



Projet IRENE : Imagerie Radar pour l'Estimation des Niveaux d'Eau

Rapport final
Mars 2024



Institut national
de la recherche
scientifique



Projet IRENE : Imagerie Radar pour l'Estimation des Niveaux d'Eau

Rapport final
Mars 2024

ÉQUIPE DE RÉALISATION :

Karem Chokmani, Institut National de la Recherche Scientifique
Jimmy Poulin, Institut National de la Recherche Scientifique
Anas El Alem, Institut National de la Recherche Scientifique
Rachid Lhissou, Institut National de la Recherche Scientifique
Yves Gauthier, Institut National de la Recherche Scientifique
Jasmin Gill-Fortin, Institut National de la Recherche Scientifique

Titre du projet Ouranos: Projet IRENE : Imagerie Radar pour l'Estimation des Niveaux d'Eau

Numéro du projet Ouranos: 705700

Citation suggérée : Chokmani, Karem, Poulin, Jimmy, El Alem Anas. (2024). *Projet IRENE : Imagerie Radar pour l'Estimation des Niveaux d'Eau*. Rapport présenté à Ouranos. Montréal. Institut National de la Recherche Scientifique. 85 p.

Source de l'image sur la couverture :

CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=678104>

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas l'Institut National de la Recherche Scientifique ni ses membres. Toute utilisation ultérieure du document sera au seul risque de l'utilisateur sans la responsabilité ou la poursuite juridique des auteurs.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été rendu possible grâce au financement accordé par Ouranos dans le cadre du projet INFO-Crue qui vise la réalisation de recherche et développement en changements climatiques et résilience face aux inondations pour le compte du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)

Nous tenons à remercier plus particulièrement pour leur collaboration les membres du comité scientifique et de suivi :

Marco Braun, Ouranos
Alexandrine Bisailon, Ouranos
Richard Turcotte, MELCCFP
Vincent Tremblay, MELCCFP
Danielle DeSeve, Institut de recherche d'Hydro-Québec
Pascal Matte, Environnement Canada
Simon Tolszczuk-Leclerc, Ressources Naturelles Canada
Robert Leconte, Université de Sherbrooke



**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**



RÉSUMÉ

Contexte

Le projet IRENE vise développer une approche satellitaire opérationnelle permettant de créer des stations virtuelles de niveau d'eau. Il s'agit d'obtenir, sans intervention sur le terrain, le niveau d'eau en différents points de la plaine inondable pour une section de rivière non jaugée et ce, pour une résolution spatiale qui se rapproche de celle du modèle numérique de terrain LiDAR (~1 m). La méthode vise à utiliser des images radar disponibles gratuitement et en temps quasi-réel.

Objectifs :

- Pour une image radar satellitaire donnée, fournir les estimations du niveau d'eau/profondeurs de submersion sur une série de points jugés optimaux, avec la meilleure qualité possible et avec les incertitudes qui s'y rattachent ;
- Identifier la portée spatiale d'application (conditions optimales et secteurs prometteurs) et détailler les limitations techniques de la méthode ;
- Indiquer la démarche nécessaire pour appliquer la méthode sur de nouveaux bassins ;
- Développer un prototype d'outil automatisé pour appliquer la méthode développée.

Démarche :

- Estimation de la distribution statistique des valeurs de rétrodiffusions des pixels correspondant aux emplacements d'eau libre.
- Classification des pixels d'une image radar par logique floue afin de détecter l'eau libre.
- Désagrégation spatiale de la classification de l'eau libre en utilisant un modèle numérique de terrain de haute résolution.
- Estimation des hauteurs d'eau sur les secteurs d'eau libre.
- Calcul de l'incertitude issue des données sources et de la méthode.
- Validation des résultats.
- Codage du processus d'estimation sous forme d'un exécutable automatisé afin de créer un prototype facilement utilisable.

Résultats

- La méthodologie initiale, basée sur des concepts et des travaux de l'INRS, n'a pas donné les résultats escomptés. L'hypothèse selon laquelle la rétrodiffusion radar pourrait être traduite en pourcentage d'eau libre par pixel n'a pas été confirmée.

- La validation par drone n'a montré aucune relation claire entre les pourcentages d'eau libre estimés par la méthode et les valeurs réelles obtenues par drone. Le filtre de réduction du chatoiement a pu affecter les résultats.
- En raison des défis rencontrés, il a été décidé avec les représentants de la Direction de l'expertise Hydrique (DEH) de ne pas poursuivre le développement d'un prototype automatisé, mais de rechercher une nouvelle méthode et d'approfondir l'étude des incertitudes et limitations techniques.
- Une méthodologie alternative a été évaluée, comparant l'étendue de l'eau déterminée par radar à des étendues théoriques produites par binarisation des valeurs du modèle HAND, pour déterminer le niveau d'eau final.
- Cette nouvelle méthode a été appliquée à 14 sites possédant une station hydrométrique de la DEH, avec des résultats mitigés. Deux sites ont présenté des résultats acceptables.
- Les sites avec des résultats acceptables avaient une grande amplitude de niveaux d'eau, ce qui permet des variations horizontales significatives du plan d'eau, détectables par radar.

Suites recommandées

- L'amélioration des résultats pourrait passer par l'utilisation de modèles numériques de terrain à niveau d'eau bas et idéalement complétés par une bathymétrie, afin de maximiser la dynamique des niveaux d'eau observables sur les images radar.
- Il serait bénéfique de poursuivre le projet en appliquant la méthode sur des sites aux caractéristiques idéales, sans égard à la présence de stations hydrométriques, en utilisant des modèles numériques de terrain créés par drone et des techniques avancées de classification pour traiter les images radar.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	ii
Résumé	iii
Table des matières	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	x
Liste des abréviations, sigles et acronymes	xi
1. Introduction	1
1.1 objectifs	1
2. Méthodologie	2
2.1 De l'image radar à l'eau libre	2
2.1.1 Étape 1: Estimation de la distribution statistique des rétrodiffusions des objets d'eau libre	3
2.1.2 Étape 2: Classification par logique floue des objets d'eau libre	4
2.2 De l'eau libre à l'étendue d'inondation	4
2.2.1 Étape 3: Désagrégation de la classification de l'eau libre	4
2.3 De l'étendue aux niveaux d'eau.....	7
2.3.1 Étape 4: Estimation des hauteurs d'eau sur les secteurs d'eau libre	7
2.3.2 Étape 5: Calcul de l'incertitude issue des données sources et de la méthode.....	7
2.4 Validation et automatisation	9
2.4.1 Étape 6: Zone d'étude et validation des résultats.....	9
2.4.2 Étape 7: Codage du processus d'estimation sous forme d'un exécutable automatisé	10
3. Résultats et discussion	11
3.1 Activités réalisées.....	11
3.1.1 Mise en place de la base de données	11
3.1.1.1 Données satellites radar	11
3.1.1.2 Données de niveau d'eau	12
3.1.1.3 Modèle numérique de terrain	12
3.1.1.4 Représentation cartographique des cours d'eau	13
3.1.2 Application de la méthode proposée	13
3.1.2.1 Estimation de la distribution statistique des rétrodiffusions des objets d'eau libre	13

3.1.2.2	Classification de la probabilité d'eau	13
3.1.2.3	Désagrégation de la classification de l'eau libre	14
3.1.2.4	Estimation des hauteurs d'eau sur les secteurs d'eau libre	15
3.1.3	Validation des résultats	18
3.1.3.1	Validation de la relation entre la probabilité d'appartenance à l'eau / présence d'eau sous-pixel	22
3.1.4	Méthodologie alternative	27
3.1.5	Validation de la méthodologie alternative.....	32
3.1.5.1	Sites montrant des résultats satisfaisants.....	33
3.1.5.2	Sites montrant des résultats modérés.....	37
3.1.5.3	Sites montrant des résultats médiocres	41
3.1.6	Discussions	45
4.	Conclusion	53
	Références.....	55
	Annexes	57

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Processus méthodologique pour le développement d'IRENE.	2
Figure 2 : Histogramme des densités de probabilité de rétrodiffusion.	3
Figure 3 : Fonction d'appartenance de forme Z.	4
Figure 4 : Approche HAND tirée de Nobre et al., 2011).	5
Figure 5. Processus de désagrégation spatiale.	6
Figure 6. Calcul du niveau d'eau.	7
Figure 7. Schéma de propagation de l'erreur des entrées jusqu'aux sorties dans le cas d'un modèle à deux variables d'entrée.	9
Figure 8. Zone d'intérêt.	11
Figure 9. Classification de la probabilité d'occurrence de l'eau à partir de l'image Sentinel-1. Gauche : Image visible du cours d'eau (date indéterminée). Milieu : Image Sentinel-1 du 1er juin 2019. Droite : Probabilité d'occurrence de l'eau d'après l'image Sentinel-1 (noir = 0%, blanc = 100%).	14
Figure 10. Désagrégation spatiale en combinant les probabilités d'occurrence de l'eau à une résolution de 10 m et un modèle HAND à une résolution de 1 m.	15
Figure 11. Profondeur de submersion obtenue en soustrayant les valeurs du HAND d'une surface d'élévation constante (par rapport au HAND).	16
Figure 12. : Processus de classification des zones submergées (Rivière Chaudière, 26 avril 2019, zone de 3 km x 6 km). A) image Sentinel-1, B) probabilité d'appartenance à la classe eau, C) modèle HAND dérivé du MNT, D) image du secteur (date indéterminée), E) étendu de la surface submergée et F) profondeur de submersion de la zone inondée.	17
Figure 13. Zone utilisée pour effectuer les premières validations.	19
Figure 14. Niveaux estimés à partir de la méthode proposée.	19
Figure 15. Création d'une zone d'analyse adaptée au contenu de l'image S-1. 1) Image S-1. 2) Degré d'appartenance à la classe eau. 3) Pixels utilisés pour l'analyse (rose avec transparence).	21
Figure 16. Niveaux estimés en limitant le domaine d'analyse aux pixels ayant un degré d'appartenance non nul et contigu à la rivière (Version 2).	21
Figure 17. Niveaux estimés suite à diverses modification de la méthode proposée.	22
Figure 19. Classification des pixels d'eau sur les images de drone. L'image de gauche montre la limite de l'eau tracée manuellement et l'image de droite la proportion d'eau par pixel de 10 m déterminé à partir de l'image de gauche.	24
Figure 20. Image Sentinel-1 acquise le 2 octobre 2023. Les valeurs de rétrodiffusion sont présentées à gauche alors que le degré d'appartenance à la classe eau est présenté à droite.	24
25	
Figure 21. Comparaison du pourcentage d'eau par pixel déterminé sur les images acquises par drone et le degré d'appartenance à la classe eau estimé à partir des images Sentinel-1.	25
Figure 22. Analyse de la relation entre le pourcentage d'eau déterminé à partir du drone et le pourcentage estimé à partir de l'image Sentinel-1. Tous les pixels ayant un pourcentage d'eau plus grand ou égal à 0 ont été utilisés.	25
Figure 23. Analyse de la relation entre le pourcentage d'eau déterminé à partir du drone et le pourcentage estimé à partir de l'image Sentinel-1. Seulement les pixels ayant un pourcentage d'eau supérieur à 0% et inférieur à 100% ont été utilisés.	26

Figure 24. Exemples de niveaux d'eau théoriques (0 à 3 m) générés à partir du modèle HAND par binarisation.	27
Figure 25. Exemples des neuf plans d'eau générés à partir de l'image radar du 27 avril 2018 via la classification par logique floue en utilisant la méthode de Quadrature Gaussienne et de leur binarisation à l'aide d'un seuil de 0,5.	29
Figure 26. Exemple de graphique permettant d'identifier le niveau d'eau en se basant sur les scores de l'IoU. Sur l'axe des abscisses sont présentées les scores de l'IoU, tandis que sur l'axe des ordonnées sont représentées les niveaux d'eau théoriques. Les étoiles marquées indiquent le groupe des 10% de niveaux d'eau ayant les meilleurs scores. L'exemple (A) illustre un groupe sans valeurs aberrantes, tandis que l'exemple (B) représente un cas avec une valeur de niveau aberrante. Les deux graphiques ne correspondent pas à des scénarios associés à la même image radar.	30
Figure 27. Organigramme général de la méthodologie alternative.	32
Figure 28. Fiche descriptive de la station Saint-Lambert-de-Lauzon.	34
Figure 29. Comparaison entre la modélisation des niveaux d'eau et les mesures in situ pour la station Saint-Lambert-de-Lauzon.	35
Figure 31. Comparaison entre la modélisation des niveaux d'eau et les mesures in situ pour la station Saint-Gabriel-de-Brandon.	37
Figure 32. Fiche descriptive de la station au-quai de la municipalité de Stratford.	38
Figure 33. Comparaison entre la modélisation des niveaux d'eau et les mesures in situ pour la station Au-quai de la municipalité de Stratford.	39
Figure 34. Fiche descriptive de la station du-barrage à Saint-Hyacinthe.	40
Figure 35. Comparaison entre la modélisation des niveaux d'eau et les mesures in situ pour la station Du-barrage à Saint-Hyacinthe.	41
Figure 36. Fiche descriptive de la station au-lac Mégantic à Lac-Mégantic.	42
Figure 37. Comparaison entre la modélisation des niveaux d'eau et les mesures in situ pour la station Au-quai de la municipalité de Stratford.	43
Figure 38. Fiche descriptive de la station à la plage municipale de la ville de Lac-Brome.	44
Figure 39. Comparaison entre la modélisation des niveaux d'eau et les mesures in situ pour la station à la plage municipale de la ville de Lac-Brome.	45
Figure 40. Illustration de la zone d'analyse à partir desquels l'estimation des niveaux d'eau a été calculés (A) et du modèle HAND (B) pour la station Saint-Lambert-de-Lauzon.	46
Figure 41. Illustration de la zone d'analyse à partir desquels l'estimation des niveaux d'eau a été calculés (A) et du modèle HAND (B) pour la station Saint-Gabriel-de-Brandon. La zone encadrée en rouge est un zoom sur le masque utilisé lors du processus de la modélisation.	46
Figure 42. Illustration de la zone d'analyse à partir desquels l'estimation des niveaux d'eau a été calculés (A) et du modèle HAND (B) pour la station Au-quai de la municipalité de Stratford. La zone encadrée en rouge est un zoom sur le masque utilisé lors du processus de la modélisation.	48
Figure 43. Illustration de la zone d'analyse sur le modèle HAND à partir desquels l'estimation des niveaux d'eau a été calculés pour la station Du-barrage à Saint-Hyacinthe. La zone encadrée en rouge est un zoom sur le masque utilisé lors du processus de la modélisation.	49
Figure 44. Illustration de l'emplacement spatiale de la station virtuelle avec le masque de calcul pour la station Au-lac Mégantic à Lac-Mégantic (A). Les encadrés rouges sont des zooms de la de l'empreinte de l'image HAND utilisée, tandis que les encadrés violets sont des zooms du masque de calcul, montrant la surface de la plage et les	

zones après la plage (B), ainsi que les altitudes HAND de la plage et des zones après la plage (C).	51
Figure 45. Illustration de l'emplacement spatiale de la station virtuelle avec le masque de calcul pour la station à la plage municipale de la ville de Lac-Brome (A). La zone encadrée en rouge est un zoom sur le masque utilisé lors du processus de la modélisation montrant l'espace réduit en largeur (B) et la présence des arbustes (C).	52
Figure 46. Fiche descriptive de la station sur la rivière Chaudière au barrage Sartigan...	58
Figure 47. Fiche descriptive de la station au lac Aylmer - au quai de la municipalité de Stratford.....	59
Figure 48. Fiche descriptive de la station sur la rivière Yamaska - à 0,6 km en amont du pont-route de la 235 à Farnham.	60
Figure 49. Fiche descriptive de la station sur la rivière Yamaska - au pont de la rue de Soulanges à Bromont.....	61
Figure 50. Fiche descriptive de la station au barrage Ludger - au lac Ludger à Sainte-Agathe-des-Monts.	62
Figure 51. Fiche descriptive de la station au Barrage Cornu - au lac Cornu à Mont-Blanc (anciennement Saint-Faustin-Lac-Carré).	63
Figure 52. Fiche descriptive de la station au barrage des Rapides-des-Cèdres - au lac du Poisson Blanc à Notre-Dame-du-Laus.	64
Figure 53. Fiche descriptive de la station au barrage Mitchinamecus - au réservoir Mitchinamecus à Lac-Oscar.	65
Figure 54. Fiche descriptive de la station au barrage des Moulins - sur la rivière des Mille-Îles à Terrebonne.	66
Figure 55. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station sur la rivière Chaudière au barrage Sartigan.	68
Figure 56. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station au lac Aylmer - au quai de la municipalité de Stratford.	68
Figure 57. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station sur la rivière Yamaska - à 0,6 km en amont du pont-route de la 235 à Farnham.....	69
Figure 58. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station sur la rivière Yamaska - au pont de la rue de Soulanges à Bromont.....	69
Figure 59. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station au barrage Ludger - au lac Ludger à Sainte-Agathe-des-Monts.....	70
Figure 60. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station au Barrage Cornu - au lac Cornu à Mont-Blanc (anciennement Saint-Faustin-Lac-Carré).....	70
Figure 61. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station au barrage des Rapides-des-Cèdres - au lac du Poisson Blanc à Notre-Dame-du-Laus.	71
Figure 62. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station au barrage Mitchinamecus - au réservoir Mitchinamecus à Lac-Oscar.	71
Figure 63. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station au barrage des Moulins - sur la rivière des Mille-Îles à Terrebonne.	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques de Sentinel-1.....	12
Tableau 2. Pondération pour les 9 scénarios de la quadrature gaussienne.....	13
Tableau 3. Modifications apportées à l’algorithme afin d’améliorer l’estimation du niveau d’eau.....	22
Tableau 4. Exemple de la fiche technique finale d’estimation du niveau d’eau. Avec la Moyenne est le niveau d’eau estimé, Sigma et l’erreur sur l’estimation, Niveaux sont les niveaux estimés à partir des neuf scénarios, IoU sont les meilleurs scores et Coeff sont les pondérations de la Quadrature Gaussienne.	31

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

API	Application Programming Interface
COBARIC	Comité de Bassin versant de la Rivière Chaudière
CSV	Comma Separated Values
DEH	Direction de l'expertise Hydrique
FDP	Fonction de Densité de Probabilité
GEE	Google Earth Engine
GRHQ	Géobase du réseau hydrographique du Québec
HAND	Height Above Nearest Drainage
INRS	Institut National de la Recherche Scientifique
IRENE	Imagerie Radar pour l'Estimation du Niveau d'Eau
LiDAR	Light Detection And Ranging
MELCCFP	Ministère de l'environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MSP	Ministère de la sécurité publique du Québec
RCM	Radarsat Constellation Mission
RSO	Radar à synthèse d'ouverture
S-1	Sentinel-1

1. INTRODUCTION

Les inondations sont un phénomène récurrent au Québec et comme tout évènement climatique extrême, le risque d'inondation est susceptible d'être influencé par les changements climatiques. C'est dans ce contexte qu'OURANOS vient en appui au programme INFO-Crue (MELCC), qui a été créé pour optimiser la délimitation des zones inondables au Québec et pour mettre sur pieds un système de prévision des inondations en temps réel. Le projet IRENE, qui combine télédétection radar et principes d'hydrologie, répond ainsi au besoin de démonstration de techniques innovantes d'acquisition de données pouvant être utilisées à des fins de cartographie des zones inondables. En utilisant des images radar satellites qui couvrent le Québec à une fréquence quasi-journalière et qui sont disponibles gratuitement (Sentinel-1, Constellation Radarsat), IRENE vise particulièrement à combler le besoin de mesures de niveau d'eau dans des secteurs de rivières non-jaugés.

1.1 OBJECTIFS

Le projet IRENE vise à développer une approche satellitaire opérationnelle permettant de créer des stations virtuelles de niveau d'eau. Il s'agit d'obtenir, sans intervention sur le terrain, le niveau d'eau en différents points de la plaine inondable pour une section de rivière non jaugée et ce, pour une résolution spatiale qui se rapproche de celle du modèle numérique de terrain LiDAR (~1 m). La méthode vise à utiliser des images radar disponibles gratuitement et en temps quasi-réel.

Afin d'atteindre l'objectif général, les objectifs spécifiques sont :

- Pour une image radar satellitaire donnée, fournir les estimations du niveau d'eau/profondeurs de submersion sur une série de points jugés optimaux, avec la meilleure qualité possible et avec les incertitudes qui s'y rattachent ;
- Identifier la portée spatiale d'application (conditions optimales et secteurs prometteurs) et détailler les limitations techniques de la méthode ;
- Indiquer la démarche nécessaire pour appliquer la méthode sur de nouveaux bassins ;
- Développer un prototype d'outil automatisé pour appliquer la méthode développée.

Le but de ce rapport final est de présenter les activités réalisées et les résultats obtenus et de discuter des problèmes rencontrés. En effet, l'hypothèse de départ consistait à analyser statistiquement les valeurs de rétrodiffusion radar pour les pixels identifiés comme étant des zones d'eau libre, puis à les classer précisément grâce à la logique floue. Cette classification était raffinée spatialement à l'aide du HAND de haute résolution spatiale, avant d'estimer les hauteurs d'eau dans ces zones. Cependant, cette hypothèse n'a pas été validée, les validations par drone n'ayant montré aucune corrélation claire entre les estimations d'eau libre et les mesures réelles. Face à ces obstacles, un accord a été conclu avec les représentants de la DEH pour mettre en pause le développement de cette méthode. À la place, une méthode alternative a été expérimentée, consistant à comparer l'étendue d'eau détectée par radar avec des étendues théoriques générées par la binarisation du modèle HAND. Appliquée à 14 sites équipés de stations hydrométriques de la DEH, cette nouvelle approche a produit des résultats variables, mais jugés acceptables dans certaines conditions.

2. MÉTHODOLOGIE

La figure 1 présente le processus méthodologique qui a été proposé pour atteindre les objectifs initiaux. Il est basé sur l'application de concepts connus et sur l'intégration innovante de divers travaux déjà menés à l'INRS. Les différentes étapes sont décrites ci-après.

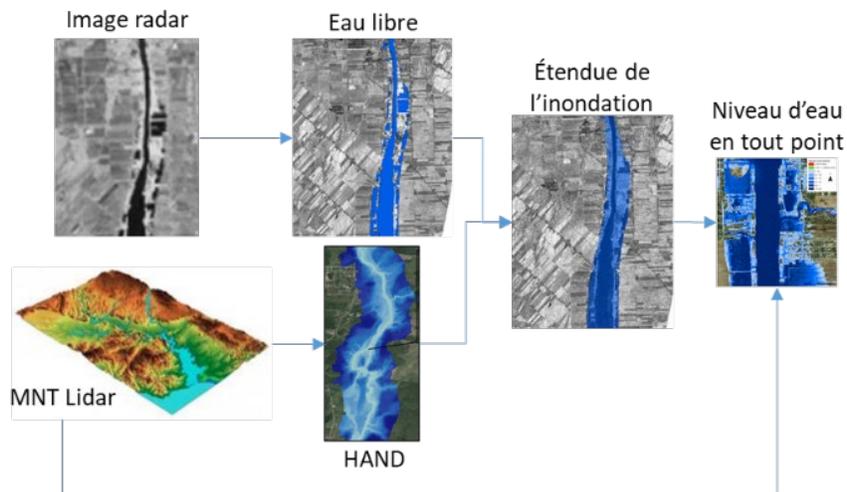


Figure 1. Processus méthodologique pour le développement d'IRENE.

2.1 DE L'IMAGE RADAR À L'EAU LIBRE

Les capteurs radar produisant leur propre source d'énergie, l'acquisition d'images est totalement indépendante des conditions de luminosité, et est donc possible de jour comme de nuit, ce qui est un avantage majeur par rapport aux capteurs optiques, qui sont dépendants du rayonnement solaire réfléchi par les objets. De plus, l'atmosphère ne présentant pas d'absorption marquée aux longueurs d'ondes supérieures à environ 12 GHz, les capteurs radar ont la capacité d'acquérir des images de la surface terrestre en présence d'un couvert nuageux.

La rétrodiffusion du signal émis par un capteur radar à synthèse d'ouverture est particulièrement sensible à l'humidité de la surface imagée, à ses propriétés diélectriques, mais aussi à la rugosité de la surface et à sa géométrie. Cela lui confère un fort potentiel pour la détection des changements de conditions d'humidité du sol, et ainsi, pour la cartographie des zones inondées. L'eau ayant une constante diélectrique très élevée, l'onde radar ne pénètre que de quelques millimètres sous sa surface. Ainsi, les plans d'eau libre et les sols nus inondés lisses et homogènes agissent comme réflecteurs spéculaires, réfléchissant intégralement le signal incident hors du champ de réception du capteur. Ils apparaissent ainsi avec des valeurs radiométriques très faibles sur les images. À l'inverse, les sols nus non inondés présentent une surface généralement irrégulière et rugueuse, et auront tendance à réfléchir le signal de manière diffuse, dans un grand nombre de directions. Une portion significative de l'onde incidente étant rétrodiffusée en direction du capteur, les coefficients de rétrodiffusion sont plus élevés, et seront ainsi traduits par des tons clairs sur l'image. Cela rend ainsi les sols non inondés aisément

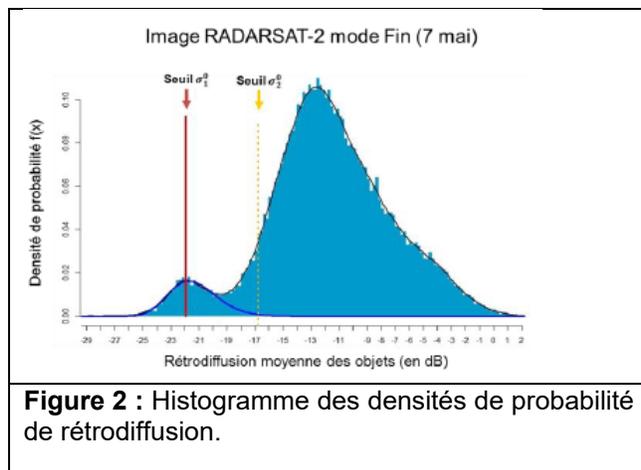
différenciables des plans d'eau libre et des sols nus inondés (Landuyt et al., 2019; Dasgupta et al., 2018). On considère ici comme des zones d'eau libre les zones où seule de l'eau est présente sur le sol, sans émergence de végétation ou d'éléments anthropiques.

En effet, la détection de la présence d'eau en zone végétalisée ou urbaine est plus complexe. Les longueurs d'ondes utilisées (bandes C et X) sont très largement atténuées par les couches supérieures de la canopée et seront ainsi majoritairement soumises à une diffusion de volume. Elles ne permettent pas d'obtenir des informations sur la présence d'eau au sol. Quant au signal qui pénètre jusqu'au sol, il sera soumis à une réflexion multiple entre l'eau et les sections les plus basses de la végétation (troncs et branches). Il en résulte un fort retour du signal radar et une difficulté accrue de détecter les zones végétalisées inondées (Tsyganskaya et al., 2018). Cependant, les recherches menées par Brisco et al. (2019) ont montré qu'il est faisable d'exploiter les données multi-modes de la mission RADARSAT pour identifier les zones de végétation inondée dans la région du delta Peace Athabasca en Alberta. En zone urbaine, plusieurs facteurs peuvent venir complexifier la détection des zones inondées. Tout d'abord, les zones urbaines sont constituées de nombreuses surfaces lisses, souvent recouvertes d'asphalte et ayant une rétrodiffusion de type spéculaire, similaire à celle de l'eau. Il est donc très difficile de déterminer si elles sont affectées ou non par l'inondation (Giustarini et al., 2013). Également, avec la visée oblique du radar, une partie du sol est masquée par les structures urbaines et n'est pas visible pour le radar (zones d'ombrage). Enfin, les effets de rétrodiffusion par double rebond (ou par rebonds multiples) sont également récurrents en zone urbaine, et peuvent être la source d'incertitudes quant à la présence d'eau à proximité de certains bâtiments. Nous avons développé une approche indirecte pour extrapoler la matrice d'eau libre aux zones urbaines et forestières en utilisant à nouveau le modèle HAND. Toutefois, dans le cadre de ce projet, le mandat est de se concentrer sur les secteurs où la mesure est directe et où l'incertitude est moindre. Nous établirons donc les stations virtuelles dans les secteurs d'eau libre.

2.1.1 Étape 1: Estimation de la distribution statistique des rétrodiffusions des objets d'eau libre

La détection des zones d'eau libre consiste d'abord en l'estimation de la fonction de densité de probabilité (FDP) des valeurs moyennes de rétrodiffusion des objets (ou pixels) correspondant en théorie à de l'eau libre sur l'image RSO (Figure 2). Cette méthode a été appliquée avec succès dans les travaux présentés par Matgen et al. (2011) et par Giustarini et al. (2013) pour la détection des zones d'eau libre sur des images d'inondations acquises par les capteurs ENVISAT ASAR et TerraSAR-X, respectivement. Les surfaces d'eau libre étant généralement des surfaces

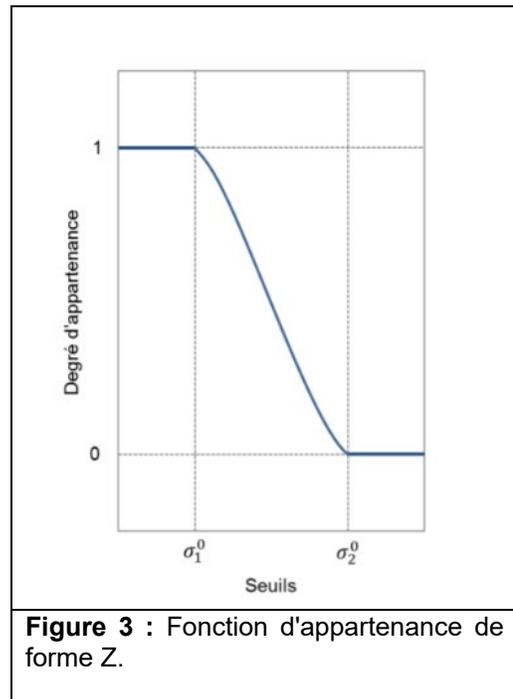
homogènes agissant comme des réflecteurs spéculaires et ayant ainsi de faibles valeurs de rétrodiffusion, on suppose que la distribution statistique des valeurs de rétrodiffusion de ces surfaces suit une distribution Gamma (Matgen et al., 2011). Suivant ces travaux, la formule du mode de la distribution Gamma sera utilisée pour faciliter la procédure d'ajustement (le fit). Le paramètre de forme est optimisé pour limiter l'écart entre la fonction de densité théorique et la fonction de densité empirique. Si l'histogramme des valeurs de rétrodiffusion sur la plaine inondable n'est pas strictement



bimodal, ce qui peut arriver si les surfaces d'eau sont rendues rugueuses par l'action du vent ou de fortes pluies, l'algorithme réalise alors une estimation de la première dérivée d'une fonction spline cubique de lissage ajustée à la FDP expérimentale. La méthode d'estimation de la FDP théorique des valeurs moyennes de rétrodiffusion associées aux objets d'eau libre n'est cependant pas applicable si l'histogramme des valeurs empiriques est strictement uni-modal.

