographie relativement uniforme. Cette zonation a été définie à partir de 6400 points fournis par le Service hydrographique du Canada (SHC), conformément à la méthodologie décrite par Matte (2014). La conversion des caractéristiques du substrat en valeurs de Manning repose sur la méthode proposée par Morin, Boudreau, Secretan & Leclerc (2000). De plus, une couche de frottement supplémentaire a été intégrée afin de représenter la résistance hydraulique additionnelle générée par la présence de macrophytes, observables dans certaines zones pendant la saison estivale. Lors de l'étalonnage du modèle, les coefficients de Manning ont été ajustés de manière à rester dans l'intervalle de valeurs recommandé par Morin *et al.* (2000). La distribution spatiale des coefficients de frottement ainsi définis est illustrée à la Figure 2.9.

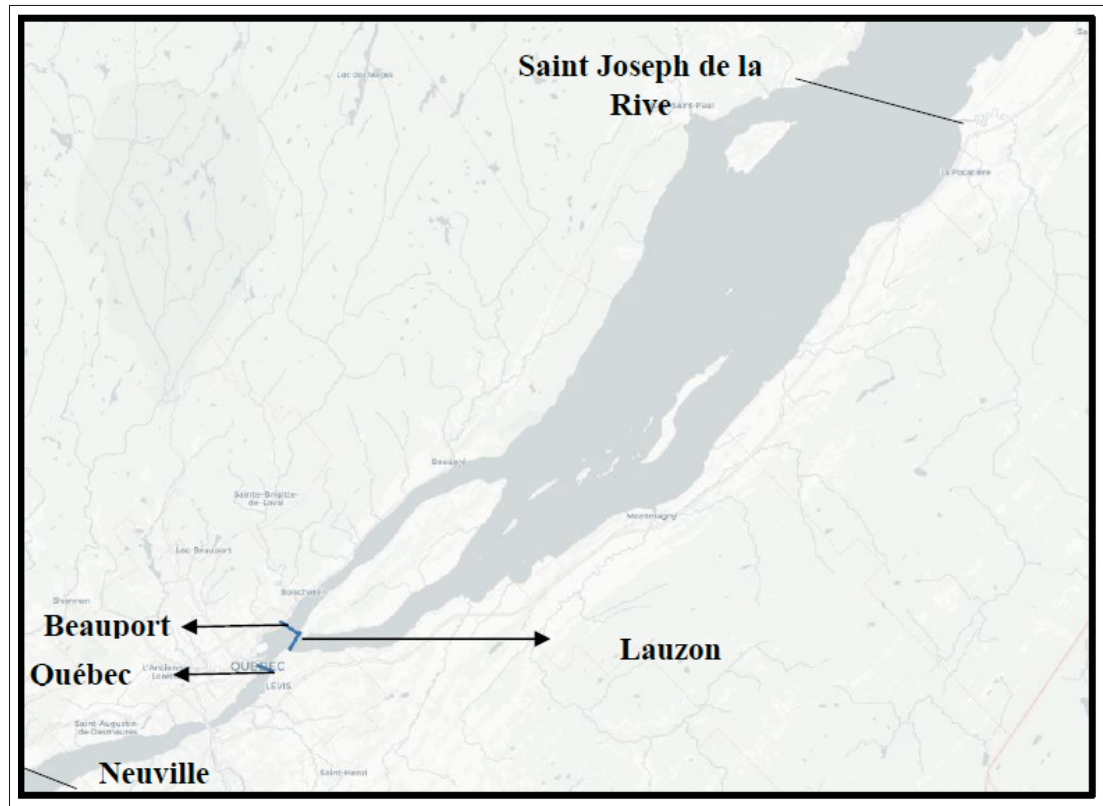


FIGURE 2.8 Les sections de débits utilisées pour la calibration et la validation du modèle

TABLEAU 2.3 Occupation du sol et coefficient de Manning choisis

Occupation du sol	Coefficient de Manning
Asphalte	0.016
Végétation basse	0.06
Végétation moyenne et haute	0.15
Bâtiment	10

Les coefficients de frottement de Manning appliqués à la zone topographique ont été attribués en fonction de l'occupation du sol (Tableau 2.3), afin de refléter au mieux les variations de rugosité à la surface. Chaque type de couverture (zones urbaines, prairies, forêts, berges ou surfaces imperméables) se voit associer un coefficient spécifique, calculé à partir des valeurs typiques disponibles dans la littérature et ajusté selon les conditions locales observées.

La zone topographique est représentée par 2 094 438 points, ce qui permet une résolution fine pour intégrer ces variations de rugosité et représenter de manière réaliste la dissipation de l'énergie et l'influence de la rugosité sur la propagation des écoulements dans le modèle hydrodynamique (Figure 2.10).

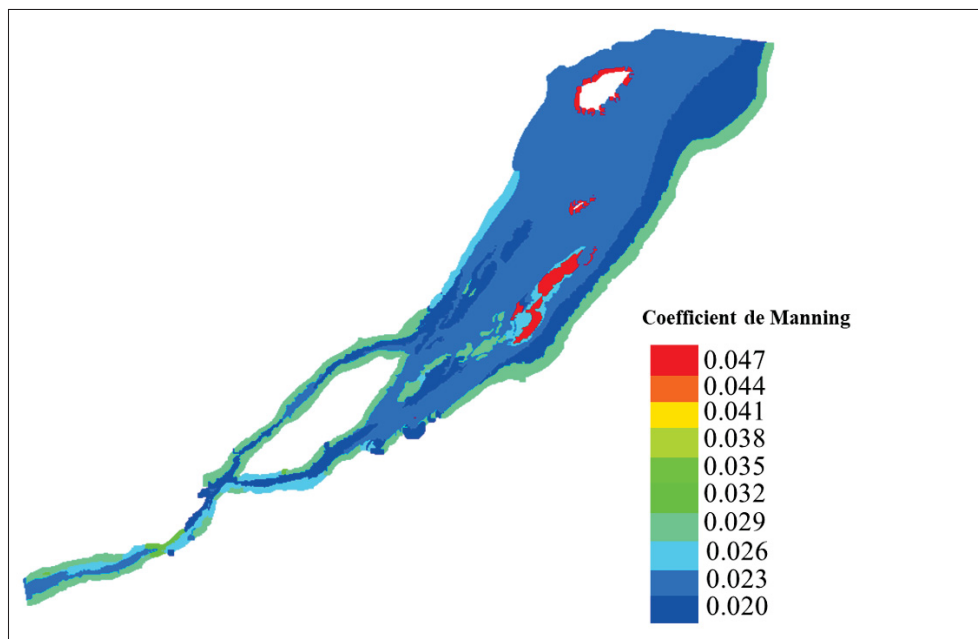


FIGURE 2.9 Les données de coefficient Manning utilisé au niveau du fleuve Saint-Laurent

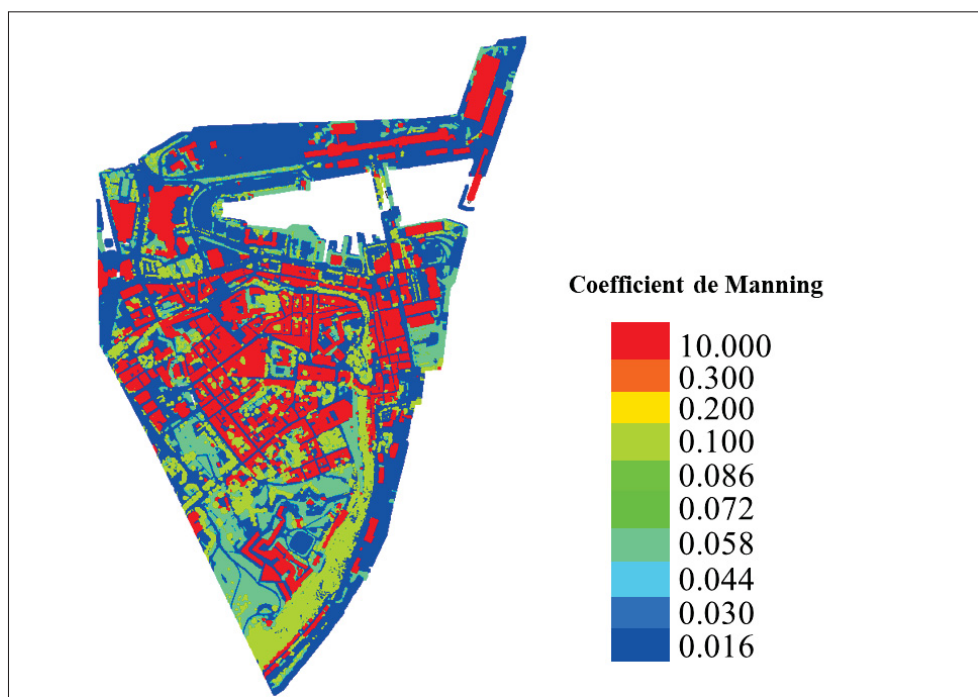


FIGURE 2.10 Les données de coefficient Manning utilisées au niveau de la ville de Québec

2.2.2 Effet de la résolution spatiale

Dans un premier temps, l'analyse s'est concentrée sur l'hydrodynamique du fleuve Saint-Laurent en se basant sur son domaine bathymétrique, représenté par 831 184 points. La préparation et la génération des maillages ont été effectuées à l'aide de BlueKenue, une interface graphique développée par le National Research Council (NRC). Cet outil permet non seulement la construction de grilles numériques adaptées aux modèles hydrodynamiques, mais aussi la visualisation des données et des résultats sous différentes formes (1D, 2D ou polaire).

Pour évaluer la sensibilité du modèle à la résolution spatiale, deux maillages réguliers de 250 m et 180 m ont été générés, dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 2.4. Le modèle créé sera nommé modèle de l'estuaire fluvial (MEF).

TABLEAU 2.4 Caractéristiques des maillages réguliers utilisés pour le modèle de l'estuaire fluvial (MEF)

Maillage	Nombre de nœuds	Nombre d'éléments
MEF 250	31 078	59 877
MEF 180	59 491	115 789

Les simulations correspondantes ont été menées pour les périodes de juin et août 2009, sur trois transects de référence situés à Québec, Beauport et Lauzon. Les débits simulés ont ensuite été comparés aux mesures disponibles (cf. Section 2.1.3), constituant ainsi une étape clé du calage du modèle.

Ces débits mesurés par l'ADCP ont été corrigés pour compenser les biais liés au mouvement du bateau, à l'inclinaison du profil et aux variations de densité. Les séries temporelles ont ensuite été filtrées et interpolées pour reconstruire des champs de vitesses et de débits continus et représentatifs du cycle semi-diurne de marée.

Les résultats des débits sont présentés dans les Figures 2.11, 2.12 et 2.13.

Une comparaison des valeurs de débit pour les différentes simulations disponibles montre qu'une résolution de 250 m semble donner des résultats plus proches des valeurs de débits mesurés.

2.2.3 Effet de la résolution temporelle

Afin d'assurer la stabilité numérique du modèle, la condition de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) doit être respectée. Cette condition s'écrit :

$$\frac{u \Delta t}{\Delta x} < 1 \quad \Rightarrow \quad \Delta t < \frac{\Delta x}{u}. \quad (2.1)$$

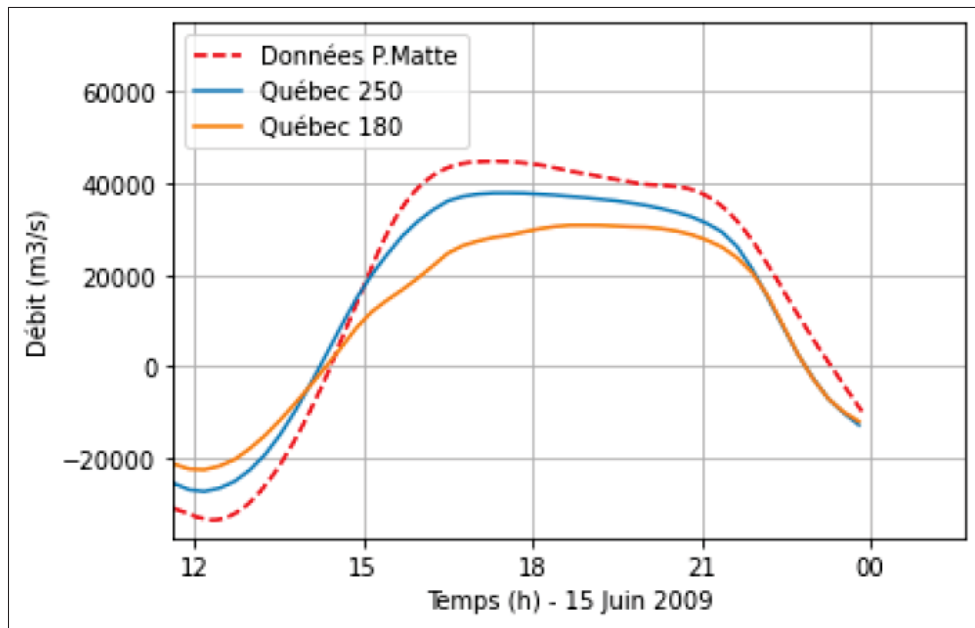


FIGURE 2.11 Les valeurs de débits obtenues avec un maillage de 250 m, un maillage de 180 m et les données de débit mesurées à la station Québec pour un pas de temps de 5s pour la période (12-15 juin)

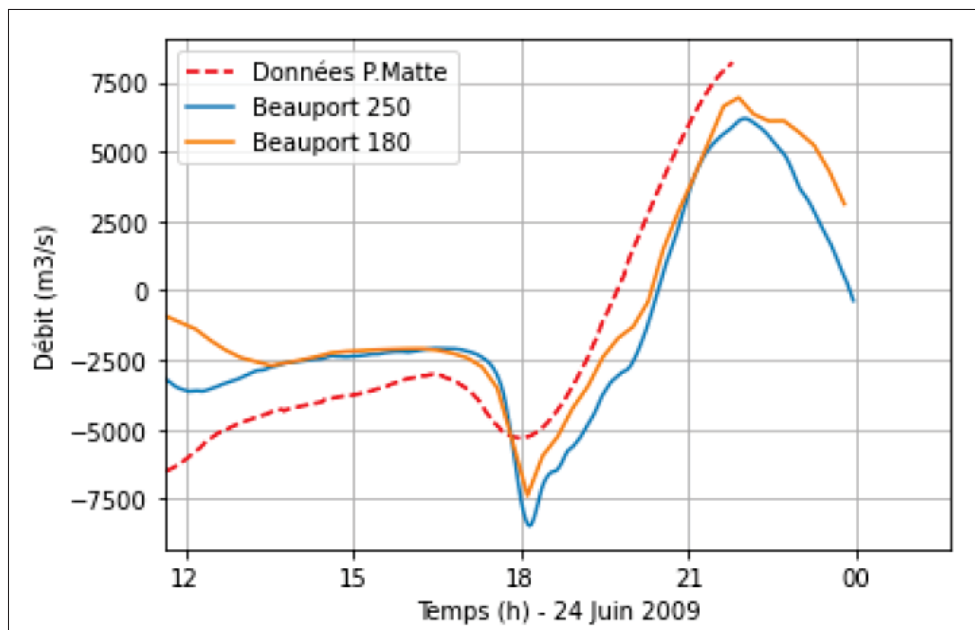


FIGURE 2.12 Les valeurs de débits obtenus avec un maillage de 250m, un maillage de 180m et les données de débit mesurées à la station Beauport pour un pas de temps de 10s pour la période (21-24Juin)

Avec :

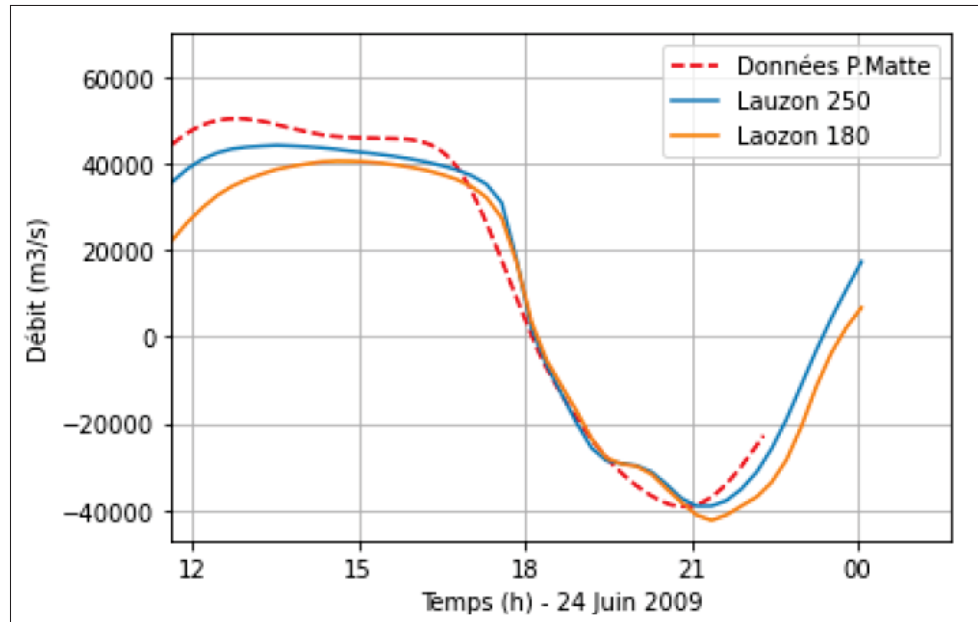


FIGURE 2.13 Les valeurs de débits obtenus avec un maillage de 250m, un maillage de 180m et les données de débit mesurées à la station Lauzon pour un pas de temps de 5s pour la période (21-24Juin)

- u : la vitesse maximale caractéristique (m/s),
- Δx : la taille minimale du maillage (m),
- Δt : le pas de temps (s).

Pour un maillage de 250 m, la distance minimale entre les nœuds est de 20 m et la vitesse maximale de 1 m/s. Au nord de l'Île-aux-Coudres, la dépression bathymétrique (canyon sous-marin associé à l'astrolème de Charlevoix) génère des vitesses pouvant atteindre 3 m/s ; en considérant la distance maximale entre les nœuds de 250 m, on obtient :

$$\Delta t < \frac{250}{3} = 83.3 \text{ s}, \quad \Delta t < \frac{20}{1} = 20 \text{ s}.$$

Pour le maillage de 180 m, la distance minimale entre les nœuds est de 15 m, ce qui conduit à :

$$\Delta t < \frac{180}{3} = 60 \text{ s}, \quad \Delta t < \frac{15}{1} = 15 \text{ s}.$$

Ces résultats montrent que la contrainte la plus restrictive correspond à la zone à mailles fines, avec un pas de temps maximal de 15 s. Par conséquent, pour garantir la stabilité du modèle, un pas de temps inférieur à 15 s a été retenu pour l'ensemble des simulations.

Afin d'évaluer l'impact du pas de temps sur la stabilité et la précision des résultats, plusieurs simulations ont été réalisées en faisant varier Δt . Pour le maillage de 250 m, des pas de temps de 10 s, 5 s et 2 s ont été testés. La même approche a été appliquée au maillage de 180 m.

Les résultats issus de ces différentes configurations ont ensuite été comparés aux débits de référence mesurés au niveau des stations de Québec, Beauport et Lauzon (Matte (2014)). Les figures suivantes présentent la comparaison entre les simulations et les observations, permettant d'identifier le compromis optimal entre stabilité numérique, précision des résultats et coût de calcul.

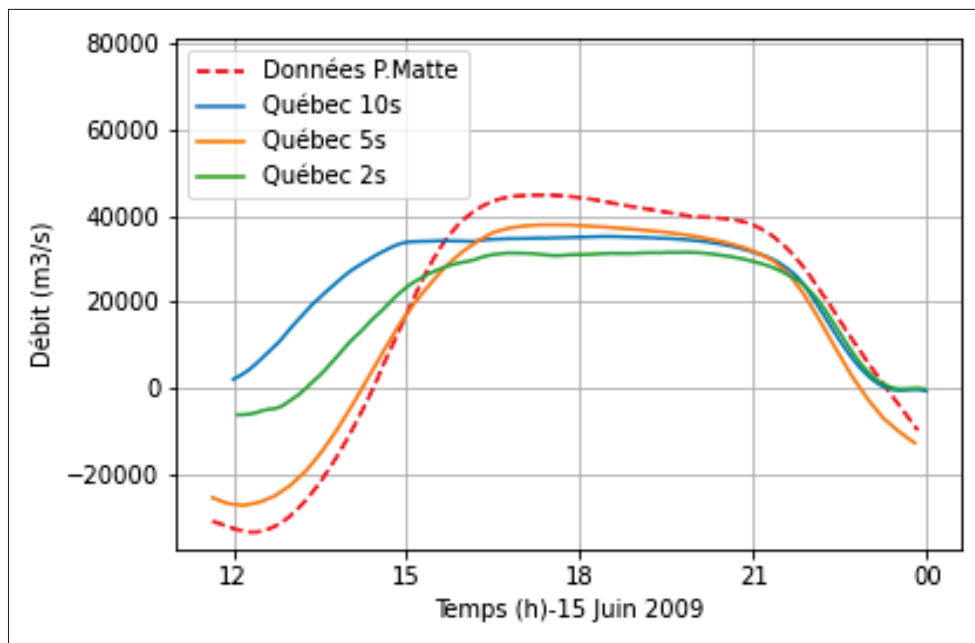


FIGURE 2.14 Les valeurs de débits obtenus avec un pas de temps de 10s, 5s, 2s et les données de débit mesurées à la station Québec pour la période (12-15Juin)

Les comparaisons de débits présentées dans les figures 2.14, 2.15 et 2.16. mettent en évidence que les simulations réalisées avec un pas de temps de 5 s et 10 s reproduisent plus fidèlement les observations. En effet, les courbes issues de ces simulations suivent globalement la même tendance que les débits de référence, tandis que celles obtenues avec un pas de temps de 2 s s'en écartent davantage.

Afin de déterminer le pas de temps optimal ainsi que la résolution spatiale la plus adaptée, une évaluation quantitative a été réalisée à l'aide de différents indicateurs statistiques. Les mesures d'erreur retenues sont :

- L'erreur moyenne absolue relative (RMAE),
- L'erreur quadratique moyenne (RMSE),
- Le Skill proposé par (Sutherland, Peet, & Soulsby, 2004)

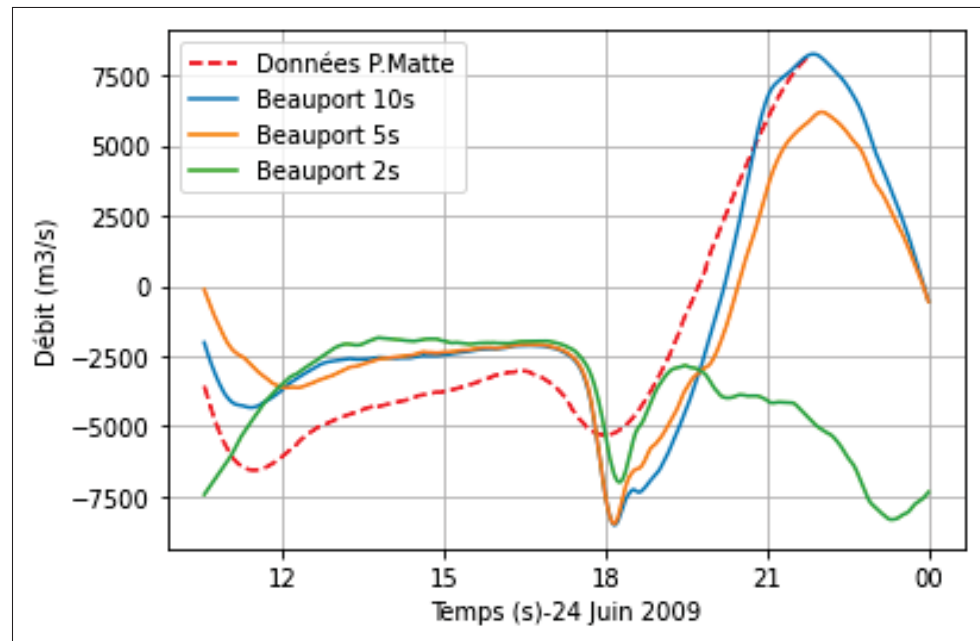


FIGURE 2.15 Les valeurs de débits obtenus avec un pas de temps de 10s, 5s, 2s et les données de débit mesurées à la station Beauport pour la période (21-24Juin)

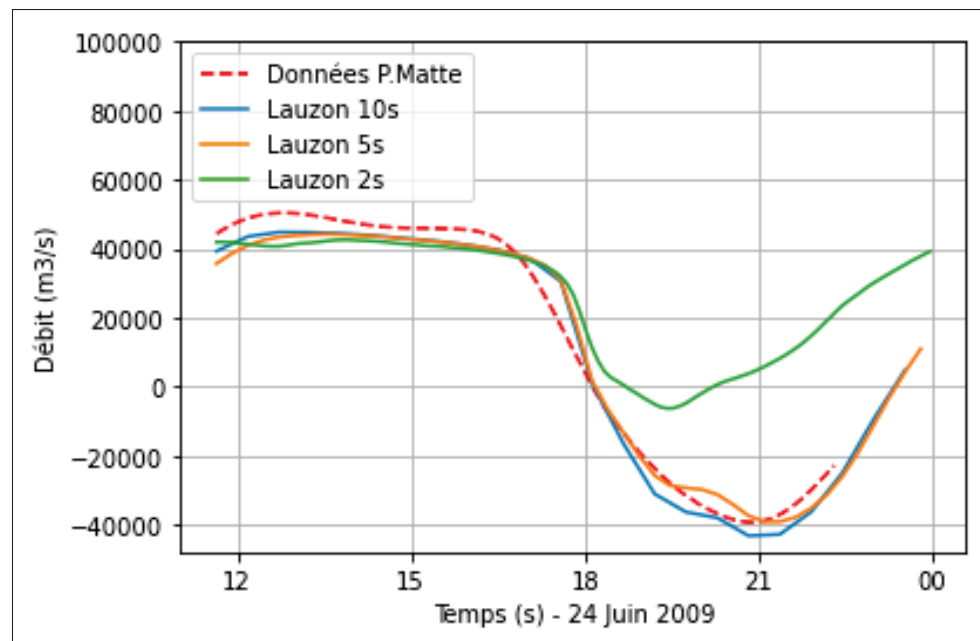


FIGURE 2.16 Les valeurs de débits obtenus avec un pas de temps de 10s, 5s, 2s et les données de débit mesurées à la station Lauzon pour la période (21-24Juin)

Ces indicateurs permettent de mesurer respectivement l'écart moyen relatif, la dispersion quadratique des erreurs et le degré de similitude globale entre les résultats simulés et les observations. Ils sont définis comme suit :

$$\text{RMAE} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |S - O|}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |O|} \quad (2.2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (S - O)^2} \quad (2.3)$$

$$\text{SKILL} = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (S - O)^2}{\sum_{k=1}^n (|S - \bar{O}| + |O - \bar{O}|)^2} \quad (2.4)$$

Avec :

S : valeur du débit simulée.

O : valeur du débit observée.

$\bar{O}$: moyenne des débits observés.

n : nombre des valeurs.

La RMSE constitue une mesure quantitative de l'écart entre les valeurs simulées et observées, exprimée dans la même unité que la variable étudiée. Le Skill, sans unité, fournit quant à lui une mesure qualitative de la concordance entre les simulations et les observations ; une valeur proche de 1 indique une simulation quasi parfaite. Enfin, le RMAE permet d'évaluer l'erreur relative entre les simulations et les observations : plus il est faible et tend vers 0, plus la simulation est considérée comme satisfaisante.

Les résultats issus du calcul de ces trois indicateurs d'erreur pour l'ensemble des configurations testées (maillage et pas de temps) sont synthétisés dans le Tableau 2.5.

Les simulations réalisées avec une résolution spatiale de 250 m présentent les résultats les plus satisfaisants, en minimisant globalement les différentes métriques d'erreur. En ce qui concerne la résolution temporelle, le pas de temps de 5 s s'avère le plus approprié, car il reproduit de manière plus fidèle l'évolution observée des débits sur l'ensemble des stations de référence.

Ainsi, pour la suite du développement et de la calibration du modèle, une résolution spatiale de 250 m sera retenue pour le domaine fluvial, combinée à un pas de temps de 5 s, afin d'assurer à la fois la stabilité numérique et une meilleure représentation des processus hydrodynamiques.

TABLEAU 2.5 Tableau de calculs des erreurs pour les maillages 250 et 180, avec les différents pas de temps 10s, 5s, 2s

Stations	Maillages	Pas de temps (s)	RMSE (m ³ /s)	RMAE (%)	Skill (%)
Québec (12-15 Juin)	250	10	13659.18	0.41	0.89
		5	8689.67	0.28	0.96
		2	12318.86	0.37	0.92
	180	10	6164.19	0.19	0.98
		5	10844.55	0.33	0.94
		2	16444.98	0.45	0.83
Beauport (21-24 Juin)	250	10	2811.52	0.54	0.87
		5	2761.45	0.60	0.83
		2	7030.95	1.58	0.45
	180	10	4879.23	1.11	0.60
		5	4944.88	1.17	0.58
		2	5874.03	1.37	0.47
Lauzon (21-24 Juin)	250	10	10304.37	0.23	0.97
		5	9602.11	0.19	0.97
		2	23551.97	0.54	0.80
	180	10	23551.97	0.54	0.80
		5	45539.76	1.21	0.189
		2	42211.03	1.10	0.22

2.3 Extension du maillage pour couvrir les berges

2.3.1 Inclusion des berges des îles

Le modèle MEF250 avec un pas de temps de 5 s a montré des résultats satisfaisants dans le cas d'un domaine borné continuellement immergé (le domaine bathymétrique). Dans la perspective de simuler des phénomènes d'inondation, en particulier au niveau de nos zones d'intérêt que sont la ville de Québec ainsi que l'île d'Orléans et l'île-aux-Coudres, nous devons apporter des modifications de résolution spatiale, pour intégrer des points topographiques.

Dans cette partie, les modifications du maillage seront validées uniquement dans des simulations de cas non-inondants, pour estimer la déviation des résultats hydrodynamiques entre le maillage MEF250 et le maillage avec l'inclusion des points au niveau des berges. Ces points bathymétriques ont été extraits de la plateforme Forêt ouverte², permettant de compléter les relevés existants et d'assurer une meilleure continuité des données le long des berges.

Une partie au niveau de la zone de l'Île-aux-Coudres a également été ajoutée, avec les piles du pont de l'île d'Orléans, avec une résolution de 15 m au niveau du pont d'Orléans.

