

1. Introduction

La présence de glace en hiver est connue pour influencer le comportement des vagues. D'une part, la **glace réduit les échanges atmosphère-océan**, et limite donc la distance sur laquelle le vent souffle pour générer des vagues (distance de fetch). D'autre part, **l'énergie transportée par les vagues est atténuée de manière exponentielle lors de leur propagation dans la glace** (Squire et Moore, 1980).

Dans l'estuaire et le golfe du St-Laurent, les vagues sont le principal agent d'érosion côtière, particulièrement lors de tempêtes hivernales. Le but de cette étude est de caractériser les interactions vagues-glace dans le St-Laurent en adaptant le modèle numérique WIM (Waves-in-Ice Model) à ces conditions grâce aux données disponibles. Ce modèle permettra d'évaluer l'effet protecteur du couvert de glace face à l'érosion, et d'estimer le futur régime de vagues hivernal dans

2. Physique des interactions vagues-glace

Lors de la propagation des vagues dans la glace, leur énergie est atténuée de manière exponentielle :

$$E = E_0 e^{-\alpha N}$$

N = nombre de floes

Le coefficient d'atténuation α dépend :

- de la période des vagues, les plus courtes subissant plus d'atténuation que les plus longues;
- des conditions de glace (concentration, épaisseur, distribution des floes).

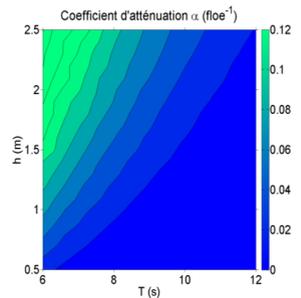


Figure 1: Coefficient d'atténuation α en fonction de l'épaisseur h de la glace, et de la période T des vagues.

Cette atténuation est due à la diffusion élastique : à l'interface eau-glace, une partie de l'énergie transportée par les vagues est réfléchiée. Après un certain nombre de floes, les vagues sont atténuées de manière significative.

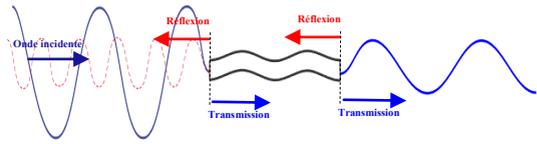
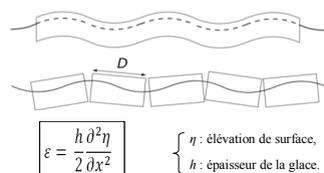


Figure 2 : schéma de la diffusion de l'énergie des vagues par un floe de glace. Le coefficient de réflexion dépend surtout de la période des vagues et de l'épaisseur du floe.



Le passage des vagues impose à la glace une contrainte de flexion, ϵ . La glace a une résistance finie à la flexion, ϵ_{max} , qui dépend de ses propriétés mécaniques, fonctions notamment de sa température, sa salinité, et son épaisseur. La glace se fracture si $\epsilon > \epsilon_{max}$. Les floes résultants de la fracture dépendent de la longueur d'onde des vagues.

Figure 3: Fracture de la glace lors du passage des vagues (Dumont et al., 2011).

La modélisation des interactions vagues-glace nécessite un outil tenant compte à la fois de l'atténuation subie par les vagues, et de la fracture endurée par la glace.

3. Le modèle WIM

WIM (Dumont et al., 2011) simule les interactions couplées vagues-glace de manière unidirectionnelle. Le spectre de vagues entrant est advecté le long d'un transect dans la région couverte de glace, et est atténué en fonction des conditions de glace: concentration, épaisseur et taille des floes. À chaque pas de temps, la taille moyenne des floes est mise à jour pour tenir compte de la fracture de la glace imposée par le passage des vagues.



Figure 4: schéma du fonctionnement du modèle WIM.