2.1.2 Étape 2: Classification par logique floue des objets d'eau libre

Afin de tenir compte de la superposition quasi-systématique d'une partie des valeurs de rétrodiffusion des surfaces d'eau libre et des valeurs de rétrodiffusion d'autres types de couvertures du sol, une approche de classification suivant les règles de la logique floue sera appliquée (Macina et al., 2006). L'intérêt des théories des ensembles flous est qu'elles permettent d'estimer le degré d'appartenance de chaque élément d'un ensemble flou à une classe donnée, selon la valeur de rétrodiffusion de cet élément à l'intérieur des limites de l'ensemble flou. Sur la base des travaux présentés entre autres par Pulvirenti et al. (2013b), une fonction d'appartenance standard de forme Z sera utilisée pour estimer l'appartenance des objets de l'image RSO d'inondation à la classe Eau libre (**Figure 3**). D'après cette fonction, plus la valeur moyenne de rétrodiffusion des objets de l'image est faible, plus fort sera son degré d'appartenance à la classe Eau libre. Elle est ainsi adaptée à l'évaluation du degré d'appartenance des objets représentant de l'eau libre, généralement caractérisés par de très faibles valeurs de rétrodiffusion. Les paramètres seuil σ_1^0 et seuil σ_2^0 de l'ensemble flou



sont extraits de manière automatique des valeurs théoriques de la FDP de type Gamma ajustée aux valeurs de rétrodiffusion moyenne des objets d'eau libre sur l'image (Tanguy, 2016). Le seuil 1 est égal au mode de la distribution Gamma théorique de l'eau libre. Le mode étant situé dans les valeurs de rétrodiffusion très basses des objets de l'image, une superposition des valeurs de rétrodiffusion de l'eau libre et des autres types de couverture du sol au niveau de ce mode est peu probable. Cela permet d'appuyer le choix du mode comme limite de l'ensemble flou. Le seuil 2 est égal au 99^e percentile de la distribution Gamma théorique de l'eau libre (Matgen et al., 2011).

2.2 DE L'EAU LIBRE À L'ÉTENDUE D'INONDATION

2.2.1 Étape 3: Désagrégation de la classification de l'eau libre

Pour ramener les résultats de la classification de l'eau (probabilité de présence de l'eau dans le pixel) issue de l'image radar (10 m) à une résolution qui se rapproche de celle du modèle numérique de terrain (1 m), une désagrégation spatiale sera faite à l'aide du modèle HAND.

Le modèle HAND pour *Height Above the Nearest Drainage* (Nobre et al., 2011) consiste en un modèle numérique d'élévation normalisé à l'altitude de la rivière. Chaque pixel du modèle

représente la différence de hauteur entre l'altitude en ce point et l'altitude du pixel sur la rivière dans lequel il s'écoule (**Figure 4**).

Le modèle HAND par ses niveaux relatifs à la hauteur de la rivière est propice à bien représenter le processus d'écoulement en surface et par conséquent, peut servir à la désagrégation spatiale des pixels partiellement couverts d'eau. Pour générer le modèle HAND, des prétraitements doivent être effectués sur le modèle numérique de terrain, soit une correction des élévations sur la surface de la rivière pour enlever les artefacts liés à l'interpolation, le remplissage des cuvettes et l'intégration des ponceaux dans le modèle numérique de terrain pour assurer un écoulement cohérent. Le modèle de direction d'écoulement doit ensuite être calculé et le modèle HAND est généré pour l'ensemble d'une rivière à partir de données disponibles gratuitement, soit les données LiDAR du gouvernement du Québec ainsi que les données de la Géobase du réseau hydrographique du Québec pour les données vectorielles des rivières.

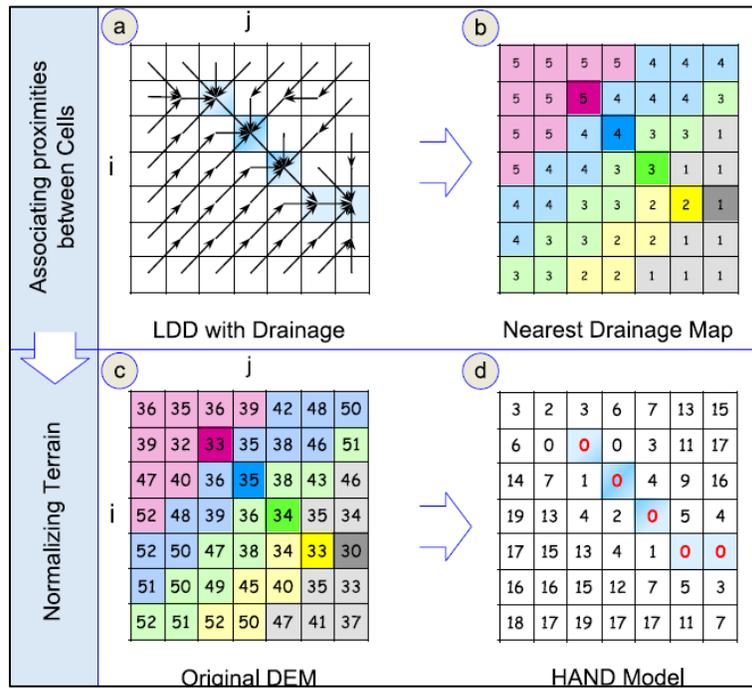


Figure 4 : Approche HAND tirée de Nobre et al., 2011).

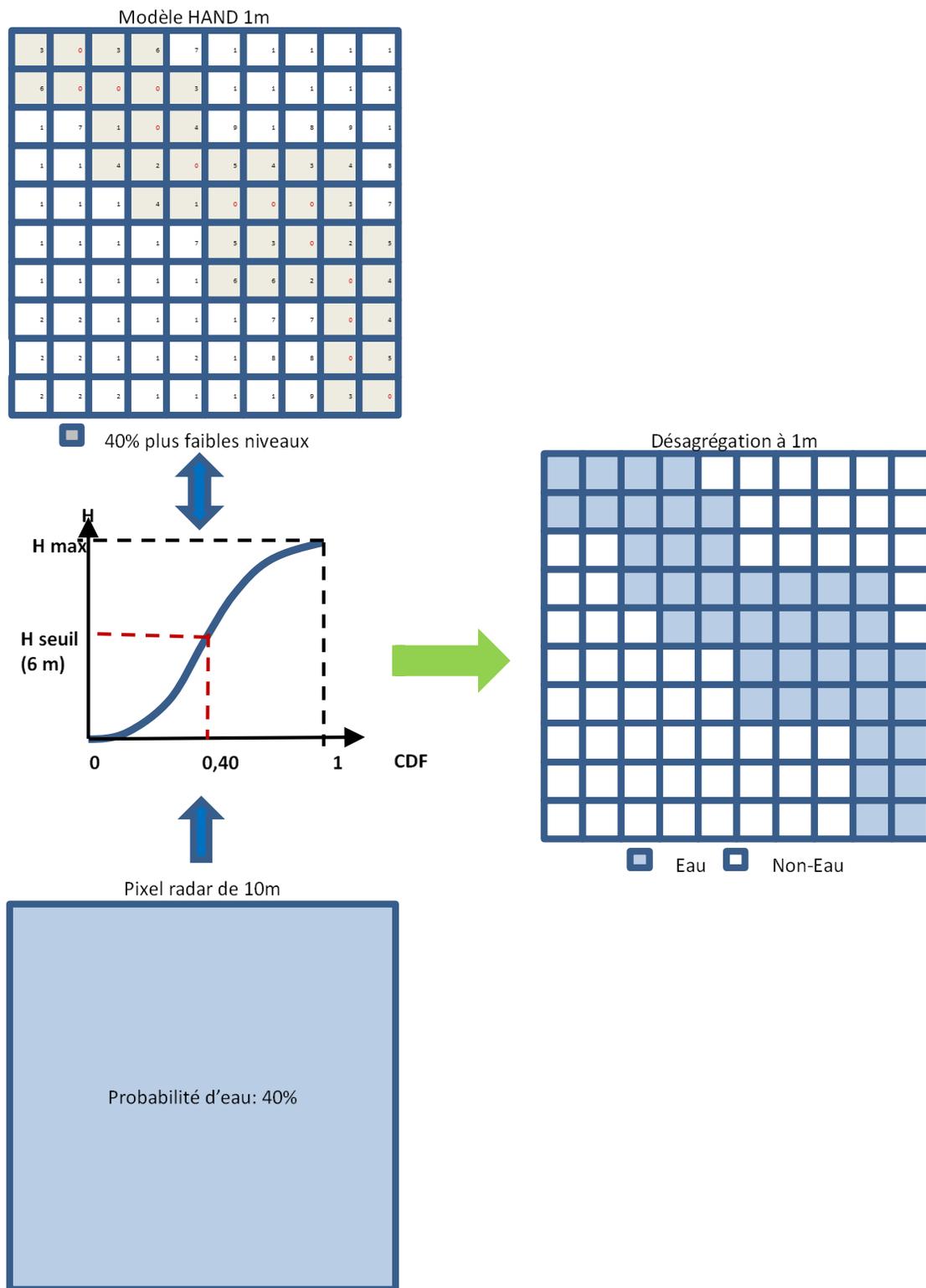
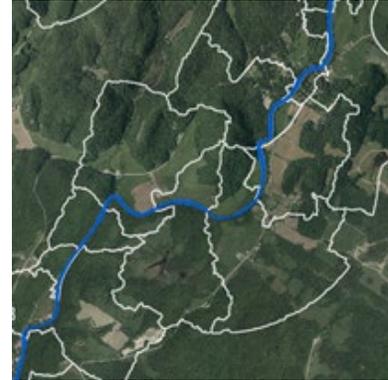


Figure 5. Processus de désagrégation spatiale.

2.3 DE L'ÉTENDUE AUX NIVEAUX D'EAU

2.3.1 Étape 4: Estimation des hauteurs d'eau sur les secteurs d'eau libre

Pour déterminer le niveau de l'eau sur les secteurs d'eau libre, on segmente d'abord le modèle HAND en tronçons et on considère comme faisant partie d'un même sous-bassin, tous les pixels qui s'écoulent dans ce tronçon (Figure 7, haut). À l'intérieur de chacun de ces sous-bassins, le niveau du modèle HAND est extrait sous les pixels identifiés comme "Eau libre". Ainsi, pour toutes les mailles qui s'écoulent en un même tronçon de la rivière et pour lesquelles le radar a détecté de l'eau, on extrait les niveaux HAND. Pour le 95^e percentile de ces niveaux, la valeur maximale est calculée. Le 95^e percentile est utilisé pour limiter l'impact des pixels qui n'auraient pas dû être inclus dans les objets d'eau libre.



Ensuite, on soustrait de la valeur de HAND maximale obtenue, la valeur originale du modèle HAND pour les points d'intérêt (stations virtuelles (Figure 7, bas)). Le niveau d'eau absolu peut également être calculé en ajoutant les profondeurs de submersions au niveau du modèle numérique de terrain.

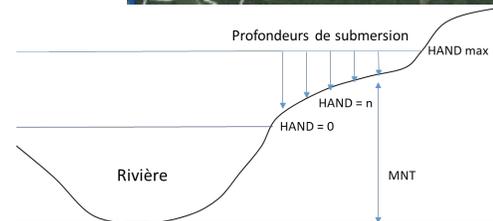


Figure 6. Calcul du niveau d'eau.

2.3.2 Étape 5: Calcul de l'incertitude issue des données sources et de la méthode

Comme tout modèle, le modèle IRENE n'est qu'une simplification plus ou moins représentative du système physique auquel il est rattaché. Par conséquent, le modèle est entaché d'un niveau plus ou moins élevé d'incertitude ou d'erreur qui affecte la qualité de ses prédictions. L'incertitude dans un modèle provient de plusieurs sources soit au niveau de sa structure mathématique, des données qui ont servi à le bâtir et à le calibrer ainsi que des paramètres et des données d'entrée qui sont utilisées. Ici, les données d'entrée sont le MNT et l'image radar. L'erreur sur les sorties ainsi que les différentes contributions sont souvent décrites par leurs moments statistiques (moyenne, variance, coefficient d'asymétrie, etc.). Les méthodes fréquemment utilisées pour les estimer, à partir de l'erreur sur les variables et paramètres d'entrée, sont la méthode analytique et les techniques probabilistes dites d'échantillonnage (Morgan and Henrion, 1990). Dans la première, la complexité de l'analyse algébrique rend la méthode très difficile à implanter et comme c'est une approche locale, elle n'est pas assez précise quand les incertitudes sont grandes. Les techniques probabilistes, quant à elles, regroupent une panoplie de méthodes considérant les sorties du modèle et l'erreur qui s'y rattache comme étant des variables aléatoires, discrètes ou continues. Ces techniques d'échantillonnage sont des approches assez précises qui conviennent aux modèles complexes puisqu'elles ne requièrent pas de développements algébriques ardu, mais elles ne permettent pas de décomposer aisément la variance totale des sorties du modèle en fonction des contributions des variables d'entrée et requièrent un nombre élevé de simulations afin d'atteindre un niveau de précision acceptable.

Comme alternative, nous utiliserons dans la présente étude, la méthode proposée par Torvi et Hertzberg (1997). Cette méthode ne traite pas la propagation de l'incertitude des entrées vers les sorties d'un modèle comme étant un problème de variables aléatoires mais plutôt comme un problème d'intégration, dont les techniques de résolution numérique sont précises et approuvées. Cette approche a été testée avec succès par Chokmani et al. (2001) dans un contexte de modélisation bioclimatique et plus récemment par El Alem et al. (2019), dans le suivi des fleurs d'eau d'algues par imagerie satellitaire ou encore par Oubennaceur et al. (2018, 2019) en modélisation hydrodynamique.

Dans cette approche (Figure 8), les moments statistiques (moyenne et variance) des sorties d'un modèle résultant de l'incertitude sur les variables d'entrée peuvent être calculés par les équations suivantes :

$$\text{Moyenne : } \mu_1 = \int_{v \in V} f(v) \cdot P(v) dv \quad (1)$$

$$\text{Variance : } \mu_2 = \int_{v \in V} (f(v) - \mu_1)^2 \cdot P(v) dv \quad (2)$$

où, v est le vecteur variable appartenant à V l'espace des variables d'entrée du modèle, $f(v)$ la sortie du modèle et $P(v)$ la probabilité conditionnelle pour l'obtention de $f(v)$. Le vecteur variable v est remplacé par un vecteur standardisé z , de la même distribution que v , construit de telle sorte que les nouvelles variables soient indépendantes. La transformation se fait à l'aide de l'équation suivante :

$$v = \mu_{1v} + \Sigma_v^{\frac{1}{2}} \times \mu_2 \times z \quad (3)$$

où, μ_{1v} est la valeur moyenne de v et μ_{2v} est sa variance. Dans ce cas, la variance est égale au carré de l'incertitude sur la mesure. Vu l'indépendance entre les nouvelles variables z , la probabilité conditionnelle se réduit au simple produit des probabilités individuelles. Ainsi, les équations (1) et (2) peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\mu_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f(v) \cdot P(z_1) \cdot \dots \cdot P(z_p) dz_1 \dots dz_p \quad (4)$$

$$\mu_2 = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} (f(v) - \mu_1)^2 \cdot P(z_1) \cdot \dots \cdot P(z_p) dz_1 \dots dz_p \quad (5)$$

où, P est la dimension de l'espace V (nombre des variables d'entrée du modèle). Il s'agit, donc d'estimer les intégrales multidimensionnelles des équations (4) et (5). La formule de Quadrature Gaussienne (Torvi et Hertzberg (1997)) permet de résoudre ce problème. Il s'agit d'une technique numérique qui transforme l'intégrale d'un produit d'une fonction $f(v)$ par une fonction de pondération $P(z_i)$ en une somme des produits de la même fonction, réalisée pour certaines valeurs de v dites nœuds, multipliée par des coefficients de pondération correspondants à la fonction de pondération originelle $P(z_i)$. Dans le cas d'une intégrale unidimensionnelle, la formule de Quadrature Gaussienne peut être illustrée par l'expression suivante :

$$\int_a^b f(z) p(z) dz = \sum_{i=0}^n A_i \cdot f(z_i) \quad (6)$$

où, n est le nombre de nœuds et A_i le coefficient de pondération calculé par la formule de Quadrature Gaussienne.

Les étapes de calculs sont résumées comme suit :

1. Choisir le nombre n de nœuds pour chaque variable;
2. Calculer les abscisses et les coefficients de pondération pour chaque variable normalisée;
3. Exécuter le modèle avec toutes les combinaisons d'abscisses, pour un total de $(n+1)^p$ simulations. Ainsi, pour un modèle comme celui utilisé dans la présente étude où p est égal à 2 (puisque les deux sources principales d'incertitude sont l'image radar et le MNT LiDAR), le nombre total de simulations est 9 si on utilise 2 nœuds comme il est souvent le cas dans ce genre d'analyse;
4. Calculer les différents moments de l'incertitude sur les sorties du modèle à l'aide de la formule de Quadrature Gaussienne.

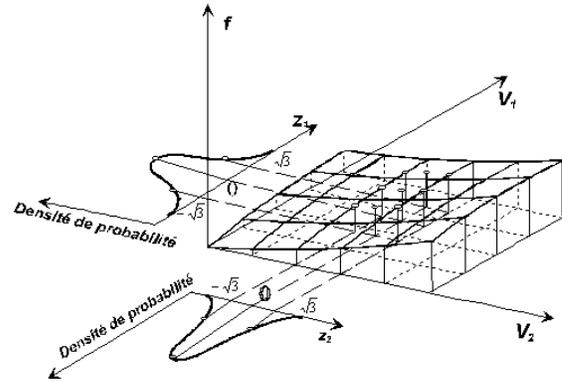


Figure 7. Schéma de propagation de l'erreur des entrées jusqu'aux sorties dans le cas d'un modèle à deux variables d'entrée.

Parmi les sources possibles d'incertitude qui seront considérées dans cette étude, il existe certaines conditions météorologiques qui peuvent nuire à la méthode: Fort vent (crée une rugosité sur la surface de l'eau et modifie la rétrodiffusion radar), présence de neige mouillée au sol (absorbe l'énergie radar), présence de glace (peu probable puisque dans le cas d'une inondation en eau libre due à une augmentation du débit de la rivière, les glaces sont généralement évacuées d'abord. Par rapport aux zones végétalisées, on rappelle que les stations virtuelles sont des points sur le territoire pour lesquels nous établissons une relation entre l'image radar et le niveau d'eau. Ces stations seront établies en zone dégagée. En mode opérationnel, s'il n'y a pas de zone dégagée dans un secteur non-jaugé mais de fort intérêt, on peut remonter sur des tronçons amonts jusqu'à une zone dégagée. Si impossible, la méthode ne s'applique pas.

2.4 VALIDATION ET AUTOMATISATION

2.4.1 Étape 6: Zone d'étude et validation des résultats

La méthode a été développée et validée sur des secteurs documentés qui ont été sujets aux inondations de 2019. La période d'inondation variait du 14 avril au 28 mai 2019. Pour obtenir un plus large éventail de débits/niveaux, 2 semaines avant et après ont été considérées. Les secteurs potentiels des rivières suivantes ont été considérés:

- Outaouais: Gatineau, Rouge et Petite-Nation;
- Montréal: Du Nord, Deux-Montagnes, Mille-Iles, Des Prairies;
- Beauce: Chaudière (Potentiel: Montmorency, Décembre 2020 pour conditions d'eau libre mais en hiver).

Comme les images radar couvrent de grands secteurs, des cours d'eau de plusieurs tailles ont été inclus.

Pour chaque secteur, entre 30 et 50 images radar Sentinel-1 (couverture partielle à complète) sont disponibles pour la période visée. Ces images de l'agence spatiale européenne sont disponibles gratuitement et en temps quasi-réel. Il est à noter que l'utilisation d'images radar en polarisation horizontale (HH) est préférée à celle de données acquises en polarisation verticale (VV), car elle permet généralement d'obtenir un meilleur contraste entre l'eau libre et le reste de l'occupation du sol. Les données Sentinel-1 sont en polarisation VV. Par contre, dans un futur rapproché, des données en polarisation HH de la constellation RADARSAT, de l'agence spatiale

canadienne seront également disponibles gratuitement en temps quasi-réel. Il été donc prévu de tester la méthode sur ces données au cours de la deuxième année du projet. Cependant, comme l'approche méthodologique a été changée, cette partie du travail n'a pas été réalisée.

Les secteurs d'intérêt en fonction des données de débits, de niveaux et de lignes d'eau disponibles (stations hydrométriques, relevés et sondes du MELCCFP, survols aériens du MSP) ainsi que des données LiDAR disponibles ont été sélectionnés. Plusieurs informations sont disponibles publiquement ou le cas échéant, sont partagées par le MELCCFP. Sur chaque secteur choisi, un ou plusieurs tronçons où les données complètes sont disponibles ont été définis. Le lit de la rivière doit être trapézoïdal (pente des rives graduelle) afin qu'une augmentation du débit résulte en un élargissement de la surface mouillée visible sur l'image radar. Sur chaque tronçon, une série de points en zone dégagée de la plaine inondable ont été choisis pour y développer l'approche.

Ainsi, dans la première année, la validation à partir de la limite de l'inondation (survol aérien) a permis d'identifier les secteurs où la cartographie radar des zones d'eau libre est la plus efficace (occupation du sol, relief et forme du chenal). Selon les données de mesures de niveau d'eau disponibles pour ces secteurs, la qualité de la mesure estimée par l'approche IRENE a été également évaluée. Pour la deuxième année, l'approche sur les secteurs prometteurs préalablement identifiés a été raffinée et les acquisitions de mesures ciblées de niveaux d'eau, conjointement à l'acquisition de nouvelles images radar ont été effectuées. Cela a permis de préciser la qualité des estimations sur plusieurs secteurs et d'identifier les meilleurs sites de stations virtuelles. De plus, un survol de drone pour documenter la limite de l'inondation sur un secteur d'intérêt afin de pouvoir comparer les résultats de l'approche IRENE avec une méthode alternative mesurée sur le terrain

2.4.2 Étape 7: Codage du processus d'estimation sous forme d'un exécutable automatisé

Il a été prévu que chaque étape de la méthodologie sera d'abord codée et automatisée individuellement durant la phase de développement, afin de réaliser le maximum d'itérations et de tests. Il a également été envisagé qu'une série de scripts en Python permettant de réaliser automatiquement toutes les étapes de l'approche va être développée. De tels scripts pourraient ensuite être intégrés tels quels ou traduits, dans les outils du MELCCFP. À la fin de la deuxième phase, il a été prévu que les modules seront intégrés pour créer un prototype d'outil qui reproduit toute la séquence. Dans cet outil, les images Sentinel-1 seront récupérées automatiquement via *Google Earth Engine*, une API qui permet d'avoir un accès facile aux données satellitaires gratuites, dans un format déjà corrigé géométriquement et radiométriquement. La procédure avec les images de la constellation RADARSAT n'a pas été testée. Les étapes subséquentes pourraient être éventuellement intégrées à l'intérieur d'un exécutable développé en langage Python qui utilise certaines bibliothèques d'ArcGIS (Arcpy). L'objectif été de faire fonctionner en continu et de mettre à jour les niveaux d'eau avec les nouvelles images satellites. Les niveaux d'eau allaient être inscrits dans des fichiers textes (CSV) avec leur incertitude associée. D'autres résultats allaient également être conservés sous la forme matricielle : profondeurs de submersions, niveau d'eau absolu, surface mouillée raffinée avec le modèle HAND (1 m x 1 m) et la carte de probabilité issue de l'imagerie radar (10 m x 10 m). Cependant, en raison de des difficultés rencontrées avec l'approche initialement proposée, cette partie du projet n'a pas été réalisée.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 ACTIVITÉS RÉALISÉES

3.1.1 Mise en place de la base de données

La première activité fut de mettre en place la base de données utilisables dans le cadre du projet. Pour se faire, nous avons défini la zone d'étude comme étant la partie méridionale du Québec, limité à l'ouest par la rivière des Outaouais, au sud par la frontière canado-américaine et à l'est aux environs de la rivière Chaudière (Figure 8). Quant à la limite nord, elle a été fixée arbitrairement aux environs de la latitude 46.3°N afin d'inclure le sud des bassins versants situés au nord du fleuve Saint-Laurent, sans pour autant s'étendre trop au nord où les enjeux des inondations sont moins présents. C'est à l'intérieur de cette zone que s'est effectuée la recherche des données nécessaires au développement et à la validation de la méthode.

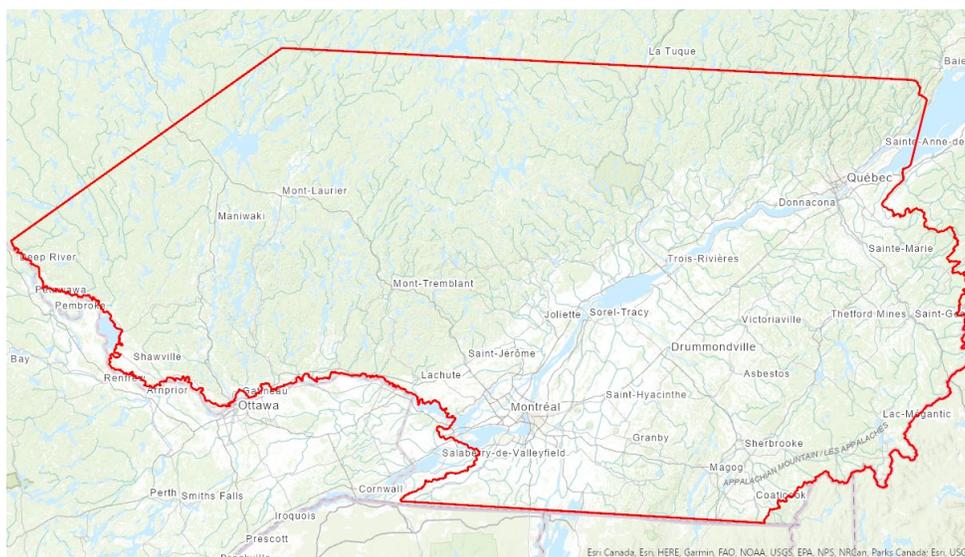


Figure 8. Zone d'intérêt.

Pour le développement de la méthode IRENE, les quatre principaux jeux de données utilisés sont les suivants : données sur les **niveaux d'eau**, **données satellites radar**, **modèle numérique de terrain** et représentation cartographique des **cours d'eau**. Une description sommaire des jeux de données est présentée plus bas mais une version plus détaillée est présente dans le rapport du livrable 1 (Chokmani et al., 2022a).

3.1.1.1 Données satellites radar

L'imagerie utilisée pour le développement de la méthode est celle issue des satellites de la série Sentinel-1 (Tableau 1). Les données couvrent régulièrement le sud du Québec depuis 2015.

Tableau 1 : Caractéristiques de Sentinel-1

Propriétaire	Satellites	Fréquence	Opération	Résolution spatiale	Couverture en mode IW	Polarisations en mode IW	Répétitivité
Agence spatiale européenne (ESA)	Sentinel 1A Sentinel 1B	Bande C (5.4GHz)	2014- aujourd'hui 2016- aujourd'hui	5m x 20m	250 km	VV + VH et HH + HV	6 jours

Les données de Sentinel-1 sont gratuites et accessibles en ligne, via plusieurs applications. Dans le cadre du projet, nous utiliserons *Google Earth Engine* (<https://developers.google.com/earth-engine>). Il s'agit d'une plateforme infonuagique qui permet le traitement à grande échelle d'images satellites pour détecter les changements, cartographier les tendances et quantifier les différences à la surface de la Terre. Les données Sentinel-1 disponibles sur *Google Earth Engine* ont déjà été traitées au niveau géométrique et radiométrique. Ces traitements sont expliqués dans le lien suivant : <https://developers.google.com/earth-engine/guides/sentinel1> . Ainsi, le téléchargement individuel des images pour appliquer ces prétraitements n'est pas requis. La plateforme facilite également la réalisation de divers traitements supplémentaires, incluant l'application de filtres comme le filtre Lee (Lee (1986)) testé dans cette étude, le découpage selon les zones d'intérêt, ainsi que le calcul de statistiques. .

3.1.1.2 Données de niveau d'eau

Pour les données de niveau d'eau, nous avons regardé les données disponibles du côté du gouvernement du Québec et de celui du Canada. De ces données, seules les stations satisfaisant les critères suivants ont été conservées :

- Stations situées à l'intérieure de la zone d'étude ;
- Stations diffusant les niveaux d'eau dans un système géodésique ;
- Stations en opération après 2015.

À ces stations, une dizaine de stations du système de surveillance de la rivière Chaudière et gérées par le COBARIC ont été ajoutées.

L'information sur les stations présentées dans le rapport accompagnant la livraison de la base de données (Chokmani et al. 2022).....

3.1.1.3 Modèle numérique de terrain

Afin d'évaluer le niveau d'eau à l'intérieur d'une plaine inondable, un modèle numérique de terrain (MNT) de grande précision est souhaitable. Pour le projet IRENE, nous avons utilisé les MNTs dérivés du LiDAR générés dans le cadre du projet d'acquisition de données par le capteur LiDAR à l'échelle provinciale (Leboeuf, 2015). Ces données possèdent une résolution spatiale de 1 m et sont diffusées gratuitement sur le site de données Québec (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/produits-derives-de-base-du-lidar>).

Le modèle numérique de terrain a servi à la fois au calcul du modèle HAND et à la détermination du niveau d'eau. Le modèle HAND est un modèle numérique de terrain normalisé où la valeur de chaque pixel correspond à la différence d'élévation entre ce pixel et le pixel du réseau hydrographique vers lequel il s'écoule. Les valeurs HAND en amont d'une rivière peuvent ainsi se comparer avec celles en aval, et les valeurs HAND de différentes rivières peuvent se comparer entre elles.

3.1.1.4 Représentation cartographique des cours d'eau

Certaines des activités à réaliser dans le cadre du projet nécessitent une représentation cartographique du réseau hydrographique. Nous avons donc choisi d'utiliser la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ) qui est le référentiel commun de l'hydrographie au Québec. Ces données sont également disponibles sur le site de données Québec (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/grhq>). Les polygones représentant les cours d'eau ont servi plus particulièrement comme masque pour déterminer la distribution des valeurs de rétrodiffusion de l'imagerie radar dans les zones couvertes par l'eau et comme valeur de départ pour la méthode HAND (soit $HAND = 0$).