² <https://www.foretouverte.gouv.qc.ca/>

Ainsi, le maillage devient comme montré sur la Figure 2.17

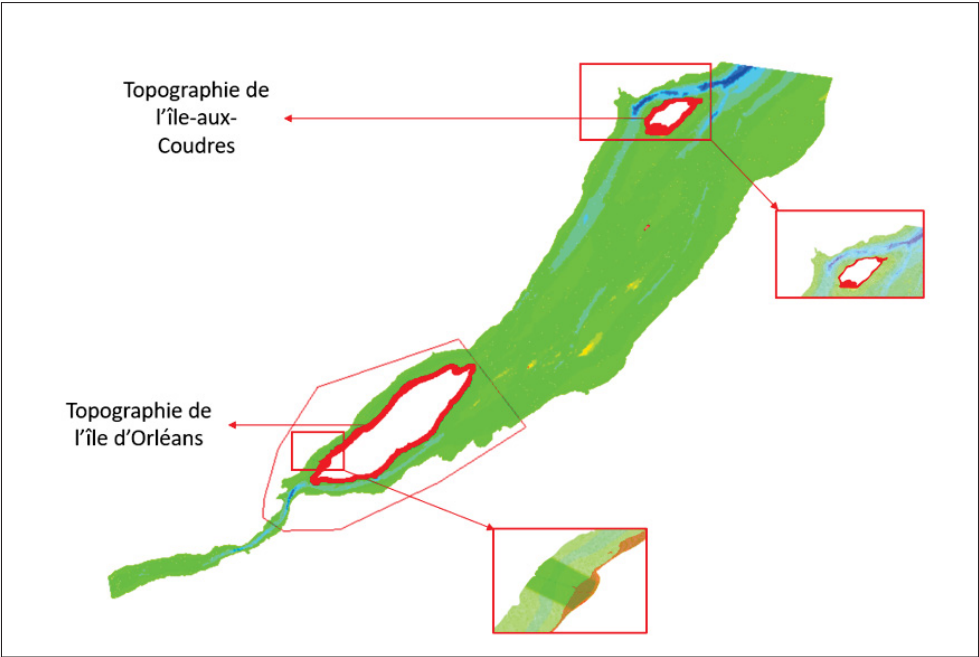


FIGURE 2.17 Figure montrant la résolution du modèle après l’ajout des points topographiques dans les berges de l’île d’Orléans et de l’île-aux-Coudres, avec une densification de maillage de 50 m et les piles de pont.

Nous avons effectué une simulation avec ce maillage, en affectant un coefficient de frottement de 0,05 aux berges des îles. Les caractéristiques de la simulation sont montrées dans le Tableau 2.6.

TABLEAU 2.6 Caractéristiques du maillage et de la simulation incluant les berges

Maillage	Nombre de nœuds	Nombre d’éléments	Résolution min (m)	Nombre de processeurs	Temps de simulation	Résolution max (m)
Maillage avec berges	170 396	335 427	15	6	1h 9 min 22 s	250

La Figure 2.18 illustre la comparaison entre les résultats obtenus avec le maillage MEF250, utilisant un pas de temps de 5 s, et ceux issus de la simulation réalisée avec le nouveau maillage avec berges. Les simulations ont été effectuées sur une période de 4 jours de marées, durant laquelle un régime transitoire s’établit au début, avant que l’écoulement n’atteigne un état quasi-stationnaire.

En intégrant au modèle la topographie des berges des îles et en attribuant un coefficient de frottement de 0,05 à ces zones, nous observons une modification très légère par rapport aux résultats obtenus avec le maillage MEF250.

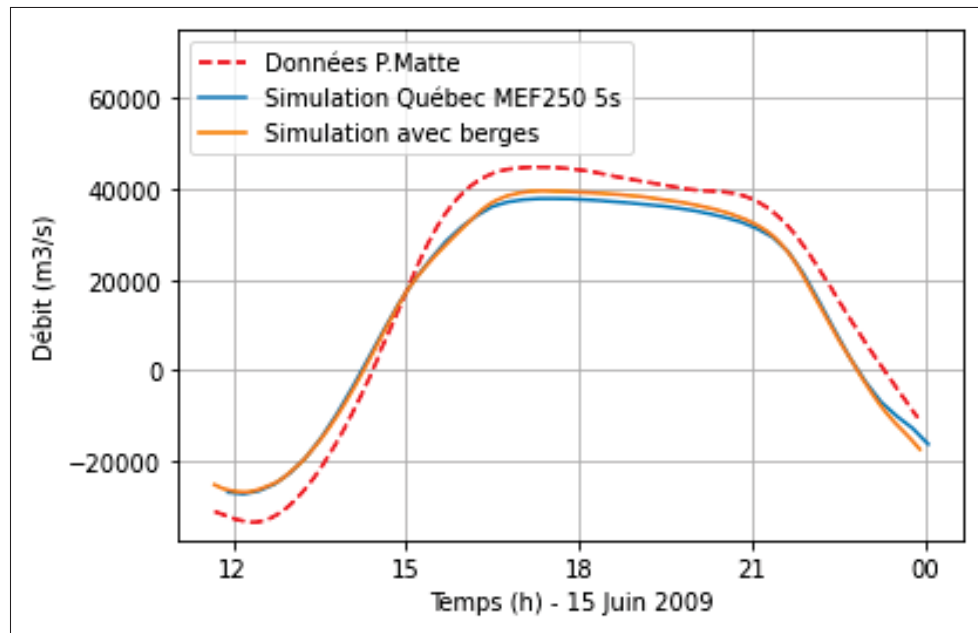


FIGURE 2.18 Une comparaison des débits résultants entre une simulation avec berges des îles et une simulation sans berges des îles

2.3.2 Maillage urbain

La prochaine étape consiste à rajouter la zone topographique urbaine. Pour avoir une bonne représentation des structures urbaines, il est essentiel de réduire la résolution à 1 m dans la zone urbaine. La zone bathymétrique ayant une résolution de 250 m. Un raffinement progressif doit donc être appliqué pour assurer une transition cohérente entre les zones.

En utilisant les données disponibles sur la plateforme Forêt ouverte, la résolution du maillage est divisée en trois parties (Figure 2.19) :

- 50 m pour la partie incluant la ville de Québec et l'île d'Orléans
- 250 m dans la rivière Saint-Laurent
- 100 m dans la partie sud de la ville de Québec

Les caractéristiques du modèle sont présentées dans le Tableau 2.7.

TABLEAU 2.7 Tableau des caractéristiques du maillage incluant les berges

Maillage	Nombre de nœuds	Nombre d'éléments	Résolution min (m)	Résolution max (m)
Modèle MEFT	191 110	377 916	50	250

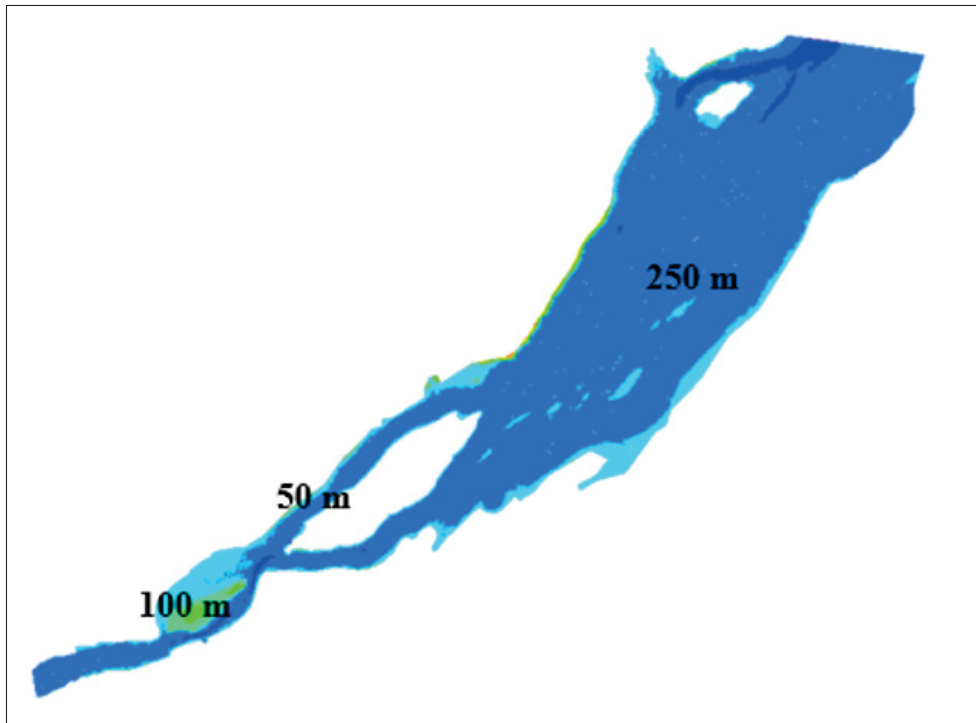


FIGURE 2.19 Résolution des maillages choisis pour le modèle MEFT

Cependant, les données topographiques disponibles sur la plateforme Forêt ouverte, bien qu'utiles pour une première représentation du relief, ne présentent pas une précision suffisante pour les besoins spécifiques de la modélisation hydrodynamique urbaine. En effet, leur résolution relativement grossière limite la capacité à représenter correctement les microreliefs, les digues ou encore les infrastructures présentes en zone côtière. Dans cette optique, l'utilisation des données LiDAR à haute résolution (1 m), récemment acquises, s'avère beaucoup plus pertinente. Ces données permettent donc mieux capter les variations fines du terrain qui influencent directement la propagation des inondations et la dynamique locale de l'écoulement.

Le coefficient de frottement est un élément essentiel dans une modélisation hydrodynamique, ainsi, on a réalisé trois tests de coefficient de frottement pour la zone topographique (berges et zone urbaine).

Les résultats sont montrés sur la Figure 2.20 ci-dessous :

Ainsi, le modèle est très sensible au choix du coefficient Manning même sur un espace non inondé. Le coefficient 0,05 semble être le plus proche des observations.

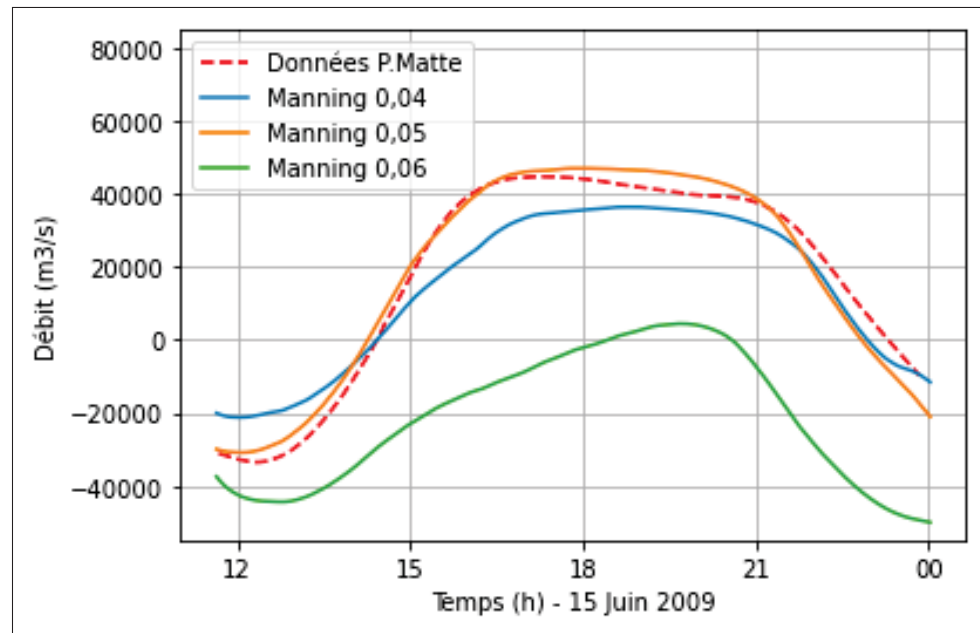


FIGURE 2.20 Comparaison de débit entre différentes valeurs de Manning de topographie

2.3.3 Résolution et stratégie urbaine

Le choix de la résolution spatiale a été guidé par une analyse de sensibilité. Une résolution fine de 50 mètres a été adoptée dans la zone de confluence et de bifurcation du fleuve, à proximité de la ville de Québec et autour de l'Île d'Orléans, conformément aux recommandations de Matte (2014). En dehors de cette zone d'intérêt, une résolution plus grossière de 250 mètres a été retenue en amont et en aval afin de limiter les coûts computationnels. La Figure 2.21 présente le maillage optimal résultant de ce processus de calibration du modèle numérique d'écoulement. L'interpolation par plus proche voisin a été employée pour générer les nœuds finaux du maillage computationnel. La grille de calcul comprend au total 532 274 éléments et 268 752 nœuds, couvrant l'ensemble de la zone d'étude.

Dans cette étude, un maillage de type BB (Buildings Blocks) (cf. Chapitre 4) a été utilisé afin de représenter explicitement les structures urbaines dans la simulation hydrodynamique (Figure 2.22). Ce maillage repose sur l'intégration des bâtiments sous forme de volumes solides, dérivés des altitudes issues du Modèle Numérique de Surface (MNS), en ne considérant que ceux dont la hauteur est inférieure à 20 mètres. L'ensemble de la zone urbaine simulée, incluant les constructions, est discrétisé à l'aide d'une grille d'éléments triangulaires irréguliers couvrant le fleuve Saint-Laurent et les basses terres de Québec. La résolution spatiale du maillage est variable : elle atteint 2 mètres à proximité des bâtiments afin de capturer finement les écoulements dans les rues et entre les obstacles, et s'étend à 50 mètres dans les zones fluviales entourant la ville.

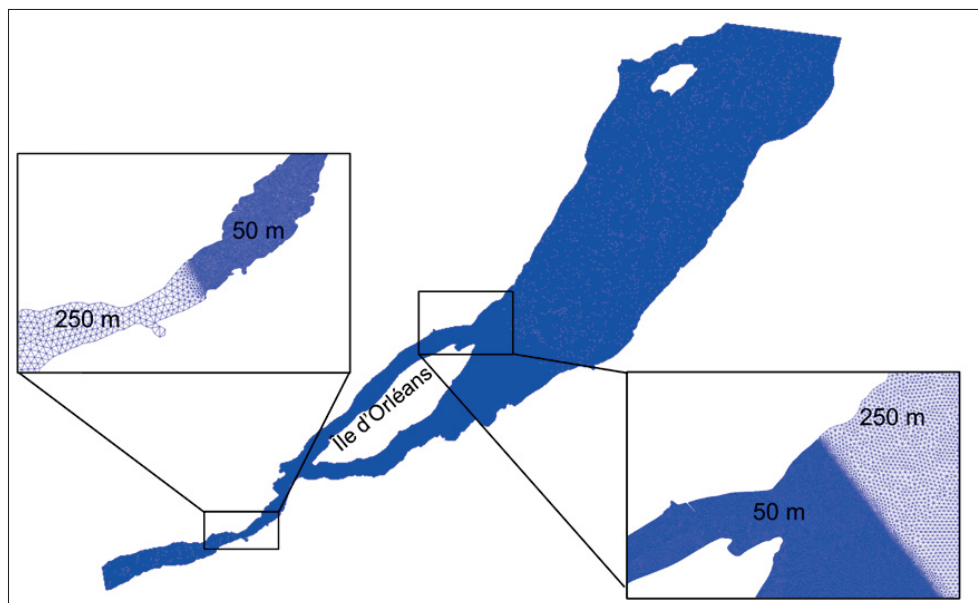


FIGURE 2.21 Maillage de calcul pour le modèle non-inondé : raffinement du maillage autour de l'Île d'Orléans

L'utilisation de ce maillage BB permet une meilleure représentation des effets de canalisation, de blocage ou de déviation des flux liés à la présence des bâtiments, offrant ainsi une modélisation réaliste des dynamiques d'écoulement en milieu urbain dense. Cette approche est essentielle pour évaluer la résilience des infrastructures face aux événements météorologiques extrêmes. À titre d'exemple, la marina de la ville de Québec, incluse dans le domaine d'étude, comprend deux bassins distincts (un bassin interne et un bassin externe) dont la géométrie est également intégrée dans le maillage.

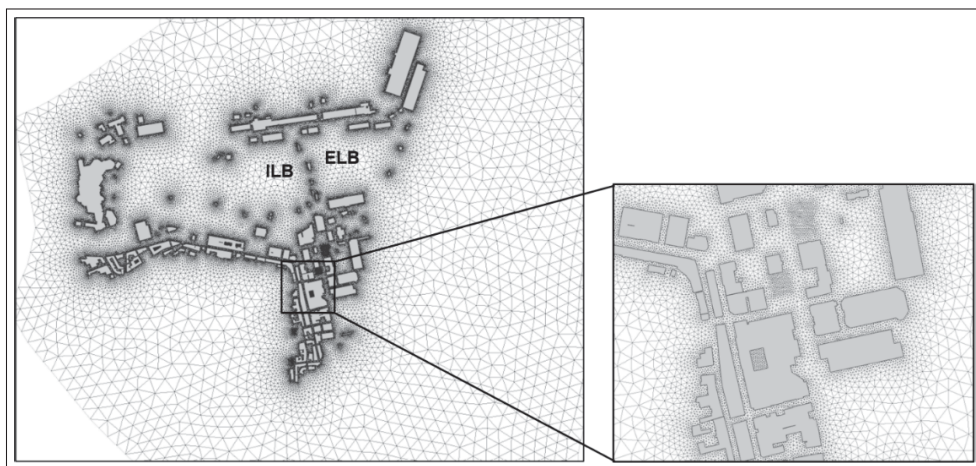


FIGURE 2.22 Maillage utilisé dans les zones basses de la ville de Québec comprenant le bassin Louise interne/externe (ILB/ ELB respectivement).

Afin de valider le modèle hydrodynamique développé, les résultats numériques ont été comparés aux données expérimentales et numériques issues de l'étude de Matte, Secretan, & Morin (2017). Deux périodes d'observation ont été considérées : du 12 au 15 juin 2009, correspondant à une marée de morte-eau, et du 21 au 24 juin 2009, correspondant à une marée de vive-eau. Les niveaux d'eau ont été relevés aux transects de l'Estuaire Saint-Charles, Saint-François et Rocher-Neptune, tandis que les débits ont été mesurés aux transects de Québec, Beauport et Lauzon (Figure 2.23).

2.3.4 Modèle hydrodynamique non-inondé

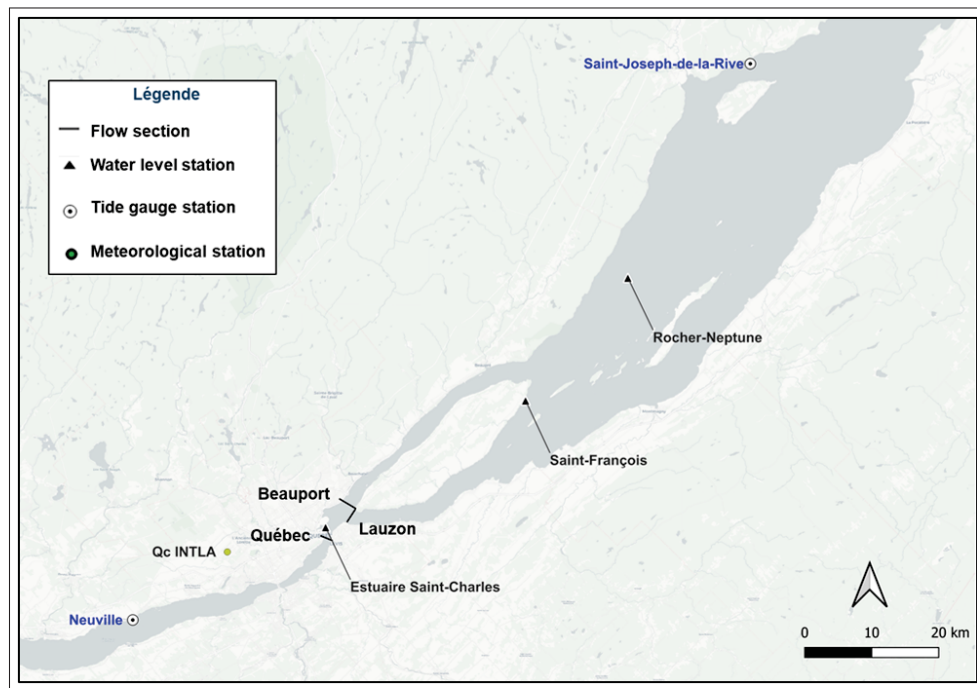


FIGURE 2.23 Carte des différents marégraphes, stations météorologiques, stations de hauteurs d'eau et sections de débit utilisées dans l'étude de cas.

Dans cette section, l'analyse va porter sur la comparaison entre la simulation réalisée sans considération de la topographie (MEF) et la simulation réalisée en tenant compte de la topographie, afin de quantifier l'impact de l'ajout de la topographie sur les résultats hydrodynamiques.

Dans un premier temps, les coefficients de rugosité de Manning adoptés pour le lit fluvial correspondent aux valeurs proposées par Matte et al. (2017) puis ont été étendus aux zones urbaines sur la base d'hypothèses préalables. Une procédure de validation en deux étapes a ensuite été mise en œuvre :

- **Étape 1 – Calibration** : Le coefficient de Manning est ajusté afin d’optimiser la concordance entre les résultats simulés et les observations de la première période (12–15 juin), tant en termes de niveaux d’eau que de débits.
- **Étape 2 – Vérification** : Les résultats du modèle calibré sont confrontés aux observations de la seconde période (21–24 juin) pour évaluer sa capacité prédictive dans une analyse a posteriori.

La Figure 2.24 illustre la distribution spatiale finale du coefficient de Manning dans la zone d’étude, ainsi que la comparaison entre les résultats numériques et les données mesurées.

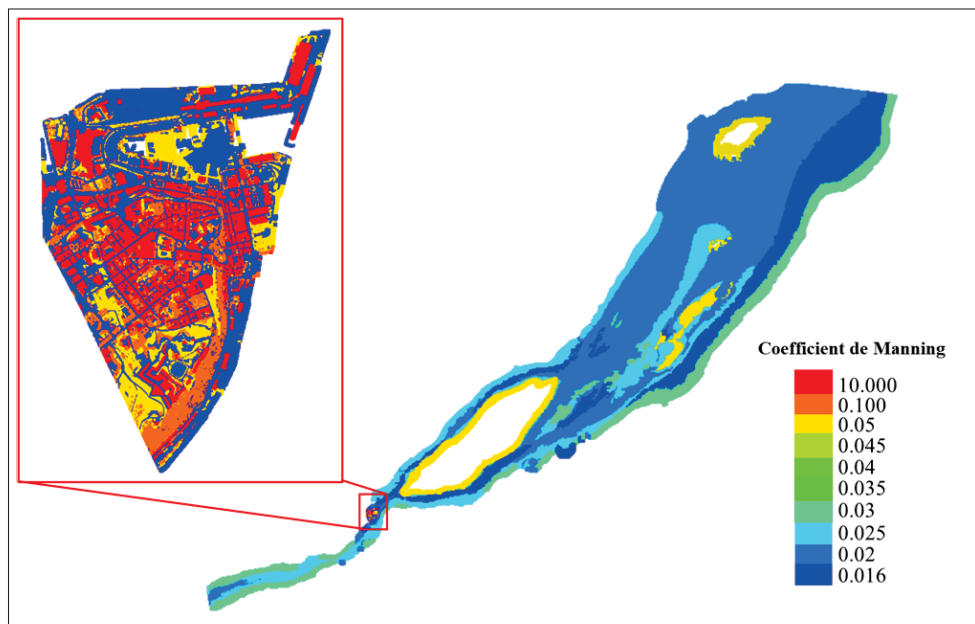


FIGURE 2.24 Coefficients de Manning utilisés dans cette étude en fonction de la composition du substrat et de l’occupation des sols.

Les figures 2.25 et 2.26 présentent la comparaison entre les résultats du modèle hydrodynamique et les observations relevées aux différents transects. La Figure 2.25 illustre les niveaux d’eau mesurés dans l’Estuaire Saint-Charles, Saint-François et Rocher-Neptune pour les pas de temps de 10 s, 5 s et 2,5 s sur la période du 12 au 15 juin 2009 (marée de morte-eau). La Figure 2.26 montre les débits pour les transects de Québec, Beauport et Lauzon, pour les mêmes pas de temps, sur les périodes du 15 et 24 juin 2009 (marées de vive eau).

Ces figures permettent d’évaluer l’influence du pas de temps sur la précision des simulations et de confirmer le choix du pas de temps optimal pour les simulations suivantes, en conciliant précision et coût computationnel.

Les Tableaux 2.8 et 2.9 présentent les erreurs numériques calculées pour différents pas de temps (10 s, 5 s et 2,5 s) dans les stations de niveau d’eau et les sections d’écoulement étudiées. Le Tableau 2.8 montre les indicateurs RMSE, RMAE et Skill pour les transects de l’Estuaire Saint-Charles, Saint-François et Rocher-Neptune (Figure 2.23), tandis

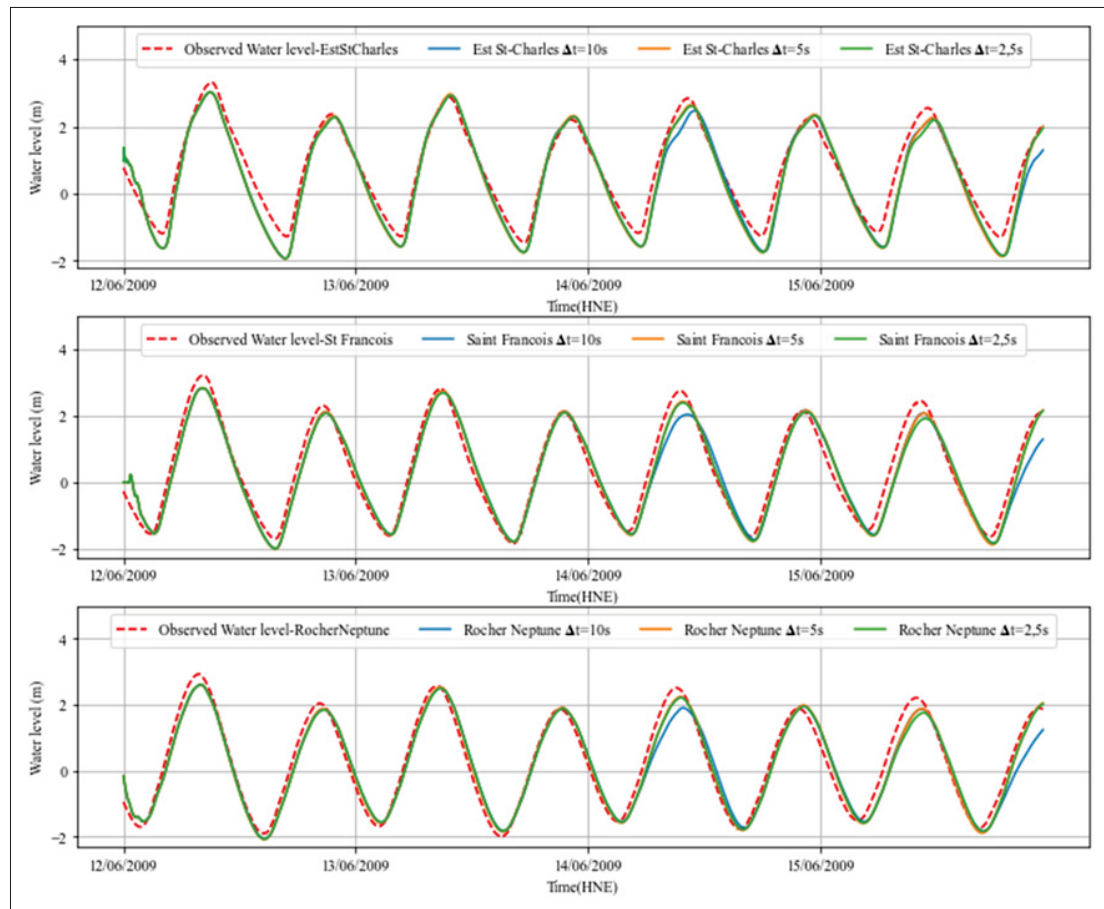


FIGURE 2.25 Comparaison entre la simulation et l'observation (série temporelle) dans les différentes sections : (a) Estuaire Saint-Charles, (b) Saint-François, (c) Rocher-Neptune pour les différents pas de temps 10s, 5s et 2,5s entre le 12 et le 15 juin 2009 en heure normale de l'Est (HNE).

que le Tableau 2.9 présente les mêmes indicateurs pour les sections de Québec, Beauport et Lauzon (Figure 2.23). Ces résultats permettent d'évaluer l'influence du pas de temps sur la précision des simulations et confirment le choix d'un pas de temps de 5 s.

