

Direction des activités de protection de l'environnement – Québec
Section des évaluations environnementales
1550 ave d'Estimauville, Québec, QC, G1J 0C3



17 février 2021

Par courriel seulement

N/R : Q062

Madame Annie St-Gelais
Coordonnatrice du secrétariat de la commission,
Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE)
140, Grande-Allée Est, bureau 650, Québec (QC) G1R 5N6

Objet : Projet de stabilisation des berges de la plage Jacques-Cartier à Québec

Madame,

Vous trouverez ci-joint les réponses d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) aux questions adressées le 2 février dernier par la Commission d'examen en lien avec le projet cité en rubrique.

En espérant le tout à votre entière satisfaction. N'hésitez pas à communiquer avec nous si vous souhaitez obtenir des renseignements supplémentaires.

Veuillez agréer, Madame, mes salutations distinguées.

Louis Breton

Gestionnaire intérimaire, Section Évaluations environnementales
Direction des activités de protection de l'environnement
Environnement et Changement climatique Canada / Gouvernement du Canada

p.j. Réponses aux questions de la Commission d'examen (2 février 2021)

c.c. Jean Morin, chef de la section, Hydrologie et Écohydraulique (SMC-Québec)
Pascal Matte, chercheur scientifique, Recherche en prévision numérique environnementale
Marc Provencher, gestionnaire principal, Direction des activités de protection de l'environnement



Modélisation des courants de l'estuaire fluvial du Saint-Laurent

Question 1 : Quelles sont les différences entre les modèles HEC-RAS et MIKE21 utilisés par l'initiateur et celui développé dans le cadre des travaux de doctorat de Pascal Matte ? Ces modèles permettent-ils de modéliser les conditions hydrodynamiques estuariennes avec le même niveau de confiance ?

Réponse :

Les modèles HEC-RAS et MIKE21 sont des logiciels commerciaux utilisés dans le cadre de modélisation hydrodynamique de rivières et d'estuaires. Ils sont équivalents à H2D2, le logiciel utilisé dans les travaux de doctorat de Pascal Matte, en ce sens où ils simulent les écoulements en eaux peu profondes décrits par les équations de Saint-Venant. Autant ces logiciels commerciaux que H2D2 sont en mesure de modéliser les conditions hydrodynamiques fluvio-estuariennes, avec un niveau de confiance similaire, dans la mesure où ils sont utilisés en respectant les conditions suivantes :

Modèle mathématique

- *Ils résolvent les équations de Saint-Venant 2D complètes (incluant tous les termes des équations de conservation de la quantité de mouvement), non pas une version simplifiée des équations où certains termes sont absents (comme avec l'approximation d'onde diffusive).*
- *Ils résolvent ces équations en mode non-stationnaire (dynamique), contrairement au mode stationnaire qui ne tient pas compte des termes temporels.*
- *Ils ont des capacités couvrant-découvrant*
- *Ils sont utilisés pour des écoulements qui respectent leurs hypothèses sous-jacentes.*

Modèle numérique d'élévation

- *Les données bathymétriques et topographiques (notamment près des berges) sont dans un référentiel vertical cohérent se rapportant au niveau moyen des mers ou son équivalent (ex.: CGVD28, CGVD2013), non pas au zéro-des-cartes.*
- *Les données couvrent tout le domaine d'intérêt (plage, estrans, ...) et non pas uniquement le lit mineur.*
- *Le modèle a été validé et son niveau d'incertitude quantifié.*

Modèle numérique de terrain

- *Le frottement au fond est représentatif du type de sédiments composant le substrat, des plantes aquatiques s'il y a lieu, et peut varier spatialement. Il peut être ajusté localement ou globalement lors de la calibration afin de reproduire adéquatement les conditions mesurées de marées (amplitude et niveaux moyens) et de débits.*
- *Prise en compte du « frottement » dû au vent et à la glace en surface.*

Modèle hydraulique

- *Le maillage est suffisamment raffiné pour représenter les variations bathymétriques du terrain, non seulement près de la zone d'étude, mais en particulier dans les zones à*

forte pente et dans le chenal profond. Il doit également être suffisamment raffiné pour bien représenter les phénomènes hydrauliques d'intérêt. La qualité du maillage aura notamment une influence sur les débits transitant d'une limite à l'autre du domaine et influencera la répartition des vitesses.