3.1.2 Application de la méthode proposée

La méthode présentée à la section 2 a été appliquée afin d'obtenir des niveaux d'eau à partir des images radar. La méthode se composait de cinq étapes.

3.1.2.1 Estimation de la distribution statistique des rétrodiffusions des objets d'eau libre

Plusieurs éléments influencent la valeur de rétrodiffusion du signal radar en présence d'eau (angle d'incidence du signal, rugosité de l'eau, etc.). Il n'est donc pas possible de déterminer un seuil fixe au niveau des valeurs de rétrodiffusion séparant efficacement les pixels d'eau et ceux de terre. C'est pourquoi nous avons décidé d'intégrer la logique floue dans le processus de classification. Ainsi, selon différents scénarios définis par la méthode de quadrature gaussienne, le calcul du degré d'appartenance à la classe *eau* sur une image radar s'effectue en faisant correspondre à chaque valeur de rétrodiffusion, une probabilité que cette valeur soit de l'eau. Afin d'utiliser la méthode de quadrature gaussienne, des distributions statistiques des rétrodiffusions des objets d'eau libre et de terre sont nécessaires. La méthode utilisée pour obtenir ces distributions est présentée dans le rapport d'étape 1 (Chokmani et al., 2022b).

3.1.2.2 Classification de la probabilité d'eau

À partir des six valeurs déterminées à l'étape précédente, la probabilité d'appartenance à la classe eau a été calculée en utilisant la somme pondérée des neuf simulations déterminées par la quadrature gaussienne (Équation 6). Les pondérations utilisées sont présentées au Tableau 2.

Tableau 2. Pondération pour les 9 scénarios de la quadrature gaussienne.

	σ_{b-}	σ_b	σ_{b+}
σ_{a-}	1/36	1/9	1/36
σ_a	1/9	4/9	1/9
σ_{a+}	1/36	1/9	1/36

L'application de l'équation 6 sur une image Sentinel-1 permet d'obtenir une probabilité d'appartenance à la classe *eau* pour chaque pixel (Figure 9).



Figure 9. Classification de la probabilité d'occurrence de l'eau à partir de l'image Sentinel-1. Gauche : Image visible du cours d'eau (date indéterminée). Milieu : Image Sentinel-1 du 1er juin 2019. Droite : Probabilité d'occurrence de l'eau d'après l'image Sentinel-1 (noir = 0%, blanc = 100%).

3.1.2.3 Désagrégation de la classification de l'eau libre

Pour ramener les résultats de la classification de l'eau (probabilité de présence de l'eau dans le pixel) issue de l'image radar (10 m) à la même résolution que celle du modèle numérique de terrain (1 m), une désagrégation spatiale a été faite à l'aide du modèle HAND. La Figure 10 montre l'application de cette méthode. Dans cet exemple, la méthode présentée à la section 2.2.1 a permis d'estimer que le niveau de l'eau au moment de l'acquisition de l'image Sentinel-1 était à 2,91 m au-dessus du niveau de référence (HAND = 0). Il est possible de remarquer sur le modèle HAND de la Figure 10 deux petits affluents au nord-est de la rivière principale. Ces affluents, dont les rives sont végétalisées, n'apparaissent pas sur la matrice de probabilité d'occurrence de l'eau. En combinant les deux jeux de données, il est possible de mieux représenter la région submergée.

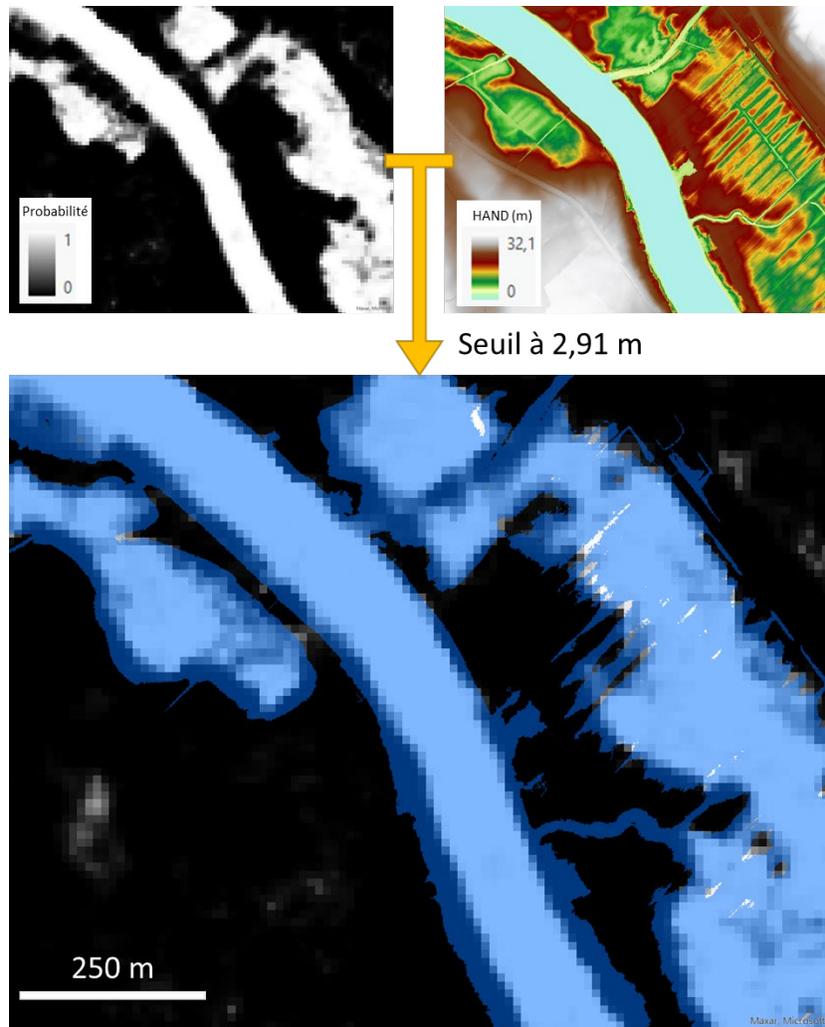


Figure 10. Désagrégation spatiale en combinant les probabilités d'occurrence de l'eau à une résolution de 10 m et un modèle HAND à une résolution de 1 m.

3.1.2.4 Estimation des hauteurs d'eau sur les secteurs d'eau libre

La profondeur de submersion est obtenue en prenant la valeur du seuil déterminé par les centiles et en soustrayant les valeurs du modèle HAND en tout point de la zone eau (Figure 11). Le niveau d'eau absolu peut également être calculé en ajoutant les profondeurs de submersions à la valeur du modèle numérique de terrain.

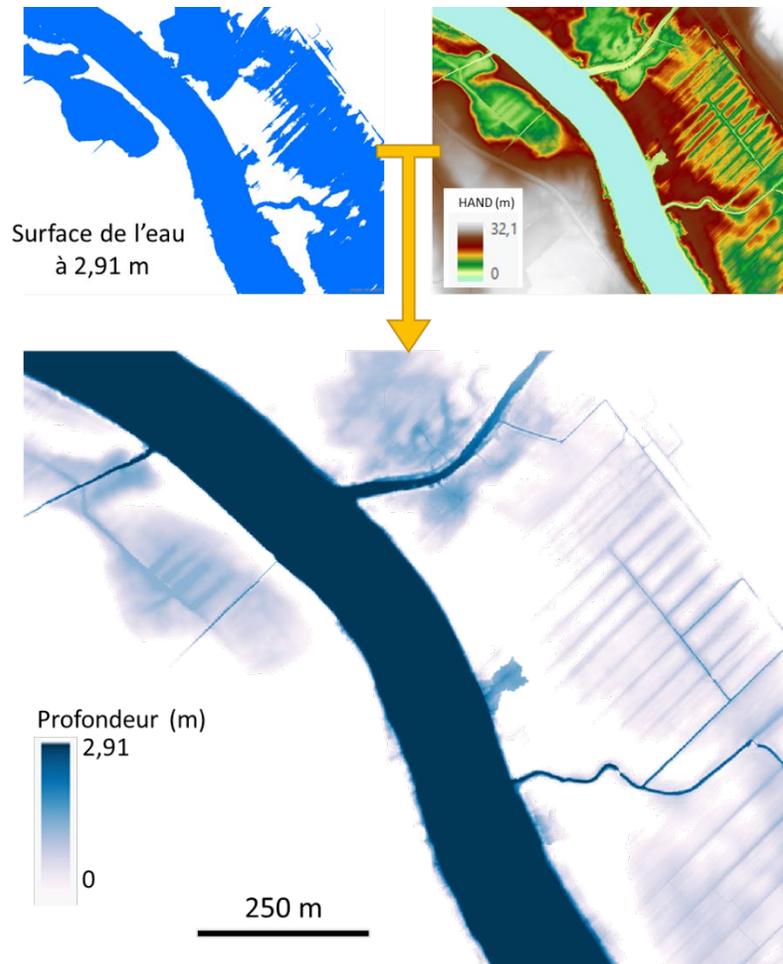


Figure 11. Profondeur de submersion obtenue en soustrayant les valeurs du HAND d'une surface d'élévation constante (par rapport au HAND).

La Figure 12 montre le résultat des différentes étapes réalisées pour un tronçon de 7 km de la rivière Chaudière lors de l'inondation de 2019.

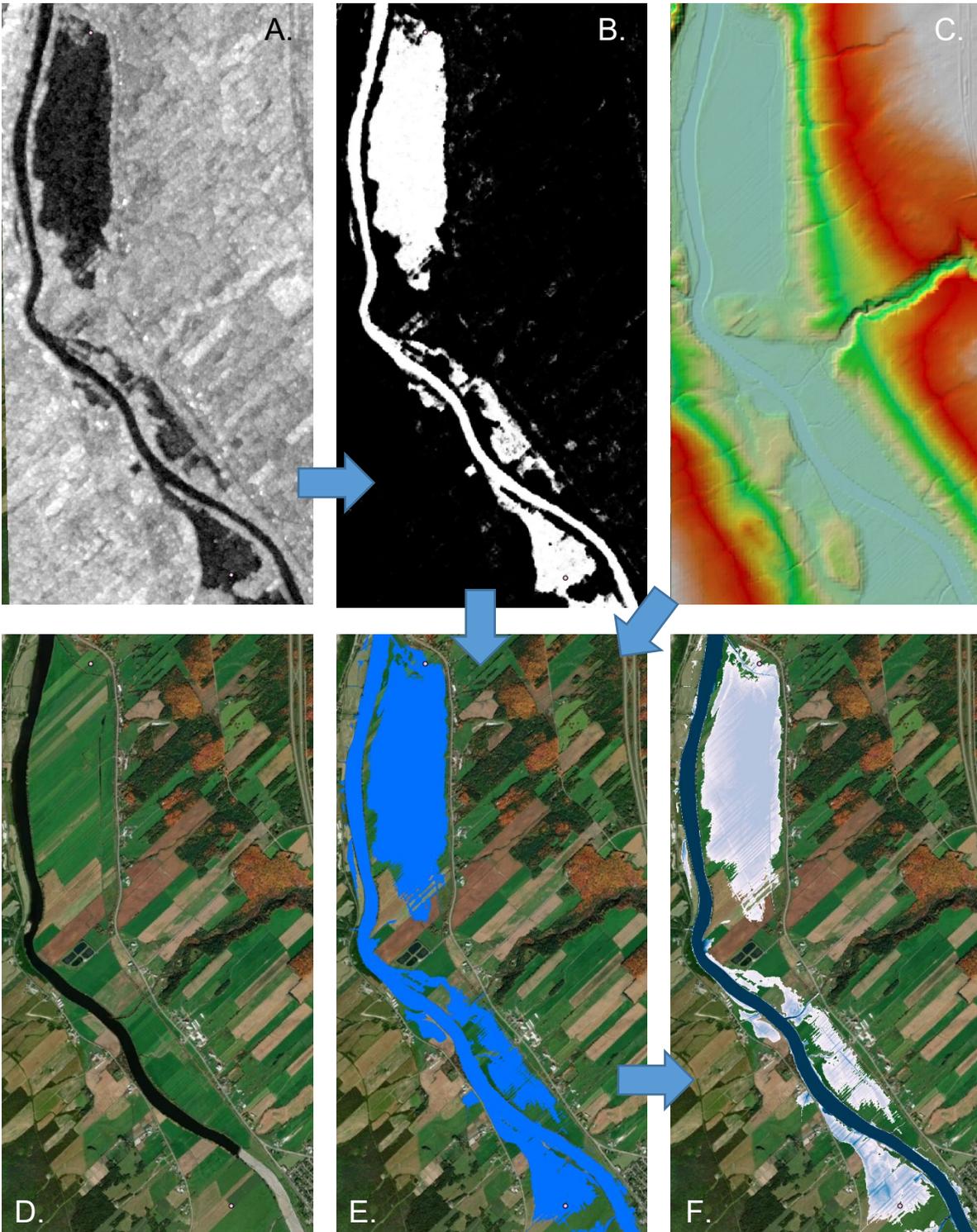


Figure 12. : Processus de classification des zones submergées (Rivière Chaudière, 26 avril 2019, zone de 3 km x 6 km). A) image Sentinel-1, B) probabilité d'appartenance à la classe eau, C) modèle HAND dérivé du MNT, D) image du secteur (date indéterminée), E) étendu de la surface submergée et F) profondeur de submersion de la zone inondée.

3.1.3 Validation des résultats

Afin de valider les résultats des étapes précédentes, nous avons répété les traitements dans des secteurs à proximité de stations hydrométriques de la DEH. Les secteurs ont été sélectionnés en regardant le MNT du lit et des berges des rivières pour s'assurer la présence d'îlots ou de berges aux pentes faibles, lesquels devraient permettre de bien capter la dynamique des niveaux d'eau sur les images RSO.

Pour ces secteurs, nous avons tout d'abord déterminé la date d'acquisition des données LiDAR. Nous avons également téléchargé ces données et converti le MNT en modèle HAND. Lors de cette conversion, le lit de la rivière, déterminé à partir du polygone du GRHQ, se voit attribuer la valeur HAND égale à 0 car l'écoulement extérieur à la rivière se fait vers ces pixels. Il est à noter que le polygone du GRHQ représente le cours d'eau selon les normes cartographiques du GRHQ et non pas le cours d'eau au moment de l'acquisition des données LiDAR. Nous avons ensuite recherché le niveau mesuré à la station de la DEH correspondante au moment de l'acquisition des données LiDAR. Ce niveau correspondra à l'élévation géodésique de la valeur 0 du HAND. Ainsi, un niveau d'eau estimé par exemple à 1 m sur le modèle HAND devrait correspondre à un niveau réel enregistré à la station qui est 1 m plus élevé que le niveau enregistré à la date d'acquisition du LiDAR.

Nous avons réalisé les premières validations en amont de la station 023402 de la DEH laquelle est située à Saint-Lambert-de-Lauzon. La zone utilisée est présentée à la Figure 13. Les images Sentinel-1 acquises entre avril et octobre 2018 au-dessus de ce secteur ont été utilisées. La Figure 14 montre les résultats obtenus avec la méthode proposée. Sur cette figure, le trait orange correspond au niveau réel de l'eau mesuré à la station hydrométrique. Le trait bleu correspond au niveau mesuré à la station hydrométrique lors de l'acquisition des données LiDAR. Cette valeur est associée au $\text{HAND} = 0$ et correspond au seuil de détection de la méthode proposée. En effet, le MNT et le modèle HAND ayant été créés avec des données LiDAR acquises alors que le niveau de l'eau correspondait à cette valeur, il n'est pas possible d'estimer des niveaux plus bas. Les traits vert et bleu correspondent respectivement au 95^e et 67^e percentile de l'ensemble des valeurs du modèle HAND extraite dans les pixels de la zone d'étude en considérant leur degré d'appartenance à la classe eau (Section 2.2.1).

Nous constatons sur la Figure 14 que les niveaux estimés à partir de la méthode proposée ne correspondent pas aux niveaux réels. Une seule valeur estimée s'approche de la réalité. Il s'agit du niveau estimé pour l'image du 27 avril 2018 en utilisant le 95^e percentile. Lors de cette journée de crue printanière, le niveau de la rivière était très haut. Pour les autres images, les niveaux estimés s'éloignent beaucoup des niveaux réels. Il ne s'agit pas non plus d'un biais car la tendance des niveaux estimés ne suit pas la tendance des niveaux réels.

Nous avons répété l'exercice sur d'autres stations avec des résultats semblables, soit une absence de corrélation entre les niveaux estimés et les niveaux réels mesurés par la station hydrométrique de la DEH.



Figure 13. Zone utilisée pour effectuer les premières validations.

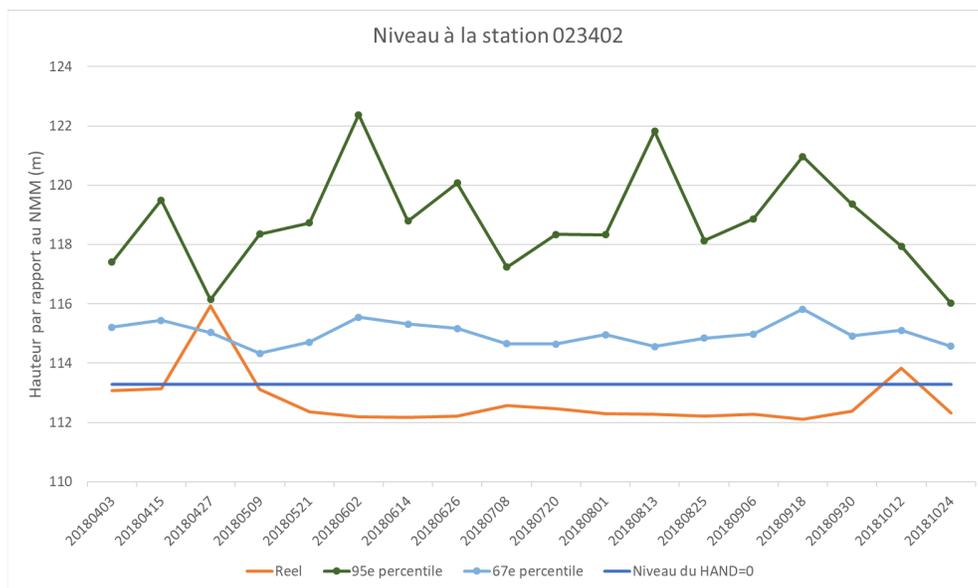


Figure 14. Niveaux estimés à partir de la méthode proposée.

Sans changer le cœur de la méthode proposée, plusieurs paramètres peuvent néanmoins être ajustés. Le premier est le domaine, ou l'étendue, sur lequel l'analyse est réalisée. Du côté de l'image RSO, il s'agit de déterminer quels pixels doivent être utilisés pour estimer le niveau de l'eau. Pour les premiers essais, une zone arbitraire a été utilisée. Cette zone avait été tracée afin d'inclure le lit de la rivière, les berges et une partie plus ou moins grande en haut du talus. Le choix des limites de la zone a de l'importance car nous voulons qu'elle soit assez grande pour contenir toute la dynamique des niveaux d'eau de la rivière, mais sans être trop grande pour ne pas inclure des régions qui pourraient être problématiques. Par exemple, il est possible que le sol de certaines régions devienne très humide selon les conditions météorologiques. Du point de vue de l'image RSO, un sol très humide peut avoir une rétrodiffusion similaire à un sol partiellement recouvert d'eau. Dans la méthode proposée, chacun de ces pixels de faible rétrodiffusion ajoutent une valeur de modèle HAND dans l'ensemble de valeurs analysées pour estimer le niveau. Ces valeurs indésirables et difficiles à prédire rendent ardues l'interprétation et l'analyse de l'ensemble des valeurs extraites.

Pour contrôler les valeurs du modèle HAND à 1 m extraites, nous avons testé différentes façons de sélectionner les pixels de l'image RSO à inclure dans l'analyse. Nous avons tout d'abord tenté de considérer tous les pixels contenant possiblement de l'eau et reliés à la rivière. Pour les extraire automatiquement, nous sommes du fait que, sur l'image montrant le degré d'appartenance à la classe eau produite à partir de l'image RSO, les pixels au centre de la rivière ont un très fort degré d'appartenance lequel diminue graduellement le long de berge. En inversant ce degré d'appartenance ($1 - \text{degré d'appartenance calculé}$), nous obtenons des valeurs élevées sur les berges lesquelles diminuent graduellement lorsqu'on s'approche du centre du cours d'eau. Cette distribution de valeur s'apparente à celle du MNT où des valeurs plus élevées sur les berges diminuent en s'approchant du lit de la rivière. Pour connaître quel pixel d'un MNT est lié à la rivière en s'écoulant vers celle-ci, nous utilisons le modèle HAND décrit précédemment. Nous avons donc appliqué le même calcul pour les pixels RSO en utilisant l'inverse du degré d'appartenance calculé. Cela nous a donné une méthode permettant d'adapter la zone d'analyse en fonction des données RSO acquises et du niveau réel tout en minimisant le nombre de pixel de sol humide mais non partiellement submergés (Figure 15).

L'utilisation de cette approche pour adapter la zone d'analyse a permis de réduire énormément l'écart entre les niveaux estimés et les niveaux réels. Cette approche semble toutefois peu sensible aux variations de niveau d'eau (Figure 16). En effet, elle résulte en une forte sous-estimation du haut niveau du 27 avril 2018 et en une surestimation des niveaux lorsque ceux-ci sont sous le seuil détectable.

À la suite de cela, nous avons tenté d'ajouter puis de remplacer différents critères pour contrôler l'extraction des valeurs du modèle HAND à 1 m. Le Tableau 3 montre certaines des modifications apportées. Leur effet sur l'estimation du niveau d'eau n'a pas été significatif comme le montre la Figure 17.

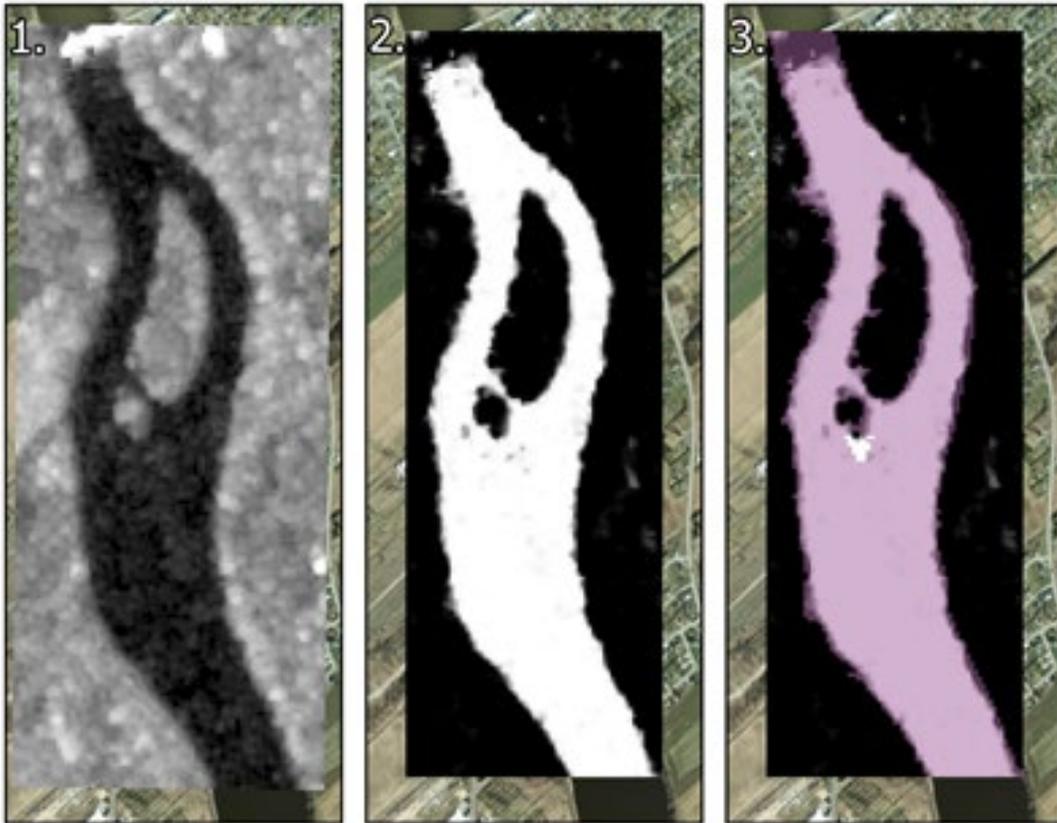


Figure 15. Création d'une zone d'analyse adaptée au contenu de l'image S-1. 1) Image S-1. 2) Degré d'appartenance à la classe eau. 3) Pixels utilisés pour l'analyse (rose avec transparence).

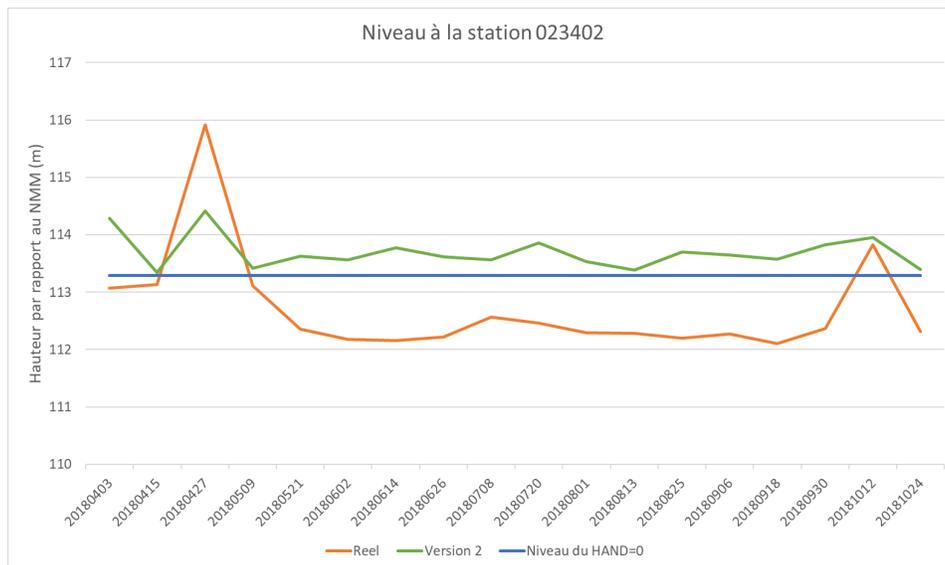


Figure 16. Niveaux estimés en limitant le domaine d'analyse aux pixels ayant un degré d'appartenance non nul et contigu à la rivière (Version 2).

Tableau 3. Modifications apportées à l'algorithme afin d'améliorer l'estimation du niveau d'eau.

Versions	Modification(s) apportée(s)
2.1	Ajout d'un seuil minimum de 5% aux degrés d'appartenance utilisés
2.2	Domaine limité spatialement à un seul pixel RSO le long de la rivière
2.3	Combinaison de 2.1 et 2.2
2.4	Réduction de 1dB des valeurs de σ_b
2.5	Retrait de la quadrature gaussienne pour ne conserver que le scénario principal (σ_a, σ_b)
2.6	Au lieu de déterminer une valeur de HAND par pixel de 10 m, le degré d'appartenance de tous les pixels est additionné et une moyenne est faite. Cette moyenne est utilisée pour extraire le percentile des valeurs de HAND à 1 m situées sous les pixels de 10 m considérés.

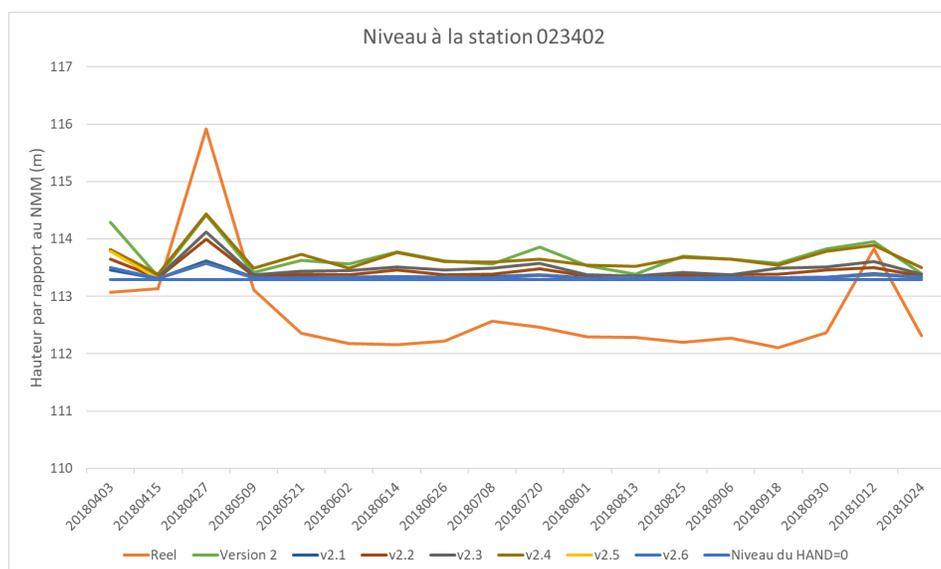


Figure 17. Niveaux estimés suite à diverses modification de la méthode proposée.

3.1.3.1 Validation de la relation entre la probabilité d'appartenance à l'eau / présence d'eau sous-pixel

Devant les difficultés rencontrées, une activité a été ajoutée au projet afin de valider l'hypothèse de départ selon laquelle les valeurs de rétrodiffusion de l'imagerie RSO sont généralement inversement proportionnelle à la quantité d'eau présente dans les pixels. Pour ce faire, des vols de drone ont été effectués le 19 mai 2023 et le 2 octobre 2023 afin de prendre des photos de l'étendue de l'eau lors de ces journées. Le secteur survolé se situe sur la rivière Chaudière à Saint-Lambert-de-Lauzon et s'étend approximativement sur 1,8 km en amont de la station 02304 de la DEH. Des images Sentinel-1 ont été acquises lors des mêmes journées. Les images acquises par le drone ont été traitées et combinées afin de créer une mosaïque du secteur survolé (Figure 18). Les pixels de la mosaïque ont ensuite été classifiés par photo-interprétation en utilisant différentes méthodes manuelles et automatiques pour extraire les pixels représentant de l'eau (Figure 19). Les images Sentinel-1 ont été classifiées de la même façon que les autres images utilisées dans le projet en utilisant les paramètres de la distribution statistique de l'eau et la méthode de quadrature gaussienne (Figure 20).

