



Service de l'ingénierie
Division de la réalisation des projets de l'état

Le 8 janvier 2021

Madame Annie St-Gelais
Bureau d'audiences publiques sur l'environnement
140, Grande Allée Est, bureau 650
Québec (Québec) G1R 5N6

Objet : Projet de stabilisation des berges de la plage Jacques-Cartier à Québec
 – Réponses aux questions

Madame St-Gelais,

En réponse à votre lettre du 18 décembre dernier, nous vous transmettons le complément pour les réponses qui n'avaient pu être répondues le 23 décembre 2020.

15. Les questions qui suivent traitent de la modélisation des vagues et de l'érosion de la plage.

a) Les modèles de vagues intègrent-ils la réflexion, la réfraction et la diffraction sur les épis? Veuillez expliquer et détailler l'influence de ces paramètres sur les processus d'érosion et de sédimentation à proximité des épis.

Réponse :

Le modèle MIKE21 avec le module Spectral Wave (SW) a été utilisé afin de générer les vagues créées par le vent. La réflexion est incluse par défaut dans les formules utilisées par MIKE21 SW, et le logiciel indique de façon explicite que les nouvelles structures (épis) vont créer une réflexion. La réfraction des vagues, qui consiste au changement de direction des vagues causé par la variation de profondeur d'eau, est également incluse par défaut dans MIKE21 SW.

La diffraction des vagues, qui consiste au phénomène de changement de direction de l'onde de vague en passant près d'une structure (dans le cas présent les épis) n'a pas été activée. Ce choix avait été fait, car il entraînait de nombreuses instabilités numériques. Si ce sujet s'avère pertinent pour la Commission, une analyse de sensibilité de ce phénomène pourrait être réalisée afin de vérifier son impact sur les processus d'érosion et de sédimentation.

Pour assurer la pérennité des ouvrages, un programme de suivi régulier sera mené afin de relever des perturbations potentielles au niveau des ouvrages.

b) Veuillez présenter et expliquer les forces impliquées (vitesse orbitale, force d'entraînement, force gravitationnelle, force de cisaillement, etc.) dans la mise en mouvement, le transport et la déposition des sédiments par les vagues et les courants littoraux. Veuillez comparer cette situation avec celle présentée au moyen du graphique de Hjulstrom qui vous permet d'affirmer que «Selon le diagramme d'Hjulstrom, les vitesses maximales de 0,1 m/s ne causent pas d'érosion, quel que soit le calibre des particules. » (PR3, p. 291 PDF).

Réponse :

Les calculs de transport de sédiments sont réalisés par MIKE21. La section 6 du manuel de documentation scientifique de MIKE21 Mud Transport Module présente les équations utilisées.

La déposition des sédiments utilise les formules suivantes :

$$\text{Deposition: } S_D = w_s c_b p_d$$

where

- w_s settling velocity (m/s)
- c_b near bed concentration (kg/m³)
- p_d probability of deposition

The probability of deposition p_d is calculated as:

$$p_d = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} = \tau_b \leq \tau_{cd}$$

where

- τ_b the bed shear stress (N/m²)
- τ_{cd} the critical bed shear stress for deposition (N/m²)

La force d'entrainement par érosion utilise les formules suivantes :

$$S_E = E \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right)^n, \tau_b > \tau_{ce}$$

where

- E erodibility of bed (kg/m²/s)
- τ_b bed shear stress (N/m²)
- τ_{ce} critical bed shear stress for erosion (N/m²)
- n power of erosion

Force de cisaillement par le courant : Les formules suivantes utilisées par MIKE21 montrent comment la force de cisaillement par le courant est calculée.

$$\tau_c = \frac{1}{2} \rho f_c V^2$$

where

τ_c	bed shear stress (N/m ²)
ρ	density of fluid (kg/m ³)
V	mean current velocity (m/s)
f_c	current friction factor

$$f_c = 2 \left(2.5 \left(\ln \left(\frac{30h}{k} \right) - 1 \right) \right)^{-2}$$

h	water depth (m)
k	bed roughness (m)

Force de cisaillement par les vagues: Les formules suivantes utilisées par MIKE21 montrent comment la force de cisaillement par les vagues est calculée. À noter que la vitesse orbitale est utilisée.

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_b^2$$

where

τ_w	bed shear stress
f_w	wave friction factor
U_b	horizontal mean wave orbital velocity at the bed (m/s)

$$U_b = \frac{2H_s}{T_z} \frac{1}{\sinh\left(\frac{2\pi}{L} h\right)}$$

Liens du manuel de documentation scientifique MIKE21 Mud Transport Module :

[https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast and Sea/MIKE 213 M T FM ScientificDoc.pdf](https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast%20and%20Sea/MIKE%20213%20Mud%20Transport%20Module/MIKE%20213%20Mud%20Transport%20Module%20ScientificDoc.pdf)

Pour le 2e volet de la question, rappelons que, dans la réponse fournie le 18 décembre 2020, nous avons déjà mentionné que nous sommes en accord avec le fait que les vitesses moyennes de 0,1 m/s peuvent causer de l'érosion.