- *Les limites du domaine sont positionnées à une distance suffisamment grande pour s'influencer minimalement l'une l'autre et pour permettre une calibration et une validation du modèle à partir de données à des stations intermédiaires. Dans un estuaire fluvial comme le Saint-Laurent, compte tenu de la largeur du fleuve (>1km) et de l'amplitude et des temps de propagation de la marée, le domaine de simulation doit s'étendre sur quelques dizaines de km au minimum.*
- *Les conditions aux limites sont posées de manière cohérente. Notamment, les marées imposées à une limite doivent être représentatives des conditions observées à cet emplacement et ne peuvent être obtenues à partir de données mesurées plusieurs km en amont ou en aval. (Par exemple, une condition limite située à Québec ne peut être définie à partir de données de marées mesurées à Neuville.) Par ailleurs, les phases de marées (niveaux ou débits) à deux conditions limites amont et aval doivent être représentatives des temps de propagation de l'onde d'une limite à l'autre. Ces derniers seront influencés par la bathymétrie (et implicitement le maillage) et la friction, laquelle contribuera également à l'atténuation du signal de marée. Un ajustement adéquat du maillage et une calibration précise de la friction sont donc nécessaires pour représenter le phénomène de propagation et d'atténuation de la marée avec précision.*
- *La solution est convergée à chaque pas de temps. Les solveurs et schémas numériques peuvent différer d'un logiciel à un autre, mais ne devraient pas mener à des résultats drastiquement différents.*
- *La validité et le niveau de confiance dans les résultats du modèle doivent plutôt être établis via une calibration et une validation rigoureuse à partir de données mesurées à des stations de niveaux d'eau intermédiaires. Des données de niveaux d'eau, de vitesses ou de débits de marée peuvent être utilisées pour valider la distribution spatiale des vitesses, la synchronicité des inversions de courant, les vitesses et débits de pointes (jusant et flot) et l'amplitude des variations de la marée et du débit.*

En résumé, tout modèle doit être validé. Il doit faire la démonstration qu'il est capable de reproduire des conditions actuelles connues avant de pouvoir l'utiliser pour des scénarios d'aménagement.

Question 2 : Est-ce que MIKE-21 pourrait permettre de représenter l'inversion des courants entre le flot et le jusant ? Justifiez votre réponse.

Réponse :

Oui, s'ils respectent les conditions mentionnées ci-haut (Question 1) et que les conditions limites sont définies de manière à permettre l'inversion des courants. Par exemple, l'imposition d'un débit moyen journalier à une limite influencée par une marée de plusieurs mètres n'est pas adéquate, puisqu'il ne s'agit pas d'un état observable du système modélisé. Lors des inversions de courant, les pentes du niveau d'eau s'inversent, ce qui est incohérent avec l'imposition d'un débit dirigé vers l'aval (qui suppose des pentes toujours dans la même direction).

Question 3 : L'initiateur mentionne que les données de débits horaires et leur direction sont manquantes, ce qui l'empêche de représenter adéquatement les vitesses et les directions des courants dans le secteur de la plage Jacques-Cartier (DQ9.2, p.7 et 8).

Réponse :

Commentaire sur cette prémisse :

Les données de vitesse et de directions des courants ne sont jamais (sauf de rares exceptions) disponibles dans le cadre de projet d'aménagement. Ceci est souvent la raison même d'utiliser la modélisation hydrodynamique. La pratique courante dans le secteur à marée (estuaire) est d'utiliser un modèle numérique d'élévation, une carte des substrats et des mesures de niveau d'eau à l'amont et à l'aval du domaine de simulation. Dans le cas présent ces mesures de niveaux sont disponibles aux stations de Neuville et de Vieux-Québec, depuis plus de 30 ans aux 3 minutes.

a) Quelle est la méthode ou la façon d'obtenir ces données ?