Nous avons ensuite dégradé la résolution des données provenant du drone afin qu'elle corresponde à celle de l'image Sentinel-1. La probabilité d'eau estimée sur l'image Sentinel-1 (degré d'appartenance à la classe eau) a alors pu être comparée à la proportion d'eau déterminée

par les images de drone (Figure 21). Cet exercice a permis de constater l'absence de relation entre les valeurs réelles et les valeurs estimées avec la méthode actuelle (Figure 22). De plus, nous avons constaté que les valeurs obtenues en utilisant les images Sentinel-1 sous-estime généralement la valeur réelle. Ce phénomène est visible dans la Figure 22 où l'histogramme montre une prépondérance de valeurs positives (valeurs du drone > valeur de Sentinel-1). Il en est de même si l'analyse porte uniquement sur les pixels de transition (pixels de berge) où la proportion d'eau est supérieure à 0% tout en demeurant inférieure à 100% (Figure 23). Cette absence de relation peut être en partie la conséquence des effets de double rebonds présents sur les rives des rivières s'écoulant dans l'axe nord-sud.



Figure 18. Mosaïques produites à partir des données acquises par drone lors des missions du 19 mai 2023 et du 2 octobre 2023. Le point rouge représente la station hydrométrique 023402 de la DEH.

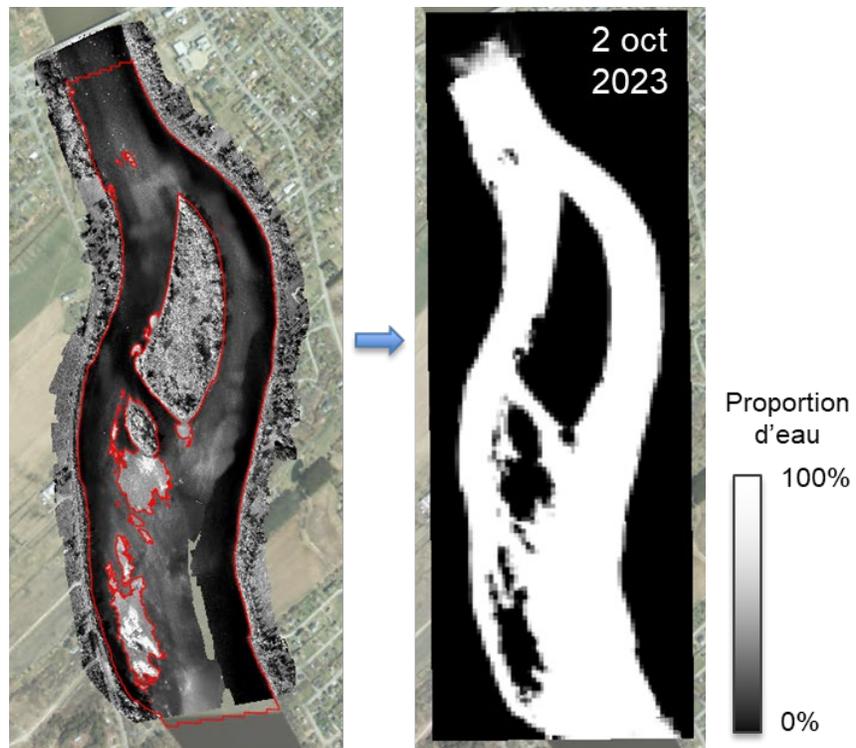


Figure 19. Classification des pixels d'eau sur les images de drone. L'image de gauche montre la limite de l'eau tracée manuellement et l'image de droite la proportion d'eau par pixel de 10 m déterminé à partir de l'image de gauche.

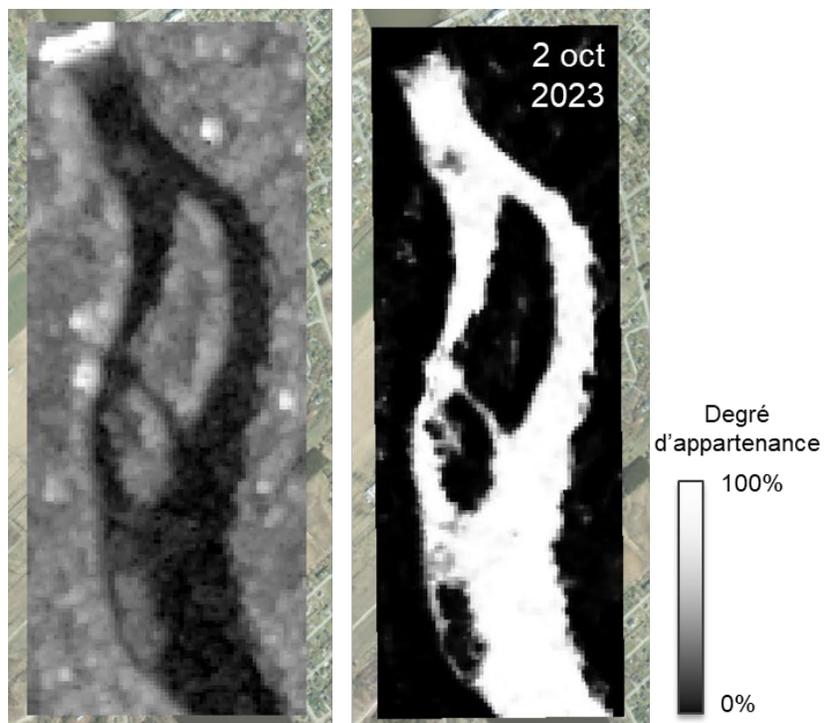


Figure 20. Image Sentinel-1 acquise le 2 octobre 2023. Les valeurs de rétrodiffusion sont présentées à gauche alors que le degré d'appartenance à la classe eau est présenté à droite.

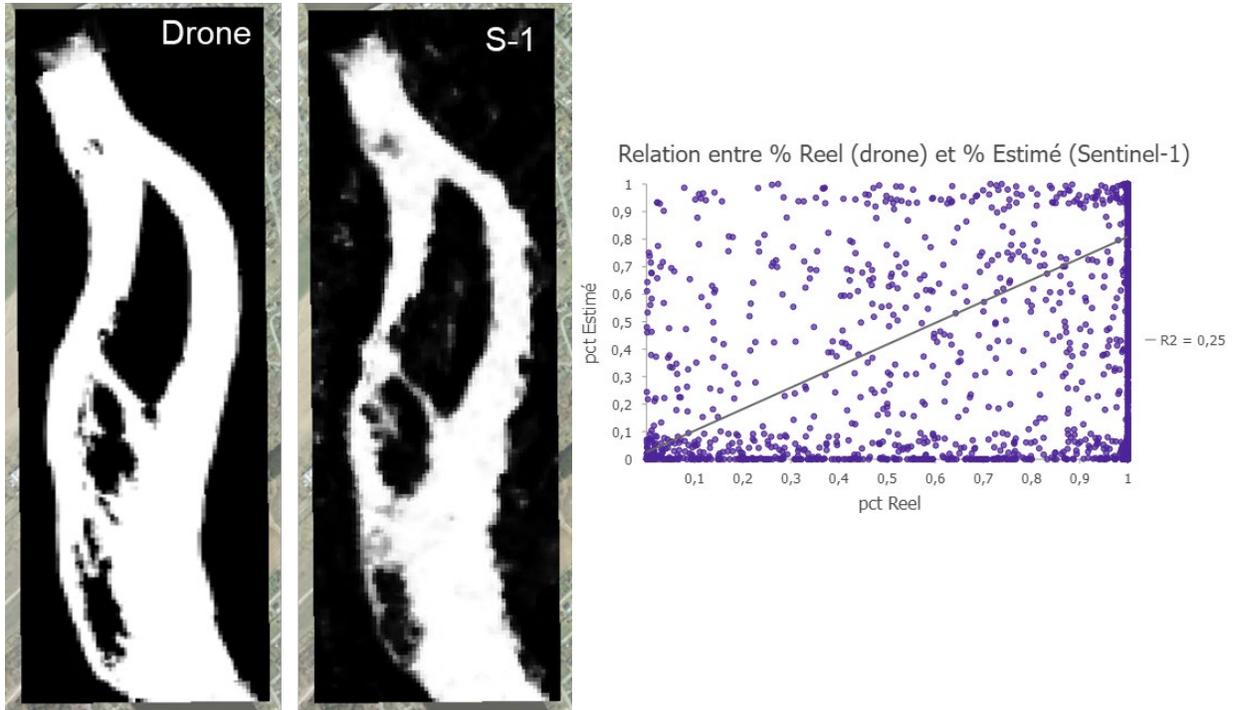


Figure 21. Comparaison du pourcentage d'eau par pixel déterminé sur les images acquises par drone et le degré d'appartenance à la classe eau estimé à partir des images Sentinel-1.

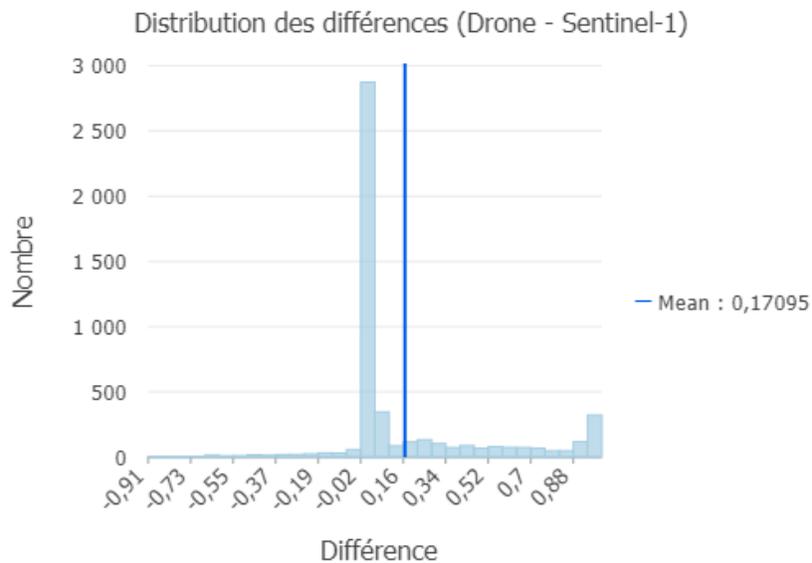


Figure 22. Analyse de la relation entre le pourcentage d'eau déterminé à partir du drone et le pourcentage estimé à partir de l'image Sentinel-1. Tous les pixels ayant un pourcentage d'eau plus grand ou égal à 0 ont été utilisés.

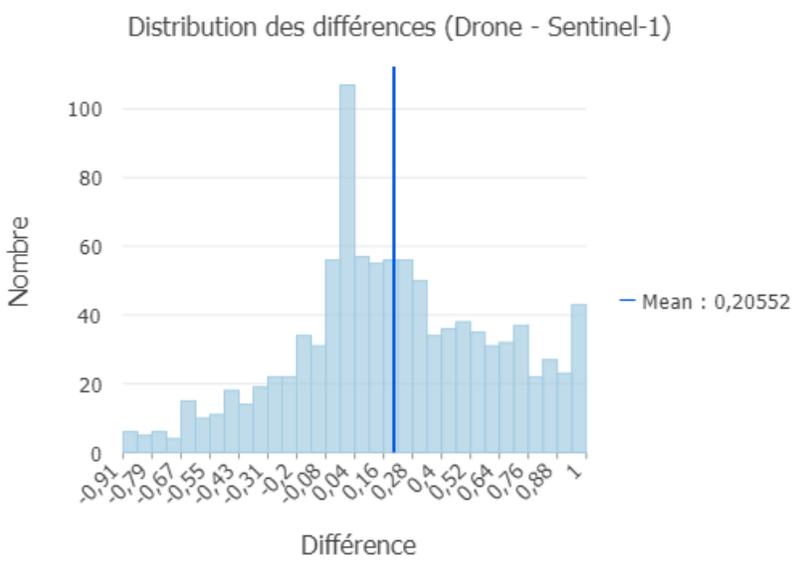
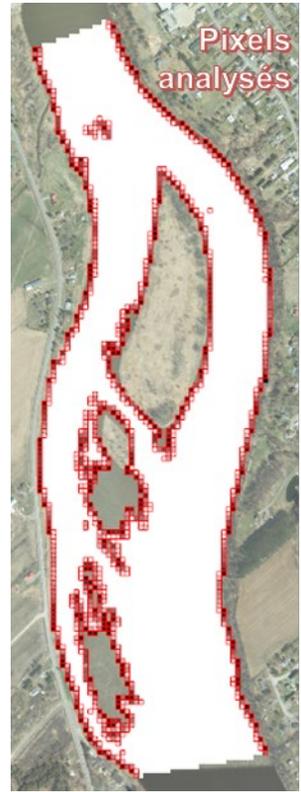
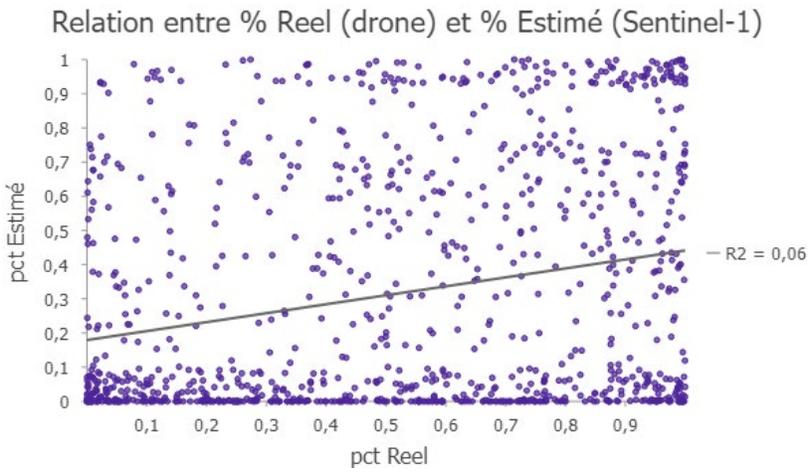


Figure 23. Analyse de la relation entre le pourcentage d'eau déterminé à partir du drone et le pourcentage estimé à partir de l'image Sentinel-1. Seulement les pixels ayant un pourcentage d'eau supérieur à 0% et inférieur à 100% ont été utilisés.

3.1.4 Méthodologie alternative

Une solution alternative a été envisagée. Elle consiste à analyser la correspondance entre divers plans d'eau théoriques, dérivés du modèle HAND (considérés comme des niveaux de référence) à des pas de 5 cm, et de les comparer à la cartographie du plan d'eau généré à partir de l'image radar. *Le plan généré à partir du modèle HAND qui correspond le mieux au plan d'eau généré à partir de l'image radar serait alors le niveau d'eau pour cette station.* Ainsi, le premier plan théorique généré est celui du niveau HAND = 0. Par la suite, plusieurs autres plans, à des pas de 5 cm sont générés jusqu'à l'atteinte d'une limite supérieure. Cette dernière varie d'une station virtuelle à une autre en fonction de la dynamique annuelle de l'eau de la région en question.

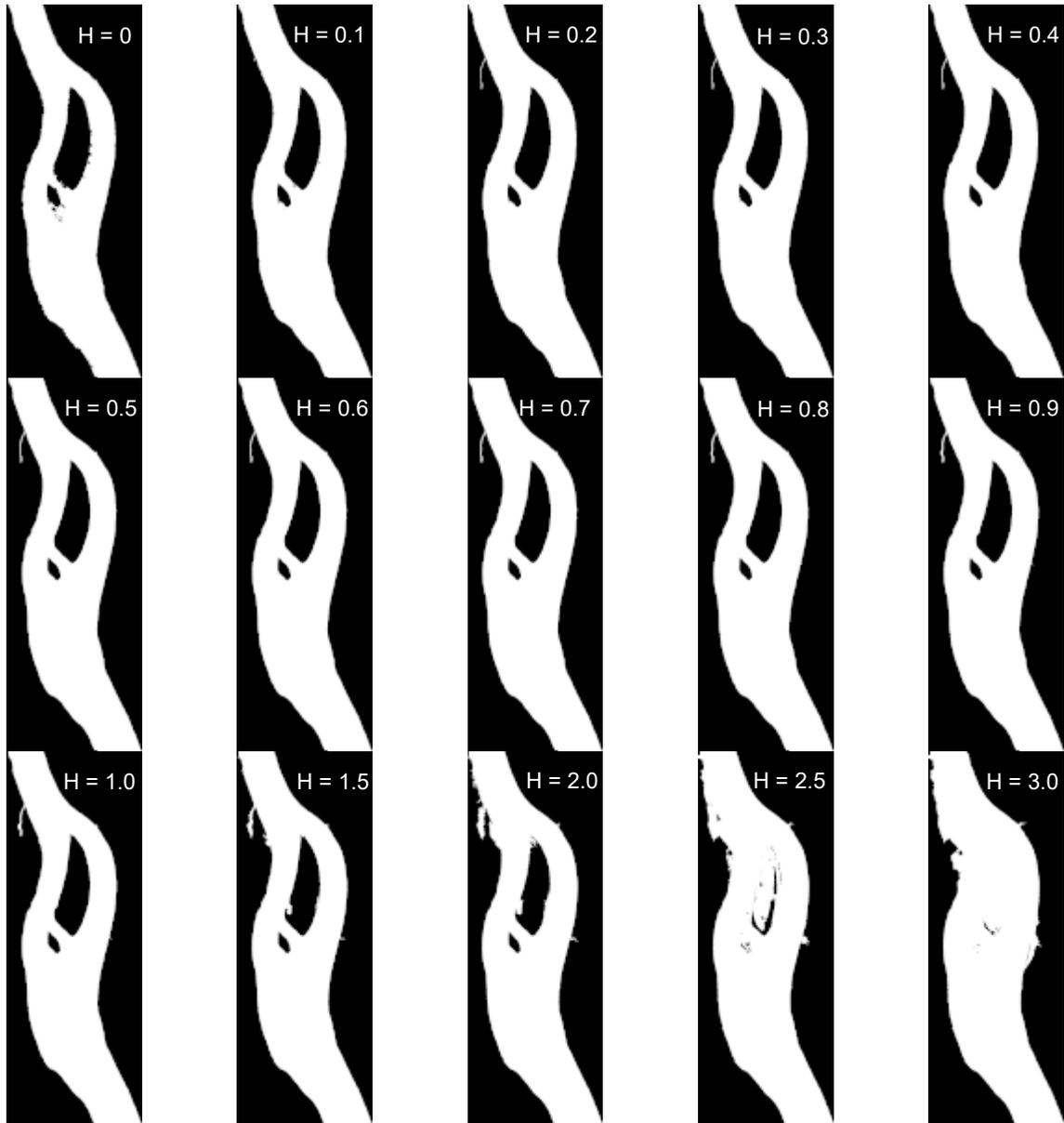


Figure 24. Exemples de niveaux d'eau théoriques (0 à 3 m) générés à partir du modèle HAND par binarisation.

Les plans d'eau dérivés du modèle HAND sont générés en se basant sur un algorithme de binarisation. Les valeurs du modèle HAND sont alors séparées en deux classes en utilisant un seuil. Les valeurs plus petites que le seuil forment la classe du plan d'eau théorique (Figure 24). D'autre part, la cartographie du plan d'eau généré à partir de l'image radar est effectuée à l'aide de la classification par logique floue. Tel que décrit à la section 2.1.2, elle calcule les degrés d'appartenance floue (x) en utilisant une fonction en forme de Z (Figure 3) basée sur deux points de transition (σ_1^0 et σ_2^0) à partir de l'équation (7).

$$f(x; \sigma_1^0, \sigma_2^0) = \begin{cases} 1, & x \leq \sigma_1^0 \\ 1 - 2 \times \left(\frac{x - \sigma_1^0}{\sigma_2^0 - \sigma_1^0} \right)^2, & \sigma_1^0 \leq x \leq \frac{\sigma_1^0 + \sigma_2^0}{2} \\ 2 \times \left(\frac{x - b}{b - \sigma_1^0} \right)^2, & \frac{\sigma_1^0 + \sigma_2^0}{2} \leq x \leq \sigma_2^0 \\ 0, & x \geq \sigma_2^0 \end{cases} \quad (7)$$

où :

x est le degré d'appartenance floue à une classe et σ_1^0 et σ_2^0 sont les points de transitions.

Contrairement à la méthode initiale, les valeurs des points de transition σ_1^0 et σ_2^0 ont été déterminées pour chaque image radar en utilisant le modèle HAND. Dans cette méthode alternative, les pixels de l'image radar avec une valeur HAND = 0 ont été catégorisés comme appartenant à la classe eau, tandis que ceux avec des valeurs supérieures à zéro ont été considérés comme appartenant à la classe Terre. Les valeurs de σ_1^0 et σ_2^0 ont ensuite été calculées comme étant les moyennes des valeurs attribuées aux deux classes.

Comme évoqué précédemment, les sources d'incertitude dans cette étude se résument à certains éléments météorologiques, notamment les vents, la présence de neige humide au sol qui absorbe l'énergie radar, et la présence de glace. Ces éléments ont un impact direct sur les valeurs de rétrodiffusion radar et, par conséquent, sur le calcul des points de transition σ_1^0 et σ_2^0 . Afin d'obtenir un calcul précis de ces deux variables cruciales (σ_1^0 et σ_2^0), il est essentiel de contrôler ces facteurs d'incertitude et de les intégrer dans le processus de modélisation.

Une approche intéressante pour contrôler l'effet de ces facteurs d'incertitude sur la valeur radiométrique du radar consiste à *quantifier* l'incertitude associée aux calculs de σ_1^0 et σ_2^0 et d'en *tenir compte* lors de l'estimation finale du niveau d'eau. L'incertitude radiométrique de la rétrodiffusion radar a été estimée à 1 dB¹. Pour tenir compte de cette incertitude lors de la modélisation, la théorie de la Quadrature Gaussienne a été adoptée. Pour être explicite, les valeurs nominales de la Quadrature Gaussienne, représentées par σ_1^0 et σ_2^0 dans cette étude, sont les moyennes de la rétrodiffusion radar de la classe Eau et de la classe Terre déterminées par l'entremise du modèle HAND. Une incertitude de ± 1 dB est ajoutée à chaque moyenne.

Avec cette approche, il devient possible de générer neuf scénarios probables pour l'étendue de l'eau dans une image radar. Ces scénarios englobent toutes les combinaisons possibles de la classification par logique floue pour trois valeurs de σ_1^0 et trois valeurs de σ_2^0 (soit 3^2 combinaisons). L'estimation finale du niveau d'eau serait alors une moyenne pondérée, comme définie dans l'équation (8), accompagnée d'une variance calculée selon l'équation (9).

$$\mu = \sum_{i=1}^3 \{\omega_i; \sigma_1^0\} \times \sum_{j=1}^3 \{\omega_j; \sigma_2^0\} \times \{Niv. eau_estimé_{i,j}\} \quad (8)$$

¹ <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-mission>

$$\sigma = \sum_{i=1}^3 \{\omega_i; \sigma_1^0\} \times \sum_{j=1}^3 \{\omega_j; \sigma_2^0\} \times \{(Niv.eau_estimé_{i,j} - \mu)^2\} \quad (9)$$

où :

$\{\omega_i; \sigma_1^0\}$ est l'ensemble des poids correspondant au point de transition σ_1^0 (Tableau 2) ;

$\{\omega_j; \sigma_2^0\}$ est l'ensemble des poids correspondant au point de transition σ_2^0 (Tableau 2) ;

$\{Niv.eau_estimé_{i,j}\}$ est l'ensemble des niveaux d'eau estimés à partir de la classification par logique floue de l'image radar, représentant les neuf scénarios possibles (Figure 25).

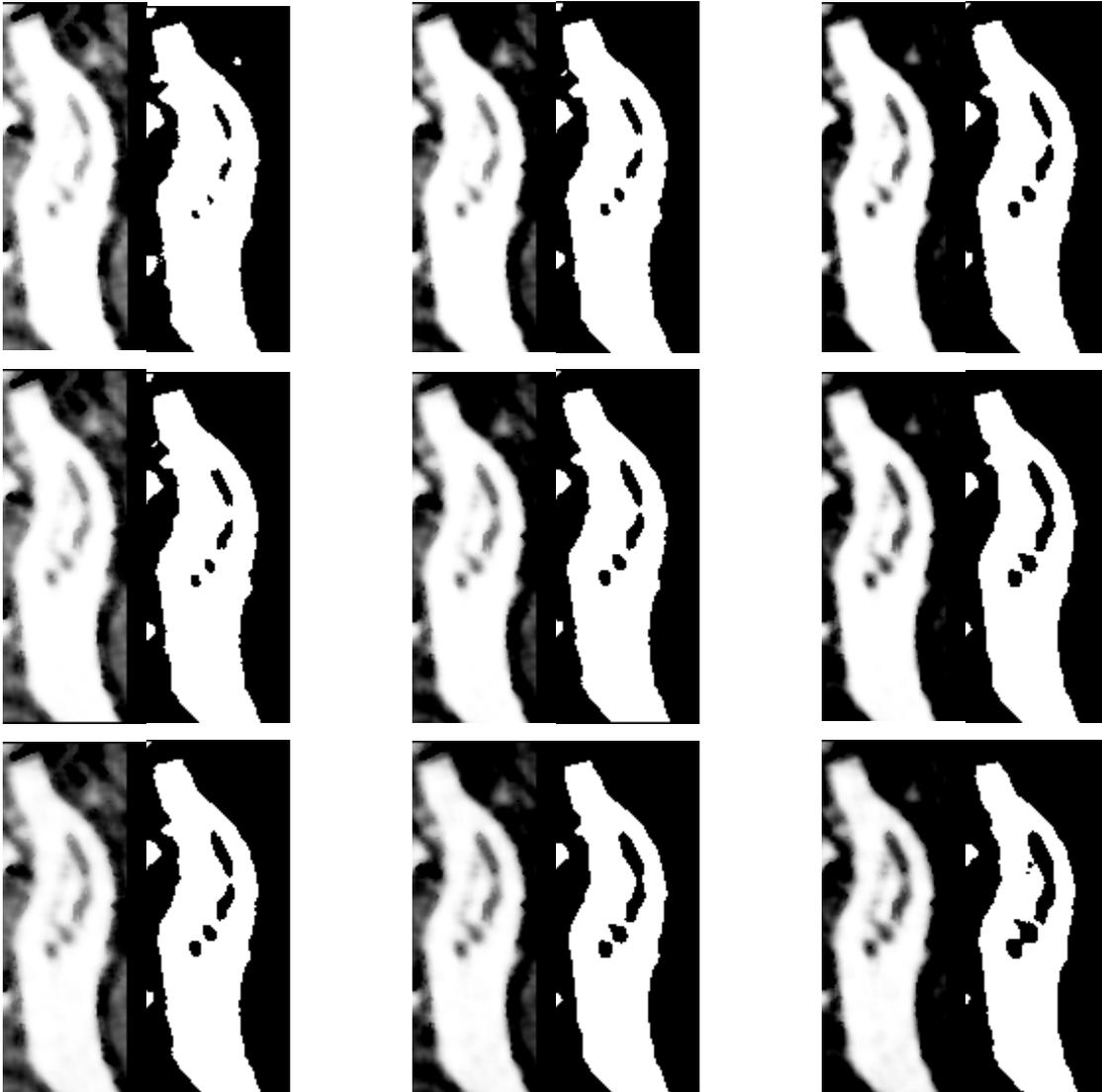


Figure 25. Exemples des neuf plans d'eau générés à partir de l'image radar du 27 avril 2018 via la classification par logique floue en utilisant la méthode de Quadrature Gaussienne et de leur binarisation à l'aide d'un seuil de 0,5.

Compte tenu du caractère probabiliste de la classification par logique floue, l'utilisation d'un seuil est nécessaire afin d'obtenir 2 classes distinctes. Un seuil de 0,5 a été utilisé. Les pixels ayant une valeur supérieure à ce seuil sont assignés à la classe *Eau*, alors que les pixels ayant une valeur inférieure sont assignés à la classe *Terre*. (voir Figure 25). Ce processus de seuillage est

crucial pour binariser les images radar classifiées en vue de les comparer avec les plans théoriques, qui sont également binaires. Une fois binarisé, chaque scénario de plan d'eau est comparé aux différents plans d'eau théoriques. Cette comparaison repose sur l'indice d'évaluation IoU (*Intersection over Union*), défini par l'équation (10). Les 10 % des plans HAND qui présentent les meilleurs scores d'IoU avec le plan d'eau généré à partir de l'image radar sont ensuite moyennés pour donner le niveau d'eau estimé pour ce scénario (Figure 26.A). Avant de calculer la moyenne, une étape finale consiste à rechercher la présence de valeurs aberrantes parmi les niveaux théoriques présentant les meilleurs scores ; le cas échéant, ces valeurs ne sont pas prises en compte lors du calcul de la moyenne (Figure 26.B). La détection des valeurs aberrantes a été réalisée en comparant chaque valeur des 10% des plans sélectionnés à la médiane plus ou moins 0,5 fois l'écart type. Les plans dont la différence entre leur valeur et la médiane est inférieure à la médiane plus ou moins 0,5 fois l'écart type sont acceptés, tandis que les autres sont considérés comme des valeurs aberrantes.

Ce processus est répété pour les neuf scénarios, aboutissant ainsi à neuf estimations du niveau d'eau. Le niveau d'eau final est alors estimé à partir de l'équation (8), tandis que sa variance est calculée à partir de l'équation (9). Le résultat final est compilé dans une fiche technique qui rassemble l'ensemble des résultats intermédiaires (les niveaux estimés à partir des neuf scénarios (Niveaux), les IoU avec les meilleurs scores et les pondérations de la Quadrature Gaussienne utilisées (Coeff)), ainsi que les résultats finaux, à savoir le niveau de l'eau (Moyenne) et l'incertitude associée (Sigma) (Tableau 4). La Figure 27 résume les étapes principales de la méthodologie alternative proposée pour ce projet.

$$IoU = \frac{\text{Aire de l'intersection}}{\text{Aire de l'union}} \quad (10)$$

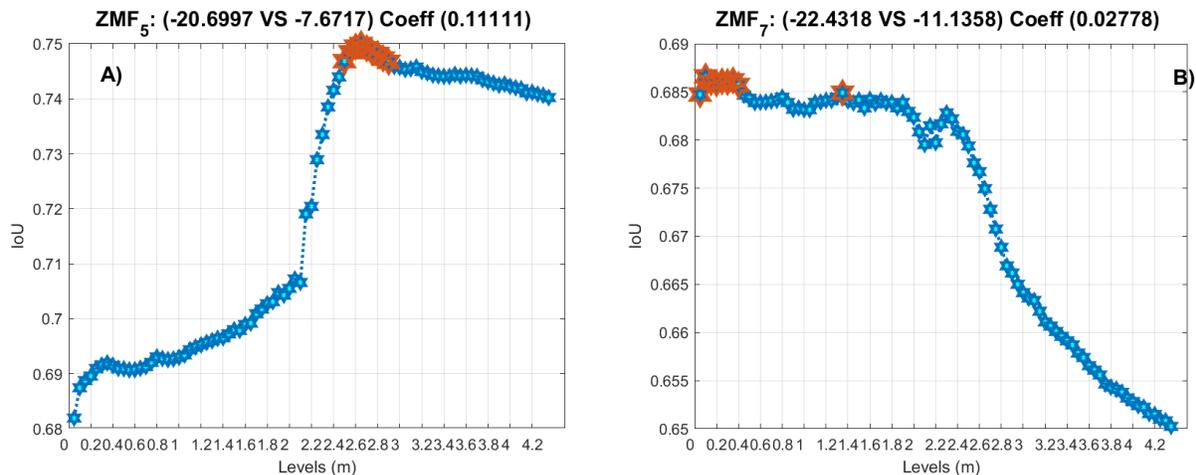


Figure 26. Exemple de graphique permettant d'identifier le niveau d'eau en se basant sur les scores de l'IoU. Sur l'axe des abscisses sont présentées les scores de l'IoU, tandis que sur l'axe des ordonnées sont représentées les niveaux d'eau théoriques. Les étoiles marquées indiquent le groupe des 10% de niveaux d'eau ayant les meilleurs scores. L'exemple (A) illustre un groupe sans valeurs aberrantes, tandis que l'exemple (B) représente un cas avec une valeur de niveau aberrante. Les deux graphiques ne correspondent pas à des scénarios associés à la même image radar.