TABLEAU 2.8 Performances du modèle pour différents pas de temps

Station	Time Step	RMAE	RMSE (m)	Skill (%)
Estuaire Saint-Charles	10 s	0.32	0.39	97.8
	5 s	0.24	0.36	98.1
	2.5 s	0.24	0.37	98.0
Saint-François	10 s	0.24	0.37	98.1
	5 s	0.19	0.29	98.8
	2.5 s	0.69	0.32	98.6
Rocher Neptune	10 s	0.23	0.35	98.2
	5 s	0.18	0.26	99.1
	2.5 s	0.20	0.29	98.8

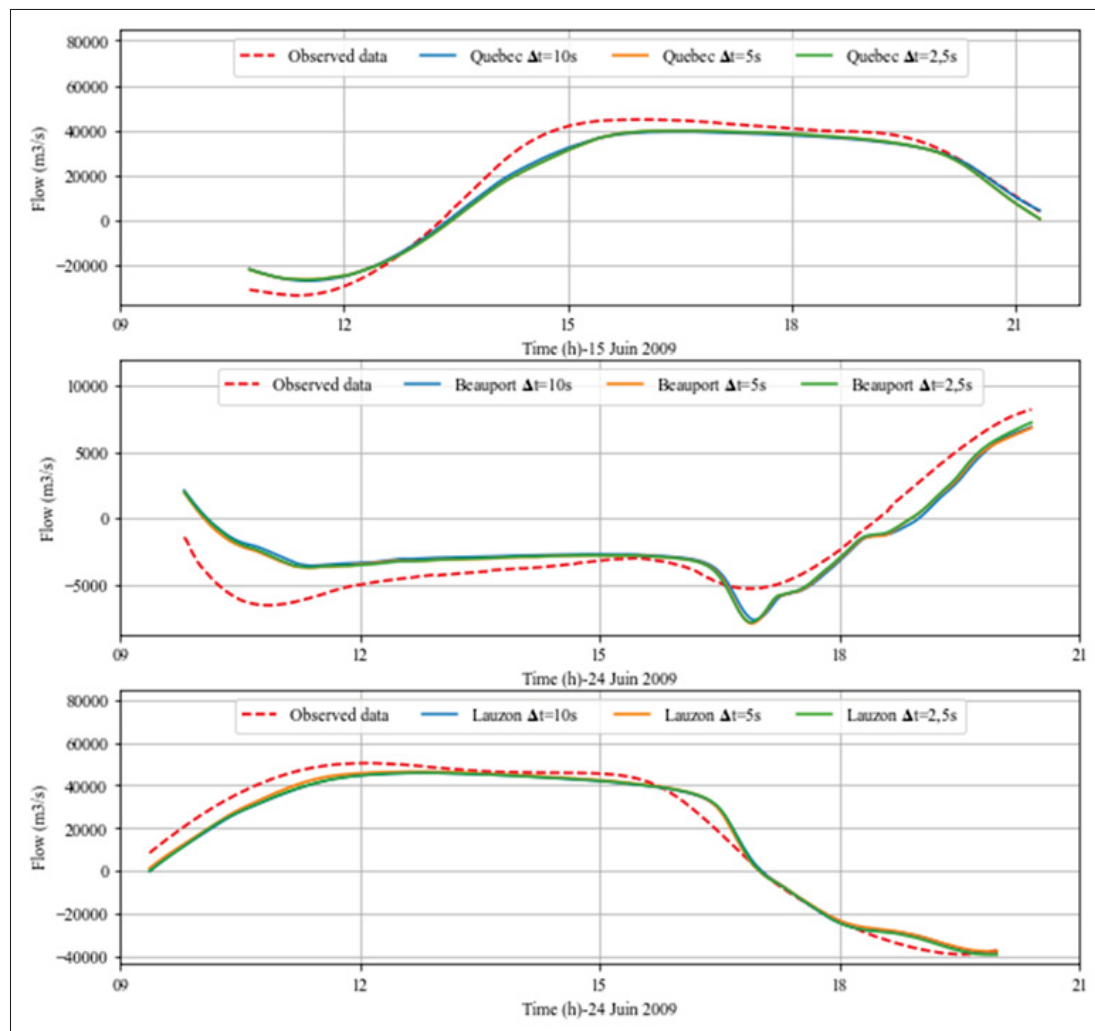


FIGURE 2.26 Comparaison entre les simulations et les observations dans les différentes sections : (a) Québec, (b) Beauport et (c) Lauzon, pour les pas de temps de 10 s, 5 s et 2,5 s, durant les 15 et 24 juin 2009.

TABLEAU 2.9 Performances du modèle pour différents pas de temps et sections

Station	Time Step	RMAE	RMSE (m ³ /s)	Skill (%)
Québec	10 s	0.14 (0.41)	5159.89 (13659.18)	98.9 (89%)
	5 s	0.15 (0.28)	5433.57 (8689.67)	98.9 (96%)
	2.5 s	0.18	6497.9	98.2
Beauport	10 s	0.39 (0.54)	2006.72 (2811.52)	90.9 (87%)
	5 s	0.36 (0.60)	1860.30 (2761.45)	92.3 (83%)
	2.5 s	0.37	1942.96	91.9
Lauzon	10 s	0.12 (0.23)	5327.85 (10304.37)	99.3 (97%)
	5 s	0.11 (0.19)	4704.4 (9602.11)	99.4 (97%)
	2.5 s	0.12	5216.19	99.3

Les simulations réalisées avec un pas de temps de 5 secondes fournissent les résultats les plus précis, tant pour les niveaux d'eau que pour les débits, et présentent la meilleure concordance avec les observations sur l'ensemble des stations étudiées. En conséquence, ce pas de temps sera adopté pour la poursuite du développement du modèle.

L'analyse globale des valeurs de Skill, RMAE et RMSE obtenues en 2.2.3, et celles obtenues en Tableau 2.9, présente une bonne concordance. Le cas de la section Lauzon se distingue comme le plus performant, avec des RMSE et RMAE faibles et des Skill atteignant 97%, traduisant une excellente reproduction des débits. Le cas Québec présente également de bonnes performances, avec des valeurs de Skill proches de 98–99%, mais des erreurs relatives légèrement plus élevées. En revanche, le cas Beauport se caractérise par une précision moindre, avec des valeurs de Skill comprises entre 83% et 87%. Dans l'ensemble, ces résultats confirment que lorsqu'on rajoute des données topographiques et que l'on inclut les berges, le modèle arrive à reproduire fidèlement la dynamique hydrodynamique du fleuve.

2.4 Synthèse

Ce chapitre a permis de présenter en détail la construction et la validation du maillage topo-bathymétrique (TBDem) de la zone d'étude ainsi que les tests hydrodynamiques associés. La compilation et l'intégration de données multi-sources, incluant les relevés bathymétriques récents et historiques, les points au niveau des berges issus de la plateforme Forêt ouverte et les données LiDAR à haute résolution, ont permis de produire un modèle numérique topo-bathymétrique cohérent et continu, adapté à la simulation hydrodynamique.

La validation du modèle a été réalisée à travers des simulations non-inondantes et l'évaluation des effets du frottement, de la résolution spatiale et temporelle sur les résultats. L'analyse des indicateurs statistiques (RMSE, RMAE et Skill) a montré que le modèle reproduit fidèlement les hauteurs d'eau et les débits d'écoulement, avec des performances optimales pour les configurations les plus raffinées.

Enfin, l'extension du maillage à l'ensemble de la zone urbaine a permis de garantir un compromis efficace entre précision hydrodynamique et coût computationnel. Ce chapitre fournit ainsi les bases nécessaires pour la simulation d'inondation qui sera présentée dans les chapitres suivants, en assurant la fiabilité et la robustesse du modèle hydrodynamique.

CHAPITRE 3

OUTILS DE SIMULATION DE LA DYNAMIQUE D'INONDATION

Ce chapitre présente les outils et méthodes numériques utilisés pour la simulation de l'inondation urbaine. L'accent est mis sur trois aspects clés : la modélisation du front sec/mouillé, la représentation des bâtiments et l'intégration de l'effet du vent.

Dans un premier temps, un cas test est étudié pour évaluer la sensibilité des simulations aux paramètres numériques, notamment le seuil H-clipping. Ensuite, différentes méthodes de maillage des bâtiments sont présentées et appliquées au cas urbain de la ville de Québec, afin d'analyser leur impact sur la propagation des inondations. Enfin, le rôle du vent, qu'il soit homogène ou non homogène, est examiné pour quantifier son influence sur la dynamique de crue et le champ d'inondation. Ce chapitre vise ainsi à fournir une compréhension détaillée des principaux outils et paramètres qui déterminent la précision et la fiabilité des simulations hydrodynamiques.

3.1 Étude du front sec/mouillé dans la simulation d'inondation

3.1.1 Description du cas test

Avant de simuler des phénomènes d'inondations dans une zone sèche intégrant des édifices urbains, mais également, afin d'économiser du temps de simulation et de génération de maillage, nous avons mis en place un modèle réduit simple qui nous permet de tester différentes stratégies de maillage et paramètres de calcul.

L'usage de ce cas simplifié constitue une étape méthodologique courante en modélisation hydrodynamique, puisqu'il permet d'identifier les tendances générales de la réponse du modèle avant de traiter la complexité topographique et géométrique d'un domaine réel (Costabile & Macchione, 2015 ; Hunter, Bates, Horritt & Wilson, 2007).

Ce cas correspond à un cas test académique, qui n'a pas fait l'objet d'une validation expérimentale. Les travaux présentés reposent exclusivement sur des simulations numériques, et ce cas simplifié sert de support pour la comparaison entre différentes configurations de calcul et modèles numériques, plutôt que pour la reproduction d'un événement réel.

La rivière est représentée par un canal rectangulaire, la zone urbaine par un trapèze, et les édifices (ici 2 bâtiments) par des carrés (Figure 3.1).

3.1.2 Conditions aux limites du cas test

Pour la simulation de ce cas schématisant une portion du fleuve Saint-Laurent et de la ville de Québec, une bathymétrie constante de -20 m a été attribuée à l'ensemble du canal rectangulaire, et une valeur de 0 m a été appliquée à la zone urbaine. Concernant les conditions de frottement, un coefficient de Manning uniforme de 0,05 unités a été utilisé à la fois pour la zone urbaine et pour le canal. Les bâtiments ont été considérés avec une hauteur fixe de 10 m.

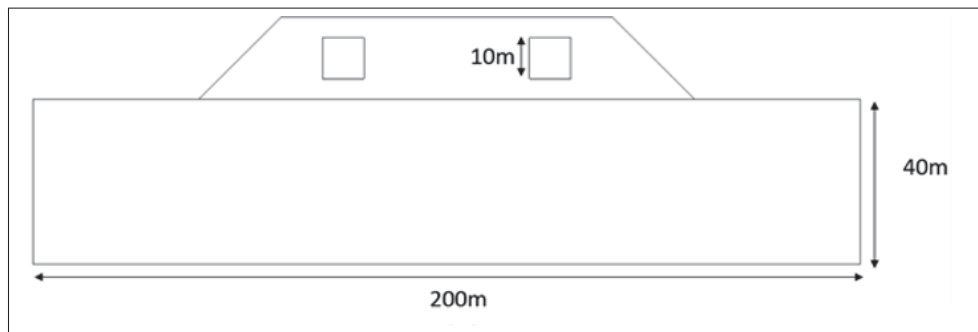


FIGURE 3.1 Dimensions géométriques du canal et du domaine urbain utilisés pour le cas test

En ce qui concerne les conditions aux limites, une inondation a été simulée en utilisant les hauteurs d'eau comme montrées en Figure 3.2.

3.1.3 Analyse de sensibilité au seuil *H Clipping*

Pour la modélisation, il a été décidé d'utiliser deux types de représentation des bâtiments. La première, de type BH (Building Hole) (Cf. Chapitre 1) et de type BB (Building Block) (Cf. Chapitre 1). Les deux méthodes de représentation des bâtiments seront analysées ultérieurement dans ce chapitre.

Les résultats seront analysés au niveau de deux points représentatifs de la zone urbaine, à savoir le point 1, situé entre deux bâtiments, et le point 2, localisé directement sur le mur d'un bâtiment (Figure 3.3).

Pour rendre la représentation numérique des passages d'une zone humide à une zone sèche plus réelle, on intègre directement le *H Clipping* dans le code. Le principe consiste à ne pas laisser la hauteur d'eau simulée devenir négative ; dès qu'elle devient négative, elle est ramenée à zéro pour marquer les mailles sèches.

Nous avons conduit une analyse de sensibilité afin d'évaluer l'influence du paramètre *H Clipping* sur la dynamique d'écoulement hydraulique.

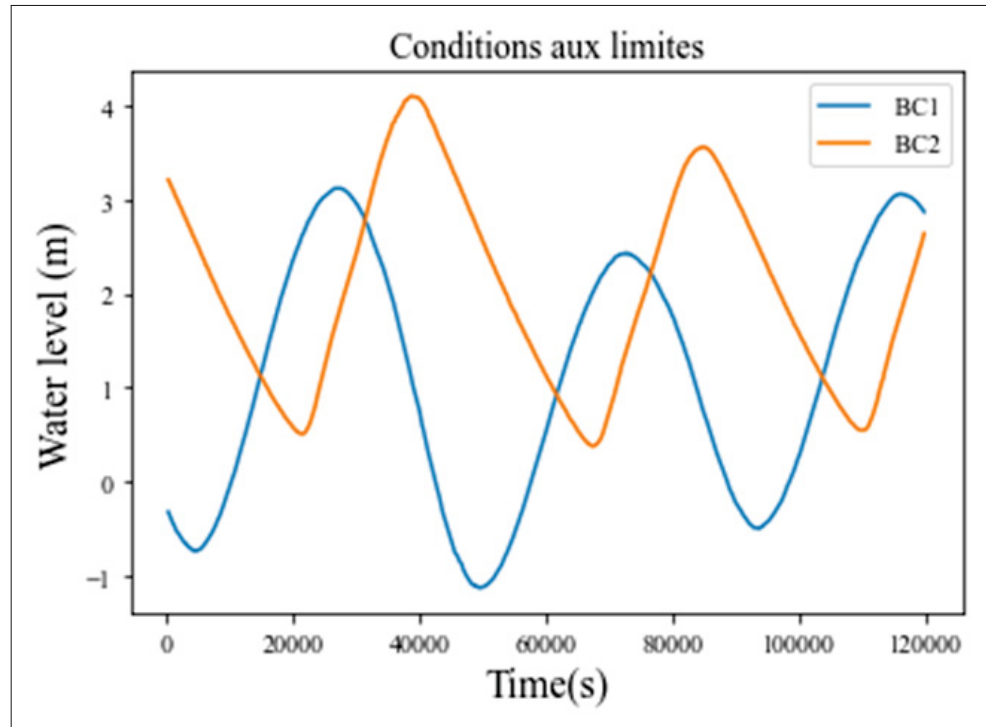


FIGURE 3.2 Hauteurs d'eau imposées au niveau de frontières du cas test

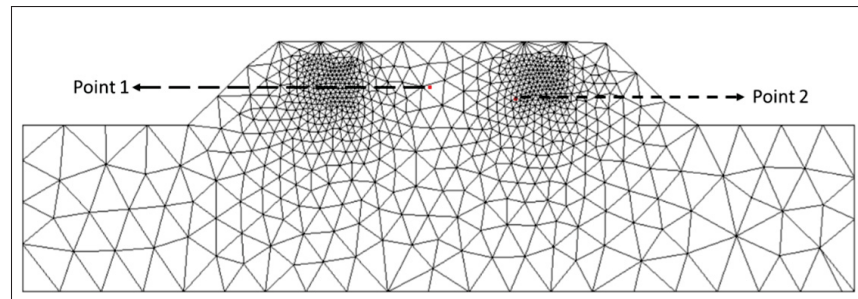


FIGURE 3.3 Vue en plan de la position des deux points de contrôle utilisés pour l'extraction des résultats (maillage triangulaire de type BB)

Les résultats en Figure 3.4 et Figure 3.5 révèlent qu'en ce qui concerne les hauteurs d'eau simulées, la modélisation différente des bâtiments semble ne pas avoir d'influence lorsque des valeurs zéro ou négatives de $H_{Clipping}$ sont utilisées. Des écarts plus marqués sont observés pour les valeurs positives, révélant une sensibilité plus prononcée des écoulements aux seuils testés.

Pour le cas $H_{Clipping} = 1$, on observe des oscillations notables au niveau du point 1 et du point 2. Ces oscillations sont liées à des phénomènes d'instabilité numérique liés à la transition entre cellules sèches et mouillées. Par ailleurs, au point 2, des écarts du niveau d'eau sont également observés, alors qu'ils ne se manifestent pas dans le

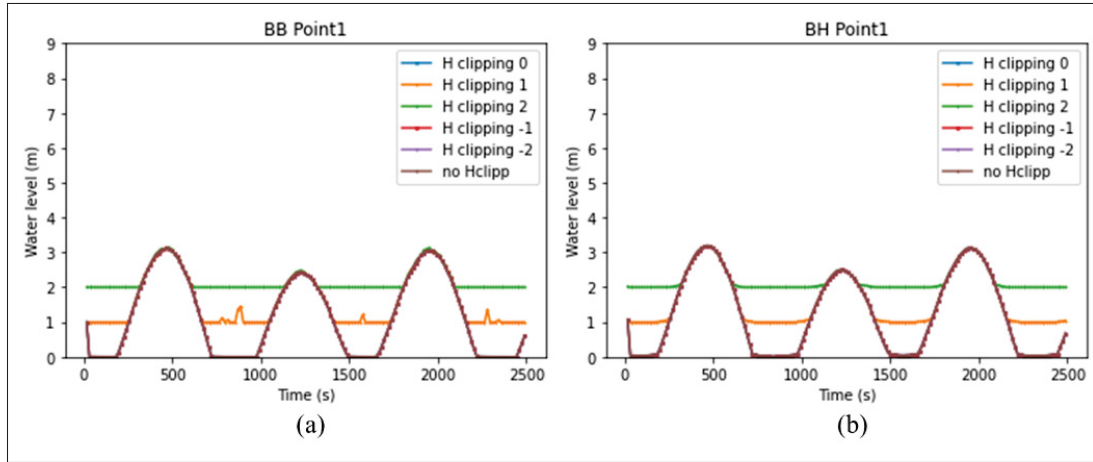


FIGURE 3.4 Hauteurs d'eau obtenues en utilisant les différentes valeurs de H Clipping pour les deux méthodes de maillage BB (a) et BH (b) extraits au niveau du point 1

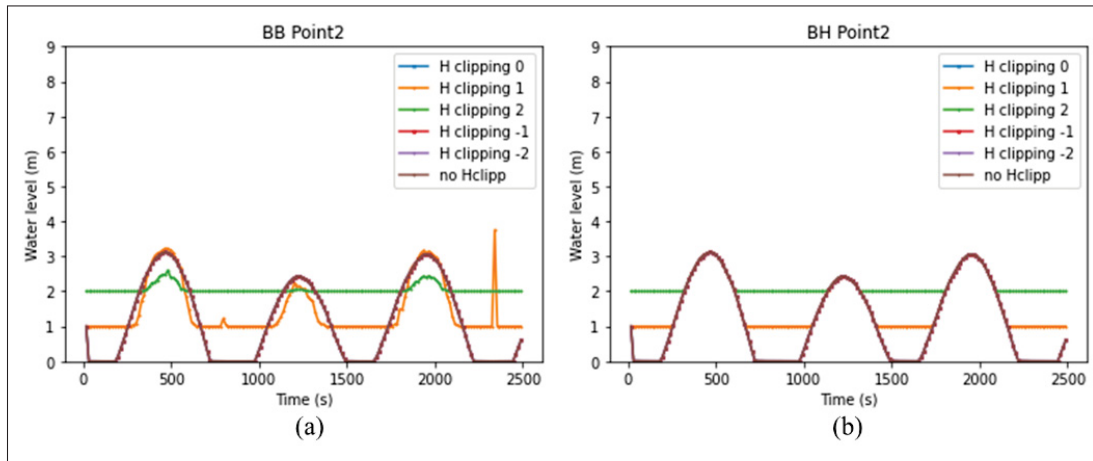


FIGURE 3.5 Hauteurs d'eau obtenues en utilisant les différentes valeurs de H Clipping pour les deux méthodes de maillage BB (a) et BH (b) extraits au niveau du point 2

cas du BH, ce qui souligne l'influence de la méthode de traitement du front sec/mouillé sur la stabilité locale de la simulation.

3.2 Méthodes de représentation des bâtiments appliquées au cas test

3.2.1 Maillage par la méthode BB (Building Block)

La méthode BB (Mustafa & Szydłowski, 2021 ; Schubert & Sanders, 2012) est une approche de modélisation des inondations urbaines qui représente les bâtiments en manipulant les données d'élévation dans le maillage

computationnel. Cette représentation géométrique est obtenue en attribuant aux nœuds du maillage des hauteurs spécifiques : ceux situés à l'intérieur des empreintes des bâtiments prennent la hauteur des toits, tandis que ceux situés à l'extérieur conservent l'altitude du terrain.

Ainsi, dans le modèle topographique utilisé pour la simulation des écoulements, les bâtiments apparaissent comme des blocs surélevant les données d'élévation jusqu'aux toits. Un des aspects clés de cette méthode est qu'elle ne contraint pas directement le maillage en fonction de la géométrie des bâtiments, nécessitant ainsi une grille relativement fine pour une caractérisation précise des structures urbaines.

Cette approche est relativement simple à implémenter et compatible avec tout type de maillage computationnel, mais elle impose un raffinement local autour des bâtiments pour garantir la précision des simulations. La Figure 3.6 présente le maillage BB appliqué au cas test.

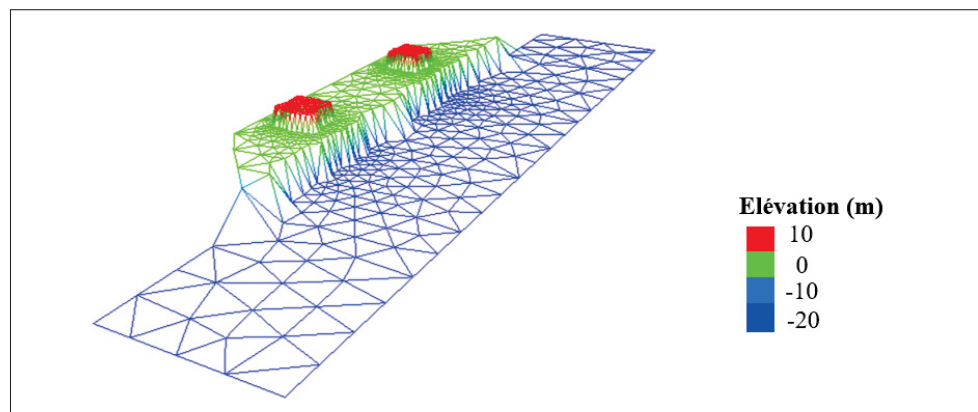


FIGURE 3.6 Maillage BB appliqué au cas test

3.2.2 Maillage par la méthode BH (Building Hole)

La méthode BH (Mustafa & Szydłowski, 2021 ; Schubert & Sanders, 2012) en modélisation des inondations urbaines représente les bâtiments comme des trous dans le maillage computationnel, avec des conditions aux limites de paroi sans frottement appliquées aux murs des bâtiments. Cette approche permet une représentation précise des formes des bâtiments tout en maintenant une résolution de maillage spatialement variable, favorisant ainsi une modélisation efficace avec un maillage relativement grossier dans les autres zones.

Bien que la méthode BH permette une exécution rapide du modèle, elle reste relativement complexe à mettre en œuvre. Elle est particulièrement adaptée aux environnements urbains présentant des géométries de bâtiments simples et espacées, comme les quartiers d'immeubles, ou aux villes très denses où les bâtiments couvrent presque entièrement le sol non occupé par les routes. Cette méthode permet de mieux prendre en compte les interactions

fluide-structure, à condition que le frottement sur les murs soit correctement défini. Elle offre également des économies de maillage à l'intérieur des bâtiments, bien que ces gains doivent être réinvestis à l'extérieur pour maintenir la précision des écoulements autour des structures. Cependant, son application devient problématique dans les zones urbaines très denses, comportant des ruelles étroites et des configurations complexes, où la modélisation des écoulements devient plus délicate. La Figure 3.7 présente le maillage BH appliqué au cas test.

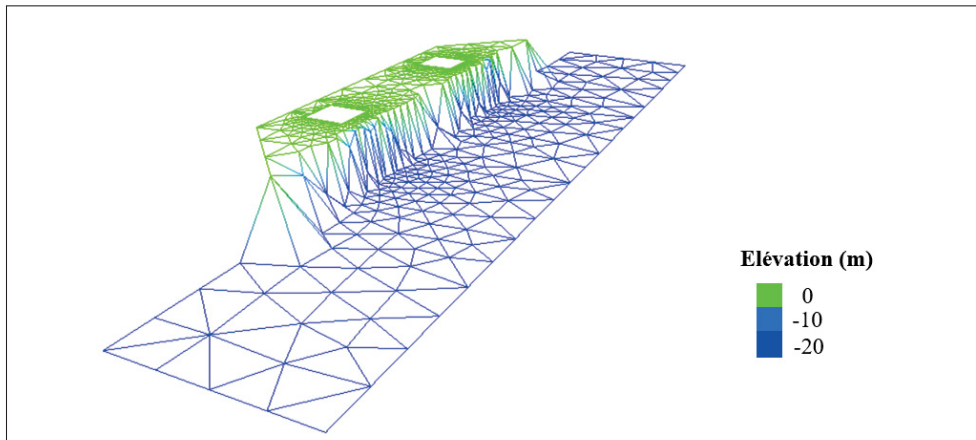


FIGURE 3.7 Maillage BH appliqué au cas test

3.2.3 Maillage par la méthode BR (Building Resistance)

La méthode de Résistance des Bâtiments (BR) est une approche simplifiée pour la modélisation des inondations urbaines, visant à représenter l'effet des bâtiments sur l'écoulement sans nécessiter une modélisation détaillée de leur géométrie. Elle repose sur l'attribution de coefficients de rugosité élevés aux zones construites afin de simuler la résistance qu'opposent les bâtiments à l'eau. Cette simplification permet de capturer les effets globaux des structures urbaines sur la dynamique des écoulements tout en réduisant la complexité computationnelle. La méthode BR est particulièrement utile lorsque des données détaillées sur la topographie et la disposition des bâtiments ne sont pas disponibles, offrant ainsi un compromis entre précision et efficacité. Son utilisation facilite l'évaluation des risques d'inondation et l'optimisation des stratégies de gestion en milieu urbain. La Figure 3.8 présente le maillage BR appliqué au cas test.

3.3 Méthode de représentation des bâtiments appliquée au cas Québec

3.3.1 Maillage par la méthode BB

Dans le cadre de la modélisation hydrodynamique appliquée à la ville de Québec, un maillage de type BB a été élaboré afin de représenter de manière explicite l'environnement urbain dense. Ce type de maillage, adopté aussi

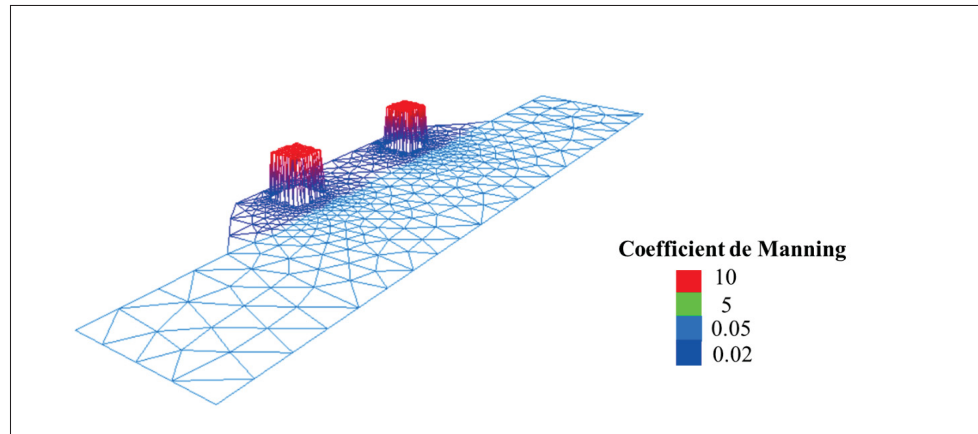


FIGURE 3.8 Maillage BR appliqué au cas test

par (Li, Liu, Mei, Shao, Wang & Yan, 2019 ; Schubert & Sanders, 2012) pour sa capacité à capturer avec précision les interactions entre l'écoulement et les structures bâties, intègre les bâtiments dont la hauteur est inférieure à 20 mètres, sur la base des altitudes extraites du Modèle Numérique de Surface (MNS). L'ensemble du tissu urbain, incluant les constructions, est discrétisé à l'aide d'éléments triangulaires irréguliers. La grille de calcul couvre à la fois le fleuve Saint-Laurent et la zone urbaine de Québec, avec une résolution spatiale variable : elle atteint 2 mètres au niveau des bâtiments, et s'élargit à 50 mètres dans les zones urbaines. Cette approche permet de capturer les détails fins de l'écoulement entre les bâtiments, tout en assurant une représentation efficace des écoulements à grande échelle dans le lit majeur. Ce type de maillage permet de mieux reproduire les effets de canalisation, de blocage ou de déviation des flux liés à la présence de structures bâties, offrant ainsi une représentation réaliste des dynamiques d'inondation en milieu urbain. La Figure 3.9 illustre le maillage BB appliqué dans la zone urbaine de la ville de Québec.

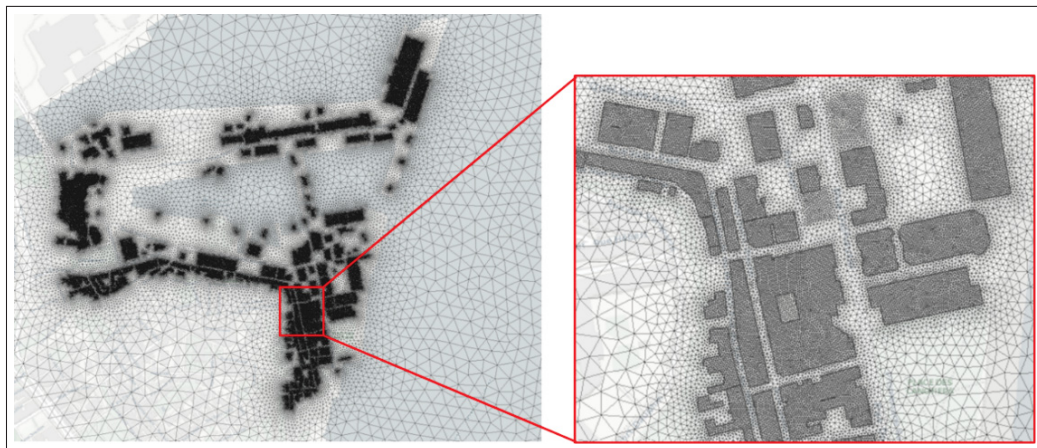


FIGURE 3.9 Maillage BB appliqué au cas Québec

3.3.2 Maillage par la méthode BH

Dans le cadre de la simulation hydrodynamique de la ville de Québec, un maillage de type BH a également été mis en œuvre, offrant une alternative efficace pour la prise en compte indirecte de l'effet des bâtiments sur l'écoulement. Contrairement au maillage BB, le type BH n'intègre pas explicitement les volumes bâtis dans la grille de calcul : il consiste à soustraire complètement les cellules de calcul coïncidant avec l'emprise des bâtiments.

Bien que le maillage BH présente des difficultés dans sa génération par rapport au maillage BB à cause de la nécessité d'adapter précisément les cellules aux contours complexes des bâtiments (Glenis, Kutija & Kilsby, 2018), il permet une réduction significative du nombre d'éléments de la grille, ce qui diminue les coûts de calcul, particulièrement dans les zones urbaines denses. Toutefois, cette simplification se fait au détriment de la précision dans la représentation des écoulements fins entre les bâtiments, en particulier lorsque ceux-ci forment des canaux étroits ou des obstacles complexes.