Réponse :

Une campagne de mesure détaillée a été réalisée dans l'estuaire fluvial du Saint-Laurent en 2009, où des données de niveaux d'eau, de vitesses et de débit ont été mesurées le long de 13 sections du Saint-Laurent pendant un cycle de marée chacune. Notamment, les vitesses le long de deux sections près de la zone d'étude ont été mesurées, soit en face de Saint-Nicolas et à Québec. De plus, plusieurs capteurs ont été ajoutés afin de densifier le réseau de stations marégraphiques durant l'été 2009 (de mai à octobre), notamment près de la zone d'étude. Ces données ont été publiées dans le cadre de la thèse de Pascal Matte (Matte, 2014; Matte et al., 2014). Elles ont été utilisées pour calibrer et valider le modèle hydrodynamique 2D du Saint-Laurent (Matte et al., 2017a, 2017b) ainsi que le modèle 1D de Pêches et Océans Canada (Lefaivre et al., 2016). Ces données demeurent disponibles sur demande et constituent un jeu de données unique pour calibrer et valider un modèle hydrodynamique de la région.

Par ailleurs, bien que des modèles soient disponibles dans le secteur d'étude, il n'est pas recommandé de tourner un modèle (ex.: MIKE21) avec des conditions limites tirées d'un autre modèle (ex.: H2D2), sans aucun contrôle ou validation de la cohérence entre les deux modèles, notamment en termes de données de base (bathymétrie, frottement) et de leur capacité respective à représenter la dynamique observée (à partir de mesures de terrain). En d'autres mots, l'utilisation de séries de débits simulés provenant d'un autre modèle ne permet pas de s'affranchir du processus de calibration et validation du modèle utilisé. Il s'agit d'une pratique qui va à l'encontre des règles de l'art, si aucun contrôle n'est effectué sur les niveaux d'eau, vitesses et débits simulés, à partir de mesures de terrain.

b) Existe-t-il une méthode de modélisation qui permettrait de pallier ces données manquantes et d'obtenir tout de même un modèle représentatif de l'hydrodynamisme dans l'estuaire fluvial ?

Réponse :

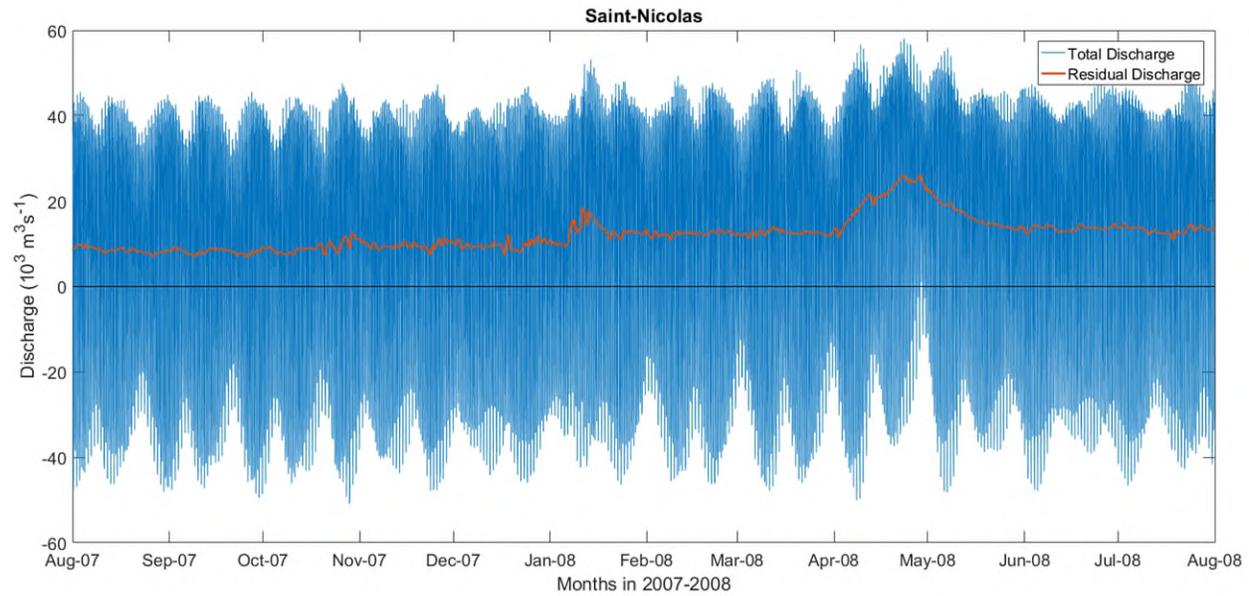
Puisque les séries observées de débits dans l'estuaire fluvial du Saint-Laurent sont relativement courtes (<24h), il n'est pas envisageable d'utiliser ces données aux conditions limites du modèle, compte tenu du temps d'initialisation d'un modèle en mode non-stationnaire. Toutefois,