Tableau 4. Exemple de la fiche technique finale d'estimation du niveau d'eau. Avec la Moyenne est le niveau d'eau estimé, Sigma et l'erreur sur l'estimation, Niveaux sont les niveaux estimés à partir des neuf scénarios, loU sont les meilleurs scores et Coeff sont les pondérations de la Quadrature Gaussienne.

Scénario	Niveaux (m)	loU	Coefficient
1	2,60	0,73	1/36
2	3,04	0,76	1/36
3	2,65	0,75	1/9
4	2,45	0,70	1/9
5	2,65	0,75	1/9
6	2,60	0,73	4/9
7	0,00	0,68	1/36
8	2,60	0,73	1/36
9	2,45	0,70	1/9
Moyenne	2,25		
Sigma	0,44		



Figure 27. Organigramme général de la méthodologie alternative.

3.1.5 Validation de la méthodologie alternative

Afin d'évaluer l'efficacité de la méthodologie alternative, une sélection de 14 stations hydrométriques de la DEH, comprenant des rivières, des réservoirs de barrage et des lacs, a été réalisée. Les étapes menant au choix des stations sont les suivantes :

1. Extraction des dates d'acquisition des données LiDAR couvrant chaque station de la DEH diffusant des données de niveaux ;
2. Extraction des niveaux observés lors des jours d'acquisition des données LiDAR ;
3. Comparaison des niveaux extraits avec les niveaux minimum et maximum observés à la station entre 2015 et 2023 ;
4. Évaluation des stations en débutant par celles où le niveau observé lors de l'acquisition des données LiDAR se situe le plus bas possible dans l'intervalle des niveaux possibles à cette station.

À partir de là, une recherche de régions ou secteurs propices à la méthode a été réalisée sur quelques km en amont ou en aval de la station selon que le régime d'écoulement de la rivière le

permette ou non. La région recherchée doit satisfaire plusieurs critères, parmi lesquels les plus importants sont : 1) être dégagée, 2) avoir une largeur minimale d'au moins 3 à 4 pixels de Sentinel-1, 3) posséder des berges avec une pente douce. Une fois cette région identifiée, un masque y est généré, et le processus de modélisation est entamé. En absence de régions satisfaisants les critères, la station a été ignorée.

Afin d'alléger le contenu de ce rapport, seuls les résultats de quelques stations parmi les plus représentatifs des 14 sites sélectionnés sont présentés et discutés. Le reste des résultats est illustré dans les annexes. Le constat général est qu'il existe trois groupes de résultats : 1) un groupe de sites présentant des résultats satisfaisants, 2) un groupe de sites présentant des résultats modérés et 3) un groupe de sites présentant des résultats médiocres.

3.1.5.1 Sites montrant des résultats satisfaisants

Parmi les stations sélectionnées, deux ont présentés des résultats jugés satisfaisant. La première est située sur la rivière de la Chaudière - au pont-route 218 à Saint-Lambert-de-Lauzon (**023402**) et la deuxième est située au Lac Maskinongé à Saint-Gabriel-de-Brandon (**052603**).

Station Saint-Lambert-de-Lauzon (023402)

La Figure 28 présente la fiche descriptive de la station. La première image compare la localisation géographique de la station hydrométrique avec celle de la station virtuelle (zone d'analyse ; Figure 28). La deuxième image montre le modèle numérique de terrain à partir duquel le modèle HAND est généré. Ce dernier est représenté dans la troisième image avec une indication du niveau HAND = 0 (en bleu). Le dernier graphique montre un profil transversal parcourant la station virtuelle. La position du profil peut être visualisée sur l'image montrant le MNT.

Parmi toutes les images Sentinel-1 acquises au-dessus du site, pour la saison de l'eau libre (mai à octobre) de l'année 2015 à 2023, 46 dates ont été sélectionnées aléatoirement. Ces images ont été téléchargées puis traitées afin de comparer le résultat de la modélisation du niveau de l'eau estimée par la méthodologie alternative avec les données des stations in situ. Une comparaison temporelle est présentée sur la Figure 29.A. La ligne rouge sur cette figure représente le niveau HAND = 0. En dessous de cette ligne, la modélisation est impossible car les niveaux réels sont inférieurs au niveau de référence à partir duquel le modèle HAND est généré. À l'exception de deux à trois dates, il existe une bonne concordance entre les niveaux mesurés et estimés. Il est également noté que lorsque le niveau de l'eau est inférieur au HAND = 0, l'estimation est très proche de 0 mètre sans exception.

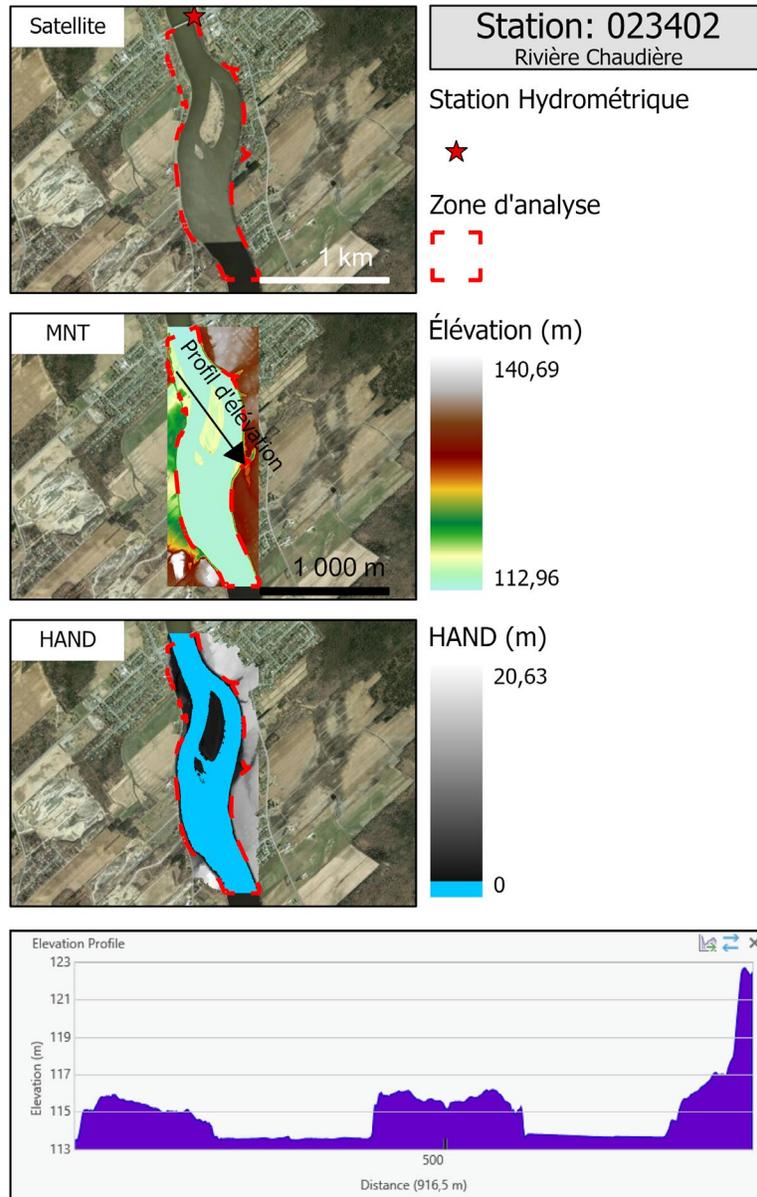


Figure 28. Fiche descriptive de la station Saint-Lambert-de-Lauzon.

Cette correspondance se reflète quantitativement dans les indices statistiques d'évaluation utilisés. Le coefficient de détermination indique que la modélisation peut expliquer jusqu'à 91 % de la variance. Le NASH, un critère très strict, montre une très grande correspondance entre les niveaux mesurés et estimés. Pour un NASH = 1 la correspondance est parfaite. L'erreur quadratique moyenne est d'environ 24 cm pour des niveaux d'eau atteignant jusqu'à 3 mètres par rapport au niveau de référence, ce qui est très acceptable. Le biais est de 14 cm, soulignant une tendance systématique à surestimer le niveau d'eau modélisé par cette méthode. Cet aspect est clairement observé pour les dates où les niveaux d'eau mesurés sont inférieurs au HAND = 0, les niveaux d'eau estimés pour ces dates étant légèrement supérieurs à 0 mètre (Figure 29.B).

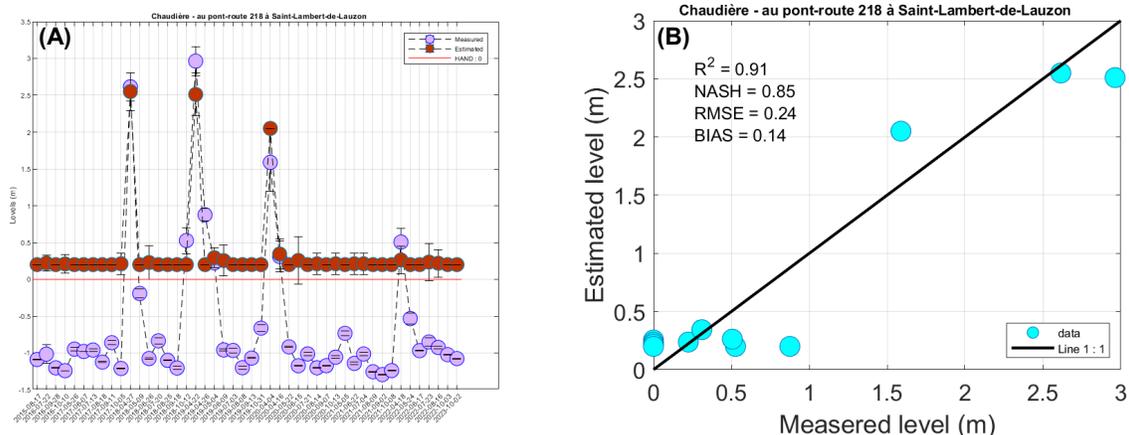


Figure 29. Comparaison entre la modélisation des niveaux d'eau et les mesures in situ pour la station Saint-Lambert-de-Lauzon.

Station Saint-Gabriel-de-Brandon (052603)

La Figure 30 présente la fiche descriptive de la station. Pour cette station, 14 images ont été sélectionnées aléatoirement parmi celles acquises par Sentinel-1 lors de la saison de l'eau libre (mai à octobre) pour les années 2017 à 2022. Une fois traitées, ces images ont été comparées avec la modélisation du niveau de l'eau estimée par la méthodologie alternative. Une comparaison temporelle est présentée sur la Figure 31.A. La concordance entre les niveaux mesurés et estimés est moins bonne que celle observée pour la station Saint-Lambert-de-Lauzon. Cependant, dans la plupart des cas, le niveau d'eau mesuré se situe dans l'intervalle d'erreur du niveau d'eau estimé. Quantitativement, le coefficient de détermination indique que la modélisation peut expliquer jusqu'à 76 % de la variance. Le NASH (= 0,76) montre une correspondance satisfaisante entre les niveaux mesurés et estimés. L'erreur quadratique moyenne est d'environ 42 cm pour des niveaux d'eau atteignant jusqu'à 2 mètres, ce qui est également satisfaisant. Le biais est de 5 cm, soulignant une légère surestimation des niveaux d'eau modélisés par cette méthode (Figure 31.B)

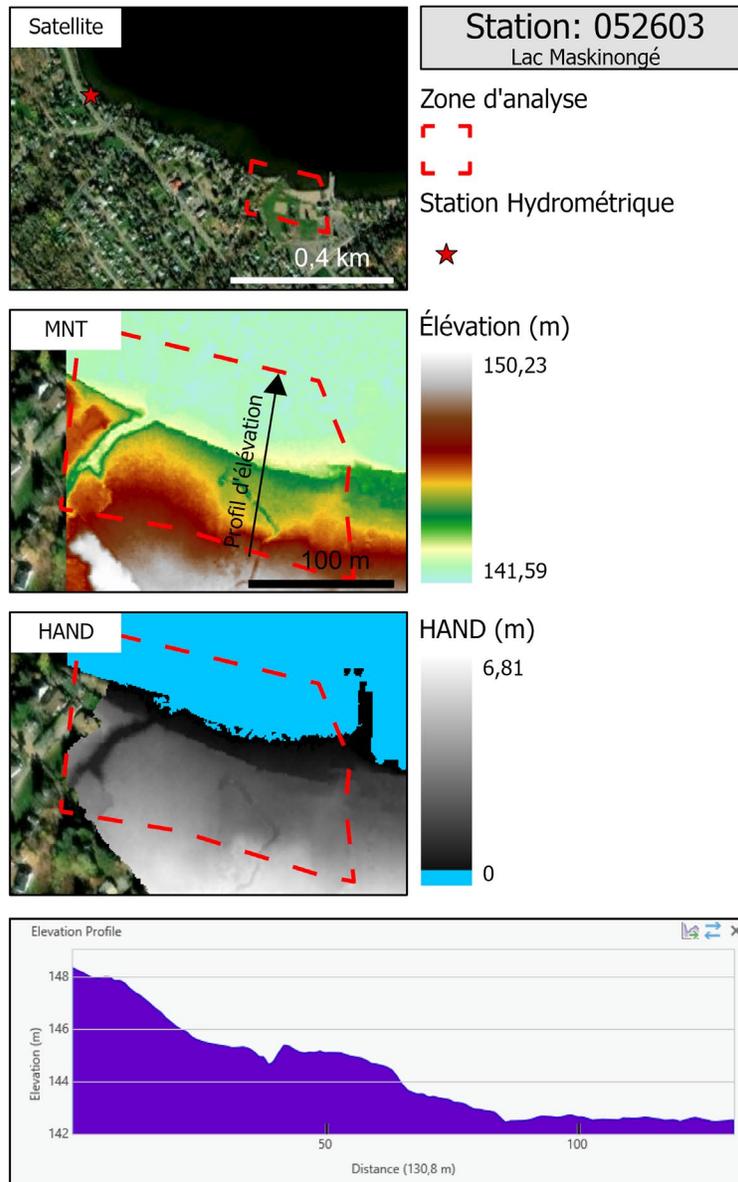


Figure 30. Fiche descriptive de la station Saint-Gabriel-de-Brandon.

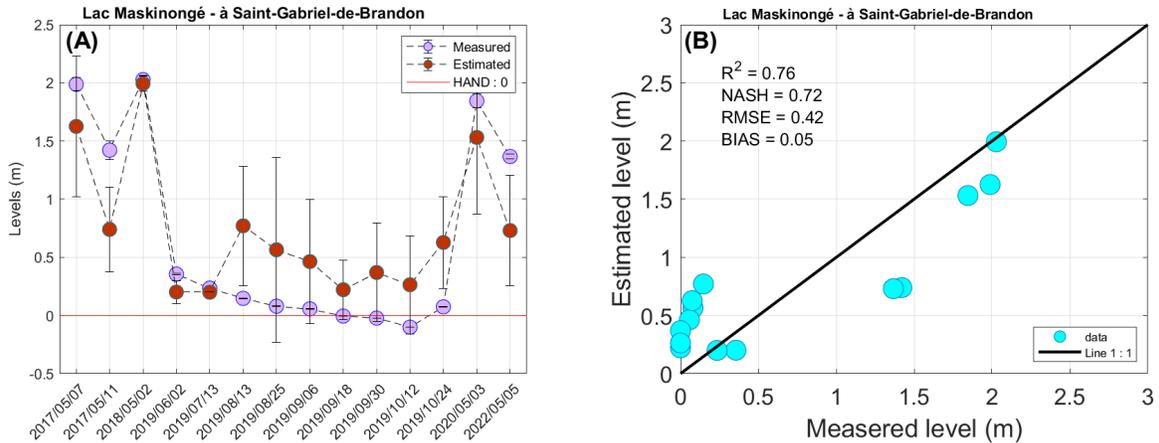


Figure 31. Comparaison entre la modélisation des niveaux d'eau et les mesures in situ pour la station Saint-Gabriel-de-Brandon.

3.1.5.2 Sites montrant des résultats modérés

Il est question de deux stations particulières. La première est située sur le Lac Aylmer - au quai de la municipalité de Stratford (**030296**) et la deuxième est située sur la rivière de Yamaska - à 1,8 km en aval du barrage à Saint-Hyacinthe (**030345**).

Station au-quai de la municipalité de Stratford (030296)

La Figure 32 présente la fiche descriptive de la station. L'analyse comparative à cette station s'est effectuée au moyen de 50 dates d'acquisition d'image sélectionnées aléatoirement lors de la saison de l'eau libre (mai à octobre) pour les années 2016 à 2022. Une comparaison temporelle est présentée sur la Figure 33.A. La concordance entre les niveaux mesurés et estimés est moins bonne que celle observée pour les deux premières stations, notamment pour les niveaux d'eau supérieurs à 40 cm. Cependant, les niveaux d'eau inférieur au niveau de référence HAND = 0 sont systématiquement estimés proches du niveau 0 mètre. Quantitativement, le coefficient de détermination indique que la modélisation peut expliquer jusqu'à 67 % de la variance. Le NASH montre une correspondance très modérée entre les niveaux mesurés et estimés. L'erreur quadratique moyenne est d'environ 8 cm pour des niveaux d'eau atteignant jusqu'à 60 cm, ce qui est également modéré. Le biais est de 0 cm, soulignant que, en moyenne, la modélisation est exacte (Figure 33.B)

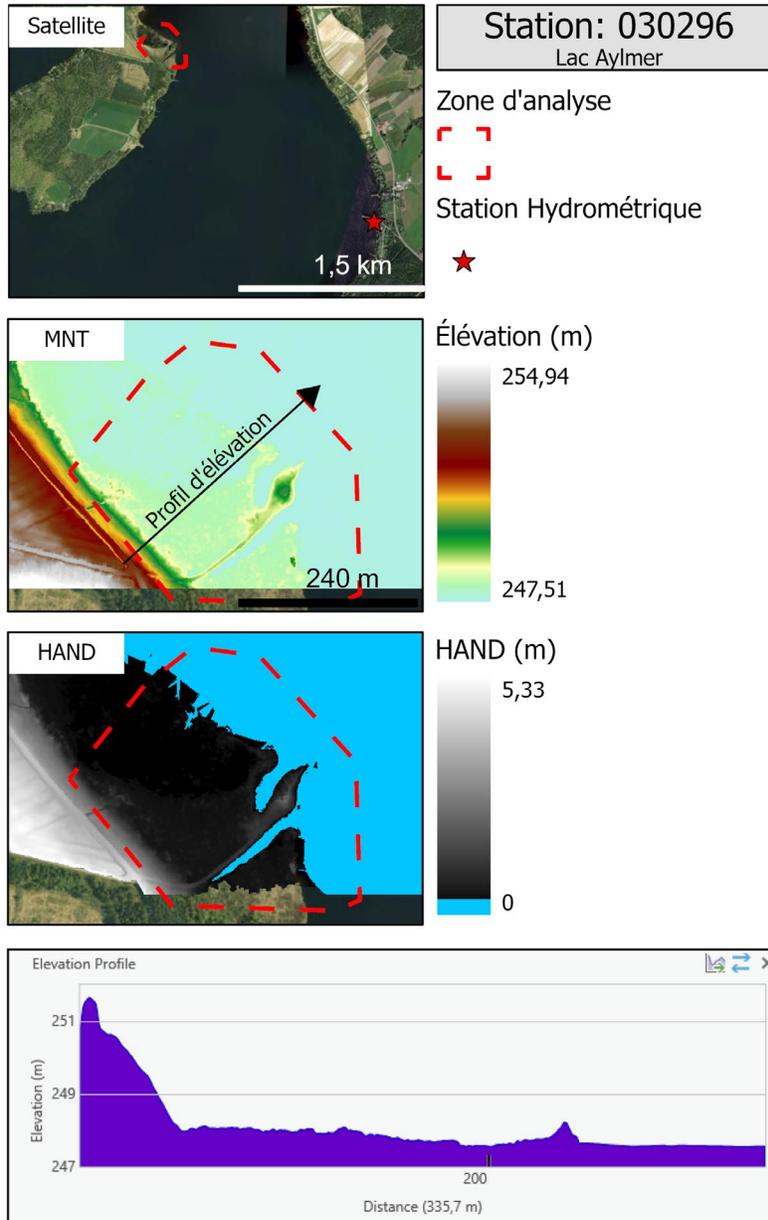


Figure 32. Fiche descriptive de la station au-quai de la municipalité de Stratford.

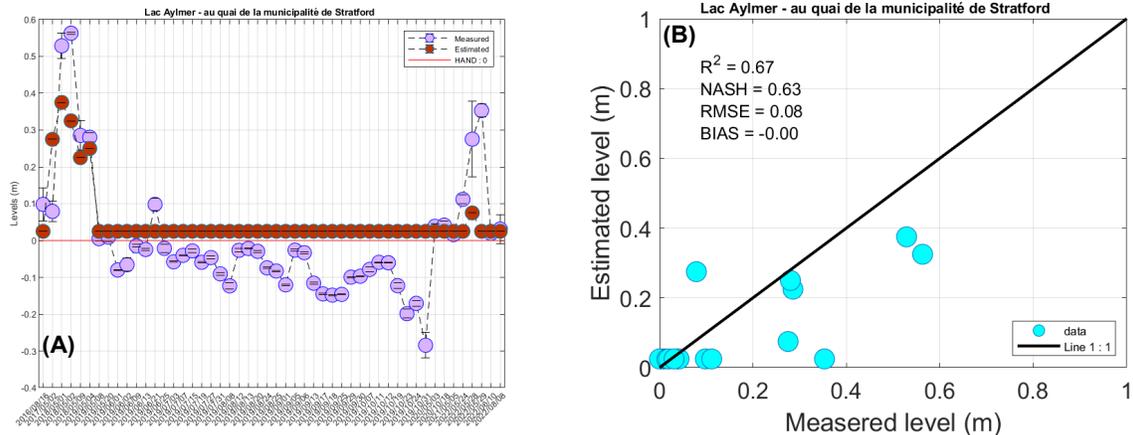


Figure 33. Comparaison entre la modélisation des niveaux d'eau et les mesures in situ pour la station Au-quai de la municipalité de Stratford.

Station Du-barrage à Saint-Hyacinthe (030345)

La Figure 34 présente la fiche descriptive de la station. Les images de 13 dates aléatoires, pour la saison de l'eau libre (mai à octobre) des années 2018 à 2019, ont été téléchargées pour fin de comparaison avec la modélisation du niveau de l'eau estimée par la méthodologie alternative. Une comparaison temporelle est présentée sur la Figure 35.A. La concordance entre les niveaux mesurés et estimés est généralement bonne sauf pour l'image du 04 mai 2019 où l'on remarque une forte sous-estimation du niveau d'eau. Quantitativement, le coefficient de détermination indique que la modélisation peut expliquer jusqu'à 43 % de la variance. Le NASH montre une correspondance très modérée entre les niveaux mesurés et estimés. L'erreur quadratique moyenne est d'environ 28 cm pour des niveaux d'eau atteignant jusqu'à 1,50 m, ce qui est assez acceptable. Le biais est de -7 cm, soulignant une légère sous-estimation du niveau d'eau (Figure 35.B).

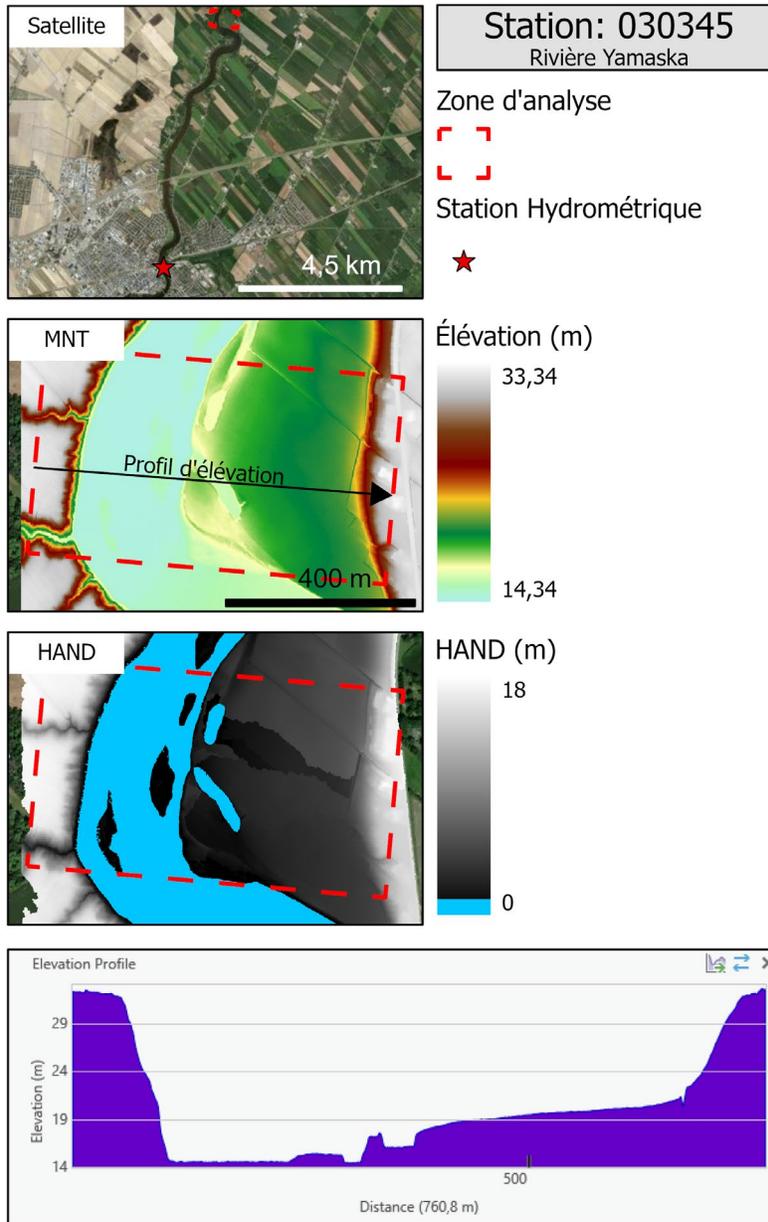


Figure 34. Fiche descriptive de la station du-barrage à Saint-Hyacinthe.

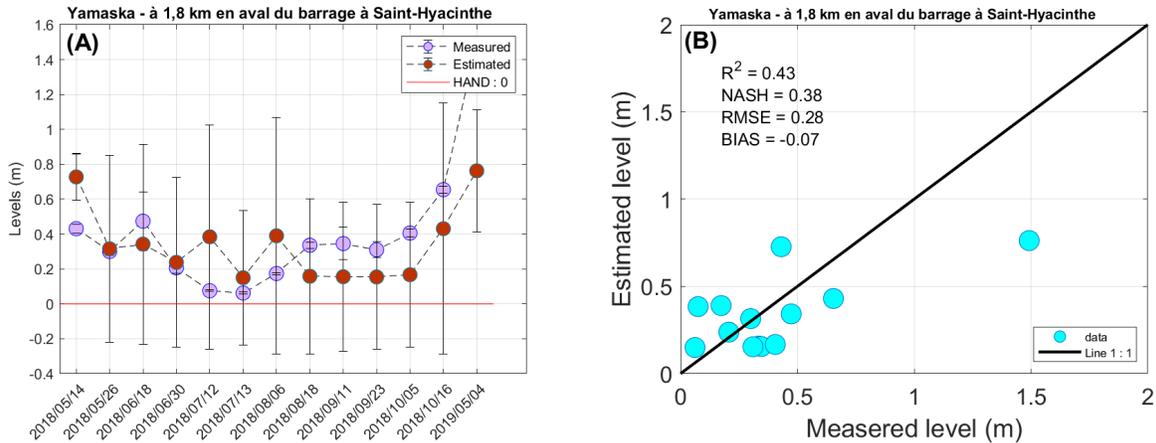


Figure 35. Comparaison entre la modélisation des niveaux d'eau et les mesures in situ pour la station Du-barrage à Saint-Hyacinthe.

3.1.5.3 Sites montrant des résultats médiocres

Les dix stations restantes utilisées pour la validation ont présenté des résultats médiocres. Nous en présenterons néanmoins deux dans cette section. Les autres sont présentées en annexe. La première est située –sur le Lac-Mégantic à Lac-Mégantic (**023409**) et la deuxième est située au Lac Brome, à la plage municipale de la ville de Lac-Brome (**030350**).

Station au-lac Mégantic à Lac-Mégantic (023409)

La Figure 36 présente la fiche descriptive de la station. Des images pour 42 dates aléatoires, pour la saison de l'eau libre (mai à octobre) des années 2017 à 2022, ont été téléchargées pour fin de comparaison avec la modélisation du niveau de l'eau estimée par la méthodologie alternative. Une comparaison temporelle est présentée sur la Figure 37.A. Il est évident qu'il n'y a aucune correspondance entre les niveaux mesurés et estimés. Cependant, les niveaux d'eau plus bas que le niveau de référence HAND = 0 sont systématiquement estimés proches du niveau 0 mètre. Quantitativement, le coefficient de détermination indique que la modélisation n'explique que 2 % de la variance. Le NASH est négatif, ce qui suggère que la moyenne des niveaux mesurés est un meilleur estimateur que la modélisation. L'erreur quadratique moyenne est d'environ 13 cm pour des niveaux d'environ 60 cm, ce qui est très bruité. Le biais est de 2 cm (Figure 37.B).