19. Il est mentionné que l'ajout d'épis devrait modifier les conditions hydrodynamiques et favoriser la sédimentation.
- a) Ces simulations tiennent-elles compte de l'effet des vagues et des courants de marée?

Réponse :

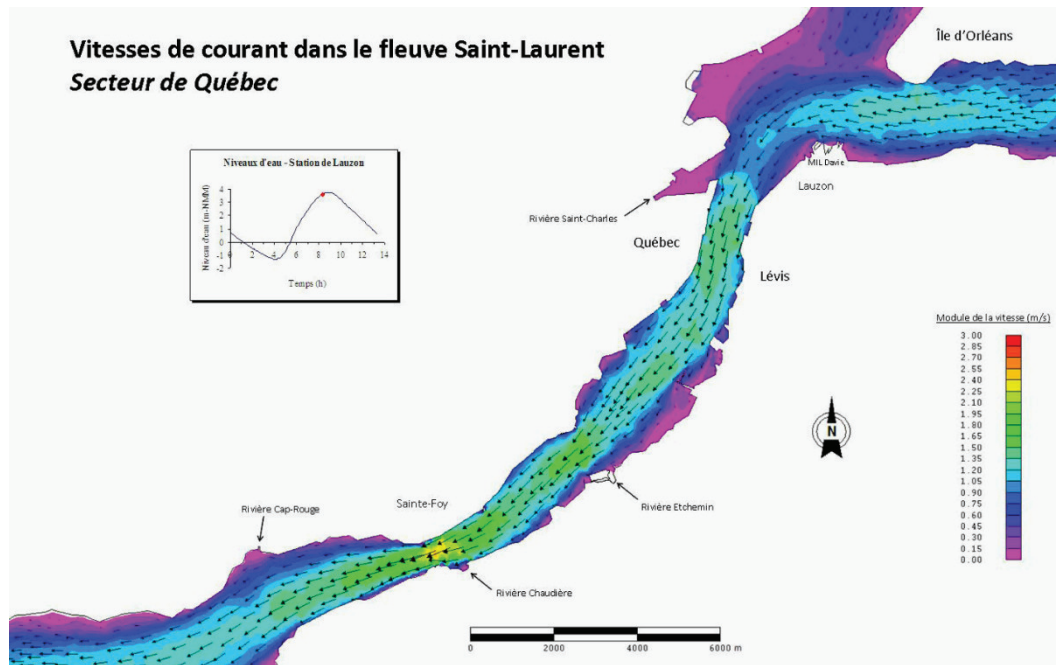
Oui. Les simulations MIKE 21 qui montrent la sédimentation/déposition incluent la combinaison des phénomènes de vagues, de marées et de débits du fleuve.

Par contre, le fait d'imposer un débit moyen journalier à la frontière amont du modèle n'a pas permis de montrer un renversement du courant lors du flot. De plus, il a été impossible jusqu'à présent d'obtenir des débits horaires afin de les modéliser. C'est la raison pour laquelle Stantec a réalisé une simulation additionnelle en imposant arbitrairement des débits horaires hypothétiques avec variation sinusoïdale variant d'environ 30 000 m³/s au flot à 47 000 m³/s au jusant afin de présenter le renversement du débit. Ce débit a été simulé conjointement avec les données horaires des niveaux des marées et des vents du 9 avril 2000, comme expliqué dans la première question.