les données les plus abondantes sont les mesures de niveaux d'eau aux marégraphes et aux stations temporaires de 2009. Ces séries de données représentent une alternative pour l'imposition des conditions aux limites d'un modèle, en optant pour des conditions de type niveau-niveau, soit des niveaux d'eau imposés à la fois aux limites amont et aval. La calibration et la validation se font alors à partir des données de niveaux et de vitesses disponibles à l'intérieur du domaine. Pour prévenir des effets de réflexion d'onde aux frontières amont et aval, il est nécessaire de positionner les limites suffisamment éloignées l'une de l'autre (ex.: une condition limite amont à Neuville et une condition limite aval dans le Vieux-Québec). De plus, il peut être judicieux d'inclure une condition limite de débit dans l'un ou plusieurs tributaires du fleuve, comme la rivière Chaudière et la rivière Cap-Rouge, situées près de la zone d'étude. Il est à noter qu'en définissant des conditions limites de type niveau-niveau, les débits fluviaux et tidaux sont pris en compte implicitement via les niveaux d'eau et les pentes naturelles qui en découlent; ainsi, un modèle dont la bathymétrie est adéquatement représentée et où le frottement a bien été calibré reproduira correctement les débits à la fois fluviaux et tidaux (voir par exemple Matte et al., 2017a, 2017b).

Question 4 : Quelle est la contribution relative des débits fluviaux, des marées et des vagues aux vitesses de courant observées près de la rive du parc de la Plage-Jacques-Cartier à marée haute lorsque la plage est submergée ? Quelle est la variabilité de cette contribution (horaire, journalière, annuelle) ?

Réponse :

Pour répondre à cette question de manière précise et quantitative, il faudrait simuler les écoulements sur une longue période comprenant une large gamme de débits fluviaux, de conditions de marée et de vents. Par contre, il est possible d'avancer que sur le domaine modélisé, et plus particulièrement à la hauteur de Saint-Nicolas, les vitesses de courant sont nettement dominées par l'action des marées. De fait, les débits de marées (et donc les courants de marées) sont typiquement de 4 à 5 fois supérieurs aux débits fluviaux autant durant le jusant que le flot (voir figure ci-dessous présentant une reconstruction annuelle des débits à Saint-Nicolas, tirée de Matte et al. (2018, 2019)). Près de la rive du parc de la Plage-Jacques-Cartier, l'effet des vagues (liées aux vents ou au batillage) vient s'ajouter à celui des marées. À marée haute, lorsque la plage est submergée, les vagues se propagent plus loin vers la rive, tandis que les courants de marée (flot) sont près de leur maximum et dirigés vers l'amont. À partir des mesures et modélisations réalisées devant Saint-Nicolas en 2009, il est possible d'estimer les vitesses à marée haute à environ 0,5 m/s vers l'amont près de la berge (Matte, 2014). Cette estimation exclut l'effet des vagues. En marée descendante (jusant), les vitesses atteindront les 0.5 m/s vers l'aval près de la rive, en conditions de marées de vive-eau et de débit d'étiage. Sur un cycle annuel, une augmentation des débits fluviaux (crue) aura pour effet de rehausser les niveaux d'eau moyens et d'accélérer les vitesses du jusant. Les vitesses au flot ne seront significativement réduites qu'en période combinée de crue et de marées de morte-eau.



Question 5 : Quels sont les paramètres ou les résultats à considérer dans un modèle hydrodynamique pour évaluer le transport sédimentaire près de la berge ? Quelle confiance avez-vous envers la qualité de l'analyse sédimentaire produite par l'initiateur avec et sans la construction d'épis (Section 7.4, PR5.2 (1 de 3), p. 158 PDF et PR5.2 (2 de 3))?