Dans le cadre de cette étude, différents tests de résolution ont été réalisés afin de comparer les performances des maillages BH et BB. Pour l'implémentation de la méthode BH, une zone tampon a été ajoutée autour de chaque bâtiment (Figure 3.10). Cette marge a été introduite afin d'éviter les problèmes liés au maillage, notamment la génération d'éléments dégénérés ou très fins autour des contours des bâtiments supprimés. Le choix spécifique de 2,4 mètres résulte d'un compromis visant à minimiser les chevauchements entre les zones tampons des bâtiments proches, tout en maintenant une qualité de maillage suffisante pour garantir la stabilité numérique et la fiabilité des simulations. Cette approche permet de mieux préserver l'intégrité structurelle du maillage et d'assurer une représentation plus réaliste de l'environnement urbain dans le modèle hydrodynamique.

Le résultat de l'application de cette méthode au cas de la ville de Québec est illustré en Figure 3.11.

3.3.3 Comparaison maillage BB et BH

3.3.3.1 Présentation des données

Pour analyser l'inondation du 23 décembre 2022 (détaillée au Chapitre 4), deux maillages distincts, BB et BH, ont été utilisés afin de simuler les écoulements hydrodynamiques dans le domaine d'étude. Les résultats ont été extraits à différents points clés, notamment au niveau du marégraphe Vieux-Québec, site de référence pour le suivi des variations du niveau d'eau du fleuve.

Le 23 décembre 2022, une opération de terrain a été menée par les agents municipaux de la Ville de Québec afin de documenter l'ampleur de l'événement d'inondation. Au total, des relevés de niveaux d'eau ont été réalisés en 47 sites entre 17h17 et 18h18 (HNE). La Figure 3.12 présente la répartition spatiale de ces points d'observation (OBS).

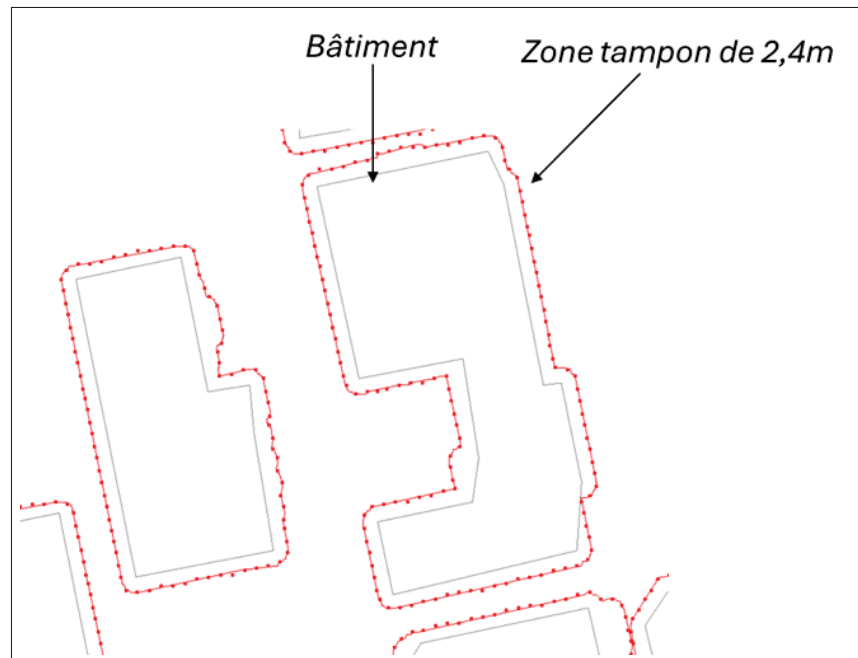


FIGURE 3.10 Zone tampon utilisée pour la génération du maillage BH

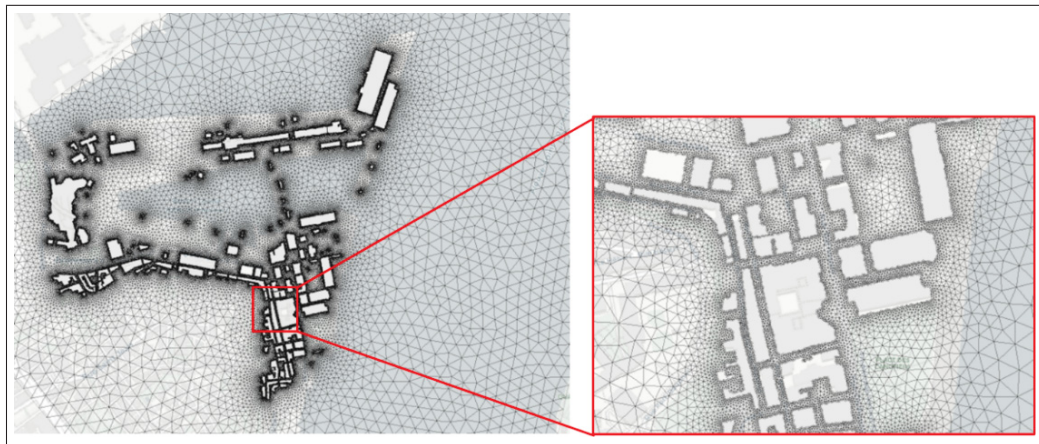


FIGURE 3.11 Maillage BH appliqué au cas Québec

En complément, des vidéos diffusées sur les réseaux sociaux fournissent des informations spatio-temporelles supplémentaires sur l'évolution de l'inondation. Ces séquences, notamment au point A (Figure 3.12), permettent d'affiner l'estimation des hauteurs d'eau grâce aux observations et aux enregistrements partagés par des journalistes, indiquant qu'une hauteur d'eau d'environ 1,17 mètre a pu être atteinte vers 18h00 (HNE) au point A. Cette configuration a permis d'évaluer l'influence du choix du maillage sur la précision des simulations, en comparant les hauteurs d'eau maximales, les temps d'arrivée des crues et la dynamique spatiale de l'inondation dans les milieux urbains et estuariens.

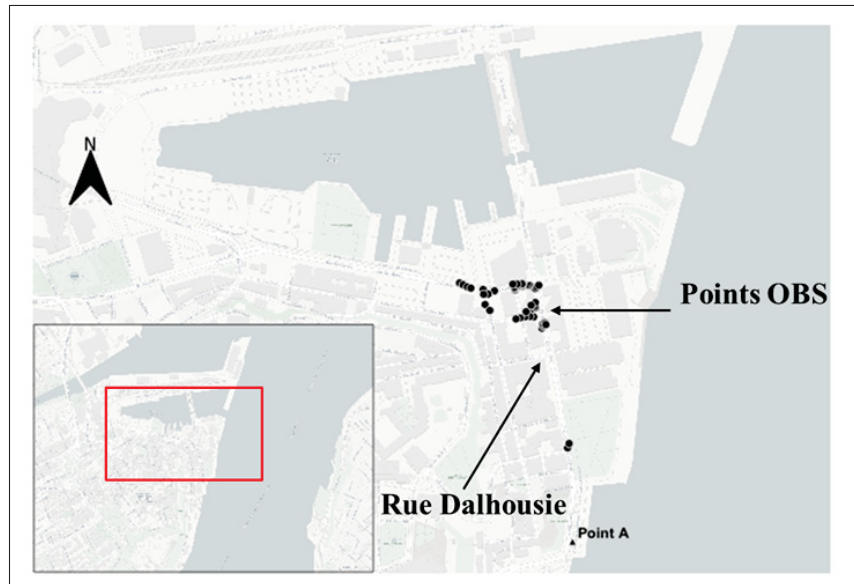


FIGURE 3.12 Localisation des points OBS et du point A dans le domaine urbain

3.3.3.2 Analyse des résultats

Au niveau du marégraphe Vieux-Québec (Figure 3.13), les simulations ont révélé une légère différence dans la représentation des pics d'inondation selon les paramètres utilisés. La simulation avec le maillage BH sous-estime le pic observé d'environ 6 cm, indiquant une légère sous-évaluation de l'ampleur de l'inondation. En revanche, la simulation avec le maillage BB surestime ce même pic de 12 cm, traduisant une tendance opposée à exagérer le niveau d'eau maximal. Ces écarts soulignent l'importance de la représentation des bâtiments dans la modélisation précise des phénomènes d'inondation, particulièrement dans les zones urbaines sensibles où de tels écarts peuvent avoir des conséquences significatives pour la gestion des risques.

La comparaison entre les hauteurs d'eau simulées et les observations aux points OBS ainsi qu'au point A met en évidence plusieurs tendances. Globalement, les hauteurs simulées par le maillage BH, représentées par les barres bleues, apparaissent sous-estimées par rapport aux hauteurs simulées par le maillage BB, indiquées par les barres vertes. La Figure 3.14 illustre cette comparaison pour l'ensemble des points OBS et le point A.

Parmi les deux maillages, le maillage BB semble mieux reproduire les hauteurs d'eau observées, notamment pour les points OBS, avec une légère surestimation dans la zone des points OBS1–OBS26. Concernant le point A, les trois séries de données sont globalement proches ; toutefois, la simulation avec le maillage BB tend à fournir une hauteur légèrement inférieure à celle obtenue avec le maillage BH.

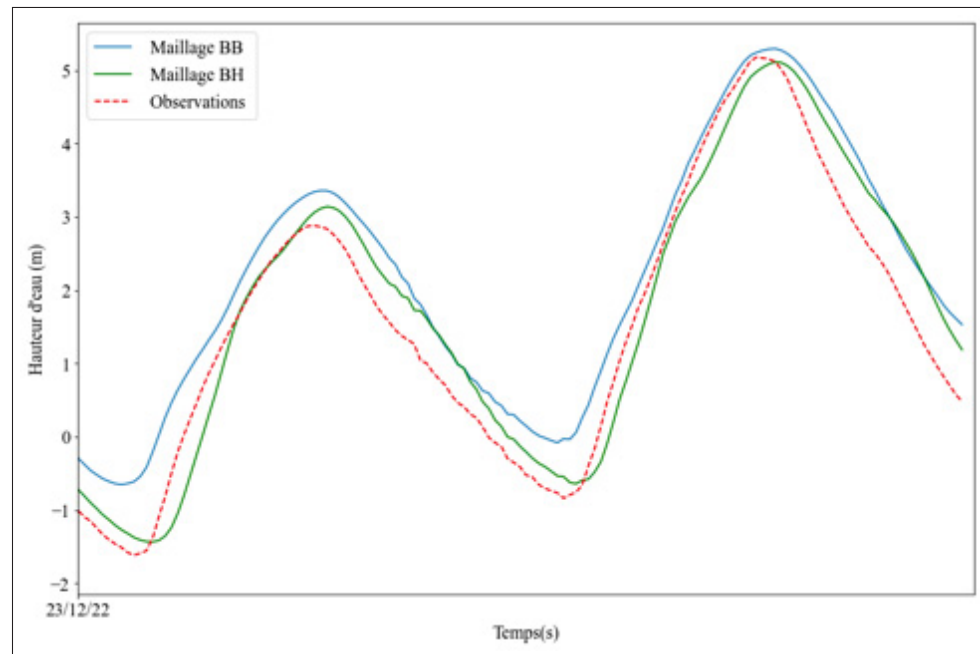


FIGURE 3.13 Localisation des points OBS et du point A dans le domaine urbain

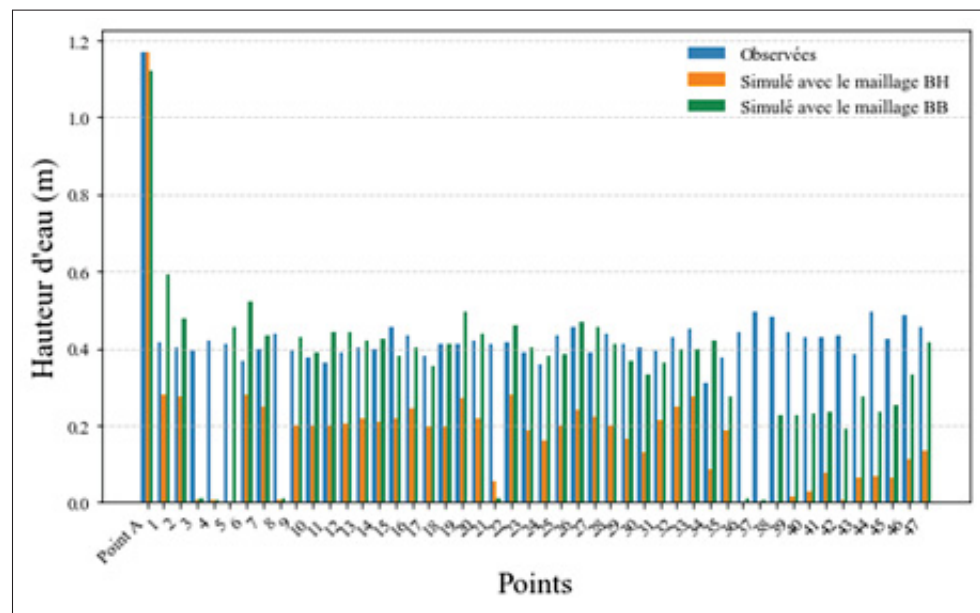


FIGURE 3.14 Localisation des points OBS et du point A dans le domaine urbain

Pour les vitesses, les résultats en Figure 3.15 montrent que les vitesses simulées avec le maillage Building Block (BB) sont globalement plus élevées que celles obtenues avec le maillage Building Hole (BH). Des écarts apparaissent notamment entre les points 15 et 30, tandis qu'en dehors de cette zone, les différences restent limitées, de l'ordre

de 0,1 à 0,3 m/s. Toutefois, la vitesse calculée avec le maillage BB dépasse 1 m/s, alors que celle obtenue avec BH demeure inférieure à 0,8 m/s. Ces résultats indiquent que le maillage BH ralentit l'écoulement à cause des conditions aux limites de non-glissement sur la paroi des bâtiments.

Un calcul de l'erreur absolue pour les valeurs de vitesse a été réalisé, la Figure 3.16 montre la répartition de ces erreurs dans le domaine urbain étudié :

$$\text{Erreur absolue} = |V_{BB} - V_{BH}|$$

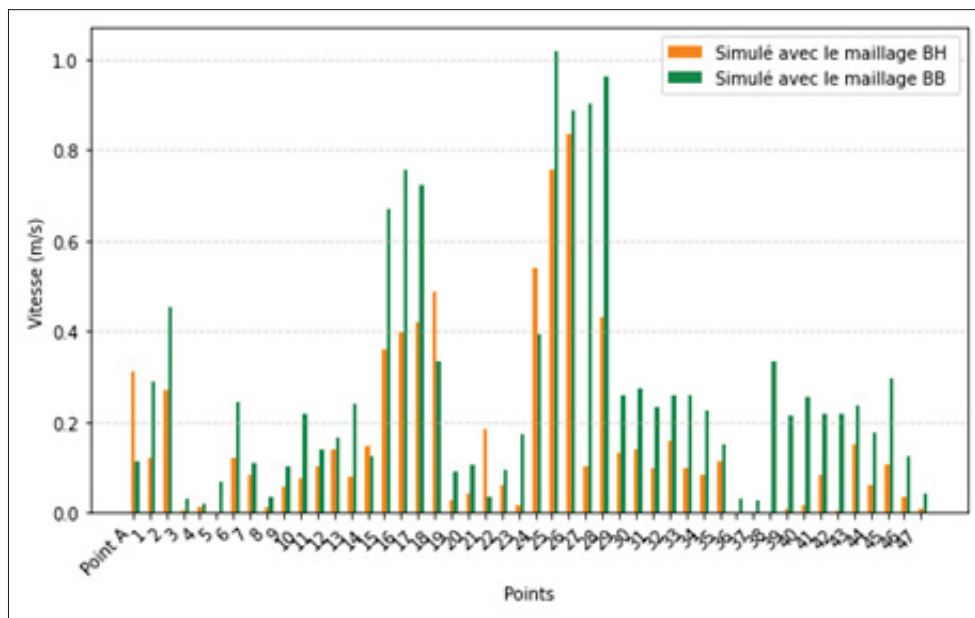


FIGURE 3.15 Comparaison des vitesses simulées avec BB et BH au niveau des points OBS et du point A

Dans l'ensemble, la majorité des points présentent une erreur faible, ce qui traduit une bonne cohérence entre les résultats obtenus avec les maillages BH et BB. Toutefois, des écarts plus marqués sont observés en certains points situés au centre de la rue Dalhousie, atteignant 0,4 à 0,8 m/s. Ces différences traduisent la forte complexité hydrodynamique de cette zone, liée à la présence d'un grand nombre d'obstacles. Elles montrent aussi l'effet des conditions aux limites de non-glissement appliquées par le maillage BH.

La Figure 3.17 présente l'étendue de l'inondation simulée avec les deux types de maillages BB et BH. Au point de départ de l'inondation, correspondant au point A, les deux maillages BH et BB produisent des hauteurs d'eau très similaires, témoignant d'une bonne concordance initiale des simulations. Cependant, à mesure que l'inondation progresse spatialement, une différence notable apparaît : le maillage BB favorise une extension plus large de l'inondation que le maillage BH.

l'étendue spatiale de l'inondation. En effet, dans ce maillage, les cellules correspondant aux bâtiments sont supprimées, ce qui signifie qu'aucune équation hydrodynamique n'est résolue dans ces zones. Par conséquent, dans les zones urbaines denses, l'écoulement rencontre de nombreuses discontinuités qui limitent son expansion, entraînant une accumulation d'eau en amont des obstacles.

3.4 Impact du vent dans la simulation d'inondation

3.4.1 Représentation du vent et paramètres de simulation dans TELEMAC-2D

L'effet du vent sur l'écoulement est intégré dans TELEMAC-2D par l'ajout d'un terme source dans les équations de Saint-Venant, représentant la contrainte de cisaillement exercée par le vent sur la surface libre (Hervouet, 2007). Ce terme traduit la force exercée par le vent sur la surface de l'eau. Cette force s'exprime selon les directions x et y par :

$$F_x = \frac{1}{h} \frac{\rho_{\text{air}}}{\rho_{\text{eau}}} a_{\text{vent}} U_{\text{vent}} \sqrt{U_{\text{vent}}^2 + V_{\text{vent}}^2} \quad (3.1)$$

$$F_y = \frac{1}{h} \frac{\rho_{\text{air}}}{\rho_{\text{eau}}} a_{\text{vent}} V_{\text{vent}} \sqrt{U_{\text{vent}}^2 + V_{\text{vent}}^2} \quad (3.2)$$

avec :

- F_x : composante de la force du vent selon la direction x (m.s^{-2})
- F_y : composante de la force du vent selon la direction y (m.s^{-2})
- h : hauteur d'eau (m)
- ρ_{air} : densité de l'air (kg.m^{-3})
- ρ_{eau} : densité de l'eau (kg.m^{-3})
- U_{vent} : composante de la vitesse suivant x (m.s^{-1})
- V_{vent} : composante de la vitesse suivant y (m.s^{-1})
- a_{vent} : coefficient d'influence du vent (sans dimension)

Le coefficient a_{vent} intègre les phénomènes complexes liés au transfert de quantité de mouvement air-eau, notamment :

- La rugosité de la surface libre
- Le fetch (distance sur laquelle le vent agit)
- Les effets de turbulence interfaciale

La documentation TELEMAC-2D propose des valeurs empiriques du coefficient a_{vent} en fonction de la vitesse du vent U_{vent} :

- Si $\|U_{\text{vent}}\| < 5 \text{ m/s}$: $a_{\text{vent}} = 0.565 \times 10^{-3}$
- Si $5 < \|U_{\text{vent}}\| < 19.22 \text{ m/s}$: $a_{\text{vent}} = (-0.12 + 0.137\|U_{\text{vent}}\|) \times 10^{-3}$
- Si $\|U_{\text{vent}}\| > 19.22 \text{ m/s}$: $a_{\text{vent}} = 2.513 \times 10^{-3}$

Cette relation traduit l'augmentation du transfert de quantité de mouvement air-eau avec la vitesse du vent, phénomène largement observé expérimentalement (Large & Pond, 1981 ; Wu, 1982). En pratique, TELEMAC-2D permet de définir plusieurs options de vent : vent constant dans le temps et l'espace, vent variable dans le temps (via un fichier atmosphérique ASCII), ou vent variable spatio-temporellement à travers une sous-routine spécifique.

Dans notre étude, l'analyse de l'effet du vent sur l'inondation est menée à travers deux types de scénarios : un vent uniforme dans l'espace et un vent non uniforme, afin de mieux saisir l'influence de la variabilité spatiale du forçage atmosphérique. La simulation utilise le maillage BB détaillé en section 3.3.1, assurant une résolution appropriée des zones côtières et urbaines.

3.4.2 Scénario de vent homogène

3.4.2.1 Données et hypothèses de modélisation du vent

Dans cette simulation, le vent est considéré spatialement homogène sur l'ensemble du domaine d'étude. La simulation utilise le maillage BB détaillé en section 3.3.1.

Les données de vent (vitesse et direction) proviennent de la station météorologique de l'aéroport international Jean-Lesage (Québec Intl A) pour la période du 21 au 25 décembre 2022 (Figure 3.18). Ces mesures horaires ont été intégrées au modèle hydrodynamique pour générer un champ de vent uniforme sur l'ensemble du domaine de calcul.

3.4.2.2 Analyse des résultats

L'analyse spatiale révèle que l'uniformité du forçage éolien génère une réponse hydrodynamique cohérente sur l'ensemble du domaine, facilitant l'identification des mécanismes de transfert de quantité de mouvement air-eau dans différentes configurations topographiques.

L'analyse comparative entre les simulations avec et sans forçage éolien révèle des modifications significatives de la dynamique temporelle d'inondation. La Figure 3.19 illustre l'évolution des hauteurs d'eau au point de contrôle A,

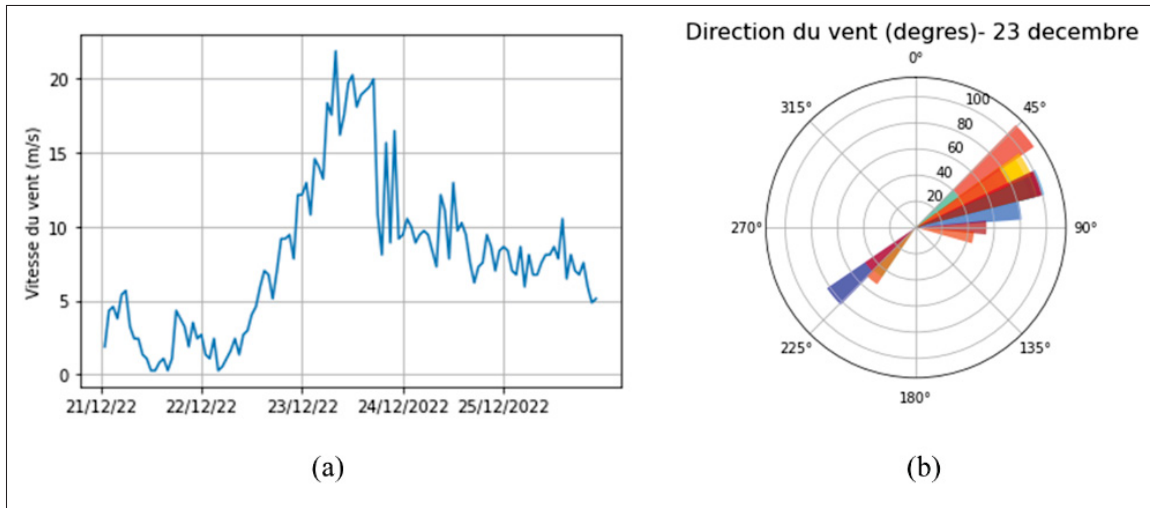


FIGURE 3.18 Données de vitesse de vent pour la période 21-25 décembre 2022 et direction du vent pour le 23 décembre 2022

où l'intégration du vent homogène génère une anticipation du pic d'inondation de 1800 secondes (30 minutes) par rapport au scénario de référence. Ce déphasage temporel s'explique par l'effet d'entraînement exercé par le vent sur la surface libre, qui augmente localement les vitesses d'écoulement et facilite la propagation de la vague de submersion vers les zones basses du domaine urbain (Gao, Li, Mo, Liu, & Hu, 2024; Shi et al., 2020).

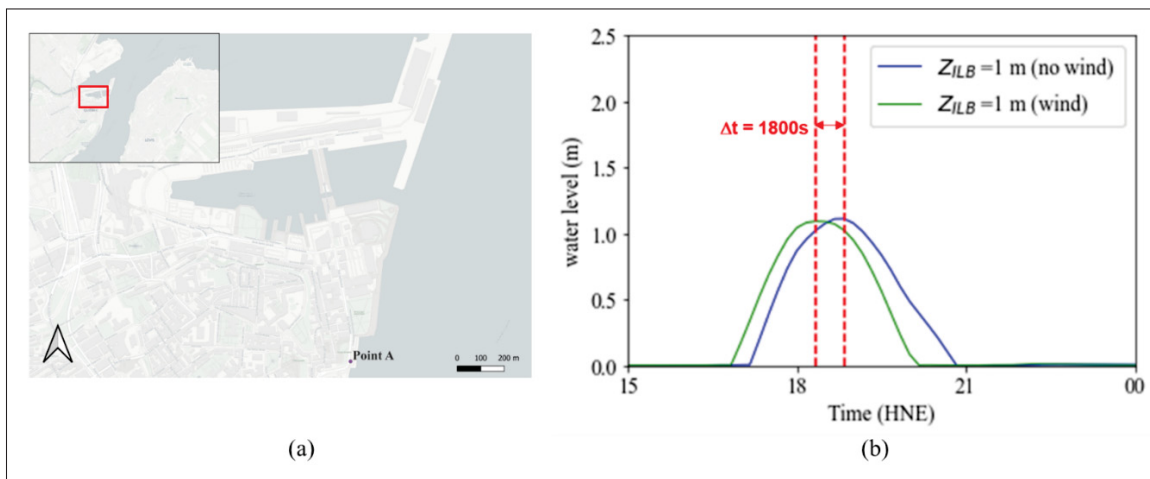


FIGURE 3.19 (a) Localisation du point A; (b) Comparaison du niveau d'eau simulé au point A avec ou sans vent.

Les mécanismes physiques identifiés confirment l'importance de l'intégration du vent dans la modélisation hydrodynamique urbaine. La contrainte de cisaillement exercée à l'interface air-eau, modulée par les paramètres empiriques du coefficient d'influence du vent, interagit avec la topographie urbaine pour modifier les motifs d'écoulement et redistribuer spatialement les zones d'accumulation d'eau. Cette interaction complexe se traduit par

une accélération de la propagation initiale de l'inondation et une modification des conditions hydrodynamiques locales. D'un point de vue opérationnel, l'intégration du vent homogène dans les simulations d'inondation urbaine apporte une modification notable de la représentativité des modèles, se traduisant par une anticipation de 30 minutes au niveau du pic d'inondation et une optimisation des délais de réponse pour la planification d'interventions d'urgence. Cependant, cette approche présente certaines limitations liées à la simplification de la variabilité spatiale réelle du vent et aux incertitudes associées aux paramètres empiriques du modèle de vent. Ces limitations soulignent la nécessité d'une validation étendue sur différents événements météorologiques et justifient l'évolution vers des configurations de vent non homogènes pour améliorer davantage la précision des simulations.

En résumé, les résultats obtenus avec le scénario de vent homogène montrent l'importance de l'intégration du vent dans la modélisation hydrodynamique urbaine, confirmant son rôle dans l'anticipation du pic d'inondation.

3.4.3 Scénario vent non-homogène

3.4.3.1 Données des stations météorologiques

Le vent peut influencer de manière significative la propagation d'inondation, surtout dans le cas d'un événement extrême. Intégrer les données de vent hétérogènes spatialement permet donc d'augmenter la précision et le réalisme des modèles. Toutefois, le réseau de stations météorologiques dans la zone d'étude est restreint.

Afin de faire une analyse du scénario avec vent variable, trois stations météorologiques ont été ajoutées pour représenter la variabilité spatiale et temporelle du vent dans la région de Québec : Beauport, Île d'Orléans et Cap Tourmente (Figure 3.20). Ces stations fournissent des données horaires détaillées sur la vitesse et la direction du vent, essentielles pour modéliser l'effet du forçage atmosphérique sur la surface libre. La distribution géographique de ces stations permet de couvrir à la fois les zones urbaines, fluviales et côtières, assurant ainsi une meilleure représentation des hétérogénéités spatiales du vent. Les données collectées ont été intégrées dans le modèle hydrodynamique afin d'évaluer plus précisément l'impact du vent sur les hauteurs d'eau simulées, les vitesses d'écoulement et les dynamiques d'inondation, notamment dans les secteurs sensibles à la canalisation ou à l'amplification des effets du vent. Cette approche permet une simulation plus réaliste des scénarios extrêmes, en tenant compte des conditions atmosphériques observées dans différentes configurations topographiques et environnementales.

3.4.3.2 Interpolation des données

Le nombre de stations météorologiques disponibles dans la zone d'étude (quatre stations au total) est limité et leur espacement est relativement important pour capter fidèlement l'hétérogénéité du vent. Les quatre stations situées à Cap-Tourmente, Beauport, l'aéroport Jean-Lesage et l'Île d'Orléans ont tout de même été incorporées pour analyser

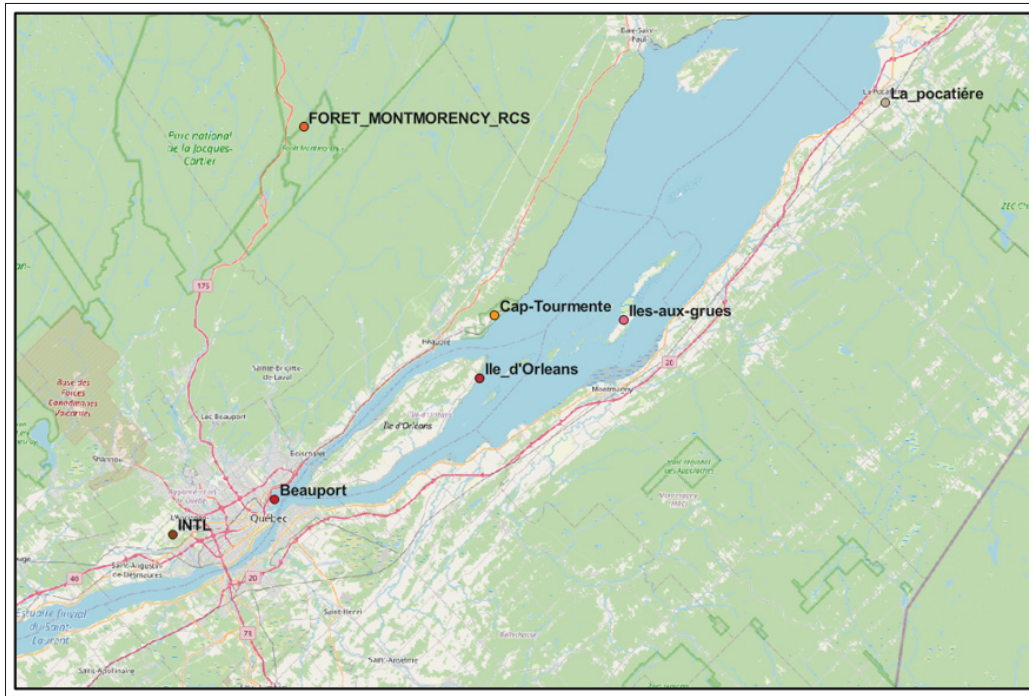


FIGURE 3.20 Les différentes stations de vent disponibles dans la zone d'étude : Aéroport International Québec (INTL), Beauport, Île d'Orléans, Îles aux-Grues, Cap-Tourmente, La Pocatière, Forêt Montmorency.

leur effet sur l'inondation. La Figure 3.21 représente le champ de vent interpolé à partir de ces quatre stations, obtenu à l'aide de la méthode de pondération inverse de la distance (IDW, $1/d^p$). On indique par p le poids utilisé pour la méthode d'interpolation ($p = 1, 2, 0.5$).