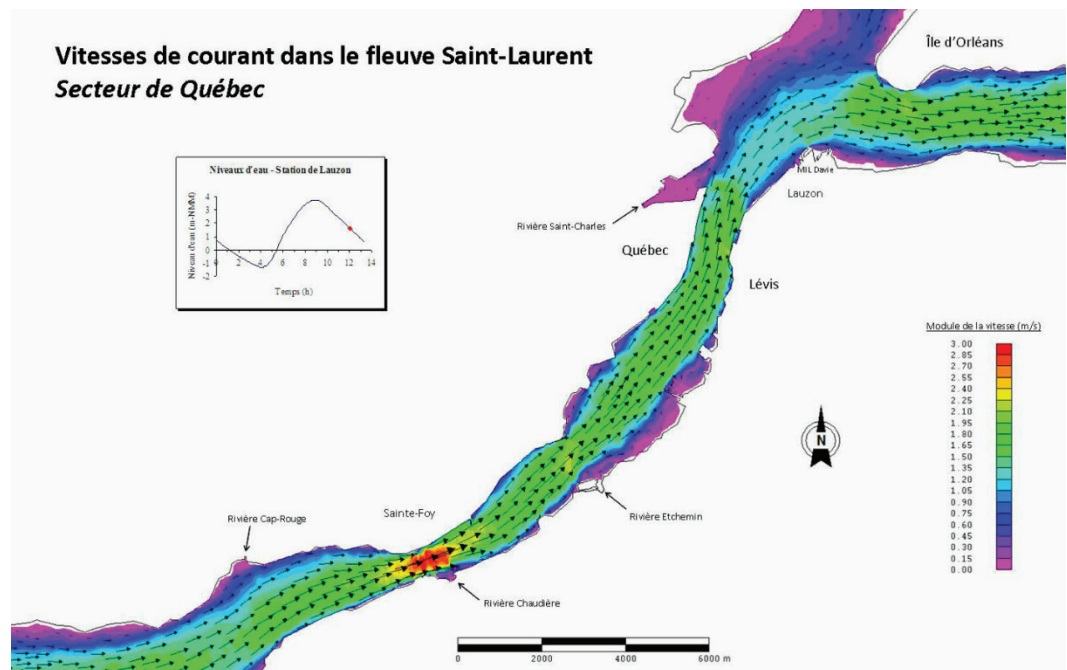
b) Compte tenu de l'importance des vitesses de courant dans le processus de sédimentation et de la possibilité de valeurs atteignant 1 m/s dans le secteur, veuillez produire une simulation qui impose une vitesse de 1 m/s et qui met en évidence les incidences sur la sédimentation, le transport et l'érosion.

Réponse :

*Nous comprenons que la valeur de 1 m/s est présente dans la section 6.2 du rapport Stantec de 2019 (au flot et jusant). Les cartes marines ne détaillent pas les vitesses près de la plage. M. Pascal Matte, ing., Ph.D. qui est chercheur scientifique pour ECC Canada a partagé avec Stantec les résultats d'une simulation d'une marée de vive-eau typique et un débit de fleuve d'environ 25 000 m³/s. La résolution spatiale moyenne des mailles pour la modélisation est de 50 m. Ce modèle numérique montre que les vitesses de courant près des berges de la plage Jacques-Cartier (sur la rive nord, en face de Saint-Nicolas) tournent autour de **0,5 m/s** dans les deux directions (flot et jusant). En marée de vive-eau, les débits de marée sont de l'ordre de 50 000 – 60 000 m³/s. Les deux figures suivantes montrent les vitesses maximales (au flot et au Jusant) tirées de la simulation de M. Matte.*



Vitesses maximales au flot (gracieuseté de M. Pascal Matte, Environnement Canada)



Vitesses maximales au jusant (gracieuseté de M. Pascal Matte, Environnement Canada)

Dans un modèle hydrodynamique 2D, il n'est pas possible de fixer ponctuellement des vitesses, car il est seulement possible d'imposer les conditions aux frontières du modèle (marées, débit du fleuve et vent). Les vitesses sont calculées par le modèle.

La vitesse instantanée de 0,5 m/s produite par le modèle d'Environnement Canada pourra éventuellement causer une érosion plus importante que la vitesse moyenne de 0,1 m/s présentée dans l'étude de Stantec, mais la vitesse de 0,5 m/s a une durée limitée et ensuite la vitesse sera renversée (jusant et flot). Il est vrai que la vitesse 0,1 m/s ne montre pas les fluctuations journalières des phénomènes érosions, transport et déposition, mais elle montre quand même une tendance générale dans une journée critique avec des vagues du sud-ouest et une autre journée avec les vagues du sud-est (incluant les marées dans tous les cas).

Enfin, le bilan annuel est positif avec l'installation des épis avec des zones d'accumulation additionnelle des sédiments ou de l'étendue des zones avec réduction d'érosion (notamment les zones proches des talus).

Par ailleurs, des vitesses de 0,5 m/s n'auraient pas d'impact sur les enrochements des talus. Le plus petit D_{50} recommandé est dans le tronçon 4 avec un D_{50} de 0,55 m calculé pour résister aux vagues. Celui-ci pourrait éventuellement résister à des vitesses plus importantes que 1 m/s. Selon la formule de Isbach, le D_{50} minimal pour assurer la stabilité des enrochements est 0.044 m (pente 1 :1) ou 0,035 m (pente 2H :1V) pour résister à une vitesse de 1 m/s. Ainsi, la stabilité des enrochements n'est pas à risque même en considérant la vitesse de 1 m/s.

Veuillez agréer, Madame St-Gelais, l'assurance de ma considération distinguée.



Luc Ouellet, ing. MBA, Chef d'équipe
LO/ml

c.c : Daniel Lessard, ing. MAP, Directeur de service – Ville de Québec
Guy Laliberté, ing. DESS, Directeur de division – Ville de Québec
Chantal Émond, ing. Chargée de projet – Ville de Québec
Wendy Whittom, Conseillère en communication – Ville de Québec
Mario Heppel, Biol. Chargé de projet – Stantec
Ammar Taha, ing. Ph. D – Stantec