Réponse :

La modélisation du transport sédimentaire repose directement sur la modélisation hydrodynamique, plus spécifiquement sur une représentation précise et validée des vitesses de courant dans le secteur d'intérêt. Les vitesses au lit seront responsables, au-delà d'une vitesse critique, de déloger et d'entraîner les sédiments. Toute vitesse supérieure à la vitesse critique va provoquer mouvement. En deçà de cette vitesse critique, il y aura potentiel de déposition. Les vitesses de courant maximales du jusant et du flot sont donc les plus susceptibles d'entraîner les sédiments, et cet entraînement est proportionnel au carré de la vitesse. Par-dessus l'effet des courants de marée s'ajoute celui des vagues, qui peuvent augmenter les vitesses maximales près du fond et donc mettre en suspension les sédiments et favoriser leur transport.

Sur la base des documents produits par l'initiateur, nous n'avons que peu confiance dans la qualité de l'analyse sédimentaire fournie, puisque les simulations hydrodynamiques qui sous-tendent ces analyses ne sont pas validées et sont problématiques à plusieurs égards. Par exemple, en s'appuyant sur des simulations stationnaires du modèle HEC-RAS, un scénario statique a été défini pour simuler les vagues avec MIKE21 (document PR5.2 (1 de 3)). Ce scénario statique consiste en un débit fluvial moyen (12600 m³/s), un niveau d'eau moyen de marée haute (3,32 m) et un vent soutenu du sud-ouest. Ce scénario fictif n'existe pas dans la réalité en conditions de marée haute et produit des vitesses de courant orientées vers l'aval plutôt que vers l'amont et significativement plus faibles qu'en présence d'une marée réelle (dynamique). En effet, le débit de flot atteindra des valeurs à marée haute de 3 à 4 fois

supérieures au débit moyen du fleuve, dans la direction opposée de ce dernier. Les scénarios subséquents sont tout aussi erronés (avec ou sans épis), ce qui invalide complètement l'analyse des vagues et l'analyse sédimentaire présentées en s'appuyant sur ces résultats hydrodynamiques.

Par ailleurs, des simulations additionnelles ont été réalisées par l'initiateur sur une année complète et dite « représentative des phénomènes moyens » (document PR5.2 (2 de 3)). Nous sommes d'avis que cette dernière affirmation est fautive, puisque deux erreurs importantes ont été commises. La première a été d'utiliser les niveaux horaires mesurés à Neuville (station 3280) comme conditions limites à Québec, soit environ 25 km en aval, induisant ainsi des erreurs de phases et d'amplitudes du signal de marée en entrée du modèle. La seconde a été d'imposer un débit journalier aux conditions limites amont du modèle, forçant ainsi un écoulement unidirectionnel erroné. Encore une fois, ces choix invalident les analyses pour l'entièreté des scénarios évalués. Notamment, les vitesses simulées près de la rive de la Plage-Jacques-Cartier ne sont simplement pas représentatives de la réalité.