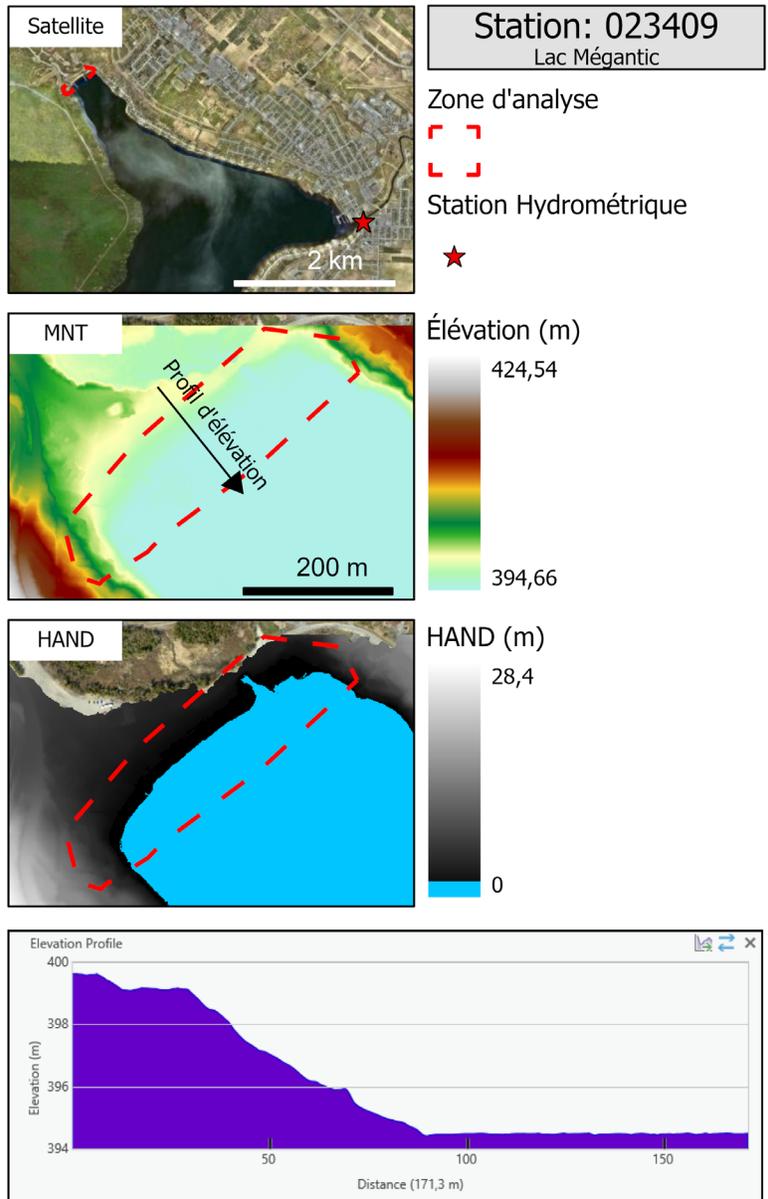


Figure 36. Fiche descriptive de la station au-lac Mégantic à Lac-Mégantic.

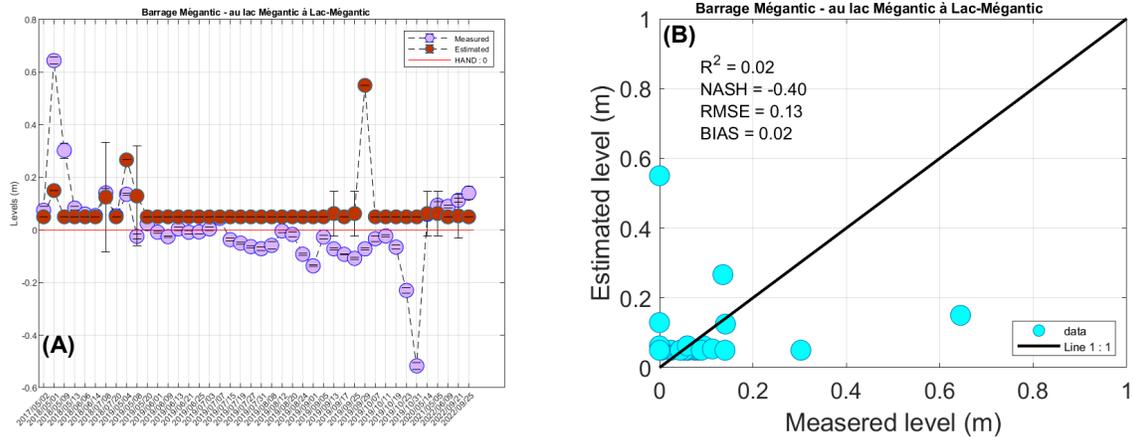


Figure 37. Comparaison entre la modélisation des niveaux d'eau et les mesures in situ pour la station Au-quai de la municipalité de Stratford.

Station à la plage municipale de la ville de Lac-Brome (030350)

La Figure 38 présente la fiche descriptive de la station. Des images pour 12 dates aléatoires, pour la saison de l'eau libre (mai à octobre) de l'année 2019, ont été t l charg es pour fin de comparaison avec la modélisation du niveau de l'eau estim e par la méthodologie alternative. Une comparaison temporelle est pr sent e sur la Figure 39.A. La figure montre aucune correspondance entre les niveaux mesurés et estimés. Quantitativement, le coefficient de détermination indique que la modélisation n'explique rien de la variance. Le NASH est négatif, ce qui suggère que la moyenne des niveaux mesurés est un meilleur estimateur que la modélisation. L'erreur quadratique moyenne est d'environ 12 cm pour des niveaux d'environ 20 cm, ce qui est très bruit . Le biais est de -8 cm, soulignant que la modélisation est entach e d'une sous-estimation systématique (Figure 39.B).

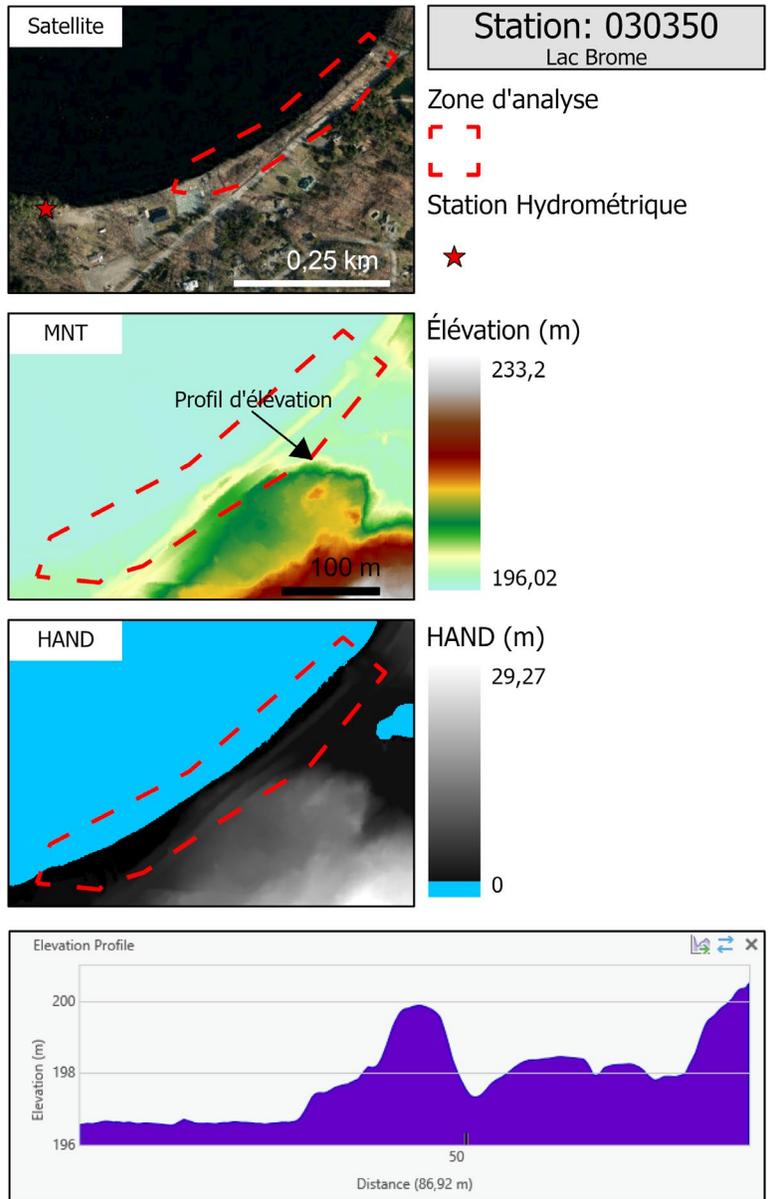


Figure 38. Fiche descriptive de la station à la page municipale de la ville de Lac-Brome.

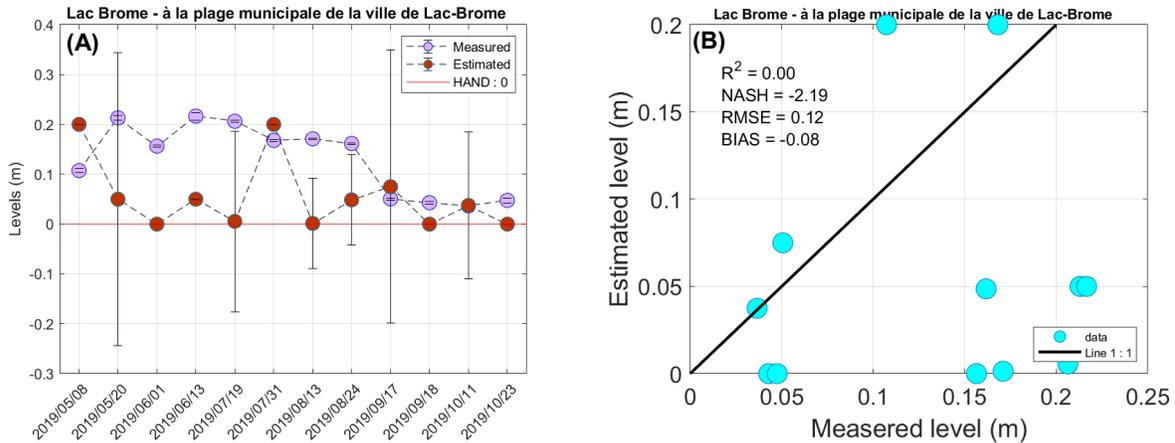


Figure 39. Comparaison entre la modélisation des niveaux d'eau et les mesures in situ pour la station à la plage municipale de la ville de Lac-Brome.

3.1.6 Discussions

Les exemples présentés dévoilent des résultats mitigés, mais une analyse en profondeur révèle leur cohérence et met en évidence à la fois les forces et les limites de la méthodologie alternative. Pour le groupe de stations affichant des résultats *satisfaisants*, un point commun est la présence d'une variation de niveaux suffisamment large et distincte (0 à 3 m et 0 à 2 m pour les stations de Saint-Lambert-de-Lauzon et Saint-Gabriel-de-Brandon, respectivement), et des berges qui sont dépourvues d'obstacles (zones masquées en bleu foncé sur la Figure 40.A et la Figure 41.A) et caractérisée par des pentes douces (zones masquées en bleu foncé sur la Figure 40.B et la Figure 41.B). Cependant, la zone répondant aux critères de sélection mentionnés est nettement plus restreinte pour la station de Saint-Gabriel-de-Brandon (plage sur la partie zoomée de la Figure 41.A) que pour celle de Saint-Lambert-de-Lauzon, où l'espace de cette zone est composé de deux îles et d'une zone étendue en longueur et en largeur (flèche rouge dans la partie nord-ouest (Figure 40.A)). De plus, la station hydrométrique est positionnée à environ 550 mètres de la zone de calcul de la station virtuelle (Figure 41.A). Ces facteurs ont probablement contribué à la meilleure qualité de la modélisation des niveaux d'eau pour la station de Saint-Lambert-de-Lauzon ($R^2 = 0,91$ et (Figure 29)) par rapport à celle de la station de Saint-Gabriel-de-Brandon ($R^2 = 0,76$ et NASH = 0,72 (Figure 31)). Malgré ces limitations, la modélisation à la station Saint-Gabriel-de-Brandon peut être qualifiée de satisfaisante.

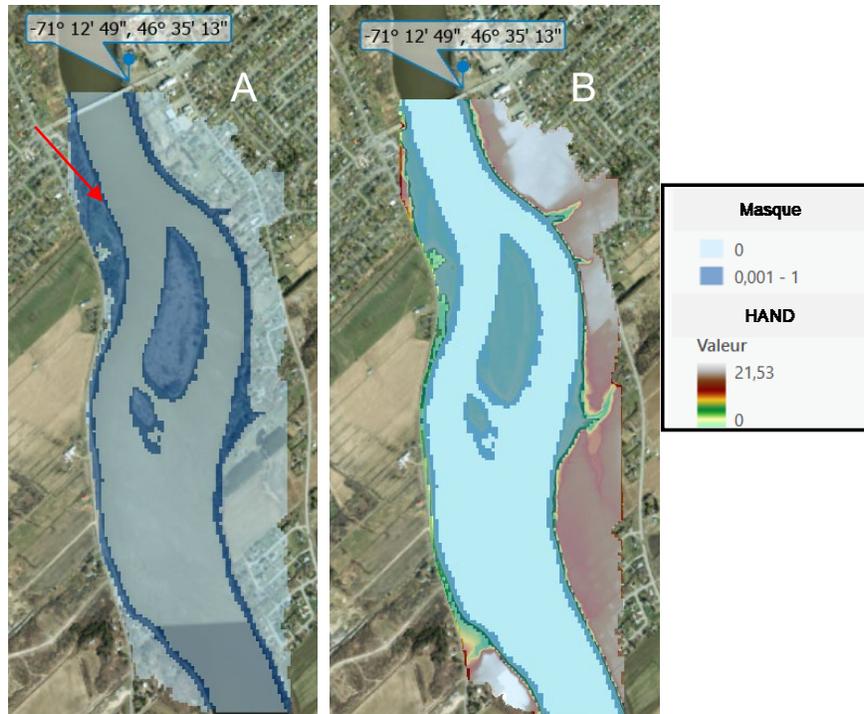


Figure 40. Illustration de la zone d'analyse à partir desquels l'estimation des niveaux d'eau a été calculés (A) et du modèle HAND (B) pour la station Saint-Lambert-de-Lauzon.

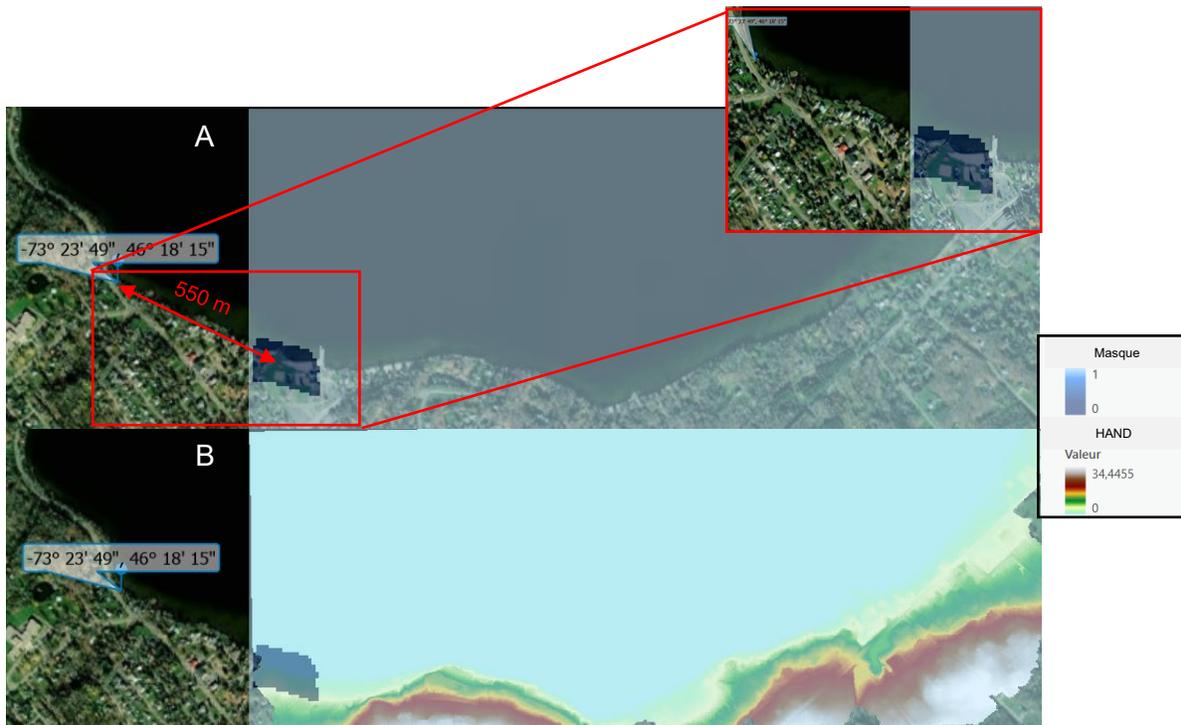


Figure 41. Illustration de la zone d'analyse à partir desquels l'estimation des niveaux d'eau a été calculés (A) et du modèle HAND (B) pour la station Saint-Gabriel-de-Brandon. La zone encadrée en rouge est un zoom sur le masque utilisé lors du processus de la modélisation.

Pour le groupe de stations montrant des résultats *modérés*, la station au quai de la municipalité de Stratford a présenté une performance acceptable ($R^2 = 0,67$ et NASH = 0,63 (Figure 33)), compte tenu des conditions du site. En effet, la différence entre le niveau le plus bas et le plus élevé mesuré pour la période étudiée à cette station est d'environ 60 cm. Considérant une résolution d'altitude de modélisation de 5 cm, la tolérance à l'erreur de modélisation est d'environ 8% ($5 \text{ cm} / 60 \text{ cm} * 100$). Cette marge élevée rend la validation très sensible aux erreurs de modélisation, malgré la présence d'une zone dégagée (Figure 42.A) avec une pente très douce (Figure 42.B). De plus, la station hydrométrique se trouve à plus de 2 km de la zone de calcul (Figure 42.A), et sur la berge opposée du lac, ce qui pourrait expliquer la performance moyenne de l'estimation des niveaux d'eau dans cette station.

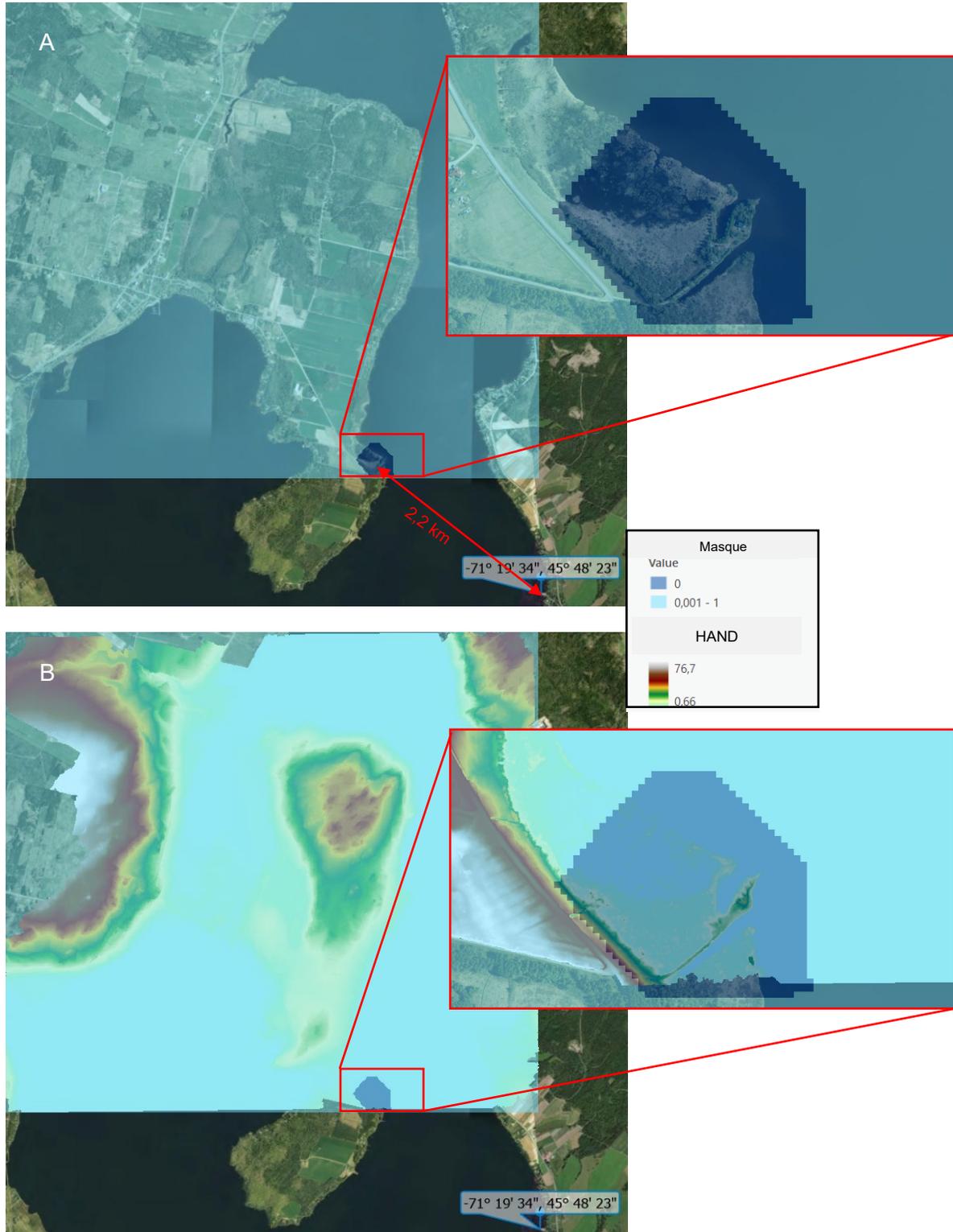


Figure 42. Illustration de la zone d'analyse à partir desquels l'estimation des niveaux d'eau a été calculés (A) et du modèle HAND (B) pour la station Au-quai de la municipalité de Stratford. La zone encadrée en rouge est un zoom sur le masque utilisé lors du processus de la modélisation.

Pour la station située sur la rivière Yamaska en aval du barrage à Saint-Hyacinthe, une zone de calcul répondant à tous les critères de sélection a été identifiée. La variation entre le niveau le plus bas et le plus élevé enregistré sur la période étudiée est d'environ 1,5 m, ce qui entraîne un taux d'erreur tolérable de 3,33%. Cependant, cette zone de calcul se trouve à environ 7 km de la station hydrométrique (Figure 43). Bien qu'aucun affluent important ne rejoigne la rivière entre la station et le site d'étude, cette distance spatiale pourrait potentiellement avoir un impact sur le processus de validation pour cette station. Malgré cette contrainte de localisation spatiale, la modélisation au niveau de cette station est acceptable ($R^2 = 0,43$ et NASH = 0,38 (Figure 35)).

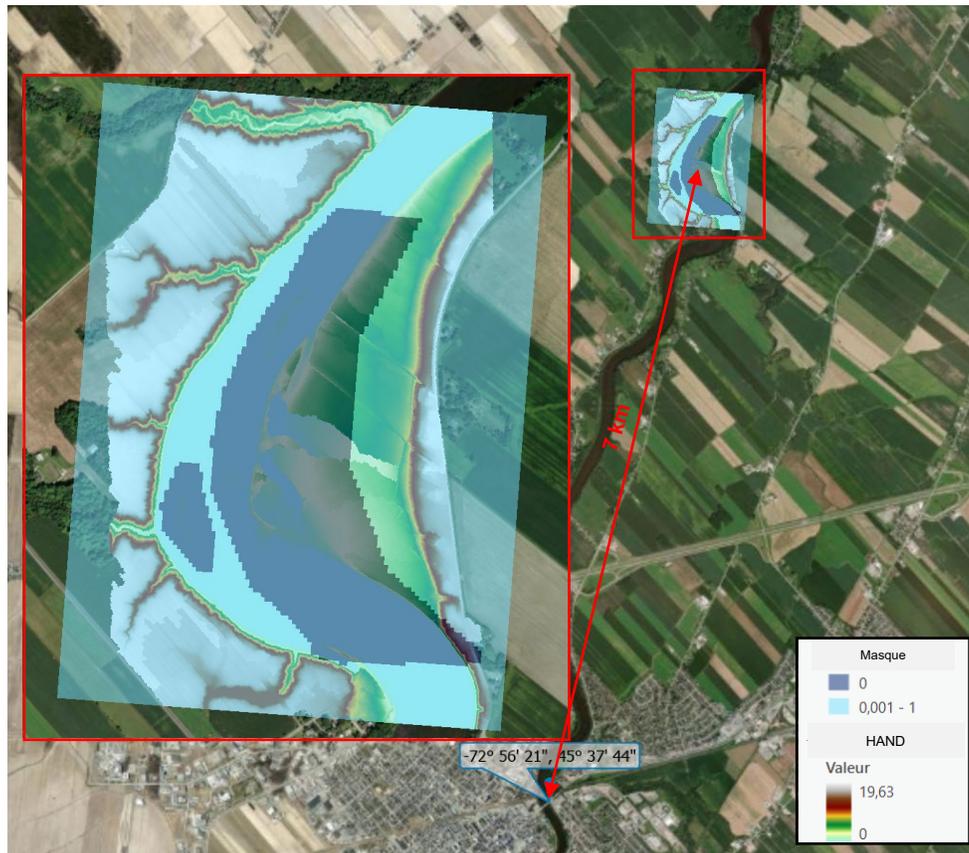


Figure 43. Illustration de la zone d'analyse sur le modèle HAND à partir desquels l'estimation des niveaux d'eau a été calculée pour la station Du-barrage à Saint-Hyacinthe. La zone encadrée en rouge est un zoom sur le masque utilisé lors du processus de la modélisation.

Pour le groupe de stations présentant des résultats *médiocres*, le point commun entre les deux stations étudiées est un rapport élevé de tolérance à l'erreur de validation, s'élevant à 7,7% pour la station au Lac-Mégantic à Lac-Mégantic et à 25% pour la station à la plage municipale de la ville de Lac-Brome. En outre, deux critères spécifiques s'ajoutent à la station au Lac-Mégantic à Lac-Mégantic. Premièrement, elle est éloignée de la station de mesure hydrométrique, située à environ 4 km de la station virtuelle (Figure 44.A). Deuxièmement, l'espace de la plage est très restreint, ne dépassant pas 1 à 2 pixels en largeur (flèches bleues sur la Figure 44.B), avec des pentes très douces, et des pentes très abruptes une fois dépassée la plage (Figure 44.C). Cela signifie que la variation de l'altitude de l'eau est très faible au niveau de la plage. Avec une résolution spatiale de 10 m de Sentinel-1, il devient alors très difficile d'effectuer une modélisation

précise à un pas de 5 cm (les pentes à l'intérieur des pixels sont trop faibles pour détecter la variation). Enfin, la présence de deux quais saisonniers (Figure 44.B), qui peuvent être absents en début ou en fin de saison, exerce une influence directe sur le niveau de l'eau au niveau de la plage. Ces caractéristiques rendent ainsi la modélisation extrêmement difficile pour cette station.

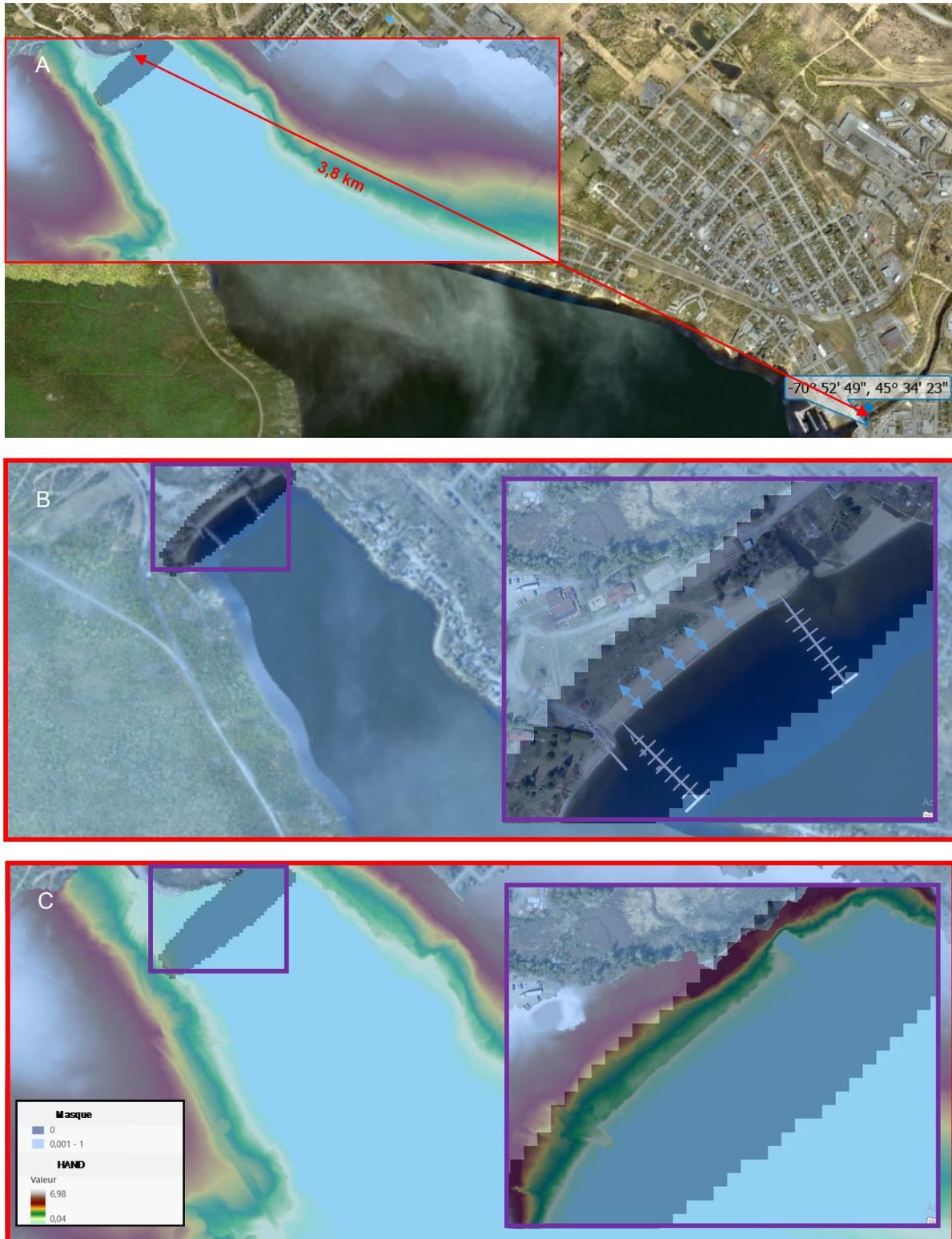


Figure 44. Illustration de l'emplacement spatial de la station virtuelle avec le masque de calcul pour la station Au-lac Mégantic à Lac-Mégantic (A). Les encadrés rouges sont des zooms de la de l'empreinte de l'image HAND utilisée, tandis que les encadrés violets sont des zooms du masque de calcul, montrant la surface de la plage et les zones après la plage (B), ainsi que les altitudes HAND de la plage et des zones après la plage (C).