Les résultats de la Figure 3.22 montrent que l'inclusion du vent, qu'il soit homogène ou non homogène (NHW, $p=2$), se traduit principalement par un déplacement du temps d'arrivée du pic d'inondation, tandis que les variations d'amplitude d'inondation demeurent relativement faibles. En revanche, lorsqu'on abaisse la puissance d'interpolation (NHW, $p=1$ ou 0.5), les résultats changent : plus le rayon de pondération spatiale s'étend (par exemple à 50 % du rayon de base), plus le niveau d'eau simulé augmente. On constate ainsi que le choix du paramètre p influe sur les résultats, en fonction du nombre et de la qualité des stations. En théorie, le krigeage bayésien empirique (EBK), outil qu'on emploie pour tisser ensemble les relevés bathymétriques et topographiques, pourrait réduire les erreurs d'interpolation liées au jeu de données du vent. Cependant, cela dépasse le cadre de notre présente étude à cause du nombre limité de stations disponibles.

3.4.4 Synthèse

Le chapitre 3 présente les outils et les approches numériques employés pour reproduire la dynamique des inondations urbaines et côtières. L'étude commence par une analyse du front sec/mouillé à travers un cas test, mettant en avant



FIGURE 3.21 La zone d'influence 50% selon les poids IDW dans la zone d'étude

l'importance cruciale d'un traitement rigoureux de ce front pour garantir la stabilité numérique des simulations et la justesse des hauteurs d'eau, surtout dans les cas d'inondation.

Par la suite, le chapitre examine plusieurs façons de modéliser les bâtiments : Building Block (BB), Building Hole (BH) et Building Resistance (BR). Lorsqu'on les applique au cas de la ville de Québec, on constate que le choix de la méthode impacte la propagation des inondations et les vitesses d'écoulement.

L'impact du vent a également été examiné à l'aide de scénarios tant homogènes que non-homogènes. Les résultats révèlent que le vent modifie surtout le moment d'apparition des pics d'inondation, alors que leurs amplitudes restent presque inchangées. Le paramètre de pondération spatiale p de l'interpolation des données de vent a aussi son impact sur la chronologie du pic d'inondation. Des méthodes comme EBK pourraient également être utilisées pour réduire les incertitudes d'interpolation.

En conclusion, ce chapitre montre que la précision des simulations d'inondation repose à la fois sur la méthode de traitement du front sec/mouillé, sur la représentation détaillée des bâtiments et sur l'intégration de l'effet du vent. Ces outils constituent le socle méthodologique indispensable aux études des événements d'inondation.

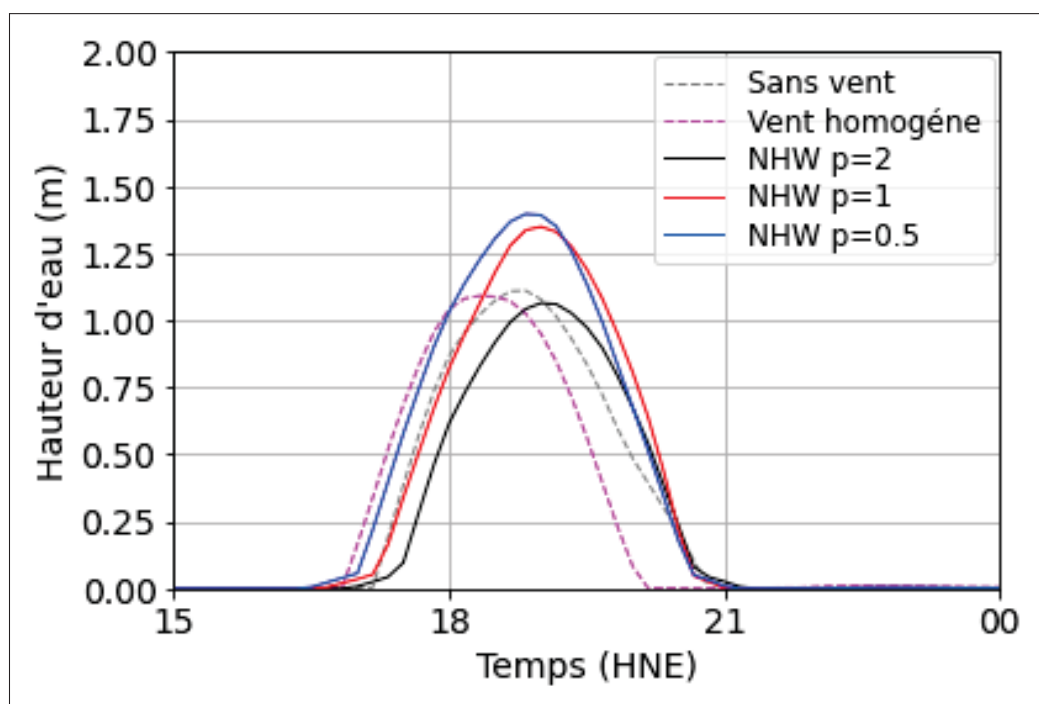


FIGURE 3.22 Hauteurs d'eau simulées au niveau du point A pour les différentes simulations, sans vent, avec vent homogène, vent non homogène et interpolation IDW ($p=1$, $p=2$, $p=0.5$)

CHAPITRE 4

STRENGTHENING COASTAL FLOOD FORECASTING THROUGH EVENT-BASED DATA CAPITALIZATION : A CASE STUDY FROM THE DECEMBER 2022 STORM SURGE IN QUÉBEC CITY

Sara Abair^{1,2}, Abdelkader Hammouti^{1,2}, Juzer Noman³, Sylvie Daniel³, Damien Pham Van Bang^{1,2}

¹ Centre Eau-Terre-Environnement, Institut National de la Recherche Scientifique (INRS),
Université du Québec, Québec, Canada

² École de Technologie Supérieure (ÉTS), Montréal, Canada

³ Université Laval, Québec, Canada

Article publié dans 'Natural Hazards', Décembre 2025

Abstract

The maritime conditions due to climate change, such as sea level rise, storm surge, and river discharge, will worsen coastal risks, including submersion and erosion, in the lowlands. Flood risk mapping is necessary to help decision-makers in coastal management. Compared to the standard GIS-based (or Bathtub) model assessing flooded zone expansion from a stationary approach, hydrodynamic models enable a dynamic description of water level and velocity during the flooding. Such information is particularly relevant for evaluating the depth–velocity flood danger level to define an optimal crisis management or evacuation plan.

This research aims to validate a 2D hydrodynamic model of the Saint-Lawrence Fluvial Estuary (SLFE) for coastal flooding risk management in Quebec City and use it to analyze the flood event of December 23rd, 2022. The model results from an integration of multisource data for topography and bathymetry, as well as their fusion and interpolation. With a computational grid and variable resolution from 2 m in the urbanized area to 250 m in the SLFE, the model captures flow patterns in the inundated urban zone during macro-tidal or spring tide. Results indicate that the wind can influence water levels in urban areas and that the urban configuration in Quebec City can also affect the flooding process.

Keywords : 2D hydrodynamic model ; geomantic resolution ; model validation ; urban flood

4.1 Introduction

The coastal, estuarine, and continental aquatic environments are privileged areas where numerous human activities (residence, tourism) and societal activities such as maritime trade and industries requiring access to water and fisheries resources are concentrated. The number of people currently occupying land located 10 m above high tide lines worldwide is estimated to be one billion, with 230 million located between 5 and 10 m above high tide lines (Kulp & Strauss, 2019).

According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), climate change will manifest in coastal areas through a global rise in sea levels, an increase in the frequency and severity of extreme events such as marine submersions (Kulp & Strauss, 2019), shoreline erosion, and ocean acidification. Moreover, these phenomena appear to be accelerating on the North American Atlantic coast (Boon, 2012; Chouinard, Plante & Martin, 2008). In their sixth assessment report (AR6), the IPCC estimates that an average rise between 0.6 m and 1.1 m is generally expected by the end of the century (Mel, Lo Feudo, Miceli & Maiolo, 2023). However, it is conceivable that sea level rise (SLR) could exceed 2 m because of the instability of the Antarctic and Greenland ice sheets (Horton, Khan, Cahill, Lee, Shaw, Garner, Kemp, Engelhart & Rahmstorf, 2020; Khojasteh *et al.*, 2021).

Moreover, in the context of coastal areas, the estimation does not account for specific local factors such as astronomical tides and meteorological-maritime surges (atmospheric depressions, winds). These phenomena can be accentuated in estuaries with strong convergence (Khojasteh *et al.*, 2021). For instance, SLR increases the water level in estuaries, leading to tidal inundation floods (Hanslow, Morris, Foulsham & Kinsela, 2018). This contributes to an underestimation of the necessity for flood risk mapping. Hence, there is a critical need to develop accurate flood risk mapping techniques, which are essential for informed decision-making in coastal management and crisis planning.

Various methodologies can be used to delineate flood-prone areas. These methodologies may rely on geomatic data, particularly topography, or fundamental principles of physics, notably hydrodynamics. Historically, geospatial information system (GIS)-based models, also called “Bathtub” models, were used to estimate flood expansion from a stationary perspective. Based on the Digital Elevation Model (DEM), these models assess the flood risk by identifying regions with lower elevations than the projected future water level (Seenath *et al.*, 2016). Bathtub models consider all regions with elevation below the projected flood level vulnerable to flooding (Yunus *et al.*, 2016). Despite being efficient in rapidly predicting flood extent, these models frequently overestimate exposure to episodic floods, potentially leading to overengineered protection structures (Ramirez, Lichter, Coulthard & Skinner, 2016; Seenath *et al.*, 2016). Moreover, they do not incorporate morphological processes as they rely on a static topography (Kulp & Strauss, 2019).

On the other hand, hydrodynamic models consider fluid mechanics principles to describe water flows in coastal environments (Seenath *et al.*, 2016). This modeling approach solves the governing Navier–Stokes equations derived from Newton’s second law applied to fluids (Kantha & Clayson, 2000). Hydrodynamic models determine water depth and velocity while accounting for bed friction, natural or artificial barriers, and different turbulent processes affecting the flow in complex bathymetry (Seenath *et al.*, 2016). Hence, when predicting the impact of SLR in urbanized lowlands near macro-tidal and hypersynchronous estuaries, hydrodynamic models are more accurate than Bathhtub models (Khojasteh *et al.*, 2021).

The influence of elevation data precision and accuracy is specific to estuarine regions. Within estuaries and when employing models with meticulous horizontal resolution, factors such as storm surge, tide amplitude, and flow rates have a substantial impact on the delineation of inundated regions compared to variations in the diverse elevation models utilized to underpin the simulation (Araújo, Mazzolari & Trigo-Teixeira, 2013 ; Falcão AP & Pestana R, 2016). However, meshes in urban areas should describe geometry well and combine simplicity and realism to maintain the key features that affect flow (Gargallo-Peiró, Folch & Roca, 2016).

Flood extent can be estimated through various dimensional approaches. Although the one-dimensional (1D) approach consumes minimal input data, it facilitates the estimation of flood velocities and water levels. The two-dimensional (2D) approach, which is more complex, employs a mesh made up of several polygonal cells corresponding to topographical elements of river terrains and floodplains, which offers high precision, especially for complex riverine systems (Papaioannou, Loukas, Vasiliades & Aronica, 2016). Advancements in flood simulation have led to the recognition and adaptation of coupled 1D/2D models in the scientific community (Li *et al.*, 2019 ; Werner, 2004). However, 2D hydrodynamic models seem suitable for handling complex flooding processes in large urban landscapes due to their effectiveness in simulating complex lateral unsteady flow dynamics, including backflow in floodplains (Merwade, Olivera, Arabi & Edleman, 2008 ; Pinos & Timbe, 2019). Nevertheless, the accuracy of the 2D modeling process and its simulation results can be affected by multiple sources of uncertainty, such as input data, model structure, and model parameters. A calibration process involving the use of detailed historical flood data from past events is essential to mitigate these uncertainties (Papaioannou *et al.*, 2016). However, calibration and validation of the simulation performance of the developed models can prove difficult, as depth and velocity measurements associated with severe flooding are rarely available (Merwade *et al.*, 2008).

As documented in El-Sabh & Silverberg (1990), different analytical and numerical models were developed to give a general comprehension of tide propagation within the Saint Lawrence River. The ONE-D model (Dailey JE, 1972) is one of those numerical models that provides water level predictions in the fluvial estuary (Lefaivre D & , (2009). Many other 2D and 3D models were also developed (Leclerc, Bellemare & Trussard, 1990 ; Matte, Secretan & Morin, 2017a,1 ; Saucier & Chassé, 2000 ; Saucier, Roy, Gilbert, Pellerin & Ritchie, 2003). Few of these studies focused on

the fluvial and middle estuary. Furthermore, this part of the estuary is characterized by a high population density and high tides (Matte, 2014), which could exacerbate the flood vulnerability in the lowlands near the estuary.

On the period of 21–26 December 2022, North America was exposed to a historic winter storm generated by an extratropical cyclone. The storm, named Elliott, produced record-low temperatures, blizzards, strong winds, and snowfall across the United States and many parts of Canada¹. In addition to causing significant damage and power shortages, the storm and the accompanying cold wave caused at least 100 deaths². In Quebec City, the wind exceeded 50 km/h for several hours according³ to Environment and Climate Change Canada (ECCC).

Quebec City is a particular case where the confluence of river dynamics and urban development presents a flooding challenge. The access to water level during the flooding, measured by local authorities (City of Quebec) and data published on social media platforms, can provide relevant insight for the post-event analysis. The study presents a comprehensive model to simulate the urban hydrodynamics, including velocities in the urban area, during the flood event of December 23rd, 2022, relying on these data to assess validation of the inundation model.

4.2 Description of the site

The St. Lawrence Estuary (SLE) is one of the widest and deepest estuaries in North America, with a length of 400 km and a depth of 350 m. It is the river with the second largest discharge in North America, with an average annual flow of 12 600 m³/s at Quebec City and a watershed of more than one million km² (Hudon & Carignan, 2008).

To investigate coastal inundation in the urban area of Quebec City, we delimited our study area (Figure 4.1) to the transitional zone between the fluvial and middle estuaries. This area is 120 km long, extending from Baie Saint-Paul (north limit) to Neuville (south limit). This selected area is situated in a strong convergence zone of the estuary (the city name is derived from the Indigenous term “Kébec”, signifying “where the river narrows”). The river width decreases from 25 km at Baie Saint-Paul to a few kilometers at Neuville.

Due to this location, tidal dynamics in this part of the estuary are semi-diurnal and macrotidal, with a tidal range of around 5 m in Québec City. The tide in this part is asymmetric hypersynchronous due to the dominant effect of convergence relative to friction (Forrester, 1972; Godin, 1999). The evolution of tidal components from Baie Saint-Paul up to Montreal is reported by Matte (2014), providing valuable insight into tidal behavior in this transitional zone. Furthermore, the zone of interest is also exposed to waves coming principally from the east (Drapeau, 1992).

¹ <https://www.weather.gov/arx/dec2322>

² <https://www.lesoleil.com/2022/12/24;https://weather.com/news/news/2022-12-26-winter-storm-elliott-buffalo-blizzard-erie-county>

³ <https://climate.weather.gc.ca>

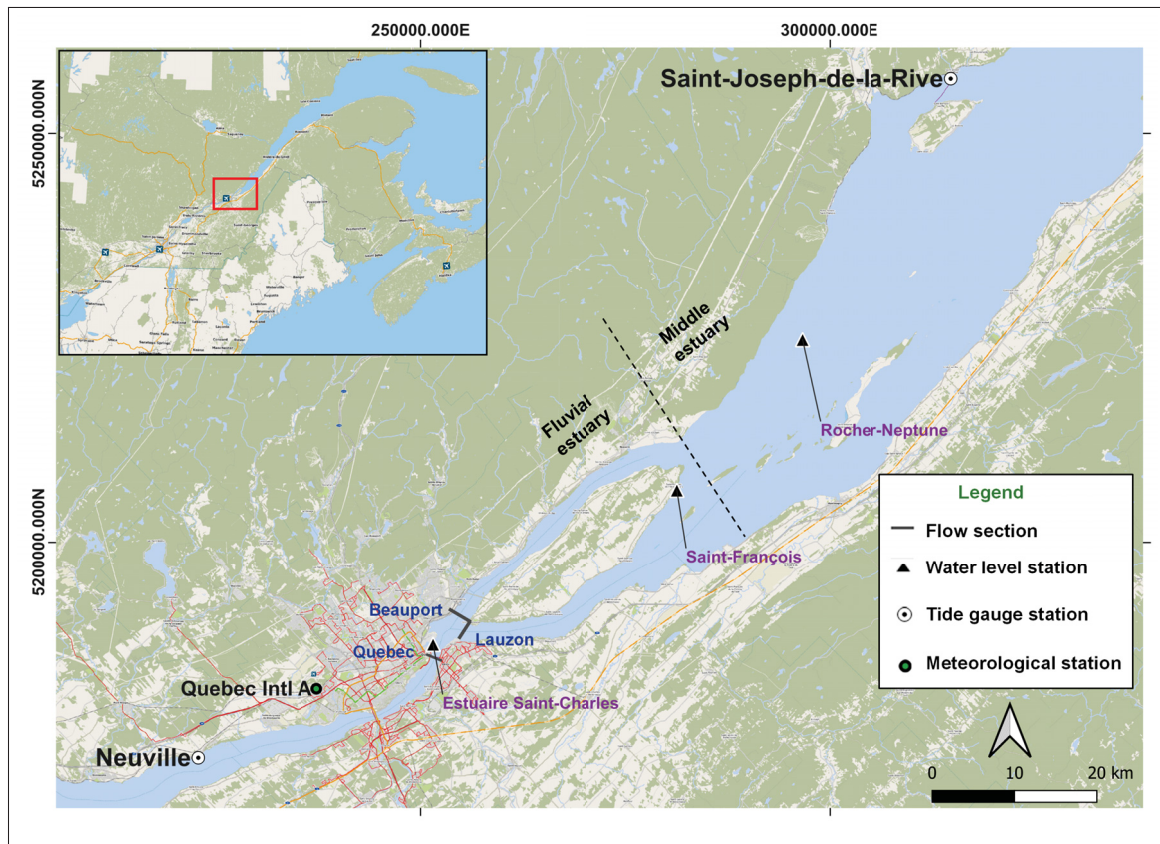


FIGURE 4.1 Layout map of the study area (Quebec, Canada)

4.2.1 Consistent bathymetric data

Bathymetry is critical data for hydrodynamic modeling studies. Therefore, the bathymetry of shallow areas is of pivotal importance in reproducing and numerically modeling storm surges (Dube, Murty, Feyen et al., 2010). Table 4.1 provides the inventory of bathymetric data sets employed in this study. It results from a diverse range of accessible open-source data predominantly from governmental sources⁴. Bathymetric data were mainly recuperated from the Canadian Hydrographic Services (CHS). They are principally sourced from the NONNA (Non-Navigational Bathymetric Data) data, a combination of all datasets available at the disposal of the SHC. Although this data consists of 1373 varying datasets collected from 1990 to present, each data point in the integrated dataset represents the most up-to-date or shallowest bathymetric value. Compilation in Table 4.1 also includes datasets from municipal partners such as CMQuebec (Quebec Metropolitan Community) or the city of Quebec, Quebec Ministry of Transport (MTQ) and new measurements obtained by a more recent bathymetric survey, especially during the project RQM-OSIRISQ (2020-2022). For such a large multi-temporal and multisource dataset, it is challenging to

⁴ <https://data.chs-shc.ca/dashboard/map>

assess the global accuracy of the compilation. However, a cross-validation method discussed below can be used to estimate uncertainties.

TABLEAU 4.1 Integration of multi-source bathymetric and topometric data.

Multisource data	Year	From	To	Produced/distributed by
Multibeam	2010	Quebec City	Ile d'Orléans	CMQuebec
Multibeam	2015	Quebec City	Ile d'Orléans	CMQuebec
Single beam	2015	Beauport	Saint-Anne de Beaupré	MTQ
Multibeam	2019	Quebec City	Quebec City	City of Quebec
NONNA	2021	Neuville	Baie Saint- Paul	SHC
Multibeam	2022	Ile d'Orléans	Baie Saint-Paul	OSIRISQ
Topo-lidar	2011	Beaupré	Baie Saint-Paul	Government of Quebec
Topo-lidar	2012	Neuville	Quebec City	Government of Quebec
Topo-lidar	2013	Neuville	Beaupré	MFFP
Topo-lidar	2016	Sainte Croix	Lévis	MFFP
Topo-lidar	2016	Quebec City	Ile d'Orléans	CMQuebec
Topo-lidar	2017	Sainte Croix	Saint Jean-Port Joli	CMQuebec
Topo-lidar	2019	Quebec City	Beauport	CMQuebec

4.2.2 Topographic Lidar data in urban area

Similarly, Table 4.1 outlines the compilation of topographic data for this study. This data was procured from high-resolution LIDAR data provided by the Government and Municipalities of Quebec⁵ or the Quebec Ministry of Parks and Forest⁶ (MFFP) with some update by the local authority, i.e., the city of Quebec or the partner CMQuebec. As detailed in Table 4.1, the data sources within the region of interest are a collection of data over the last decade, which could represent significant spatial and temporal variability from one data set to the next, especially in urban areas.

For the topographic data in the dense urban area, this study has considered the last high-resolution data provided by the Lidar survey in 2019 by CMQuebec (Table 4.1). The dataset consists of a density of 4 points/m² with horizontal accuracy of 50 cm and vertical accuracy equal to 15 cm. Figure 4.2 illustrates the topographic data in the lower coasts of Quebec City near the port.

4.2.3 Topo-bathymetric digital elevation model

The generation of the topo-bathymetric digital elevation model that includes high resolution in the urban area and moderate resolution in the maritime zone for the hydrodynamic coastal model needs to follow different steps as detailed in Noman *et al.* (2023).

⁵ <https://data.chs-shc.ca/dashboard/map>

⁶ <https://www.foretouverte.gouv.qc.ca>

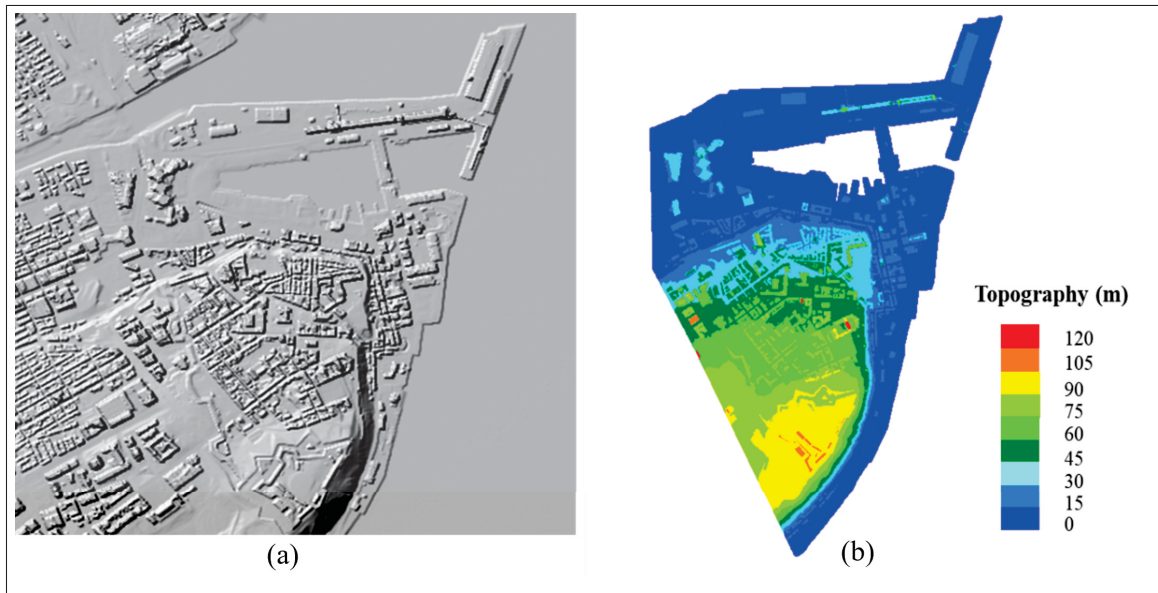


FIGURE 4.2 High resolution Lidar data (1m) in greyscale elevation (a), and in a classified version (b)

Creating a consistent topo-bathymetric dataset requires identifying, collecting, and characterizing the available dataset including the survey area, the survey date, resolution, type of equipment, resolution and measuring condition. Datum conversion is essential for bathymetric and topographic data to ensure consistency across all data within the same horizontal and vertical reference. In this study, NRCAN NTV2⁷ (Natural Resources Canada) national transformation was employed for converting horizontal systems complemented by a separation surface for transforming vertical systems produced by SHC. All data was converted to a uniform horizontal and vertical datum MTM 7 NAD83CSRS, CGVD28 (HT2.0).

To create a coherent dataset from the multisource collections, it is necessary to assess the data overlap. This assessment is essential to simplify the data and avoid redundancy. When choosing data, priority is given to a more recent collection or a collection with a more advanced sensor. Generally, old data should be replaced by newer data that uses the most accurate technology. Tests on coherence are processed in terms of resolution, density and uncertainty using a variogram analysis, which characterizes the spatial continuity in the elevation values of the combined data sets.

The next step consists in merging the four data components, namely the bathymetry of the estuary, the topography of the lowlands and the urban area, and the digital terrain interface (DTI) with an elevation between -5 and +5 m. For the DTI model, this study considers the methodology by Falcão AP & Pestana R (2016). The fluvial estuary morphology is reconstructed by delineating the left and right banks based on the elevation (topographic and bathymetric) dataset and employing weighted regression as developed by Gallant & Austin (2009).

⁷ <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ntv2.php>

The subsequent step performs the data interpolation to obtain a smooth surface without artifacts and misrepresented features. Here we used an Empirical Bayesian Kriging (EBK) method Danielson, Poppenga, Brock et al. (2016); Zhang *et al.* (2015). The EBK methodology is a non-stationary kriging method that relies on an intrinsic random function. It predicts the semivariogram and estimates the error through repeated simulations, enhancing the accuracy of the interpolation.

The final step consists in estimating the uncertainties of the multisource digital topo-bathymetric model. Determining the spatial distribution error poses challenges, primarily due to the absence of real values for comparison. To address this issue, a cross-validation technique can be employed that consists of predicting the value of an omitted (or removed) point. Comparing the projected values for the omitted points with the actual value for each omitted point and subsequently repeating this operation for all points provides an adequate understanding of the global uncertainty of the digital surface model as pointed out by Burrough & McDonnell (1998).

After these four steps, the Topo-Bathymetric Digital Elevation Model (TBDEM) has successfully covered the area of interest. The numerical simulation for flood prediction can be implemented.

The proposed EBK based method reduces errors by about 25% compared to other methodologies Danielson *et al.* (2016) for building TBDEM. Specifically, we observe that the corrected data has an error of 0.6 m in the shallow water zone and 0.25 m for the urban zone. It is important to note that the error quantification is the result of the cross-validation technique on all points.

4.3 Hydrodynamic model and verification

4.3.1 Governing equations

The coastal inundation flow is particularly complex in a densely populated area as the location of wet zones evolves dynamically with tides or water levels. High resolution in time and space is required to represent the urban zone, buildings, and equipment with fidelity to capture correctly the interbuilding channeling flow or the localized accumulation of water changing with time.