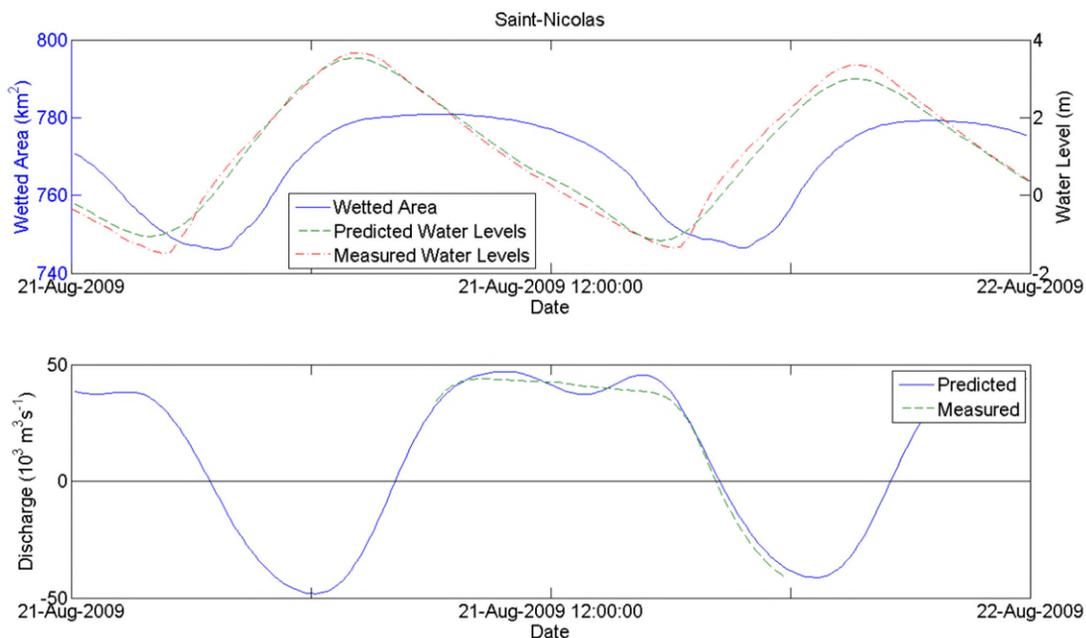
Question 6 : Quelle confiance peut-on avoir dans l'utilisation de débits hypothétiques présentés au document DA4.1 (p. 3) pour représenter correctement le renversement du courant de marée?

Réponse :

Comme mentionné précédemment, l'utilisation de débits moyens journaliers mène à des résultats erronés aberrants autant lors du flot que du jusant, notamment avec des vitesses toujours orientées vers l'aval et largement sous-estimées. La combinaison d'une condition moyenne journalière (amont) et de variations horaires des marées n'a aucun sens physique sur un si court tronçon de l'estuaire fluvial. Pour imposer ce type de conditions limites, il faudrait remonter la limite jusqu'en amont du lac Saint-Pierre, là où la marée disparaît. Contrairement à ce qu'affirme Stantec (document DA4.1, p. 3), il est possible de représenter le phénomène d'inversion de courant sur des domaines plus petits que celui utilisé par ECCC. En effet, avec des conditions limites définies correctement (ex.: niveau amont – niveau aval), il serait pensable de développer un modèle couvrant seulement quelques dizaines de km, sans grand coût sur le plan computationnel. Plutôt que de suivre cette avenue, Stantec utilise dans un test subséquent une série de débits hypothétiques variant de manière sinusoïdale, en tentant de reproduire la gamme de débits positifs (jusant) et négatifs (flot) caractéristiques de ce secteur du fleuve. Cette représentation du débit est incorrecte. D'une part, les débits de marée ne suivent pas une forme sinusoïdale simple, comme la marée, mais se présentent comme une onde formée d'un plateau lors du jusant (voir figure ci-dessous pour Saint-Nicolas, tirée de Matte (2014)). D'autre part, un signal de débit incohérent ou déphasé par rapport à la marée imposée en aval aura pour effet de propager deux signaux incohérents qui s'interféreront l'un l'autre. Résultat : les vitesses simulées à l'aval du domaine sont complètement erronées. En effet, à la hauteur des ponts de Québec, des vitesses plus élevées en berge que dans le chenal sont obtenues, ce qui est contraire à toute intuition, aux mesures et aux modélisations existant dans ce secteur du fleuve. Ainsi, il est difficile d'avoir confiance dans les analyses présentées par l'initiateur, ni dans le secteur de la Plage-Jacques-Cartier, ni ailleurs. D'autant plus que ces résultats n'ont pas été validés. Contrairement à ce qu'affirme Stantec, nous sommes d'avis que la solution

proposée n'est ni stable ni physiquement raisonnable et présente des valeurs de vitesses qui ne sont pas représentatives du milieu.

À noter également que l'utilisation de valeurs de débit issues d'un autre modèle hydrodynamique, tel que envisagé par Stantec, ne représente pas une option viable dans le contexte d'une modélisation réalisée sans validation aucune, sans moyen pour assurer la cohérence des conditions limites et des données de base entre les modèles, et sans contrôle du réalisme du maillage utilisé. Bien que le phénomène de marée soit complexe, il est possible de le simuler avec précision en suivant des règles de base.