De manière similaire, deux critères spécifiques s'ajoutent au critère global expliquant la très mauvaise modélisation pour la station à la plage municipale de la ville de Lac-Brome. Premièrement, il y a un espace réduit en largeur pour la zone de calcul (Figure 45.B), malgré la proximité de la station de mesure hydrométrique avec cette zone (Figure 45.A). De plus, cette zone de calcul n'est pas dégagée et est parsemée d'arbustes tout au long de sa superficie. Ces branches d'arbustes agissent comme des obstacles pour le signal radar, favorisant ainsi le phénomène du double rebond, ce qui augmente par conséquent l'amplitude du signal radar. Cela a un effet direct sur la classification par logique floue, puisque cette zone est considérée comme étant de la terre plutôt qu'une zone intermédiaire entre la classe *Eau* et la classe *Terre*, là où la modélisation du niveau d'eau a lieu.

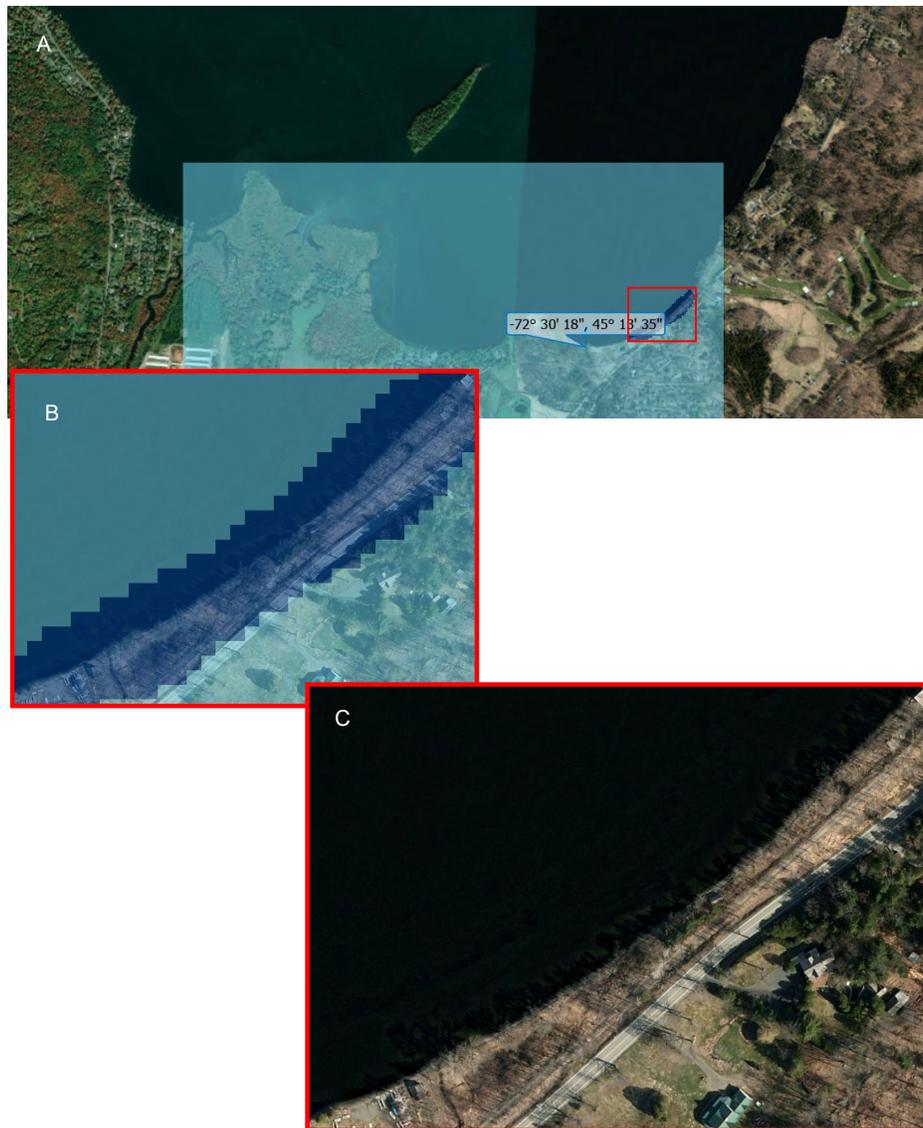


Figure 45. Illustration de l'emplacement spatial de la station virtuelle avec le masque de calcul pour la station à la plage municipale de la ville de Lac-Brome (A). La zone encadrée en rouge est un zoom sur le masque utilisé lors du processus de la modélisation montrant l'espace réduit en largeur (B) et la présence des arbustes (C).

4. CONCLUSION

Le projet IRENE visait à développer une approche satellitaire opérationnelle permettant de créer des stations virtuelles de niveau d'eau. Il s'agissait d'obtenir, sans intervention sur le terrain, le niveau d'eau en différents points de la plaine inondable pour une section de rivière non jaugée et ce, pour une résolution spatiale qui se rapproche de celle du modèle numérique de terrain LiDAR diffusé par le gouvernement du Québec (~1 m).

Afin d'atteindre l'objectif général, les objectifs spécifiques étaient :

- Pour une image radar satellitaire donnée, fournir les estimations du niveau d'eau/profondeurs de submersion sur une série de points jugés optimaux, avec la meilleure qualité possible et avec les incertitudes qui s'y rattachent ;
- Identifier la portée spatiale d'application (conditions optimales et secteurs prometteurs) et détailler les limitations techniques de la méthode ;
- Indiquer la démarche nécessaire pour appliquer la méthode sur de nouveaux bassins ;
- Développer un prototype d'outil automatisé pour appliquer la méthode développée.

Une méthodologie basée sur l'application de concepts connus et sur l'intégration innovante de divers travaux déjà menés à l'INRS avait été proposée. L'application de cette méthode n'a pas donné les résultats attendus. L'hypothèse de départ selon laquelle la rétrodiffusion mesurée sur l'image radar peut se traduire en pourcentage d'eau libre par pixel n'a pas été confirmée. L'application de la méthodologie initiale infirmerait même l'hypothèse car une étape de validation au moyen de données acquises par drone n'a montré aucune relation claire entre les pourcentages d'eau libre par pixel estimés par la méthode et les valeurs réelles obtenues par le vol de drone. Le filtre utilisé pour réduire le chatouement peut avoir un impact sur les résultats obtenus.

Devant les défis apparus dans l'application de la méthodologie proposée initialement, il a été convenu d'un commun accord avec les représentants de la DEH au comité avisé, que l'objectif de développer un prototype d'outil automatisé pouvait être laissé de côté au profit d'une recherche d'une nouvelle méthode et d'une recherche plus approfondie sur les incertitudes et limitations techniques de la méthode.

Une méthodologie alternative a été évaluée. Elle consiste à comparer l'étendue de l'eau déterminée à partir de l'image radar à un ensemble d'étendue d'eau théorique produit par binarisation des valeurs du modèle HAND. Les étendues d'eau théorique ayant la meilleure correspondance sont moyennées pour déterminer le niveau d'eau final. La méthode a été appliquée à 14 cours d'eau ou plan d'eau possédant une station hydrométrique de la DEH.

Les résultats obtenus sont mitigés. Deux des 14 sites ont présenté des résultats acceptables. Une des principales caractéristiques de ces sites est la très grande amplitude de niveaux d'eau mesurés par les stations hydrométriques. En effet, des niveaux de plus de 2 m supérieur au niveau de l'eau au moment de l'acquisition des données LiDAR y ont été observés. En choisissant des portions de rivière avec un rivage étendu, cette grande amplitude de niveau se traduit par de grandes variations horizontales du plan d'eau. Les variations de niveau d'eau doivent se traduire par une variation d'un minimum de trois à quatre pixels sur le rivage pour être acceptable.

Les données géospatiales peuvent également contribuer à l'amélioration des résultats. Idéalement, le site doit être représenté par un modèle numérique de terrain produit avec un niveau de l'eau le plus bas possible. Cet élément s'aligne avec la caractéristique principale en

permettant de maximiser la dynamique de niveaux d'eau observables sur les images radar. Dans le meilleur des cas, une bathymétrie complèterait le MNT ce qui permettrait d'avoir une topographie complète indépendante du niveau de l'eau. La production d'un modèle HAND nécessite l'utilisation d'un masque représentant le cours d'eau ou le plan d'eau. Les valeurs du modèle HAND sont mesurées par rapport à l'élévation des pixels présents dans ce masque. Idéalement, ce masque devrait représenter l'empreinte de la rivière à l'étiage afin, ici aussi, d'être en mesure de capter toute la dynamique de niveau d'eau de la rivière, si le MNT le permet également.

Nous pensons qu'une suite serait avantageuse au projet afin d'appliquer la méthode sur des sites présentant des caractéristiques idéales selon ce qui vient d'être énuméré sans égard à la présence ou non d'une station hydrométrique. Pour ces sites, un modèle numérique de terrain pourrait être créé par drone afin de contrôler le moment de l'acquisition et le synchroniser avec une période d'étiage. Au niveau du traitement des images radar, des tests ont été fait avec de nouveaux filtres pour réduire le chatoiement mais cela pourrait être poussé davantage. Par la suite, les méthodes de classification par apprentissage profond ou orienté-objet seraient possiblement plus robuste pour gérer la présence de bruit dans les images.

RÉFÉRENCES

- ANGEL JR, KUNKEL KE (2010) The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron. *J Great Lakes Res* 36:51–58. doi: 10.1016/j.jglr.2009.09.006
- CHOKMANI K., VIAU A. A., BOURGEOIS G., (2001) Analyse de l'incertitude de quatre modèles de phytoprotection relative à l'erreur des mesures des variables agrométéorologiques d'entrée. *Agronomie*, 21, 147-167.
- CHOKMANI K., GAUTHIER Y., POULIN J. (2022a) Projet IRENE : Imagerie Radar pour l'Estimation des Niveaux d'Eau – Livrable 1 : Mise en place de la base de données, Rapport de recherche (R2229). INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec.
- CHOKMANI K., POULIN J. (2022b) Projet IRENE : Imagerie Radar pour l'Estimation des Niveaux d'Eau – Rapport d'étape 1, Rapport de recherche (R2228). INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec.
- DASGUPTA A., GRIMALDI STEFANIA, RAMSANKARAN R., PAUWELS V.R.N., WALKER J.P., CHINI M., HOSTACHE R., MATGEN P. (2018) Chapter 4: Flood Mapping Using Synthetic Aperture Radar Sensors From Local to Global Scales. In: *Global Flood Hazard: Applications in Modeling, Mapping, and Forecasting*. Book Editor(s): Guy J-P. Schumann Paul D. Bates Heiko Apel Giuseppe T. Aronica. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series. 254 p.
- EL-ALEM, A., CHOKMANI, K., LAURION, I., EL-ADLOUNI, S.E., RAYMOND, S., RATTE-FORTIN, C. (2019) Ensemble-Based Systems to Monitor Algal Bloom with Remote Sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57 (10), art. no. 8736492, pp. 7955-7971.
- GIUSTARINI L, HOSTACHE R, MATGEN P, SCHUMANN GJP, BATES PD & MASON DC (2013) A change detection approach to flood mapping in Urban areas using TerraSAR-X. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 51(4):2417-2430.
- LANDUYT L , VAN WESEMAEL A, SCHUMANN G.J.P. , HOSTACHE R, VERHOEST N.E.C. , AND F.M.B. VAN COILLIE (2019) Flood Mapping Based on Synthetic Aperture Radar: An Assessment of Established Approaches. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 57, No. 2, February 2019.
- LEE, J.-S., SPECKLE SUPPRESSION AND ANALYSIS FOR SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGES. *OPTICAL ENGINEERING*, 1986. 25(5): P. 636-643
- MACINA F, BIGNAMI C, CHINI M & PIERDICCA N (2006) Exploiting Physical and Topographic Information within a Fuzzy Scheme to Map Flooded Area by SAR. *IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium 2006 (Denver, CO, ÉtatsUnis, 31 juillet-4 août 2006)*. p 1052-1055.
- MATGEN P, HOSTACHE R, SCHUMANN G, PFISTER L, HOFFMANN L & SAVENIJE HHG (2011) Towards an automated SAR-based flood monitoring system: Lessons learned from two case studies. *Physics and Chemistry of the Earth* 36(7-8):241-252.
- MORGAN M.G., HENRION M., (1990) *Uncertainty: A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*, Cambridge University Press.

- NOBRE, A.D., CUARTAS, L.A., HODNETT, M., RENNÓ, C.D., RODRIGUES, G., SILVEIRA, A., WATERLOO, M., SALESKA, S., Height above the Nearest Drainage, a hydrologically relevant new terrain model, *Journal of Hydrology* (2011), doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.051
- OUBENNACEUR, K., CHOKMANI, K., NASTEV, M., GAUTHIER, Y., POULIN, J., TANGUY, M., RAYMOND, S., LHISSOU, R. (2019) New sensitivity indices of a 2D flood inundation model using gauss quadrature sampling. *Geosciences (Switzerland)*, 9 (5), art. no. 220, DOI: 10.3390/geosciences9050220
- OUBENNACEUR, K., CHOKMANI, K., NASTEV, M., TANGUY, M., RAYMOND, S. (2018) Uncertainty analysis of a two-dimensional hydraulic model. *Water (Switzerland)*, 10 (3), art. no. 272 DOI: 10.3390/w10030272
- PULVIRENTI L, PIERDICCA N, CHINI M & GUERRIERO L (2013b) Monitoring Flood Evolution in Vegetated Areas Using COSMO-SkyMed Data: The Tuscany 2009 Case Study. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 52(2): 858-869.
- TANGUY, MARION (2016) Développement d'une méthode de caractérisation et d'évaluation du risque humain lié aux inondations en milieu urbain. Thèse. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Doctorat en sciences de l'eau, 429 p.
- TORVI H., HERTZBERG T., (1997) Estimation of uncertainty in dynamic simulation results. *Comput. Chem. Eng.* 21 (Suppl.) S181–S185.
- TSYGANSKAYA V, MARTINIS S, MARZAHN P, AND R LUDWIG (2018) SARbased detection of flooded vegetation: A review of characteristics and approaches, *Int. J. Remote Sens.*, vol. 39, no. 8, pp. 2255–2293.

ANNEXES

ANNEXE A – FICHES DESCRIPTIVES DES STATIONS HYDROMÉTRIQUES UTILISÉES POUR LA VALIDATION DE LA MÉTHODE ALTERNATIVE

Station sur la rivière Chaudière au barrage Sartigan (023446)

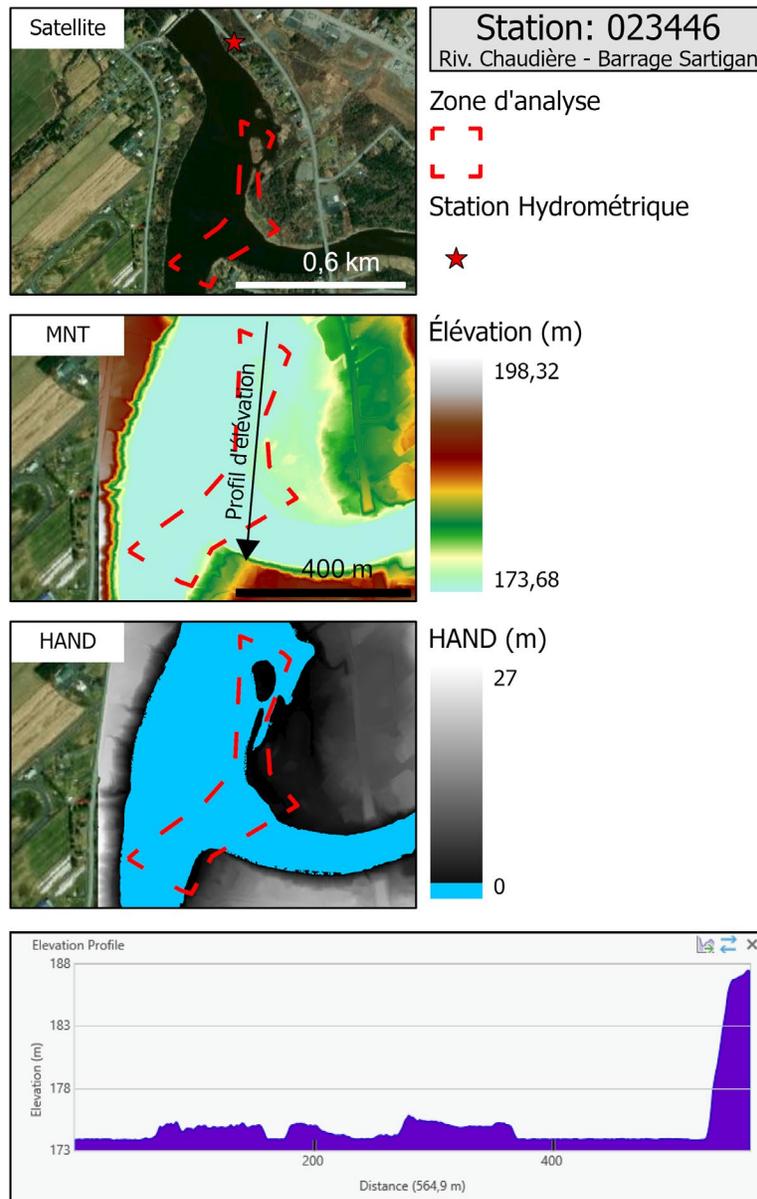


Figure 46. Fiche descriptive de la station sur la rivière Chaudière au barrage Sartigan.

Station Lac Aylmer - au quai de la municipalité de Stratford (030296)

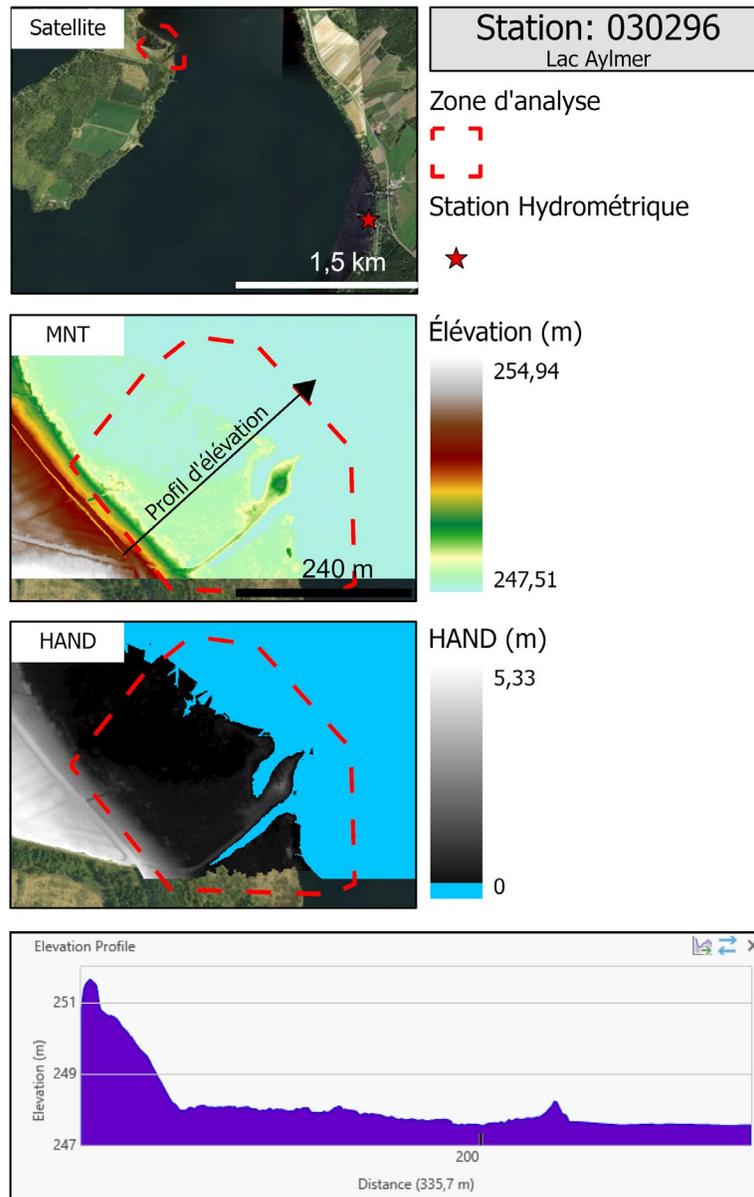


Figure 47. Fiche descriptive de la station au lac Aylmer - au quai de la municipalité de Stratford.

Station rivière Yamaska - à 0,6 km en amont du pont-route de la 235 à Farnham (030302)

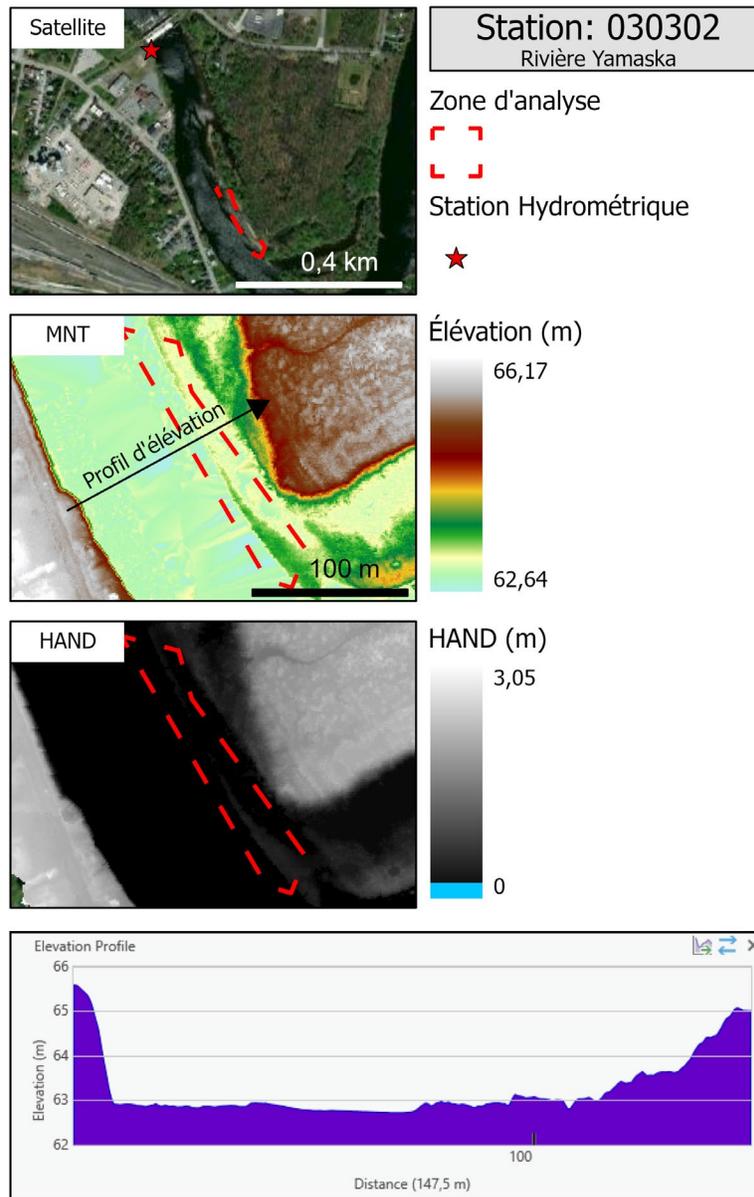


Figure 48. Fiche descriptive de la station sur la rivière Yamaska - à 0,6 km en amont du pont-route de la 235 à Farnham.

Station rivière Yamaska - au pont de la rue de Soulanges à Bromont (030354)

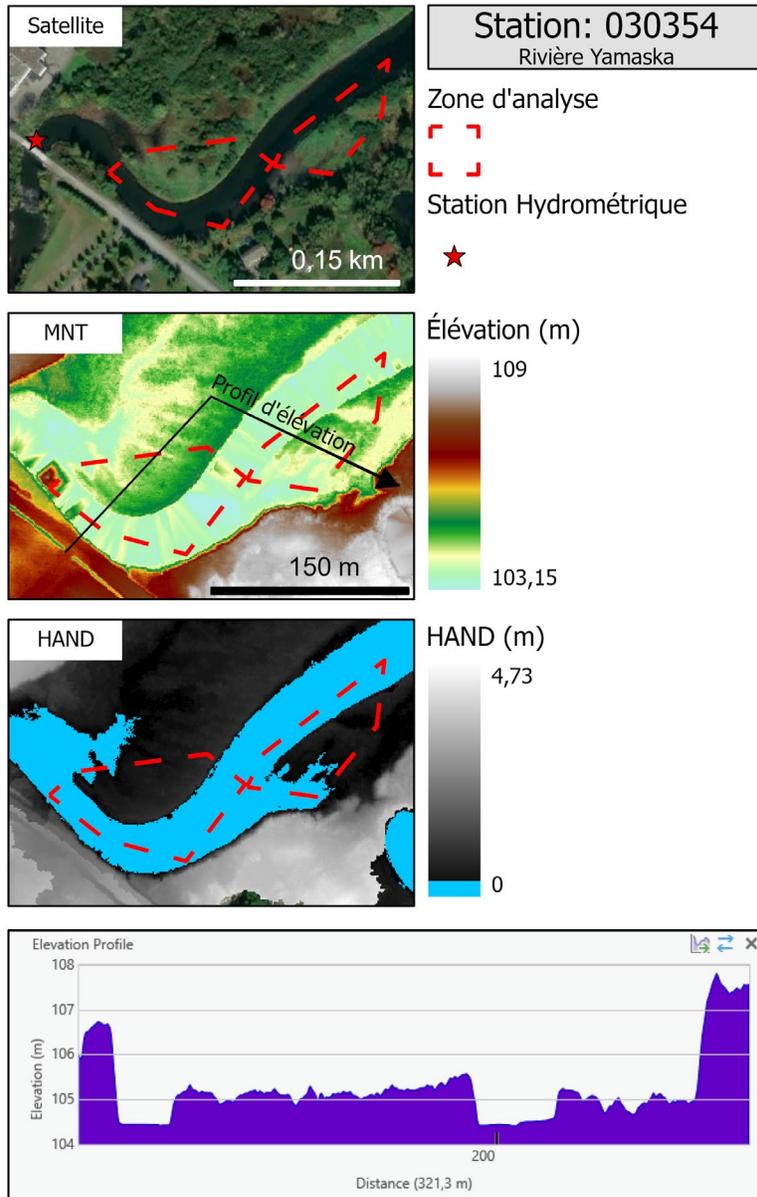


Figure 49. Fiche descriptive de la station sur la rivière Yamaska - au pont de la rue de Soulanges à Bromont.

Station au barrage Ludger - au lac Ludger à Sainte-Agathe-des-Monts (040103)

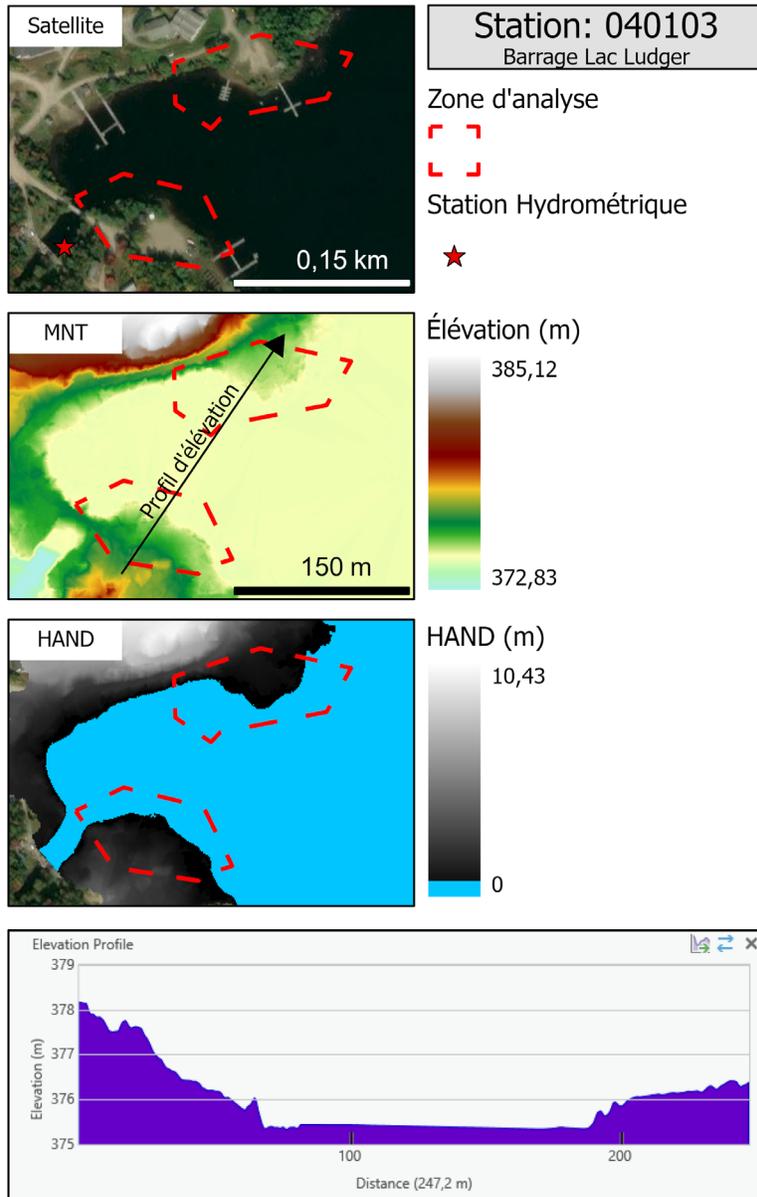


Figure 50. Fiche descriptive de la station au barrage Ludger - au lac Ludger à Sainte-Agathe-des-Monts.