The time evolution and spatial expansion of the wetted zone accounting for the complex geometry in the urban area can be simulated by solving the shallow water, or Saint-Venant, equations :

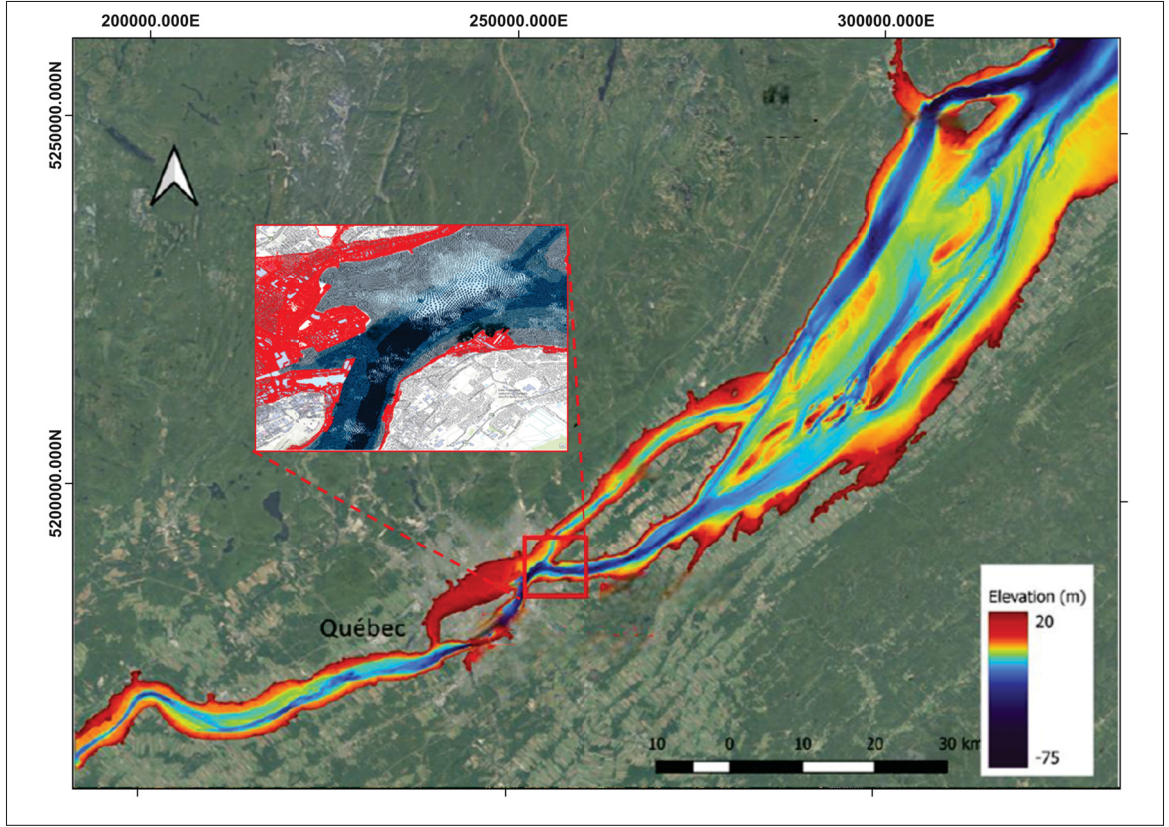


FIGURE 4.3 The final topo-bathymetric digital elevation model, the topography is shown in red, and bathymetry is shown in blue (46 million points)

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{1}{h} \nabla \cdot (h \nu_e \nabla U) + F_x, \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial z_s}{\partial y} + \frac{1}{h} \nabla \cdot (h \nu_e \nabla V) + F_y, \end{cases} \quad (4.1)$$

where h stands for the water depth (m), U and V the depth-averaged velocity (m/s), g the gravity constant (m/s^2), z_s the free surface elevation (m), ν_e the effective diffusion (m^2/s) for turbulence, F_x and F_y are source/sink terms (m/s^2) that include Coriolis, wind, and friction effects.

The present study uses the TELEMAC-MASCARET modeling system to solve the set of equations (4.1). The hydro-informatic system is freely available as an open-source code : the unstructured finite element method and the 2D depth-integrated version is used herein. Mathematical descriptions are fully detailed in Hervouet (2007). The Telemac2D operational tool is successfully applied for many engineering problems involving free surface flows in

complex geometry. This hydrodynamic study is conducted with Telemac2D which offers future possibilities for easy extension to 3D and sediment transport coupling.

Wind stresses are calculated using Flather's formula and bottom friction by Manning's formula :

$$\tau_w = \rho_{\text{air}} a_w \sqrt{U_{w10}^2 + V_{w10}^2} U_{w10}, \quad a_w = F_w(U_{w10}) \quad (4.2)$$

$$\vec{\tau}_f = -\frac{1}{2} \rho C_f \sqrt{U^2 + V^2} \vec{U}, \quad C_f = \frac{2gn^2}{h^{1/3}} \quad (4.3)$$

where τ_w (or τ_f) stands for wind (or friction) shear stress (kg/m/s²), ρ_{air} (or ρ) is the density of air (or water) (kg/m³), C_f is the friction coefficient which depends on Manning coefficient n (s/m^{1/3}) and a_w is the wind parameter given by Flather. The subscript $w10$ is for wind velocity 10 m above the water surface.

For this study, the effective diffusivity, ν_e , is derived from the k-epsilon turbulent model. As Matte *et al.* (2017a), the model was calibrated from Neuville to Saint Joseph de la Rive where water-level conditions are defined from tide gauge data. Also, this study, which primarily aims to simulate coastal flooding driven by storm surge, did not include the urban drainage system. This omission is justified by the fact that the incoming flows during storm events greatly exceed the maximum discharge capacity of the urban drainage system. While the drainage network could play a more significant role during the recession phase, this aspect falls outside the scope of the present study.

4.3.2 Computational meshing

We employ the complete TBDEM covering the river and land domains with a super-resolution in the urban zone. To reduce the computational cost, only points with elevation lower than 20 m are considered for the meshing operation. To determine the spatial resolution for the mesh, a sensitivity analysis was conducted. A resolution of 50 m was selected for the river confluence/diffuence zone near the city of Quebec and around the Île d'Orléans. This choice is consistent with the findings of Matte (2014). Outside the area of interest, a resolution of 250 m was chosen upstream and downstream to minimize computation time. Figure 4.4 presents the resulting optimal mesh from the calibration of the numerical flow model.

Nearest-neighbor interpolation was employed to generate the final computational meshing nodes. In total, the computational grid contains 532,274 elements and 268,752 nodes to cover the area of interest.

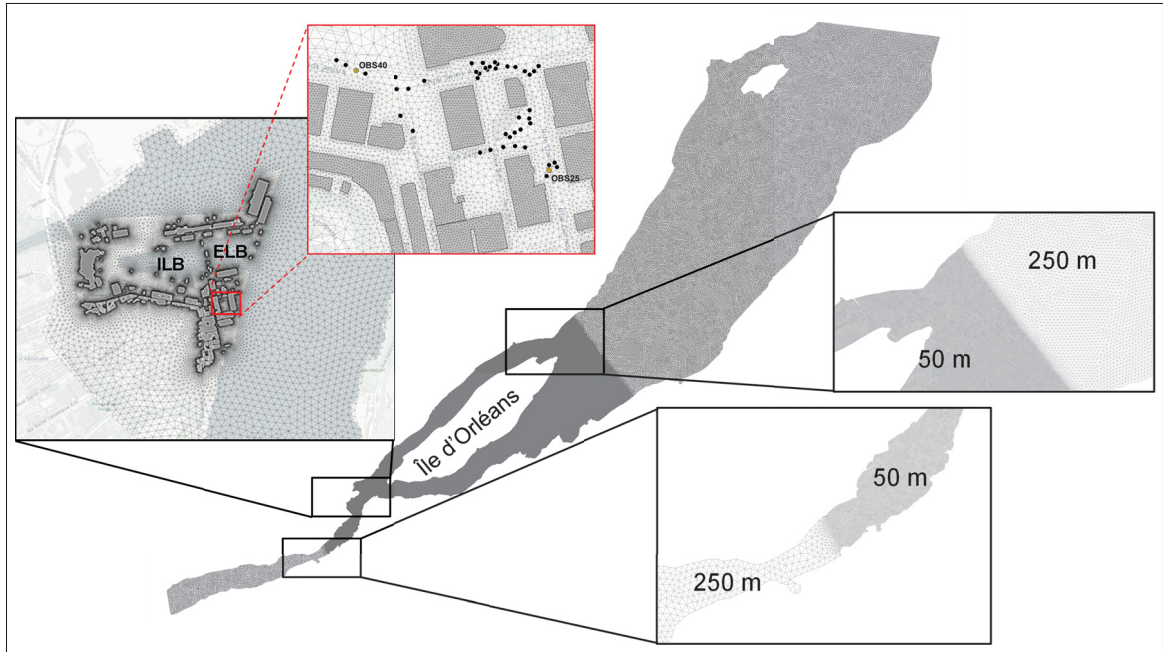


FIGURE 4.4 Computational mesh of the interpolated TBDEM with refinement around Île d'Orléans and lower Québec City, including the internal and external Louise basins (ILB/ELB) and water level observation points

4.3.3 Validation

To validate the present model, we compare our numerical outcomes with the experimental and numerical data from Matte *et al.* (2017a). On the one hand, we use observations during two periods, 12–15 June 2009, and 21–24 June 2009, on water levels at the transects Estuaire Saint-Charles, Saint-François, and Rocher-Neptune and flow discharges at three transects, Quebec, Beauport, and Lauzon respectively (Figure 4.1). The former corresponds to neap tide, the latter to spring tide. On the other hand, we first consider for the riverbed the same value as the Manning coefficient proposed by Matte (2014). This parameter on the seabed is extended to the urban area from priori settings.

Final values for the Manning coefficient (Eq. 4.2) result from a full two-step validation. In the first step, namely the calibration, the coefficient is refined to provide good agreement between numerical results and the 12–15 June observation on water level and flow discharge. In the second step, called verification, the prediction of the numerical model with the tuned Manning coefficient is compared to the 21–24 June data for a posteriori analysis.

To optimize the number of points and shorten the computational time, a sensitivity analysis is performed with three time steps : 10 s, 5 s, and 2.5 s. Numerical errors between simulations and observations of tidal levels and discharges are estimated based on standard indicators introduced by Sutherland, Peet & Soulsby (2004). In this study, we employ Root Mean Absolute Error (RMAE), Root Mean Square Error (RMSE), and Skill which reads :

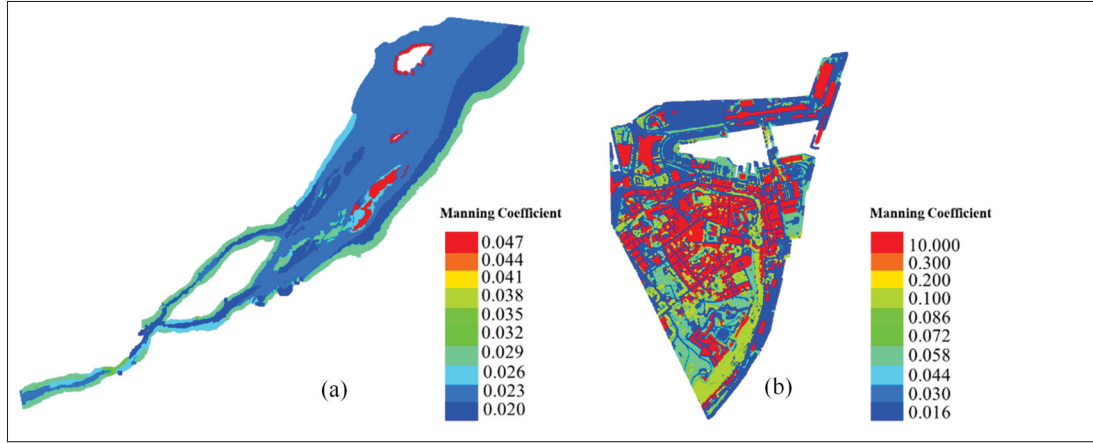


FIGURE 4.5 Manning coefficients based on substrate composition (a) and land use cover (b)

$$\text{RMAE} = \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N |O_i|} \quad (4.4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \quad (4.5)$$

$$\text{Skill} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (4.6)$$

where S and O stand for simulation and observation respectively, the subscript i specifies the index of points, N the number of points in time and space to compute errors, and $\bar{O}$ is the mean value of observations.

The most accurate results, in terms of water level and flow rate, are obtained from simulations with a time step of 5 s. Hence, this temporal resolution will be employed for the rest of the model's development.

4.4 Results

4.4.1 Input data to model the Elliott storm, December 23rd, 2022

The calculation mesh used in this model specifically includes buildings with heights below 20 m. Building heights correspond to the values provided in the Digital Surface Model (DSM). The entire simulated urban area is meshed, including buildings. The study area is discretized by a grid of triangular elements covering the St. Lawrence River and the lower shores of Quebec City. The grid resolution varies from 50 m in the St. Lawrence region surrounding

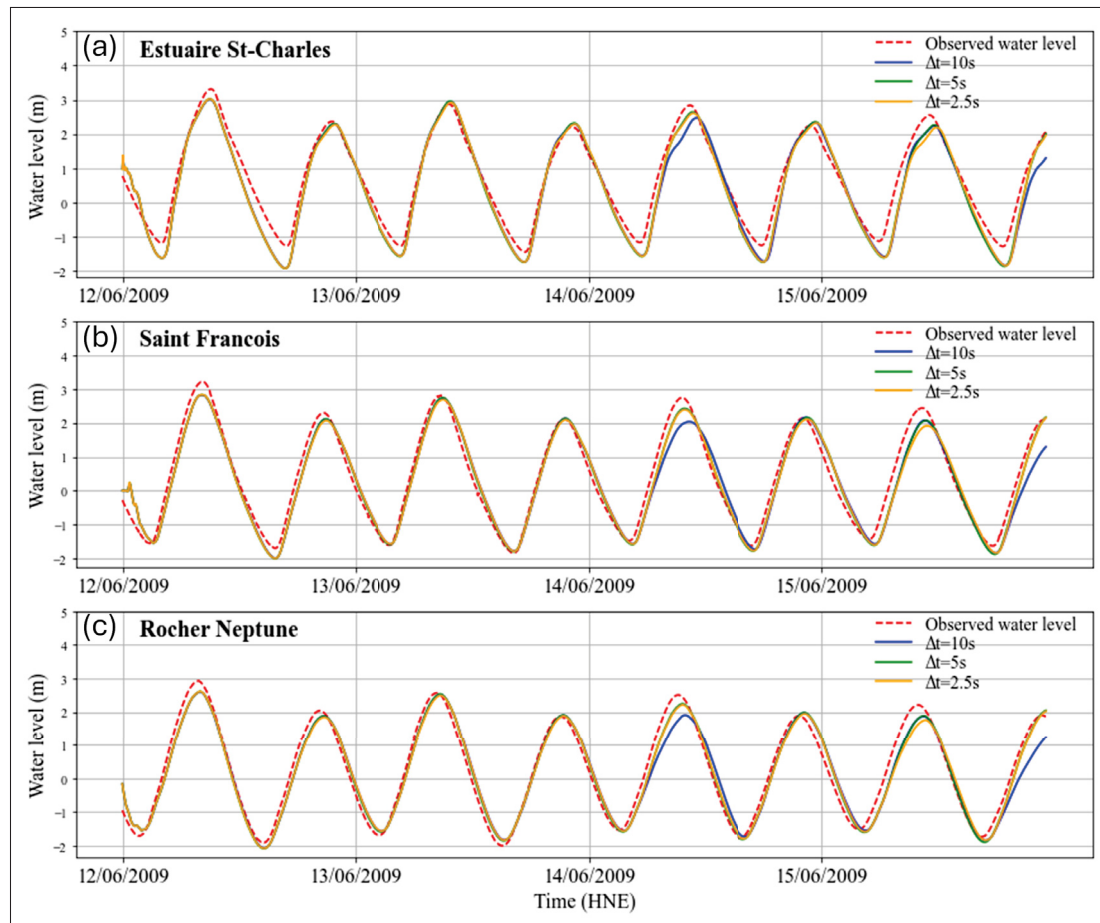


FIGURE 4.6 Comparison between simulation and observation (time series) in the different sections : (a) Estuaire Saint-Charles, (b) Saint-François, (c) and Rocher-Neptune for the different time steps timestep 10s, 5s and 2.5s between 12 and 15 June 2009 in Eastern standard time (HNE).

Quebec City to 2 m over the buildings. The time step is set to 5 s, as obtained in the non-flooding case. Understanding the dynamics of this storm can provide valuable insights into the resilience of the city's infrastructure to extreme weather events while contributing to a broader understanding of the impact of climate change on the region.

During the week of 21–26 December 2022, Quebec City was hit by the Elliott winter storm generated by an extratropical cyclone. Coastal flooding occurred on December 23rd, 2022, between 16 :00 and 20 :00. According to meteorological data (Figure 4.8), barometric depression and wind velocities were measured at the Jean Lesage International Airport in Quebec City (Figure 4.1) and are available on the Government of Canada's online platform. Figure 4.9 shows that until 17 :00, the wind blew from the N-E (75°) at 20 m/s, and then from 21 :00 onwards from the S-W (220°) with wind gusts up to 15 m/s. Between 17 :00 and 19 :00, the wind speed decreased rapidly reaching a minimum of 2 m/s and an atmospheric pressure of 970 mbar.

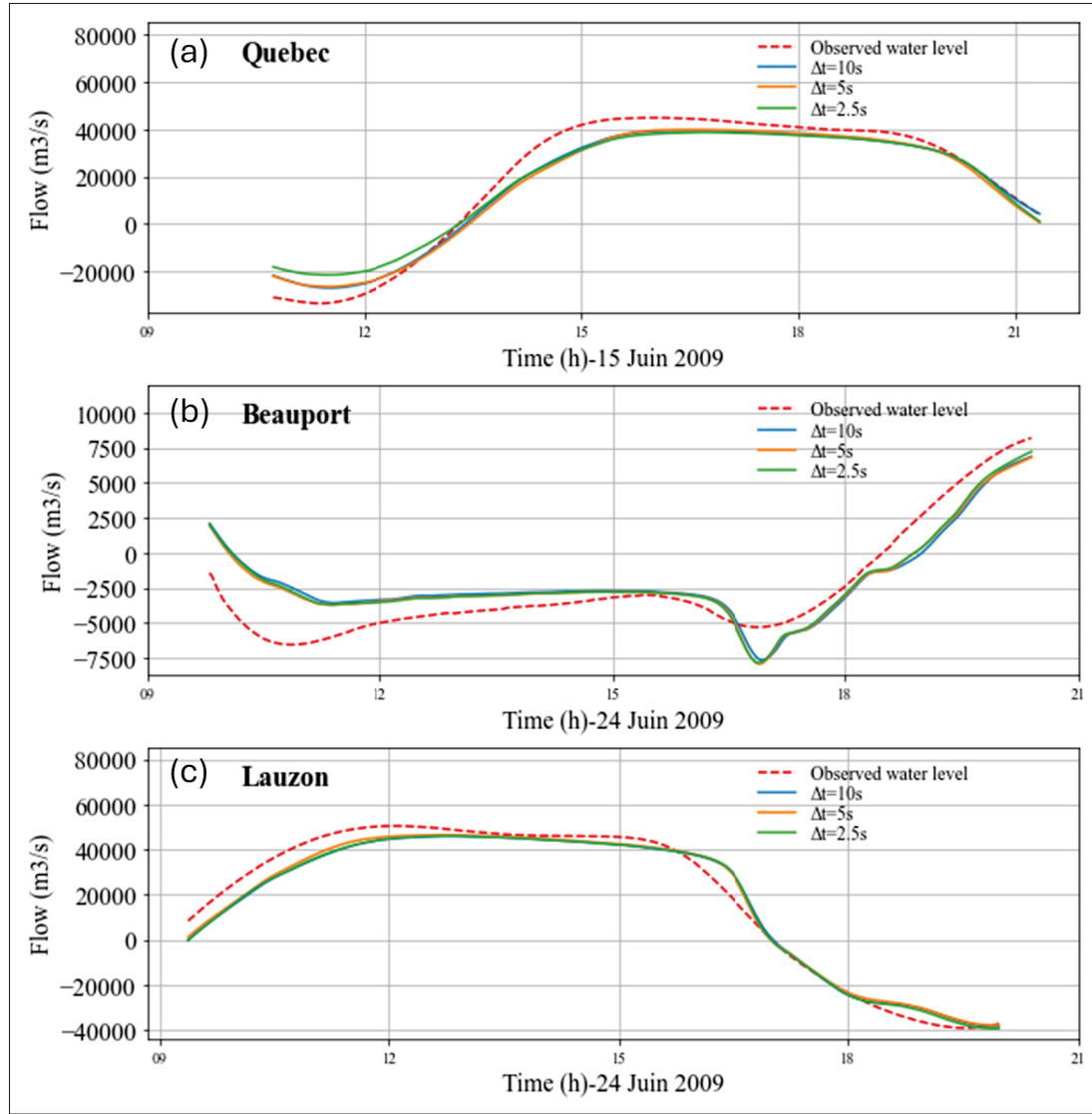


FIGURE 4.7 Comparison between simulation and observation in the different sections : (a) Quebec, (b) Beauport, and (c) Lauzon for different time steps 10s, 5s and 2.5s during the 15th June 2009 and 24th June 2009.

On December 23rd, 2022, Quebec City's municipal agents were alerted, and water levels were measured at 47 points between 17 :17 and 18 :18 (Time HNE). Figures 4.4 and 4.9 show the spatial location and temporal chronology of the measurement operations. We will refer to these as OBS points. It is important to note that the measurements were taken during the rising tide, with differences of around 1 m in sea level between the first and last points. Similarly, in this study, we also use videos posted on social networks during the event to complement the Quebec City measurements. These provide additional spatio-temporal information at point A (Figure 4.9a). Videos posted by journalists during the event indicate that the water height may have reached 1.17 m at around 18 :00 (Time HNE) at the same point. These municipal-social-media data are used to validate the flood model in the urban area.

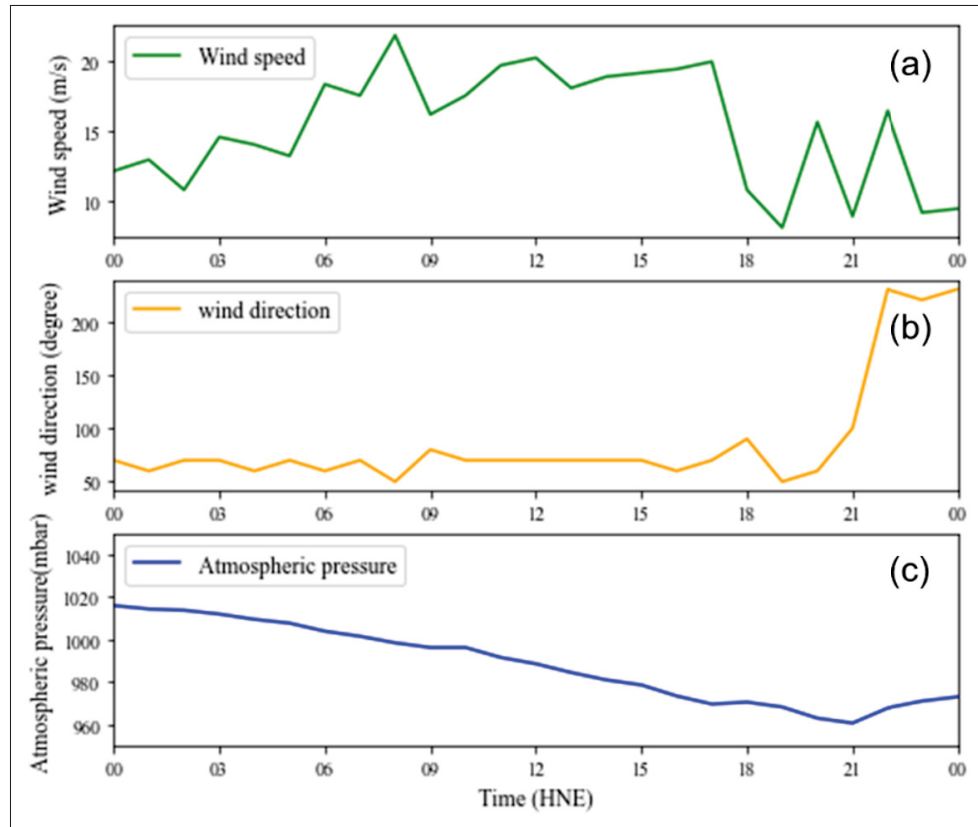


FIGURE 4.8 Meteorological parameters during the flood event of 23 December 2022 : Wind speed (a), atmospheric pressure (b), and wind direction (c) registered in the station Aeroport Intl Jean-Lesage.

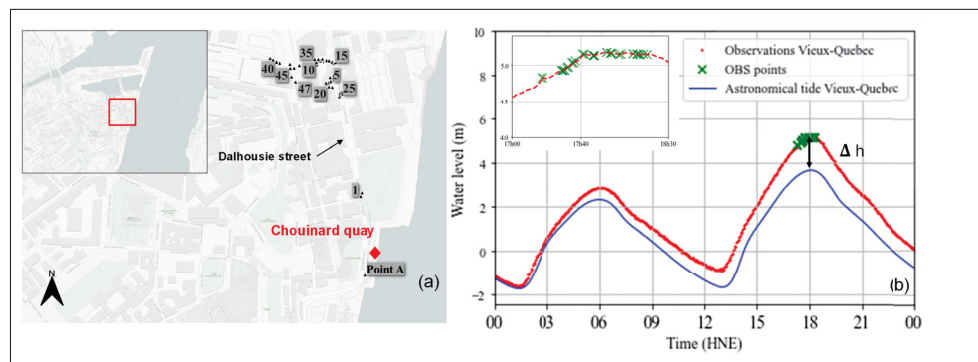


FIGURE 4.9 Spatial distribution and temporal sequence of water depth measurement : (a) 47 points measured by Municipality of Quebec (OBS points) and Point A (social media); (b) chronological sequence of measurement

To reproduce the Elliott storm flooding scenario, we update boundary conditions at Saint-Joseph-de-la-Rive and Neuville by imposing observed water levels at the tidal stations (Figure 4.10) from December 21st to 25th, 2022. It is essential to note the difference between astronomical and measured tide during the Elliott storm : we observe a storm

surge ranging between 1 m and 2 m in our study area. Thus, both atmospheric depression and wind influence our simulation results in two distinct ways : the depression affects the tidal amplitude through the boundary conditions (Figure 4.10), while the wind affects the timing of the flooding through the friction-drag laws.

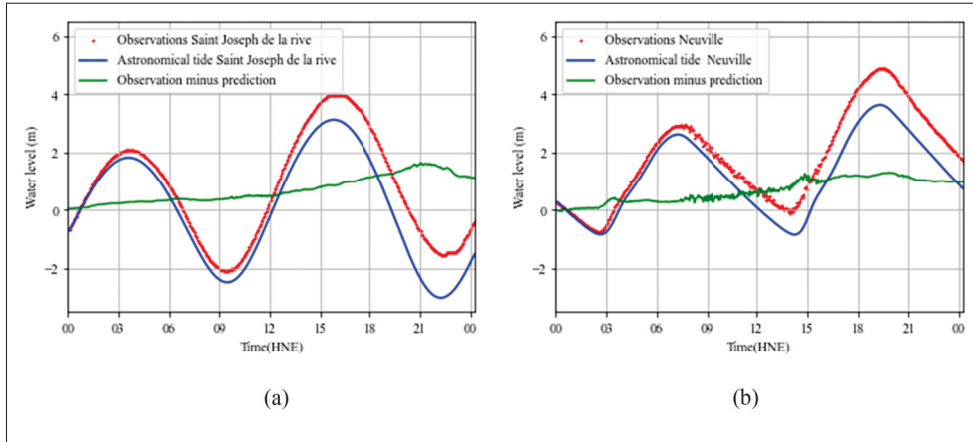


FIGURE 4.10 Water level observed in the tide gauges Saint-Joseph-de-La-Rive (a) and Neuville (b) on 23 December 2022.

4.4.2 Numerical results

This section presents the spatiotemporal results of flooding that resulted from the Elliott storm surge. Regarding the effect of wind direction, the urban zone can be flooded from the north (ILB) or the south (Chouinard Quay) side. Consequently, the water level in the ILB may affect flood propagation. Moreover, ILB is separated from the Saint Lawrence River, which remains closed from November onwards throughout the winter season. Cofferdams are used to enable the waterproofing of the basin. We imposed an initial water elevation of $Z_{ILB} = 1$ m in the ILB.

Figure 4.11 displays the simulated maximum water levels compared to observed values at Chouinard Quay (Point A) and water levels within Quebec City (OBS points). The simulation values shown in Figure 4.11 represent the maximum water level at these points. The observed water levels were measured between 17 :17 and 18 :18 on the flood day. In general, the observed and simulated water levels are in good agreement for all points, including social-media Point A.

As the tidal level in the river increases, the flood area expands. Figures 4.12 and 4.13 present the evolution of water levels and velocities during the flood, respectively. At 17 :10, submersion begins in the southern part of Quebec City, near the Chouinard Quay (Figure 4.9a). Until 18 :40, as the sea level rises (Figure 4.9b), the submerged zone extends northwards, remaining heavily channelized along Dalhousie Street (Figure 4.9a) and stagnating near the Louise Basin (Figure 4.4). The latter tends to desaturate with flow directed toward the ILB or Marina. Velocity results (Figure 4.13) show that from 18 :10, the water level in the ILB also increases from the ELB.

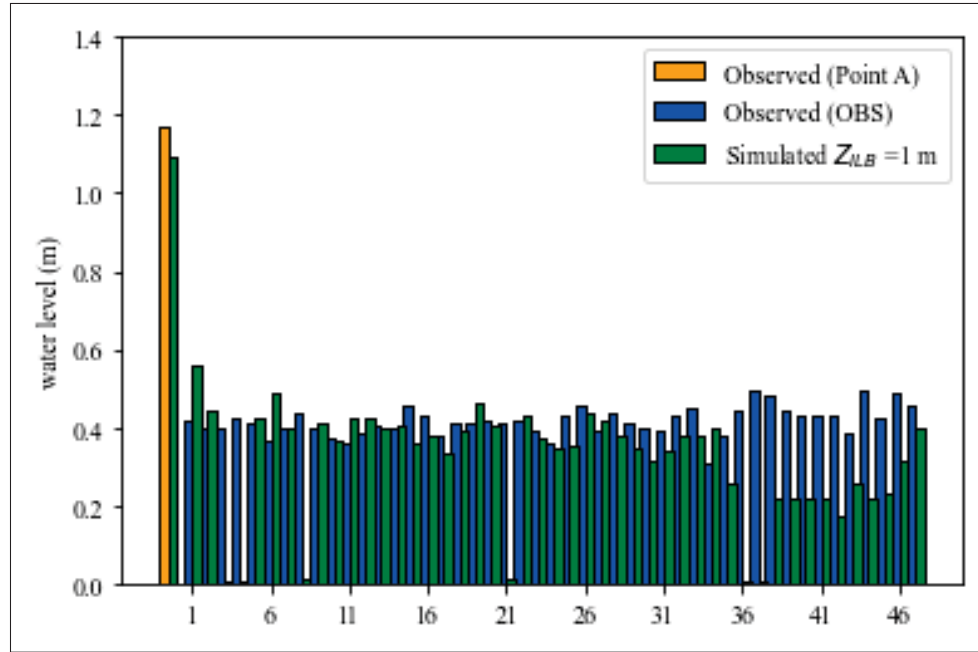


FIGURE 4.11 Observed and simulated water level at OBS points without adding wind velocities for the simulation with a water elevation of 1m in the marina, observed and simulated water level at OBS points with adding wind with a water elevation of 1m in the marina.