Question 7 : Lors de projets de stabilisation des berges, à quoi devraient servir les modèles hydrodynamiques ?

Réponse :

Lors de projets de stabilisation des berges, les modèles hydrodynamiques servent à produire les données de base de niveaux d'eau et de vitesses de courant avant et après modification du site à l'étude. Les données produites pour différents scénarios de modification et différentes conditions hydrodynamiques (marées, débits, vents) sont ensuite fournies en entrée à des modèles de vagues et de transport sédimentaire. Une modélisation déficiente des conditions hydrodynamiques entraîne des erreurs dans les modèles subséquents, susceptibles de s'amplifier en fonction du phénomène modélisé. Cette modélisation doit s'accompagner d'une validation satisfaisante en conditions actuelles (avant modification) à partir de données de terrain. Cette validation permet d'évaluer la qualité du modèle, sa précision et sa capacité à reproduire l'effet de modifications sur le milieu.

Question 8 : Quelles sont les préoccupations particulières de votre ministère en rapport avec le projet de stabilisation des berges de la plage Jacques-Cartier ?**Réponse :**

Dans l'état actuel du modèle hydrodynamique, il est difficile de faire confiance aux résultats présentés par l'initiateur. De nombreux problèmes subsistent dans la définition des conditions limites. La longueur du domaine de simulation est trop courte et devrait être étendue, à moindre coût, au minimum jusqu'aux stations marégraphiques les plus proches en amont et en aval. Des problèmes sont également suspectés au niveau du maillage à la hauteur des ponts de Québec (avec seulement ~3 points de grille sur la largeur du chenal profond), résultant en une géométrie du chenal mal représentée (d'apparence triangulaire). Un coefficient de frottement de Manning constant de 0,035 a été utilisé, ce qui semble élevé pour le secteur. De plus, l'utilisation d'un frottement constant plutôt que variable spatialement semble simpliste, puisque les cartes marines affichent généralement le type de substrat (variable) rencontré dans le fleuve. Enfin, une calibration et une validation rigoureuse devraient absolument être réalisées afin de démontrer la capacité des modèles à reproduire correctement la réalité (i.e. les mesures). Une modélisation hydrodynamique non validée rendrait hasardeuse l'utilisation qui serait faite de ses résultats, notamment par le choix d'aménagements potentiellement néfastes pour l'environnement et pour le milieu de vie environnant.

Références :

- Lefavre, D., D'Astous, A., & Matte, P. (2016). Hindcast of water level and flow in the St. Lawrence River over the 2005–2012 period. *Atmosphere-Ocean*, 54(3), 264–277. <https://doi.org/10.1080/07055900.2016.1168281>
- Matte, P. (2014). Modélisation hydrodynamique de l'estuaire fluvial du Saint-Laurent. INRS - Centre Eau Terre Environnement, Québec. Retrieved from <http://espace.inrs.ca/2616/>
- Matte, P., Secretan, Y., & Morin, J. (2014). Quantifying lateral and intratidal variability in water level and velocity in a tide-dominated river using combined RTK GPS and ADCP measurements. *Limnology and Oceanography: Methods*, 12(5), 281–302.
- Matte, P., Secretan, Y., & Morin, J. (2017a). Hydrodynamic Modeling of the St. Lawrence Fluvial Estuary. I: Model Setup, Calibration, and Validation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 143(5), 4017010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000397](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000397)
- Matte, P., Secretan, Y., & Morin, J. (2017b). Hydrodynamic Modeling of the St. Lawrence Fluvial Estuary. II: Reproduction of Spatial and Temporal Patterns. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 143(5), 4017011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000394](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000394)
- Matte, P., Secretan, Y., & Morin, J. (2018). Reconstruction of Tidal Discharges in the St. Lawrence Fluvial Estuary: The Method of Cubature Revisited. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(8), 5500–5524. <https://doi.org/10.1029/2018JC013834>
- Matte, P., Secretan, Y., & Morin, J. (2019). Drivers of residual and tidal flow variability in the St. Lawrence fluvial estuary: Influence on tidal wave propagation. *Continental Shelf Research*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.12.008>