Station au Barrage Cornu - au lac Cornu à Saint-Faustin-Lac-Carré (040105)

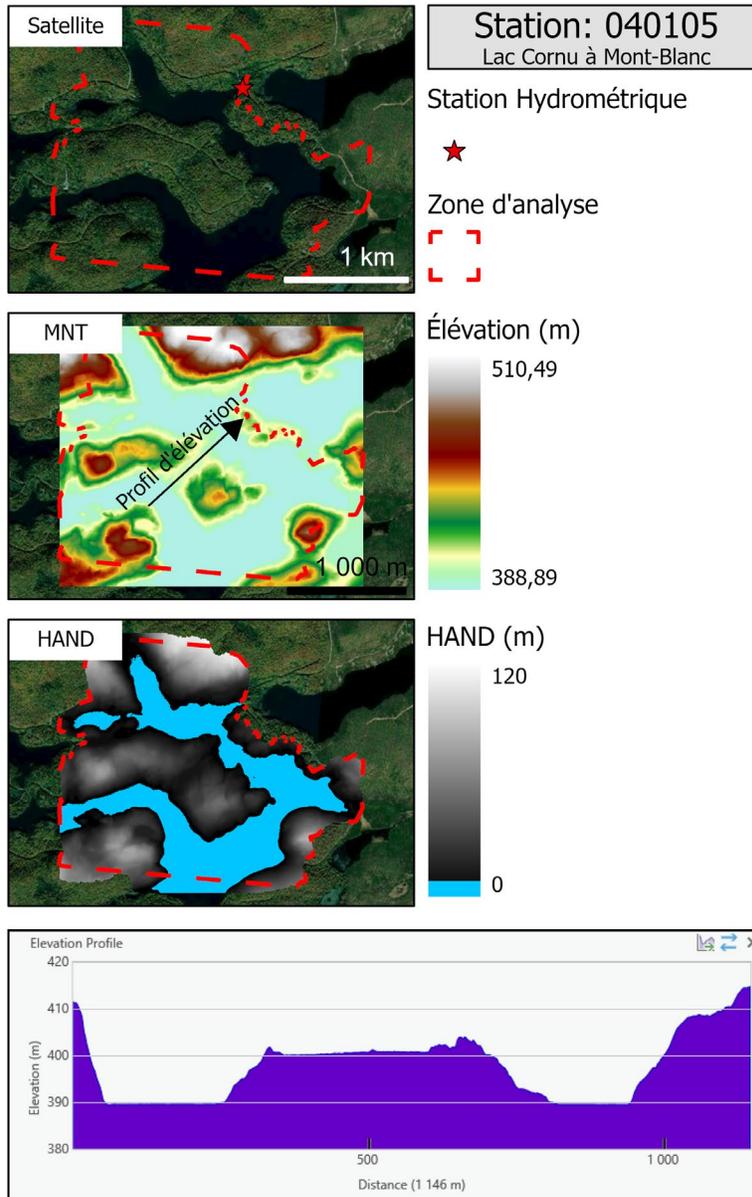


Figure 51. Fiche descriptive de la station au Barrage Cornu - au lac Cornu à Mont-Blanc (anciennement Saint-Faustin-Lac-Carré).

Station au barrage des Rapides-des-Cèdres - au lac du Poisson Blanc à Notre-Dame-du-Laus (040602)

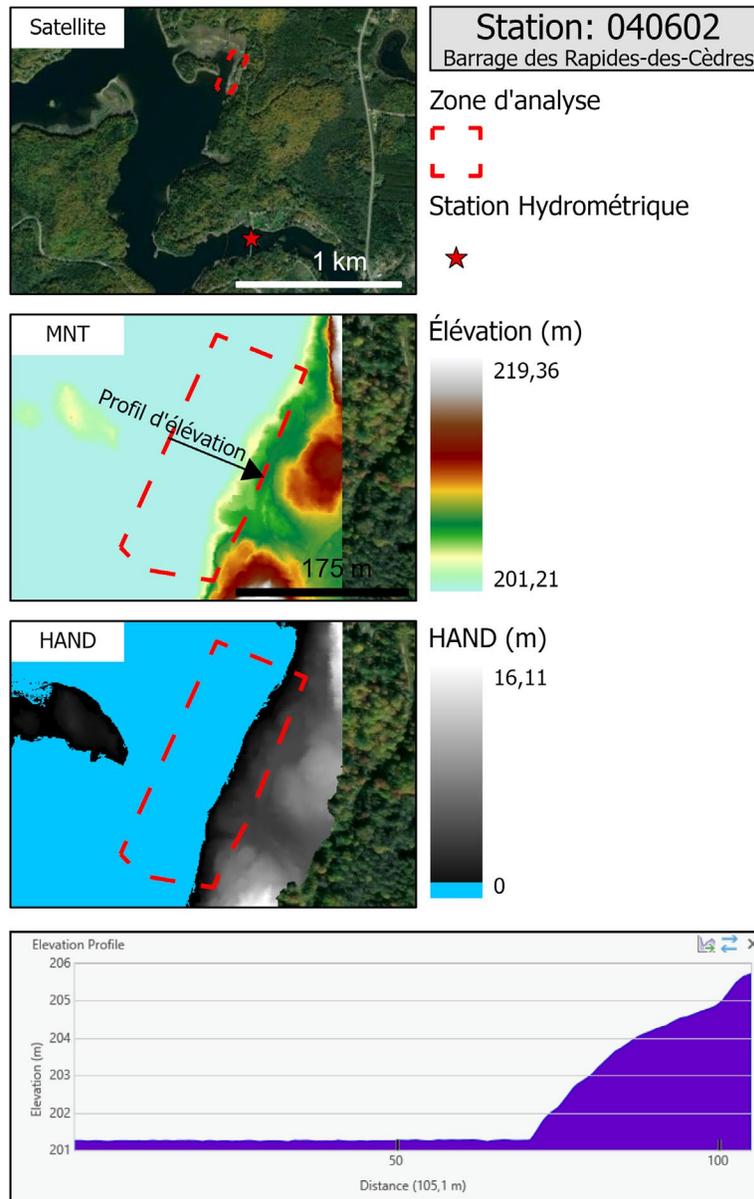


Figure 52. Fiche descriptive de la station au barrage des Rapides-des-Cèdres - au lac du Poisson Blanc à Notre-Dame-du-Laus.

Station au barrage Mitchinamecus - au réservoir Mitchinamecus à Lac-Oscar (040609)

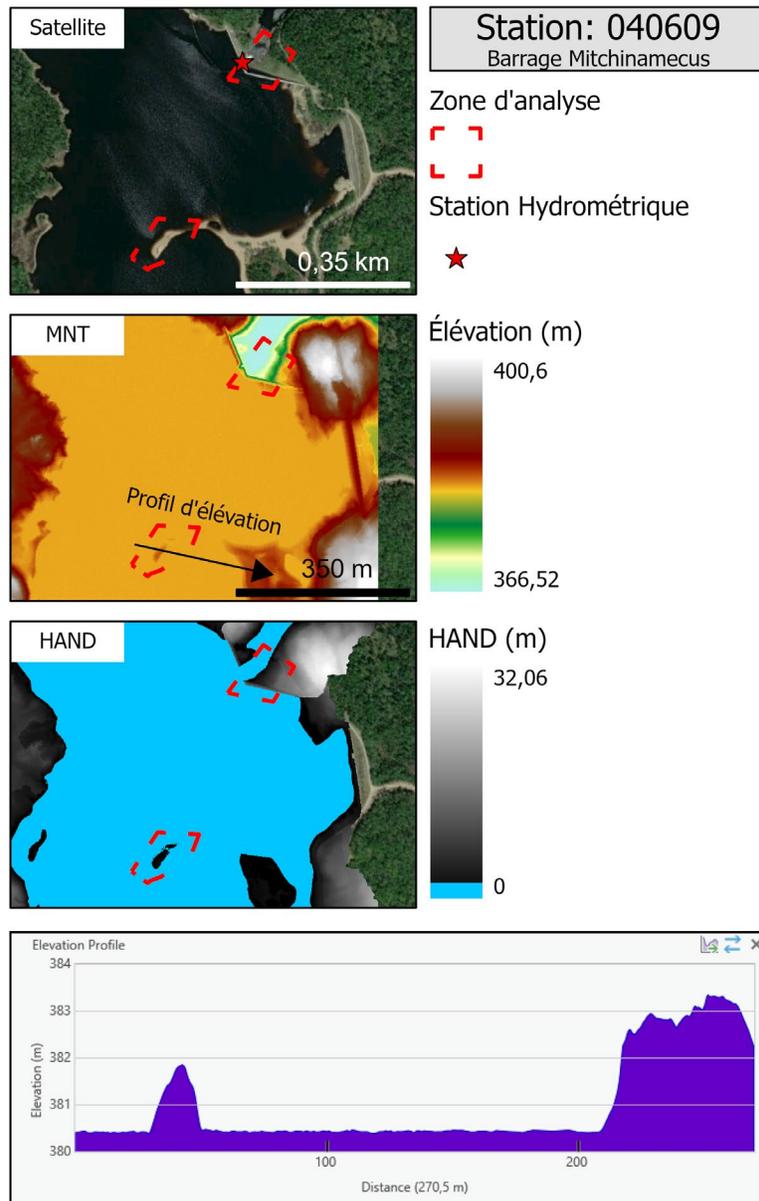


Figure 53. Fiche descriptive de la station au barrage Mitchinamecus - au réservoir Mitchinamecus à Lac-Oscar.

Station au barrage des Moulins - sur la rivière des Mille-Îles à Terrebonne (043208)

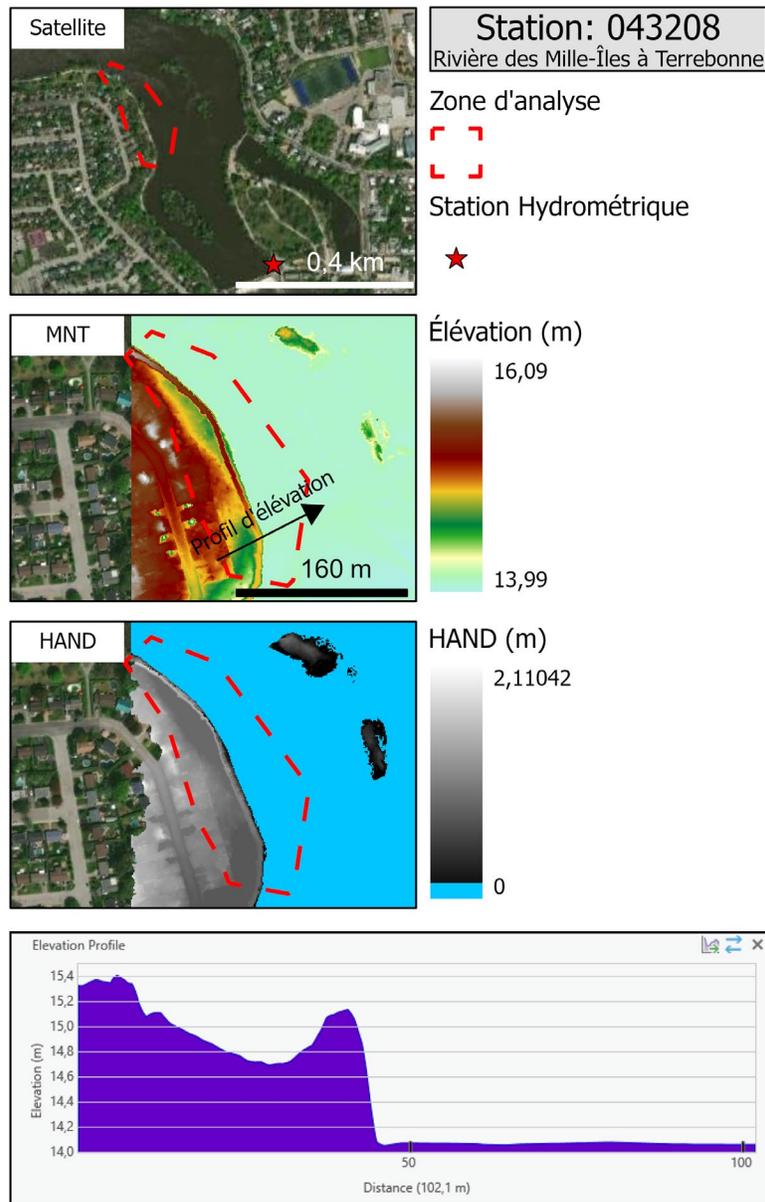


Figure 54. Fiche descriptive de la station au barrage des Moulins - sur la rivière des Mille-Îles à Terrebonne.

***ANNEXE B – RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DES NIVEAUX D’EAU DES STATIONS
HYDROMÉTRIQUES UTILISÉES POUR LA VALIDATION DE LA MÉTHODE ALTERNATIVE***

Station sur la rivière Chaudière au barrage Sartigan (023446)

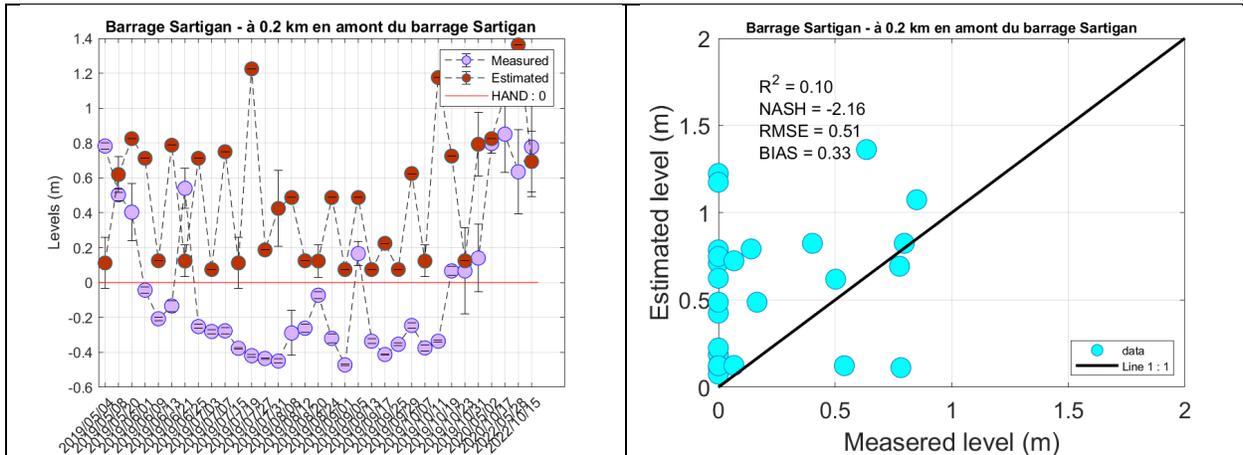


Figure 55. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station sur la rivière Chaudière au barrage Sartigan.

Station Lac Aylmer - au quai de la municipalité de Stratford (030296)

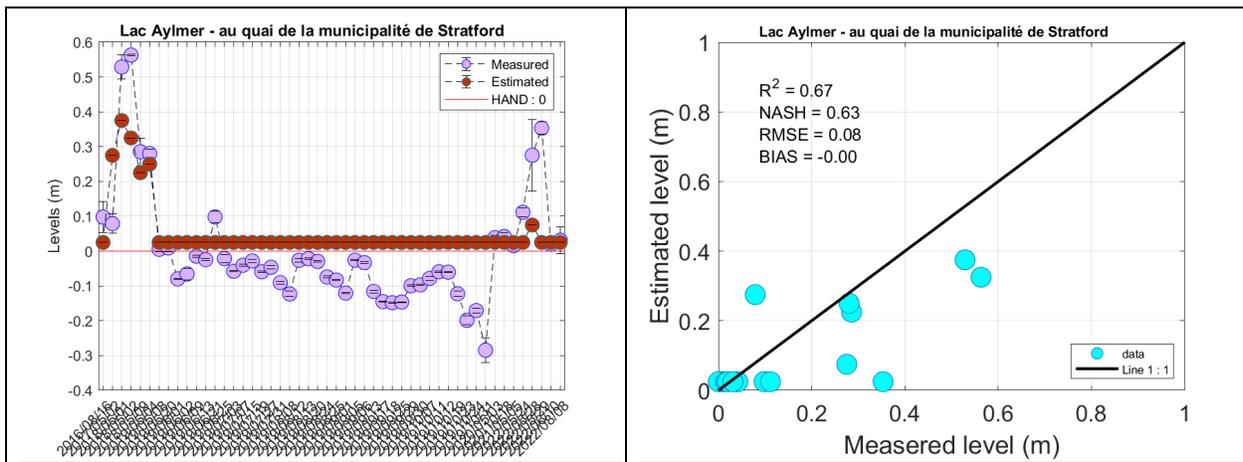


Figure 56. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station au lac Aylmer - au quai de la municipalité de Stratford.

Station rivière Yamaska - à 0,6 km en amont du pont-route de la 235 à Farnham (030302)

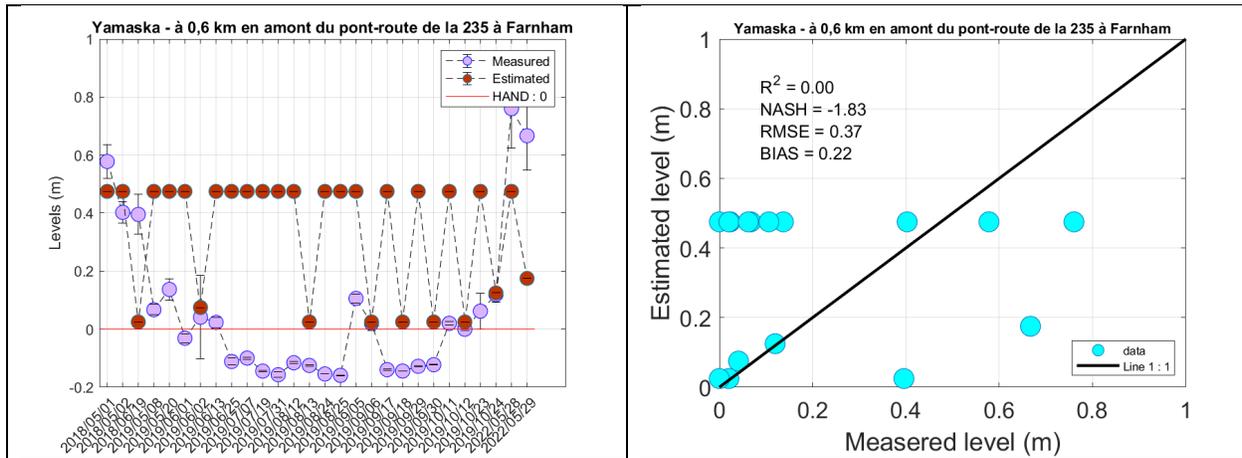


Figure 57. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station sur la rivière Yamaska - à 0,6 km en amont du pont-route de la 235 à Farnham.

Station rivière Yamaska - au pont de la rue de Soulanges à Bromont (030354)

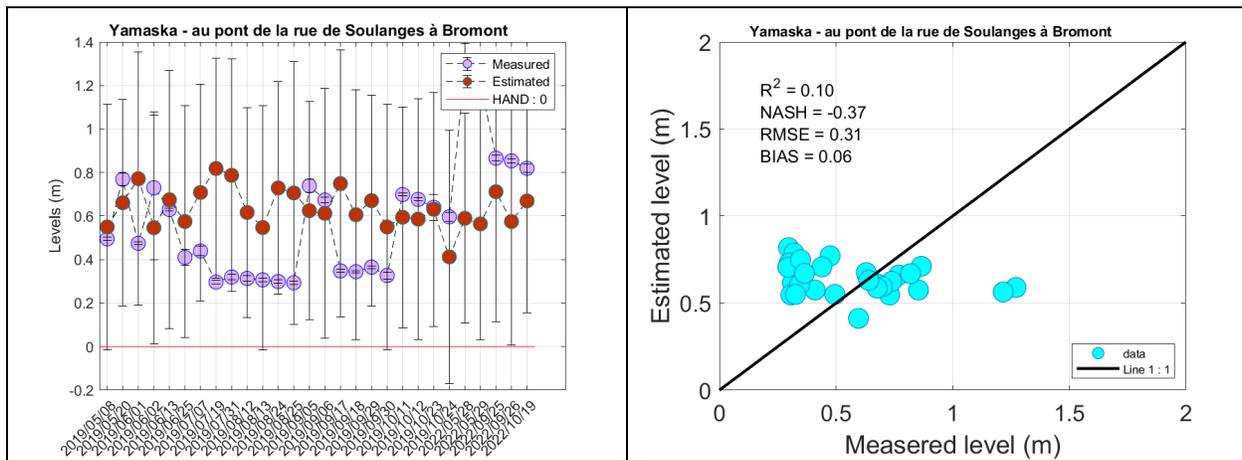


Figure 58 Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station sur la rivière Yamaska - au pont de la rue de Soulanges à Bromont.

Station au barrage Ludger - au lac Ludger à Sainte-Agathe-des-Monts (040103)

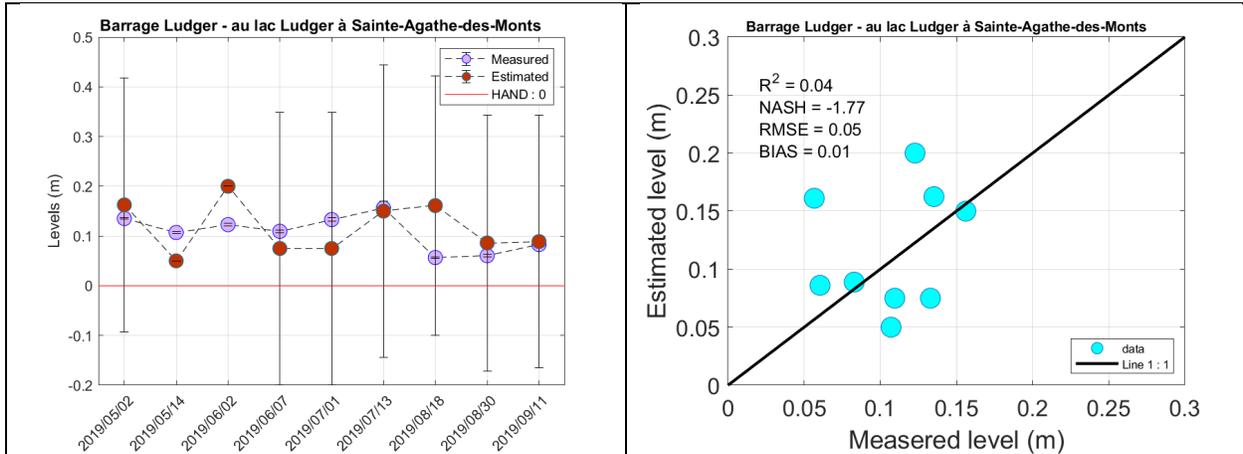


Figure 59. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station au barrage Ludger - au lac Ludger à Sainte-Agathe-des-Monts.

Station au Barrage Cornu - au lac Cornu à Saint-Faustin-Lac-Carré (040105)

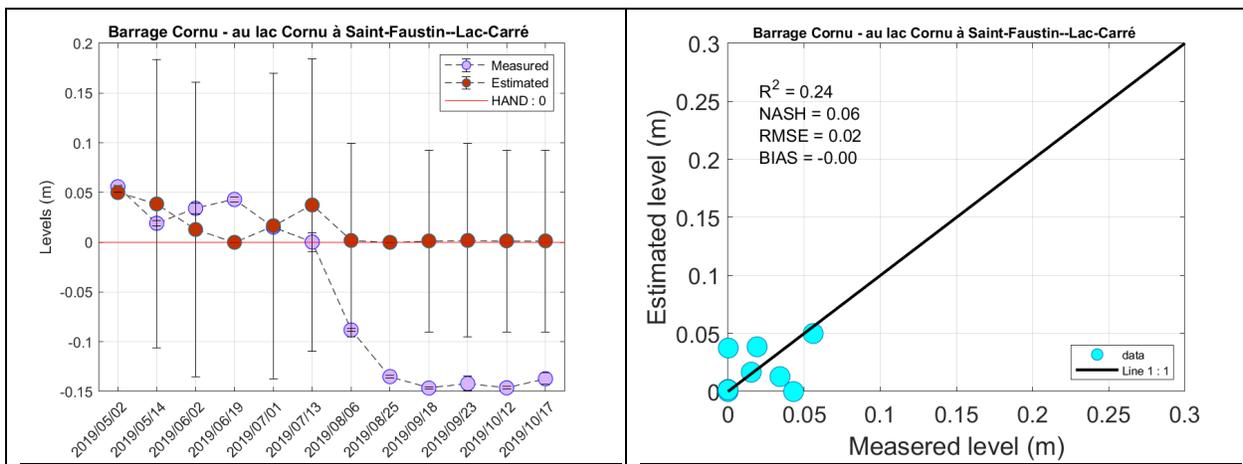


Figure 60. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station au Barrage Cornu - au lac Cornu à Mont-Blanc (anciennement Saint-Faustin-Lac-Carré).

Station au barrage des Rapides-des-Cèdres - au lac du Poisson Blanc à Notre-Dame-du-Laus (040602)

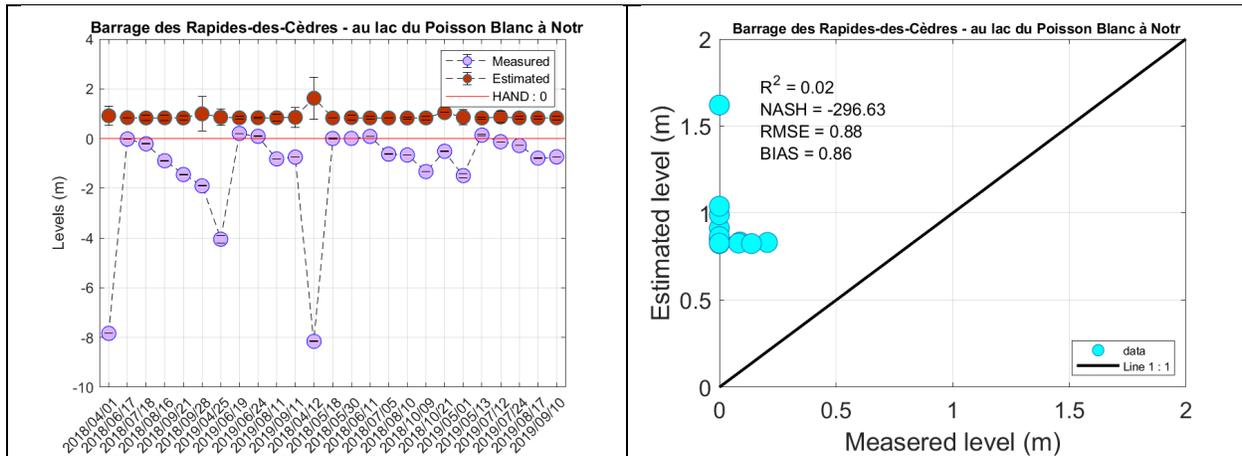


Figure 61. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station au barrage des Rapides-des-Cèdres - au lac du Poisson Blanc à Notre-Dame-du-Laus.

Station au barrage Mitchinamecus - au réservoir Mitchinamecus à Lac-Oscar (040609)

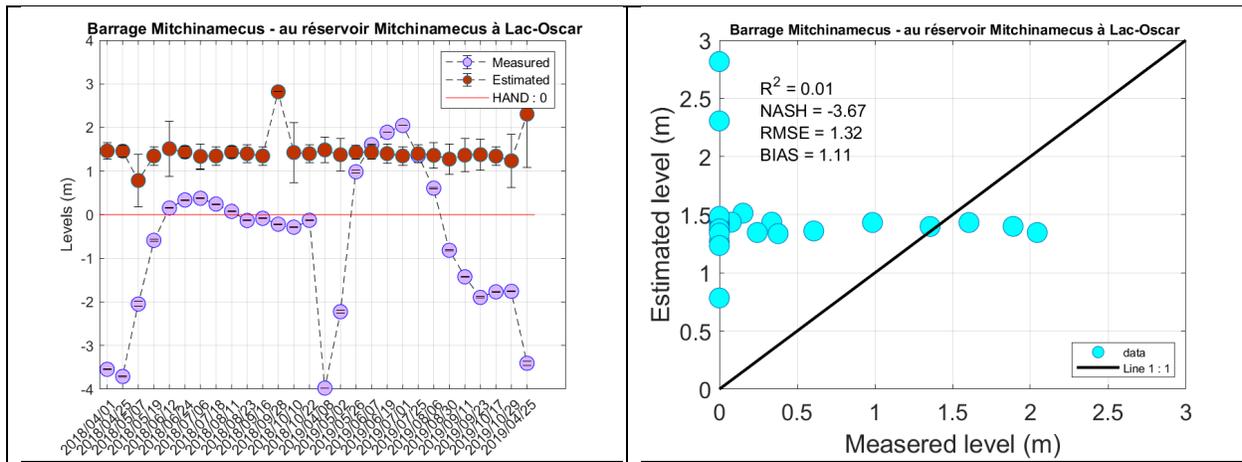


Figure 62. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station au barrage Mitchinamecus - au réservoir Mitchinamecus à Lac-Oscar.

Station au barrage des Moulins - sur la rivière des Mille-Îles à Terrebonne (043208)

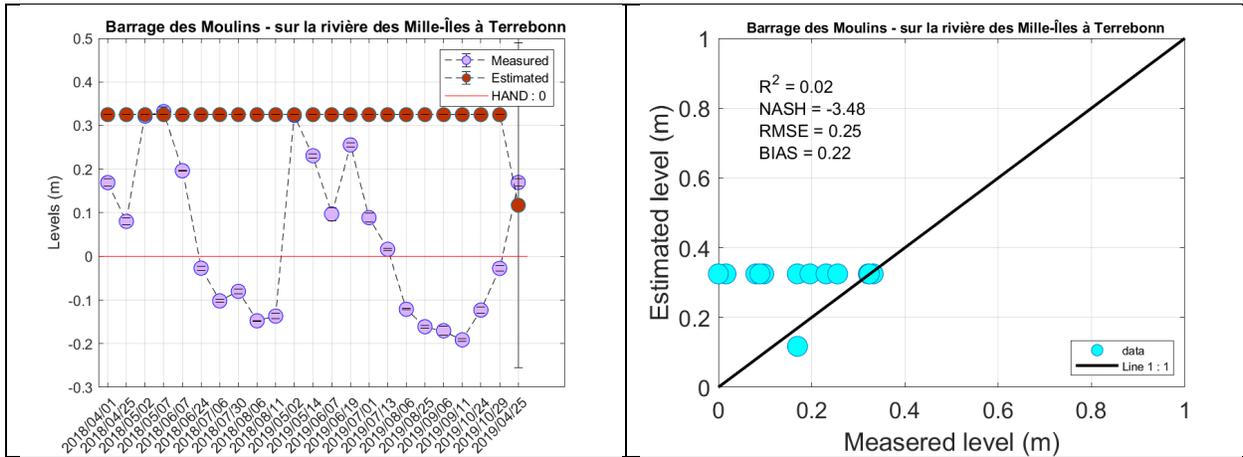


Figure 63. Comparaison temporelle et plot de la modélisation des niveaux d'eau de la station au barrage des Moulins - sur la rivière des Mille-Îles à Terrebonne.



Institut national
de la recherche
scientifique

490, RUE DE LA COURONNE, QUÉBEC, QC, CANADA, G1K 9A9 | TÉLÉPHONE 418 654.4677 | WWW.INRS.CA