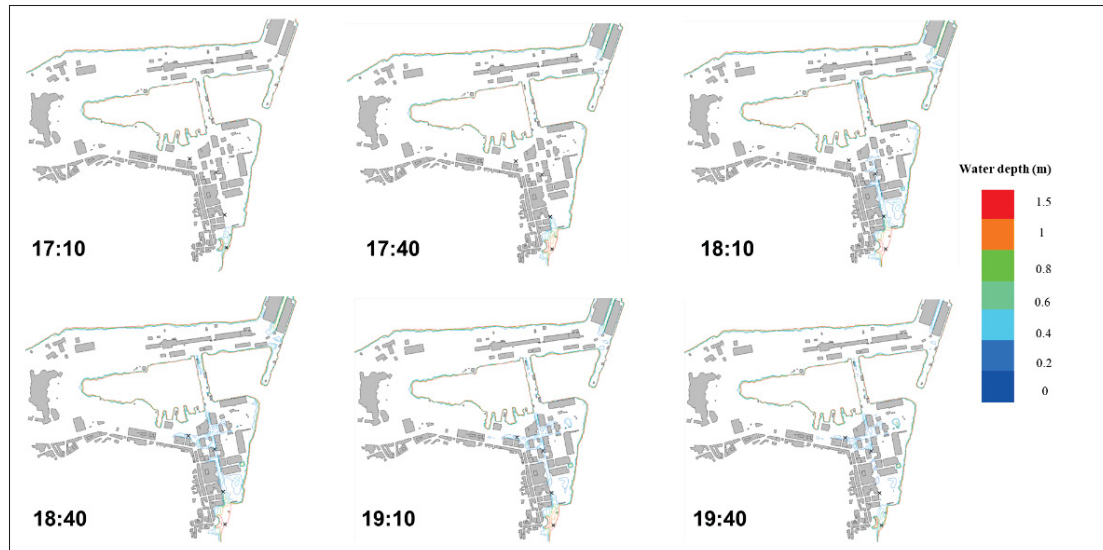


FIGURE 4.12 Time evolution of the iso-contours of water level in Quebec City on 23rd December 2022 according to the simulation with a water elevation of 1 m in the marina.

From 18 :40, corresponding to the ebb tide, the model predicts the drainage of the urban flooded zone : water levels progressively decrease with time. However, some parts of the city remain wet, likely due to local topographic depressions.

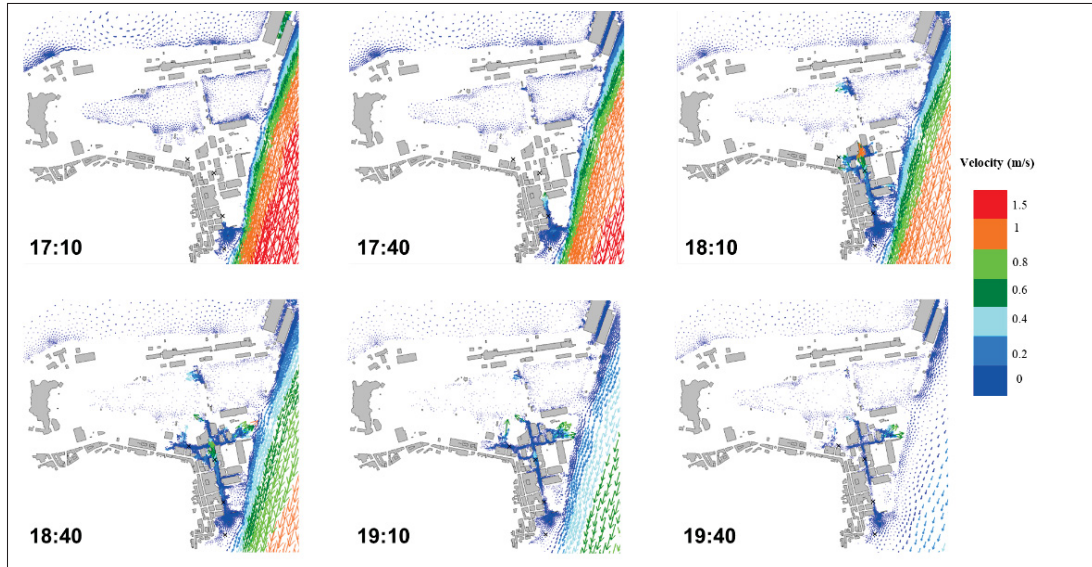


FIGURE 4.13 Spatiotemporal evolution of the velocity during coastal inundation on 23 December 2022 according to the simulation with a water elevation of 1 m in the marina..

4.4.3 Spatiotemporal analysis of the flood event

This section provides a detailed analysis of the space-time evolution of flooding at specific observation points. The water level at Point A is derived from a social-media source and represents the closest known data near Chouinard Quay, i.e., the starting point of inundation. Points OBS1 and OBS25 are located on Dalhousie Street where the flow is channelized, corresponding to the maximum flow speed. Point OBS40 is situated close to ILB and represents the drainage process for the ILB.

Figure 4.14 presents the temporal evolution of hydrodynamic parameters (water level, velocity) during the flooding of December 23rd, 2022, at selected points. At Points A and OBS1 near the river, a symmetrical flood curve is observed with similar submersion and drainage duration (Figure 4.14b). In contrast, for Points OBS25 and OBS40 within the urban area, temporal curves are asymmetric with a much slower drainage. Flooding reaches Point OBS40 almost 1.5 hours after starting at Point A. Flow velocities also confirm this lag (Figure 4.14c). Notably, the maximum velocity at Point OBS25 reaches 1 m/s, nearly five times higher than velocities at other points, highlighting the channelization phenomenon at this location.

This case study illustrates the importance of hydrodynamic modeling in providing space-time evolution of water depth and velocity in densely populated zones. The numerical results reproduce well the available multisource data. The next section discusses the effect of wind.

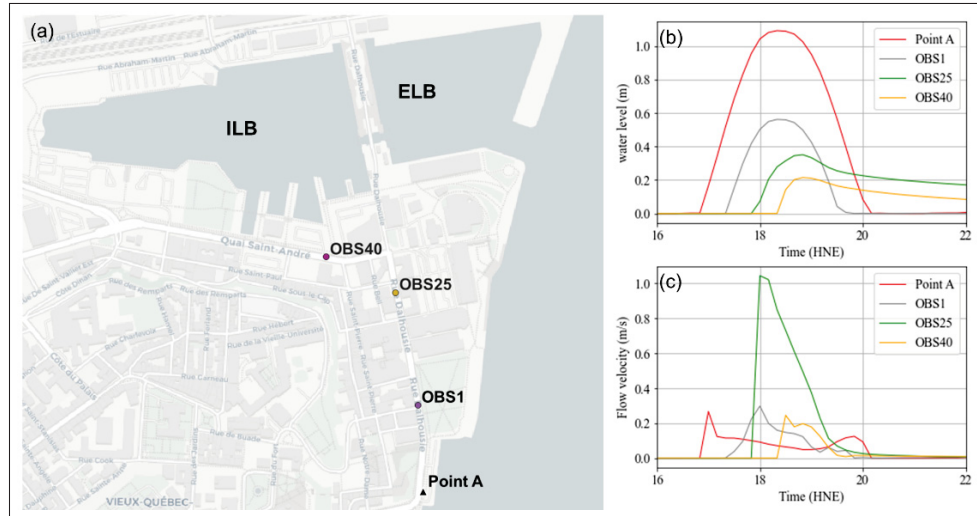


FIGURE 4.14 Temporal description of flooding in Quebec City during the Elliott storm : location of observation points (a), time series of water level (b), and flow velocity (c).

4.4.4 Discussion

4.4.4.1 Effect of wind

In Section 4.4.1, a spatially uniform wind field (from Jean Lesage International Airport) was applied across the domain, without considering spatial variability. Wind can influence flood propagation, particularly during extreme events such as Storm Elliott. Considering spatial variability could improve model accuracy. The study area has four stations : Cap Tourmente, Beauport, Lesage Airport, and Île d'Orléans. Figure 4.15 presents the wind field interpolated from these four stations using the Inverse Distance Weighting (IDW) method ($1/d^p$).

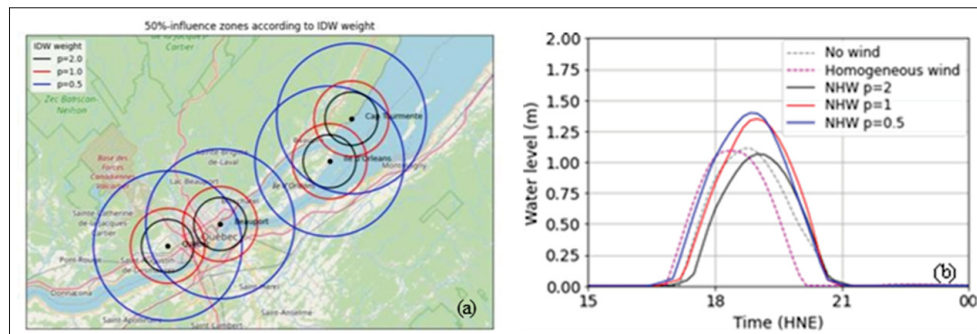


FIGURE 4.15 Comparison of simulated water level with no wind, homogeneous and non-homogeneous wind : (a) wind speed (IDW) interpolation ; (b) water level at point A

Results in Figure 4.15 indicate that wind forcing, whether homogeneous or non-homogeneous (NHW, $p = 2$), mainly affects the timing of flooding events, with minor changes in amplitude. The choice of interpolation power p can influence results, depending on the number and quality of stations. EBK could potentially reduce interpolation errors in the wind dataset, but this is beyond the scope of the present study due to the limited number of stations.

4.4.4.2 Effect of channelization

In addition to flow analysis in Section 4.4.3 Figure 4.16 presents a snapshot of flow properties at 18 :10 within the urban zone to illustrate channelization along Dalhousie Street. At that time, the Saint Lawrence River tidal current is directed south and recirculates near Chouinard Quay. Water levels overshoot local topography, generating northward flooding. Dalhousie Street is the main channel, with velocity maxima at OBS25 (1 m/s).

From OBS25, the flow divides into three main branches :

- Left branch reaches OBS40 40 minutes later and terminates at ILB ;
- Middle branch continues along Dalhousie Street and terminates at ILB ;
- Right branch flows toward the Saint Lawrence River.

To detail the urban flow in this channel, specified sections were chosen for examination. These include South section, a section near the OBS25 point with a width of 24 meters, ILB section, the end portion of Dalhousie Street that intersect with ILB at a width of 16 meters. The West branch section corresponds to a section near the OBS40 point, in the west of Saint-André Quay with a width of 17 meters. The East branch section is in the east of Saint-André Quay with a width of 12 meters.

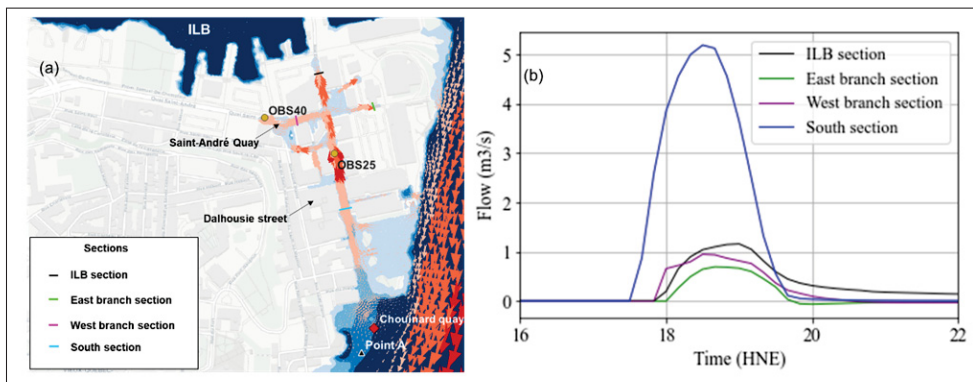


FIGURE 4.16 Flow pattern in the low land of Quebec City at 18 :40 (a), time series of flow in sections : OBS25, LB section, right branch, and left branch (b).

Analysis of Figure 4.16 shows that the maximum flow rate in the South section exceeds $5 \text{ m}^3/\text{s}$, which is five times higher than the other sections. Moreover, the South section exhibits the highest velocity among the studied sections.

4.5 Conclusion

The present study introduces a methodological approach to hydrodynamic flood modeling in the low-lying areas of Quebec City using Telemac2D. The Telemac2D model solves the Navier-Stokes equations and provides estimates of the spatio-temporal distribution of water level and velocity in urban areas. The proposed model is based on a fusion of three high-resolution data systems : topographic data, bathymetric data, and seawater levels.

The methodological features make this approach applicable to other coastal cities facing similar flood risks. First, it allows extending a fully hydraulic model to urban areas without re-meshing or re-calibration, enabling rapid adaptation for urban flood simulations. Second, the modular framework permits updating the urban domain in a patchwork manner to account for future urban planning or test different mesh strategies without compromising hydrodynamic validation. Third, it can integrate emerging data sources, such as social media and urban cameras, to enhance and diversify measurement points.

After being tested and validated on non-flooding data, the model effectively reproduces water levels and flows in the St. Lawrence River. It was then applied to simulate flooding resulting from the Elliott storm on December 23rd, 2022. Telemac2D provides the spatio-temporal distribution of water level and velocity during the flood, which is crucial for classifying flood hazard levels for the urban population. Validation relied on multisource data, including municipal measurements, press photography, and social media sources.

Inclusion of meteorological parameters, such as wind, changes the flooding scenario, particularly its timing. The numerical model reproduces the phase shift between tidal signals and urban flow signals under different wind conditions. Wind has a non-negligible influence, although this study considered a spatially homogeneous wind; future studies will incorporate spatial wind variability. Flow velocities evolve over time, initially increasing, then slowing and reversing during ebb. Maximum velocities in the urban area exceed 1 m/s on Dalhousie Street. This information is valuable for assessing flood risk (Sathya, Rahardjo & Jayadi, 2021). A phase shift between the tidal signal and the urban flood curve varies significantly across locations, informing future crisis management planning.

The model also has limitations. One key limitation is the exclusion of the urban sewage system, potentially causing overestimation of water levels in some areas. While the urban mesh technique effectively reproduces flooding, alternative meshing approaches could provide additional insights into urban flood dynamics. Finally, the model's ability to simulate a flooding event makes it a useful tool for projecting extreme climate scenarios and sea-level rise impacts. Future studies can build upon these limitations to improve the accuracy and reliability of urban flood mapping and risk assessment.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette thèse a abordé de manière approfondie la modélisation hydrodynamique des inondations côtières et urbaines, avec une application spécifique aux basses côtes de la ville de Québec. Dans ce travail, un modèle hydrodynamique TELEMAC-2Da été proposé. Nous avons montré que la reproduction de l'hydrodynamique des inondations dépend de plusieurs paramètres principaux : la construction et la validation d'une méthode de fusion topo-bathymétrique (TBDEM) pour un maillage à haute résolution, l'intégration rigoureuse des structures urbaines dans les modèles hydrodynamiques, et la prise en compte des paramètres atmosphériques, notamment le vent, en complément des conditions hydrodynamiques.

Le premier chapitre a permis de définir les fondements physiques et numériques de la simulation hydrodynamique des inondations. L'étude des équations de Saint-Venant, du traitement du front sec/mouillé et des différentes méthodes de représentation des bâtiments a fourni une base méthodologique solide, essentielle pour garantir la stabilité des calculs et la précision des hauteurs d'eau et des vitesses simulées.

Le deuxième chapitre a présenté en détail la construction et la validation du maillage topo-bathymétrique (TBDEM) de la zone d'étude. L'intégration de données multi-sources, incluant relevés bathymétriques récents et historiques, points de berges et données LiDAR à haute résolution, a permis de produire un modèle numérique de terrain adapté à la simulation hydrodynamique. Une première étape de validation (incluant calibration sur un jeu de données, puis vérification sur un second jeu de données) a montré que le modèle reproduit fidèlement les hauteurs d'eau et les débits observés. Le modèle ainsi validé constitue un compromis efficace entre précision et coût computationnel, offrant une base pertinente pour la modélisation opérationnelle des inondations de la Ville de Québec par débordement du fleuve Saint-Laurent.

Le troisième chapitre a présenté les outils et approches numériques nécessaires à l'étude de l'hydrodynamique des inondations urbaines. L'analyse du front sec/mouillé s'avère essentielle pour assurer la stabilité numérique. La comparaison des différentes méthodes de représentation des bâtiments (Building Block, Building Hole, Building Resistance) a démontré l'influence de la configuration urbaine sur la propagation des inondations et les vitesses d'écoulement. L'intégration du vent, homogène ou non-homogène, dans les simulations d'événements extrêmes a révélé son impact sur la chronologie des pics d'inondation, tandis que son effet sur l'amplitude de la hauteur d'eau reste limité. Il est également important de considérer d'autres facteurs, tels que le nombre de stations de vent et les paramètres d'interpolation, qui influencent significativement l'hydrodynamique d'inondation.

L'ensemble des outils et approches développés a permis d'appliquer le modèle au cas réel de la tempête du 23 décembre 2022 à Québec. Les résultats, publiés dans la revue *Natural Hazards* sous le titre *Strengthening Coastal Flood Forecasting through Event-Based Data Capitalization*, montrent que le modèle reproduit la propagation spatiale et l'évolution temporelle d'un événement d'inondation récent, identifie les zones urbaines les plus vulnérables, et fournit des indications précieuses pour la planification et la résilience urbaine. La méthodologie repose sur une fusion de données topo-bathymétriques précises et différentes représentations fines des structures urbaines. Le modèle validé a été transféré à la Communauté Métropolitaine de Québec (CMQ) pour doter leurs services d'un outil opérationnel.

À l'issue de ce travail de thèse portant sur la simulation des inondations de la ville de Québec par le débordement du fleuve Saint-Laurent, plusieurs pistes d'amélioration apparaissent pour rendre le modèle davantage prédictif ou étendre sa fonctionnalité jusqu'à présent centrée sur les inondations.

Tout d'abord, une des difficultés concerne les scénarios climatiques et les données de conditions aux limites. Bien que le scénario RCP 8.5 projette une élévation du niveau moyen de la mer pouvant atteindre environ 1,1 m d'ici 2100, il correspond à une trajectoire d'émissions élevée aujourd'hui considérée comme peu probable et est principalement utilisé pour explorer des conditions climatiques extrêmes. Disposer de scénarios climatiques (débit, marée, tempêtes) réalistes serait particulièrement utile. Ainsi, cette thèse étant centrée sur la modélisation hydrodynamique, une collaboration avec les spécialistes du climat d'organismes tels que Ouranos ou Environnement Canada va permettre d'alimenter le modèle avec les conditions limites futures afin d'utiliser notre modèle déterministe en mode prédictif. À défaut des données précises sur les niveaux d'eau et les tempêtes du futur, il est toutefois possible d'envisager des travaux combinant des approches probabilistes ou d'intelligence artificielle. À titre d'exemple, il serait possible compte tenu du caractère opérationnel du présent modèle d'effectuer différentes simulations en faisant varier les intrants suivant des distributions à l'instar des méthodes de type Monte Carlo ou de tirs aléatoire. De même les techniques utilisées en assimilation de données ou en intelligence artificielle pourraient être utilisées dans une démarche de prédiction-correction et d'amélioration continue par apprentissage sur les événements d'inondations. Néanmoins, la disponibilité des données lors des épisodes d'inondation côtière reste pour ces différentes améliorations un élément déterminant. Et la démarche s'appuyant sur une participation citoyenne, capitalisant les informations disponibles sur les réseaux sociaux ou les caméras de surveillance municipale, est en ce sens très prometteuse.

Ensuite, la modélisation hydrodynamique présente certaines limites méthodologiques. Les modèles 2D, bien adaptés à la représentation de l'extension spatiale des inondations à grande échelle, reposent sur une moyenne verticale

des équations de l'écoulement, ce qui limite la représentation explicite des processus turbulents et des structures verticales, en particulier dans les zones de fortes hétérogénéités bathymétriques ou en présence d'ouvrages. À l'inverse, les modèles 3D permettent une description plus fine de la structure verticale des écoulements et de la turbulence, au prix d'un temps de calcul et de besoins en ressources numériques élevés, limitant leur application à de vastes territoires ou à des simulations de long terme.

Le choix du modèle de turbulence $k-\varepsilon$, largement utilisé pour sa robustesse et sa stabilité numérique, constitue également une limite. Bien qu'il soit adapté à une approche opérationnelle, ce modèle présente des restrictions dans la modélisation des processus turbulents. Des travaux futurs pourraient explorer l'utilisation de modèles de turbulence plus avancés, sous réserve de capacités de calcul suffisantes.

De surplus, le déploiement de la méthode sur un territoire aussi vaste que celui administré par la CMQuébec et la pérennité du modèle présente des défis techniques et technologiques. En effet, si l'étendue spatiale du territoire est grande, la méthodologie exige une haute résolution sur les zones littorales à l'interface terre-mer. Or ces zones sont difficiles à arpenter compte tenu de la faible profondeur d'eau pour la bathymétrie, des fortes pentes pour les murs côtiers ou les quais portuaires, des zones d'ombre pour les méthodes optiques en présence de bâtiments ou mobiliers urbains. Face à ces difficultés, le travail et la méthodologie d'étude permettent de travailler de manière incrémentale puisque les zones de maillages sont compléments modulaires : il est possible de modifier localement la géométrie sur une zone urbaine tout en gardant la topologie du maillage (donc en conservant la validation hydrodynamique) sur l'ensemble de l'estuaire fluvial. Cette fonctionnalité autorise un découpage du travail par zones et une intégration dans l'ensemble similaire à un patchwork. Par ailleurs, le modèle étant open-source, sa compilation est toujours possible pour être exécutable sur les futurs systèmes d'exploitation.

Enfin, bien que l'étude a été centrée sur la problématique d'inondation, le modèle hydrodynamique développé dans l'environnement Telemac permet d'envisager d'étendre sa fonctionnalité à d'autres problématiques hydro-environnementales complémentaires, en particulier le transport de température, de salinité, de glace, ou de différentes substances dissoutes ou solides (sédiments).

LISTE DES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alipour, A., Jafarzadegan, K. & Moradkhani, H. (2022). Global sensitivity analysis in hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. *Environmental Modelling & Software*, 152, 105398. doi : 10.1016/j.envsoft.2022.105398.
- Amback, B. C., Magalhães, P. M., Siva, L. E., de Sousa, M. M. & Miguez, M. G. (2025). Assessing Drainage Infrastructure in Coastal Lowlands : Challenges, Design Choices, and Environmental and Urban Impacts. *Infrastructures*, 10(5). doi : 10.3390/infrastructures10050103.
- Anh, V. T., Trung, P. B., Nguyen, K.-A., Liou, Y.-A. & Phan, M.-T. (2021). Human Impacts on Estuarine Erosion-Deposition in Southern Central Vietnam : Observation and Hydrodynamic Simulation. *Sustainability*, 13(15). doi : 10.3390/su13158303.
- Araújo, M. A. V., Mazzolari, A. & Trigo-Teixeira, A. (2013). An object oriented mesh generator : application to flooding in the Douro estuary. *Journal of Coastal Research*, (65), 642–647.
- Arrieta-Pastrana, A., Coronado-Hernández, O. E. & Fuertes-Miquel, V. S. (2025). Hydrodynamic Modelling Techniques for Bays and Estuaries : Simulation Methodology and Practical Application. *Water*, 17(5). doi : 10.3390/w17050623.
- Assani, A., Landry, R., Labrèche, M., Frenette, J.-J. & Gratton, D. (2014). Temporal Variability of Monthly Daily Extreme Water Levels in the St. Lawrence River at the Sorel Station from 1912 to 2010. *Water*, 6(2), 196212. doi : 10.3390/w6020196.
- Ayala, M., Sadek, Z., Ferčák, O., Cal, R. B., Gayme, D. F. & Meneveau, C. (2024). A moving surface drag model for LES of wind over waves. *Boundary-Layer Meteorology*, 190(10), 39.
- Azhar, M., Kane, B., Vahedifard, F. & AghaKouchak, A. (2025). Comprehensive portfolio of adaptation measures to safeguard against evolving flood risks in a changing climate. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 824.
- Barbier, E. B. (2017). Marine ecosystem services. *Current Biology*, 27(11), R507R510.
- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C. & Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169193. doi : 10.1890/10-1510.1.
- Batchelor, G. K. (1989). Fluid Mechanics. By LD LANDAU and EM LIFSHITZ. 2nd English edition. Pergamon Press, 1987, 205.
- Bates, P. D. & De Roo, A. P. J. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236(1), 5477. doi : 10.1016/s0022-1694(00)00278-x.
- Beretta, R., Ravazzani, G., Maiorano, C. & Mancini, M. (2018). Simulating the Influence of Buildings on Flood Inundation in Urban Areas. *Geosciences*, 8(2). doi : 10.3390/geosciences8020077.
- Bertin, X. & Olabarrieta, M. (2016). Relevance of infragravity waves in a wave-dominated inlet. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 121(8), 54185435. doi : 10.1002/2015jc011444.

- Blaber, S., Cyrus, D., Albaret, J.-J., Ching, C. V., Day, J., Elliott, M. & Potter, I. (2000). Effects of fishing on the structure and functioning of estuarine and nearshore ecosystems. *iCES Journal of marine Science*, 57(3), 590602. 162.
- Booi, S., Mishi, S. & Andersen, O. (2022). Ecosystem Services : A Systematic Review of Provisioning and Cultural Ecosystem Services in Estuaries. *Sustainability*. doi : 10.3390/su14127252.
- Boon, J. D. (2012). Evidence of Sea Level Acceleration at U.S. and Canadian Tide Stations, Atlantic Coast, North America. *Journal of Coastal Research*, 28(6), 1437–1445. doi : 10.2112/JCOASTRES-D-12-00102.1.
- Bradford, S. F. & Sanders, B. F. (2002). Modeling flows with moving boundaries due to flooding, recession, and wave run-up. Dans *Estuarine and Coastal Modeling (2001)* (pp. 695–708).
- Bricker Jeremy D., I. S. & G., M. S. (2005). Bed Drag Coefficient Variability under Wind Waves in a Tidal Estuary. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(6), 497508. doi : 10.1061/(asce)0733-9429(2005)131:6(497).
- Burrough, P. A. & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford : Oxford University Press.
- Bush, E. & Lemmen, D. S. (2019). *Canada's Changing Climate Report*.
- Castro-Bolinaga, C. F., Diplas, P. & Bodnar, R. J. (2020). Modeling Hydro-Morphodynamic Processes During the Propagation of Fluvial Sediment Pulses : A Physics-Based Framework. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 125(12), e2020JF005722. doi : 10.1029/2020jf005722.
- Catella Michele, P. E. & Luca., S. (2008). Conservative Scheme for Numerical Modeling of Flow in Natural Geometry. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(6), 736748. doi : 10.1061/(asce)0733-9429(2008)134:6(736).
- Chamoin, L. & Legoll, F. (2021). A pedagogical review on a posteriori error estimation in Finite Element computations. *arXiv preprint arXiv :2110.02160*.
- Chen, C., Qi, J., Liu, H., Beardsley, R. C., Lin, H. & Cowles, G. (2022). A Wet/Dry Point Treatment Method of FVCOM, Part I : Stability Experiments. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7). doi : 10.3390/jmse10070896.
- Chicharo, M. A. T., Chicharo, L. & Wolanski, E. (2008). Estuarine ecohydrology.
- Chilton, D., Hamilton, D., Nagelkerken, I., Cook, P., Hipsey, M., Reid, R. & Brookes, J. (2021). Environmental Flow Requirements of Estuaries : Providing Resilience to Current and Future Climate and Direct Anthropogenic Changes, 9. doi : 10.3389/fenvs.2021.764218.
- Cho, H. J. (2007). Effects of Prevailing Winds on Turbidity of a Shallow Estuary. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 4(2), 185192. doi : 10.3390/ijerph2007040014.
- Chouinard, O., Plante, S. & Martin, G. (2008). The community engagement process : a governance approach in adaptation to coastal erosion and flooding in Atlantic Canada. *Canadian journal of regional science*, 31(3), 507–520.
- Cockburn, B., Lin, S.-Y. & Shu, C.-W. (1989). TVB Runge-Kutta local projection discontinuous Galerkin finite element method for conservation laws III : One-dimensional systems. *Journal of Computational Physics*, 84(1), 90113. doi : 10.1016/0021-9991(89)90183-6.

- Costabile, P. & Macchione, F. (2015). Enhancing river model set-up for 2-D dynamic flood modelling. *Environmental Modelling & Software*, 67, 89107. doi : 10.1016/j.envsoft.2015.01.009.
- Dailey, J. E. & Harleman, D. R. F. (1972). Numerical Model for the Prediction of Transient Water Quality in Estuary Networks. Technical report ; institutional and report details not specified in source reference.
- Dailey JE, H. R. . (1972).) Numerical model for the prediction of transient water quality in estuary networks.
- Danielson, J. J., Poppenga, S. K., Brock, J. C. et al. (2016). Topobathymetric Elevation Model Development Using a New Methodology : Coastal National Elevation Database. *Journal of Coastal Research*, 76, 75–89. doi : 10.2112/SI76-008.
- de Ruiter, P. J., Mullarney, J. C., Bryan, K. R. & Winter, C. (2017). The influence of entrance constriction on hydrodynamics and intertidal morphology within estuarine basins. Dans *Australasian Coasts & Ports 2017 : Working with Nature : Working with Nature* (pp. 378–384). Engineers Australia, PIANC Australia and Institute of Professional Engineers . . .
- Dewals, B. J., Detrembleur, S., Archambeau, P., Erpicum, S., Ernst, J. & Piroton, M. (2011). Caractérisation micro-échelle du risque d'inondation : modélisation hydraulique détaillée et quantification des impacts socio-économiques. *La Houille Blanche*, (2).
- Diaz, J. & Grote, M. J. (2015). Multi-level explicit local time-stepping methods for second-order wave equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 291, 240265. doi : 10.1016/j.cma.2015.03.027.
- Dodet, G., Melet, A., Ardhuin, F., Bertin, X., Idier, D. & Almar, R. (2019). The Contribution of Wind-Generated Waves to Coastal Sea-Level Changes. *Surveys in Geophysics*, 40(6), 15631601. doi : 10.1007/s10712-019-09557-5.
- Dowdall, L., Bowe, C. & Kirby, J. R. (2022). The Natural Capital approach : A framework for the successful recovery of nature in estuaries. *Ecological Solutions and Evidence*, 3(3), e12161.
- Drapeau, G. (1992). Sediment Dynamics in the St. Lawrence Estuary. *Géographie Physique et Quaternaire*, 46(2), 233–242. doi : 10.7202/032907ar.
- Du, J., Shen, J., Zhang, Y. J., Ye, F., Liu, Z., Wang, Z. & Wang, H. V. (2018). Tidal Response to Sea-Level Rise in Different Types of Estuaries : The Importance of Length, Bathymetry, and Geometry. *Geophysical Research Letters*, 45(1), 227235. doi : 10.1002/2017gl075963.
- Dube, S. K., Murty, T. S., Feyen, J. C. et al. (2010). Storm Surge Modeling and Applications in Coastal Areas. Publication venue not clearly specified in source reference ; please complete from your original source.
- Eakins, B. W. & Grothe, P. R. (2014). Challenges in building coastal digital elevation models. *Journal of Coastal Research*, 30(5), 942953.
- El-Sabh, M. I. & Silverberg, N. (1990). *Oceanography of a Large-Scale Estuarine System : The St. Lawrence*. Berlin : Springer-Verlag.
- Environment and Climate Change Canada. Page d'observations météorologiques — à adapter.
- Falcão AP, M. M. & Pestana R, e. a. . (2016).) Methodology to Combine Topography and Bathymetry Data Sets for Hydrodynamic Simulations : Case of Tagus River. doi : 10.1061/(asce.

- Favre, E. (2018). Évaluation de la stabilité des ouvrages poids soumis à la submersion basée sur la dynamique numérique des fluides. (S.l.) : *Ecole Polytechnique*, Montreal (Canada).
- Flindt, M. R., Ângelo Pardal, M., Lillebø, A. I., Martins, I. & Marques, J. C. (1999). Nutrient cycling and plant dynamics in estuaries : A brief review.
- Forrester, W. D. (1972). Tidal transports and streams in the St. Lawrence River and Estuary. *The International Hydrographic Review*.
- French, C. E., French, J. R., Clifford, N. J. & Watson, C. J. (2000). Sedimentation–erosion dynamics of abandoned reclamations : the role of waves and tides. *Continental Shelf Research*, 20(12), 1711-1733. doi : 10.1016/S0278-4343(00)00044-3.
- Gallant, J. & Austin, J. (2009). Stitching Fine Resolution DEMs. *Proceedings of the 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation*, pp. 2486–2492.
- Gallien, T. W., Sanders, B. F. & Flick, R. E. (2014). Urban coastal flood prediction : Integrating wave overtopping, flood defenses and drainage. *Coastal Engineering*, 91, 1828. doi : 10.1016/j.coastaleng.2014.04.007.
- Ganju, N. K., Brush, M. J., Rashleigh, B., Aretxabaleta, A. L., Del Barrio, P., Gear, J. S. & O'Donnell, J. (2016). Progress and challenges in coupled hydrodynamic-ecological estuarine modeling. *Estuaries and Coasts*, 39(2), 311-332.
- Gao, X., Li, S., Mo, D., Liu, Y. & Hu, P. (2024). Development of a novel storm surge inundation model framework for efficient prediction. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2024, 120. 164.
- Gargallo-Peiró, A., Folch, A. & Roca, X. (2016). Representing Urban Geometries for Unstructured Mesh Generation. *Procedia Engineering*, 163, 175–185. doi : 10.1016/j.proeng.2016.11.044.
- Gedan, K. B., Kirwan, M. L., Wolanski, E., Barbier, E. B. & Silliman, B. R. (2011). The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines : answering recent challenges to the paradigm. *Climatic Change*, 106(1), 729. doi : 10.1007/s10584-010-0003-7.
- Glenis, V., Kutija, V. & Kilsby, C. G. (2018). A fully hydrodynamic urban flood modelling system representing buildings, green space and interventions. *Environmental Modelling & Software*, 109, 272-292.
- Godin, G. (1999). The propagation of tides up rivers with special considerations on the upper Saint Lawrence River. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48(3), 307–324.
- Gonzalez, P. (2016). Modélisation de la propagation des inondations en zone urbaine. (S.l.) : *Ecole Polytechnique*, Montreal (Canada).
- Grabemann, I., Uncles, R. J., Krause, G. & Stephens, J. A. (1997). Behaviour of Turbidity Maxima in the Tamar (U.K.) and Weser (F.R.G.) Estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. doi : 10.1006/ecss.1996.0178.
- Haigh, I. D., Pickering, M. D., Green, J. M., Arbic, B. K., Arns, A., Dangendorf, S. & Idier, D. (2020). The tides they are a-Changin' : A comprehensive review of past and future nonastronomical changes in tides, their driving mechanisms, and future implications. *Reviews of Geophysics*, 58(1), e2018RG000636.
- Hanslow, D. J., Morris, B. D., Foulsham, E. & Kinsela, M. A. (2018). A Regional Scale Approach to Assessing Current and Potential Future Exposure to Tidal Inundation in Different Types of Estuaries. *Scientific Reports*, 8, 7065. doi : 10.1038/s41598-018-25410-y.

- Heinemann, P., Isopescu, D. & Maxineasa, S. G. (2021). Case Studies on Finite Element Modeling of Welded Joints. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Construction. Architecture Section*, 67(2), 7994. doi : 10.2478/bipca-2021-0017.
- Heniche, M., Secretan, Y., Boudreau, P. & Leclerc, M. (2000). A two-dimensional finite element drying-wetting shallow water model for rivers and estuaries.
- Hervouet, J.-M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows : modelling with the finite element method*. John Wiley & Sons.
- Hoitink, A. J. F. & Jay, D. A. (2016). Tidal river dynamics : Implications for deltas. *Reviews of Geophysics*, 54(1), 240272. doi : 10.1002/2015rg000507.
- Horton, B. P., Khan, N. S., Cahill, N., Lee, J. S. H., Shaw, T. A., Garner, A. J., Kemp, A. C., Engelhart, S. E. & Rahmstorf, S. (2020). Estimating Global Mean Sea-Level Rise and Its Uncertainties by 2100 and 2300 from an Expert Survey. *npj Climate and Atmospheric Science*, 3, 18. doi : 10.1038/s41612-020-0121-5.
- Hrma, P., Ferkl, P. & Kruger, A. A. (2023). Arrhenian to non-Arrhenian crossover in glass melt viscosity. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 619, 122556.
- Hsu, M., Kuo, A., Kuo, J. & Liu, W. (1999). Procedure to Calibrate and Verify Numerical Models of Estuarine Hydrodynamics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 166182. doi : 10.1061/(asce)0733-9429(1999)125:2(166).
- Hudon, C. & Carignan, R. (2008). Cumulative Impacts of Hydrology and Human Activities on Water Quality in the St. Lawrence River (Lake Saint-Pierre, Quebec, Canada). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 65(6), 1165–1180. doi : 10.1139/F08-069.
- Hunter, N. M., Bates, P. D., Horritt, M. S. & Wilson, M. D. (2007). Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation : A review. *Reduced-Complexity Geomorphological Modelling for River and Catchment Management*, 90(3), 208225. doi : 10.1016/j.geomorph.2006.10.021.
- Hurtado-Herrera, M., Uh Zapata, M., Hammouti, A., Pham Van Bang, D., Zhang, W. & Nguyen, K. D. (2024). Numerical investigation of the scour around a diamond- and square-shaped pile in a narrow channel. *Ocean Engineering*, 309, 118374. doi : 10.1016/j.oceaneng.2024.118374.
- Idier, D., Bertin, X., Thompson, P. & Pickering, M. D. (2019). Interactions Between Mean Sea Level, Tide, Surge, Waves and Flooding : Mechanisms and Contributions to Sea Level Variations at the Coast. *Surveys in Geophysics*, 40(6), 16031630. 165. doi : 10.1007/s10712-019-09549-5.
- Iglesias, I., Avilez-Valente, P., Bio, A. & Bastos, L. (2019a). Modelling the Main Hydrodynamic Patterns in Shallow Water Estuaries : The Minho Case Study. *Water*. doi : 10.3390/w11051040.
- Iglesias, I., Almeida, C. M. R., Teixeira, C., Mucha, A. P., Magalhães, A., Bio, A. & Bastos, L. (2020). Linking contaminant distribution to hydrodynamic patterns in an urban estuary : The Douro estuary test case. *Science of The Total Environment*, 707, 135792. doi : 10.1016/j.scitotenv.2019.135792.
- Iglesias, I., Avilez-Valente, P., Pinho, J. L., Bio, A., Vieira, J., Bastos, L. & Veloso-Gomes, F. (2019b). *Numerical modeling tools applied to estuarine and coastal hydrodynamics : A user perspective*. IntechOpen.
- Iglesias, I., Bio, A., Bastos, L. & Avilez-Valente, P. (2021). Estuarine hydrodynamic patterns and hydrokinetic energy production : The Douro estuary case study. *Energy*, 222, 119972.

- James, T. S., Henton, J. A., Leonard, L. J., Darlington, A., Forbes, D. L. & Craymer, M. (2014). Relative sea-level projections in Canada and the adjacent mainland United States. doi : 10.4095/295574.
- Ji, Z.-G., Moustafa, M. & Hamrick, J. (2024). Hydrodynamic Modeling of a Large, Shallow Estuary. *Journal of Marine Science and Engineering*. doi : 10.3390/jmse12030381.
- Juretić, F., & Gosman, A. D. (2010). Error Analysis of the Finite-Volume Method with Respect to Mesh Type. *Numerical Heat Transfer, Part B : Fundamentals*. doi : 10.1080/10407791003685155.
- Kang, S.-H. (2009). The application of integrated urban inundation model in Republic of Korea. *Hydrological Processes*, 23(11), 16421649. doi : 10.1002/hyp.7297.
- Kantha, L. H. & Clayson, C. A. (2000). *Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes*. San Diego : Academic Press.
- Kench, P. S. (1999). Geomorphology of Australian estuaries : Review and prospect. *Australian Journal of Ecology*, 24(4), 367380. doi : 10.1046/j.1442-9993.1999.00985.x.
- Kennish, M. J. (2016). Encyclopedia of estuaries. (*S.l.*) : (*s.n.*).
- Khojasteh, D., Hottinger, S., Felder, S., De Cesare, G., Heimhuber, V., Hanslow, D. J. & Glamore, W. (2020). Estuarine tidal response to sea level rise : The significance of entrance restriction. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 244, 106941.
- Khojasteh, D., Glamore, W., Heimhuber, V. & Felder, S. (2021). Sea Level Rise Impacts on Estuarine Dynamics : A Review. *Science of The Total Environment*, 780, 146470. doi : 10.1016/j.scitotenv.2021.146470.
- Kim, H. I., Keum, H. J. & Han, K. Y. (2019). Real-Time Urban Inundation Prediction Combining Hydraulic and Probabilistic Methods. *Water*, 11(2). doi : 10.3390/w11020293.
- Kirstetter, G., Hu, J., Delestre, O., Darboux, F., Lagrée, P.-Y., Popinet, S. & Josserand, C. (2016). Modeling rain-driven overland flow : Empirical versus analytical friction terms in the shallow water approximation. *Journal of Hydrology*, 536, 19. doi : 10.1016/j.jhydrol.2016.02.022.
- Kulp, S. A. & Strauss, B. H. (2019). New Elevation Data Triple Estimates of Global Vulnerability to Sea-Level Rise and Coastal Flooding. *Nature Communications*, 10, 4844. doi : 10.1038/s41467-019-12808-z.
- Landau, L. D. & Lifshitz, E. M. (2013). Fluid mechanics : Landau And Lifshitz : course of theoretical physics, Volume 6 (Vol. 6). (*S.l.*) : Elsevier.
- Large, W. G. & Pond, S. (1981). Open Ocean Momentum Flux Measurements in Moderate to Strong Winds. *Journal of Physical Oceanography*, 11(3), 324–336. doi : 10.1175/1520-0485(1981)011<0324:OOMFMI>2.0.CO;2.
- Le, H. A., Lambrechts, J., Ortleb, S., Gratiot, N., Deleersnijder, E. & Soares-Frazão, S. (2020). An implicit wetting–drying algorithm for the discontinuous Galerkin method : application to the Tonle Sap, Mekong River Basin. *Environmental Fluid Mechanics*, 20(4), 923951. doi : 10.1007/s10652-019-09732-7.
- Le Roy, S., Pedreros, R., André, C., Paris, F., Lecacheux, S., Marche, F. & Vinchon, C. (2015). Coastal flooding of urban areas by overtopping : dynamic modelling application to the Johanna storm (2008) in Gâvres (France). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(11), 24972510. doi : 10.5194/nhess-15-2497-2015.
- Le Soleil. Titre exact de l'article — à insérer.

- Leclerc, M., Bellemare, J.-F. & Trussard, S. (1990). Simulation Hydrodynamique de l'Estuaire Supérieur du Fleuve Saint-Laurent (Canada). Report / internal study ; institutional details not specified in source reference.
- Lefaivre, D., Hamdi, S. & Morse, B. (2009). Statistical Analysis of the 30-Day Water Level Forecasts in the St. Lawrence River. *Marine Geodesy*, 32(1), 30–41. doi : 10.1080/01490410802661971.
- Lefaivre D, H. S. & (, M. B. (2009).) Statistical analysis of the 30-Day Water level forecasts in the St. *Lawrence river. Marine Geodesy* 32 :30–41. doi : 10.1080/01490410802661971.
- Li, Z., Liu, J., Mei, C., Shao, W., Wang, H. & Yan, D. (2019). Comparative Analysis of Building Representations in TELEMAC-2D for Flood Inundation in Idealized Urban Districts. *Water*, 11(9), 1840. doi : 10.3390/w11091840.
- Lousada, S., Alves, R., Fernandes, M. & Gonçalves, L. (2023). Hydraulic Planning in Insular Urban Territories : The Case of Madeira Island—São João Stream, Funchal, Portugal. *Water*, 15(11). doi : 10.3390/w15112075.
- Ma, T. & Sun, C. (2022). Characterization of Coupled Turbulent Wind-wave Flows Based on Large Eddy Simulation. *arXiv preprint arXiv :2206.02085*.
- Martin, C. L., Momtaz, S., Gaston, T. & Moltschaniwskyj, N. A. (2020). Estuarine cultural ecosystem services valued by local people in New South Wales, Australia, and attributes important for continued supply. *Ocean Coastal Management*, 190, 105160. doi : 10.1016/j.ocecoaman.2020.105160.
- Matte, P. (2014). *Modélisation Hydrodynamique de l'Estuaire Fluvial du Saint-Laurent*. (Ph.D. thesis, Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), Université du Québec, Québec, Canada).
- Matte, P., Secretan, Y. & Morin, J. (2017a). Hydrodynamic Modeling of the St. Lawrence Fluvial Estuary. I : Model Setup, Calibration, and Validation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 143(5). doi : 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000397.
- Matte, P., Secretan, Y. & Morin, J. (2017b). Hydrodynamic Modeling of the St. Lawrence Fluvial Estuary. II : Reproduction of Spatial and Temporal Patterns. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 143(5), 04017011. doi : 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000394.
- Mckenna, J., Glenis, V. & Kilsby, C. (2023). A Local Multi-Layer Approach to Modelling Interactions between Shallow Water Flows and Obstructions. *Repéré à*.
- Mel, R. A., Lo Feudo, T., Miceli, M. & Maiolo, M. (2023). A Coupled Wave-Hydrodynamical Model to Assess the Effect of Mediterranean Storms under Climate Change : The Calabaia Case Study. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 102, 101368. doi : 10.1016/j.dynatmoce.2023.101368.
- Mendez-Rios, F., Le Coz, J., Benjamin, R. & Théophile, T. (2023). Estimation bayésienne d'un modèle hydrodynamique 1D d'une rivière influencée par la marée : application à la Seine Aval, France. *Communication présentée au Colloque SHF "Prévision des crues et des inondations—Avancées, valorisation et perspectives"*.
- Merwade, V., Olivera, F., Arabi, M. & Edleman, S. (2008). Uncertainty in Flood Inundation Mapping : Current Issues and Future Directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(7), 608–620. doi : 10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:7(608).
- Mignot, E., Li, X. & Dewals, B. (2019). Experimental modelling of urban flooding : A review. *Journal of Hydrology*, 568, 334–342.

- Miyamoto, H., Itoh, K., Komatsu, G., Baker, V. R., Dohm, J. M., Tosaka, H. & Sasaki, S. (2006). Numerical simulations of large-scale cataclysmic floodwater : A simple depth-averaged model and an illustrative application. *Geomorphology*, 76(1), 179192. 167. doi : 10.1016/j.geomorph.2005.11.002.
- Mnassri, S., & Triki, A. (2022). A Finite Element based solver for simulating open-channel transient flows The gradually varied regime. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(1), 103109. doi : 10.1080/09715010.2020.1815090.
- Morin, J., Boudreau, P., Secretan, Y. & Leclerc, M. (2000). Pristine lake Saint-François, St. Lawrence river : *Hydrodynamic simulation and cumulative impact*. *Journal of Great Lakes Research*, 26(4), 384401. doi : 10.1016/s0380-1330(00)70702-7.
- Mustafa, A. & Szydlowski, M. (2021). Application of different building representation techniques in HEC-RAS 2-D for urban flood modeling using the Toce River experimental case. *PeerJ*, 9. doi : 10.7717/peerj.11667.
- Müller, M. (2012). The influence of changing stratification conditions on barotropic tidal transport and its implications for seasonal and secular changes of tides. *Continental Shelf Research*, 47, 107118. doi : 10.1016/j.csr.2012.07.003.
- Müller, M., Arbic, B. K. & Mitrovica, J. (2011). Secular trends in ocean tides : Observations and model results. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 116.
- National Weather Service. The December 22–25 2022 Storm : Blizzard, Extreme Cold, Snow and Wind. Repéré à <https://www.weather.gov/arx/dec2322>.
- Negretto, G. (2019). The impact of spatial representation on flood hazard assessment : a comparison between 1D, quasi-2D and fully 2D hydrodynamic models of Rio Marano (Rimini).
- Noman, J., Cassol, W. N., Daniel, S. & Pham Van Bang, D. (2023). Bathymetric data integration approach to study bedforms in the estuary of the Saint-Lawrence River. *Frontiers in Remote Sensing*, 4. doi : 10.3389/frsen.2023.1125898.
- Osborne, J. M. & Whiteley, J. P. (2010). A numerical method for the multiphase viscous flow equations. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 199(4952), 34023417.
- Ouyang, X. & Lee, S. Y. (2014). Updated estimates of carbon accumulation rates in coastal marsh sediments. *Biogeosciences*, 11(18), 50575071. doi : 10.5194/bg-11-5057-2014.
- Papaioannou, G., Loukas, A., Vasiliades, L. & Aronica, G. T. (2016). Flood Inundation Mapping Sensitivity to Riverine Spatial Resolution and Modelling Approach. *Natural Hazards*, 83(S1), 117–132. doi : 10.1007/s11069-016-2382-1.
- Paquier, A., Mignot, E. & Bazin, P.-H. (2015). From Hydraulic Modelling to Urban Flood Risk. *Toward integrated modelling of urban systems*, 115, 3744. doi : 10.1016/j.proeng.2015.07.352.
- Patrick, C. J., Kominoski, J. S., McDowell, W. H., Branoff, B., Lagomasino, D., Leon, M. & Zou, X. (2022). A general pattern of trade-offs between ecosystem resistance and resilience to tropical cyclones. *Science Advances*, 8(9), eabl9155. doi : 10.1126/sciadv.abl9155.
- Payraastre, O., Bourgin, F., Hocini, N. & Lebouc, L. (2018). Construction d'échelles de gravité d'inondation sur les petits cours d'eau non jaugés à partir de la méthode Cartino. *Application aux bassins de la Nive et de la Bidouze. Convention DGPR-Ifsttar 2017 n° 2201078721 du 26 Juin 2017-Action 13*.

- Pedrerros, R., Idier, D., Muller, H., Lecacheux, S., Paris, F., Yates-Michelin, M. & Sénéchal, N. (2018). Relative Contribution of Wave Setup to the Storm Surge : Observations and Modeling Based Analysis in Open and Protected Environments (Truc Vert beach and Tubuai island). 168.
- Pilz, J. & Spöck, G. (2008). Why do we need and how should we implement Bayesian kriging methods. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 22(5), 621632.
- Pinos, J. & Timbe, L. (2019). Performance Assessment of Two-Dimensional Hydraulic Models for Generation of Flood Inundation Maps in Mountain River Basins. *Water Science and Engineering*, 12(1), 11–18. doi : 10.1016/j.wse.2019.03.001.
- Piranti, A. S., Setyaningrum, N., Widyartini, D. S. & Ardli, E. R. (2021). Key Species of Phytoplankton in Eastern Part of Segara Anakan Indonesia Based on Season. *Journal of Ecological Engineering*, 22(3), 135142. doi : 10.12911/22998993/132606.
- Polnikov, V. G. (2011). Numerical Modeling of Wind Waves : Problems, Solutions, Verifications, and Applications. 1376(1), 248254. doi : 10.1063/1.3651889.
- Poulter, B. & Halpin, P. N. (2008). Raster modelling of coastal flooding from sea-level rise. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(2), 167182.
- pp. (1046). 1050). *Coastal Education Research Foundation Inc.* doi : 10.2112/si85-210.1.
- Priya, A., Bhavan, S. G., Bella, K., Biji, K., Velayudhan, P. K., Sahadevan, P. & Kutty, R. (2023). Delineating the fish-based ecosystem services of a small tropical Indian estuary : Identification, evaluation and management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. doi : 10.1016/j.ecss.2023.108506.
- Ramirez, J. A., Lichter, M., Coulthard, T. J. & Skinner, C. (2016). Hyper-Resolution Mapping of Regional Storm Surge and Tide Flooding : Comparison of Static and Dynamic Models. *Natural Hazards*, 82(1), 571–590. doi : 10.1007/s11069-016-2198-z.
- Ravazzani, G., Mancini, M. & Meroni, C. (2009). Design hydrograph and routing scheme for flood mapping in a dense urban area. *Urban Water Journal*, 6(3), 221231. doi : 10.1080/15730620902781434.
- Safari, M. (2018). Stochastic Richelieu River Flood Modeling. (S.l.) : *Ecole Polytechnique*, Montreal (Canada).
- Saichenthur, N., Murali, K. & Sundar, V. (2022). Influence of horizontal eddy viscosity and bottom friction coefficients on morphodynamic evaluations. *Journal of Hydro-environment Research*, 40, 102115. doi : 10.1016/j.jher.2021.12.005.
- Sarchani, S., Seiradakis, K., Coulibaly, P. & Tsanis, I. (2020). Flood Inundation Mapping in an Ungauged Basin. *Water*, 12(6). doi : 10.3390/w12061532.
- Sathya, K., Rahardjo, A. P. & Jayadi, R. (2021). Flash Flood Disaster Reconstruction for Estimating the Available Warning Time : The Case in Sempor River on 21st of February 2020, Mt. Merapi Slope, Yogyakarta Special Region. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*.
- Saucier, F. J., Roy, F., Senneville, S., Smith, G., Lefaivre, D., Zakardjian, B. & Dumais, J.-F. (2009). Modélisation de la circulation dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en réponse aux variations du débit d'eau douce et des vents. 22(2), 159176.

- Saucier, F. J. & Chassé, J. (2000). Tidal Circulation and Buoyancy Effects in the St. Lawrence Estuary. *Atmosphere–Ocean*, 38(4), 505–556. doi : 10.1080/07055900.2000.9649658.
- Saucier, F. J., Roy, F., Gilbert, D., Pellerin, P. & Ritchie, H. (2003). Modeling the Formation and Circulation Processes of Water Masses and Sea Ice in the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 108(C8). doi : 10.1029/2000JC000686.
- Savage, C., Thrush, S. F., Lohrer, A. M. & Hewitt, J. E. (2012). Ecosystem services transcend boundaries : estuaries provide resource subsidies and influence functional diversity in coastal benthic communities.
- Savenije, H. H. G. (2005). *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries (Vol. 194). (S.I.) : Elsevier.*
- Schubert, J. E. & Sanders, B. F. (2012). Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency. *Advances in Water Resources*, 41, 4964. doi : 10.1016/j.advwatres.2012.02.012.
- Schubert, J. E., Sanders, B. F., Smith, M. J. & Wright, N. G. (2008). Unstructured mesh generation and landcover-based resistance for hydrodynamic modeling of urban 169.
- Seenath, A., Wilson, M. & Miller, K. (2016). Hydrodynamic versus GIS Modelling for Coastal Flood Vulnerability Assessment : Which Is Better for Guiding Coastal Management ? *Ocean & Coastal Management*, 120, 99–109. doi : 10.1016/j.ocecoaman.2015.11.019.
- Serra-Llobet, A., Tourment, R., Montané, A. & Buffin-Belanger, T. (2022). Managing residual flood risk behind levees : Comparing USA, France, and Quebec (Canada). *Journal of Flood Risk Management*, 15(2), e12785. doi : <https://doi.org/10.1111/jfr3.12785>.
- Sheaves, M., Baker, R., Nagelkerken, I. & Connolly, R. M. (2015). True Value of Estuarine and Coastal Nurseries for Fish : Incorporating Complexity and Dynamics. *Estuaries and Coasts*, 38(2), 401414. doi : 10.1007/s12237-014-9846-x.
- Shen, J., Tan, F. & Zhang, Y. (2018). Improved Building Treatment Approach for Urban Inundation Modeling : A Case Study in Wuhan, China. *Water*, 10(12). doi : 10.3390/w10121760.
- Shi, X., Yu, P., Guo, Z., Chen, F., Wu, X., Sun, Z. & Zeng, J. (2020). Simulation of storm surge inundation under different typhoon intensity scenarios : case study of Pingyang County, China. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2020, 117.
- Simons, R., Monismith, S., Saucier, F., Johnson, L. & Winkler, G. (2010). Modelling stratification and baroclinic flow in the estuarine transition zone of the St. Lawrence Estuary. *Atmosphere - Ocean*, 48(2), 132146. doi : 10.3137/oc316.2010.
- Sun, S., Lei, L. & Wang, Q. (2023). Entropy-Production-Rate-Preserving Algorithms for Thermodynamically Consistent Nonisothermal Models of Incompressible Binary Fluids. *Available at SSRN 4339859*.
- Sutherland, J., Peet, A. H. & Soulsby, R. L. (2004). Evaluating the performance of morphological models. *Coastal Engineering*, 51(89), 917939. doi : 10.1016/j.coastaleng.2004.07.015.
- Talke, S. A. & Jay, D. A. (2020). Changing tides : The role of natural and anthropogenic factors. *Annual review of marine science*, 12(1), 121151.

- Tanaka, H. & Chanson, H. (2018). Estuarine hydrodynamics and morphodynamics : a perspective. *Coastal Engineering Journal*, 60(4), 385386.
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D. & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling : A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 90, 201216. doi : 10.1016/j.envsoft.2017.01.006.
- The Weather Channel. Titre exact de l'article — à insérer.
- Uncles, R. J., Stephens, J. A. & Harris, C. (2013). Towards predicting the influence of freshwater abstractions on the hydrodynamics and sediment transport of a small, strongly tidal estuary : The Devonshire Avon. *Managing Estuarine Sediments*, 79, 8396. doi : 10.1016/j.ocecoaman.2012.05.006.
- Valle-Levinson, A. (2010). Contemporary issues in estuarine physics. (S.l.) : *Cambridge University Press*.
- van Rijn, L. (2010). Deltares. *Tidal phenomena in the Scheldt Estuary.*, 105, 199. 170.
- van Rijn, L. C. (2011). Analytical and numerical analysis of tides and salinities in estuaries ; part I : tidal wave propagation in convergent estuaries. *Ocean Dynamics*, 61(11), 17191741. doi : 10.1007/s10236-011-0453-0.
- Vojinovic, Z. & Tutulic, D. (2009). On the use of 1D and coupled 1D-2D modelling approaches for assessment of flood damage in urban areas. *Urban Water Journal*, 6(3), 183199. doi : 10.1080/15730620802566877.
- Vorobevskii, I., Al Janabi, F., Schneebeck, F., Bellera, J. & Krebs, P. (2020). Urban Floods : Linking the Overloading of a Storm Water Sewer System to Precipitation Parameters. *Hydrology*, 7(2). doi : 10.3390/hydrology7020035.
- Wang, Z. B., Jeuken, M. C. J. L., Gerritsen, H., de Vriend, H. J. & Kornman, B. A. (2002). Morphology and asymmetry of the vertical tide in the Westerschelde estuary. *Continental Shelf Research*, 22(17), 25992609. doi : 10.1016/s0278-4343(02)00134-6.
- Watson, C. S., Gyawali, J., Creed, M. & Elliott, J. R. (2024). City-scale high-resolution flood models and the role of topographic data : a case study of Kathmandu, Nepal. *Geocarto International*, 39(1), 2387073. doi : 10.1080/10106049.2024.2387073.
- Werner, M. G. F. (2004). A Comparison of Flood Extent Modelling Approaches through Constraining Uncertainties on Gauge Data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6), 1141–1152. doi : 10.5194/hess-8-1141-2004.
- Wu, J. (1982). Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 87, 97049706.
- Yee, S. H., Sharpe, L. M., Branoff, B. L., Jackson, C. A., Cicchetti, G., Jackson, S. & Shumchenia, E. (2023). Ecosystem services profiles for communities benefitting from estuarine habitats along the Massachusetts coast, USA. *Ecological Informatics*, 77, 102182. doi : 10.1016/j.ecoinf.2023.102182.
- Yunus, A. P., Avtar, R., Kraines, S., Yamamuro, M., Lindberg, F. & Grimmond, C. S. B. (2016). Uncertainties in Tidally Adjusted Estimates of Sea Level Rise Flooding (Bathtub Model) for the Greater London. *Remote Sensing*, 8(5), 366. doi : 10.3390/rs8050366.
- Zhang, H., Wu, W., Hu, C., Hu, C., Li, M., Hao, X. & Liu, S. (2021). A distributed hydrodynamic model for urban storm flood risk assessment. *Journal of Hydrology*, 600, 126513. doi : 10.1016/j.jhydrol.2021.126513.

- Zhang, L., Li, N., Jia, S., Wang, T. & Dong, J. (2015). A Method for DEM Construction Considering the Features in Intertidal Zones. *Marine Geodesy*, 38(2), 163175. doi : 10.1080/01490419.2014.937883.
- Zhang, Y. (2020). Using LiDAR-DEM based rapid flood inundation modelling framework to map floodplain inundation extent and depth. *Journal of Geographical Sciences*, 30(10), 1649–1663.
- Zhou, X., Mou, L., Ao, T., Huang, X. & Yang, H. (2025). Effect of the spatial resolution of digital terrain data obtained by drone on urban fluvial flood modeling of mountainous regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(7), 19631980. doi : 10.5194/hess-29-1963-2025.