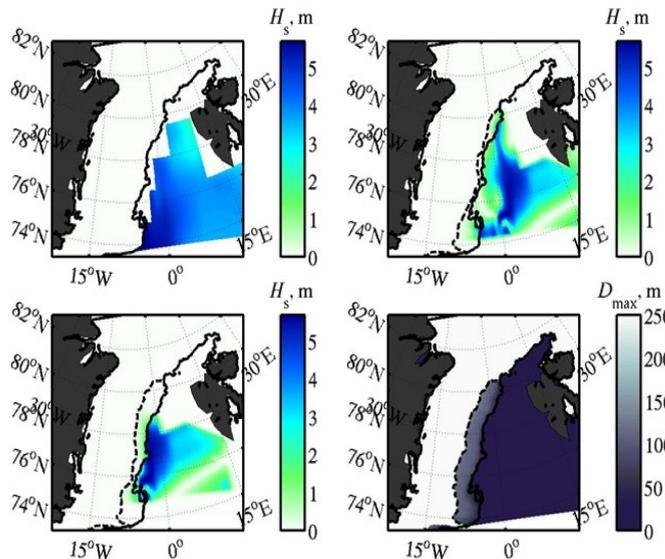


Figure 5: sortie du modèle WIM. Les vagues sont advectées le long de 5 transects différents dans le pack de glace du détroit de Fram. Les 3 premières images représentent la hauteur significative des vagues, en mètres, respectivement à $t=0$, $t=2h$ et $t=4h$. Les pointillés indiquent la zone marginale, où la glace est fracturée par la propagation des vagues. La 4ème image représente le diamètre moyen des floes de glace à $t=4h$, après le passage des vagues.

4. Méthodologie

Les données de vagues à l'échelle de l'estuaire et du golfe du St-Laurent proviennent du modèle d'Environnement Canada (Jacob et al., 2002). Ce modèle opérationnel est forcé par le modèle atmosphérique GEM (Global Environment Model). Il tient compte de l'atténuation par la glace de manière simple.

Les données de glace du St-Laurent sont fournies par le Service Canadien des Glaces (2005). Ces données sont utilisées pour générer les cartes de glace émises quotidiennement depuis 2002, elles proviennent d'images satellites couplées à des observations directes depuis un bateau et un hélicoptère.

La grande variabilité interannuelle des conditions de glace (Galbraith et al., 2012) nous permettra, grâce aux jeux de données décrits plus haut, d'établir une relation entre le régime de vagues et les conditions de glace pour le climat du passé récent. Cette relation et le modèle WIM nous aideront ultimement à mieux caractériser le régime de vagues hivernal.

Les sorties du modèle d'Environnement Canada (EC) permettent d'identifier les cas où les vagues se dirigent vers l'AWAC. La direction est validée grâce au spectre directionnel enregistré par le mouillage. Il est alors possible d'établir un transect sur lequel on suit l'évolution des paramètres de vagues à mesure qu'elles se propagent dans la glace.

Les conditions de vagues et de glace sont utilisées pour forcer le modèle WIM, dont les sorties sont comparées aux enregistrements de l'AWAC. Des simulations préliminaires montrent déjà que le modèle WIM surestime grandement l'atténuation subie par les vagues du St-Laurent. Les deux principales raisons sont : (1) WIM a été ajusté pour des conditions arctiques (mer du Groenland), où la glace est plus épaisse et les vagues plus longues, et (2) WIM ne tient pas compte de la génération et croissance des vagues par le vent.

Les figures ci-après illustrent les conditions de vagues et de glace du 19 février 2011, à 18h.

Figure 8:

À gauche: Hauteur significative et direction des vagues en sortie du modèle d'Environnement Canada. Le graphique représente l'évolution de la hauteur significative et de la période moyenne des vagues le long de leur trajet sous la glace jusqu'au mouillage.

À droite: Carte de concentration de glace. Le graphique indique l'évolution de la concentration et de l'épaisseur de la glace le long du même transect.

La validation ponctuelle des données de vagues sera effectuée grâce à 3 mouillages de type AWAC (Acoustic Wave And Current meter) déployés depuis 2010 à St-Ulric, Sept-Îles et Cap d'Espoir (projet financé par le Ministère de la Sécurité publique du Québec). Ces houlographes enregistrent toutes les heures la hauteur, la période et la direction des vagues. Ils permettent aussi de visualiser l'épaisseur des floes qui dérivent au dessus.

La photogrammétrie, qui consiste à photographier la banquise depuis un observatoire en altitude et à en extraire des informations sur la taille des floes et la concentration de glace, sera appliquée depuis le Pic Champlain, pour valider ponctuellement les données de glace dans le Chenal du Bic.



Figure 6: Position des AWAC et du Pic Champlain.

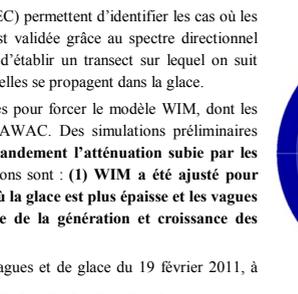


Figure 7 : À gauche, photographie du Chenal du Bic depuis l'observatoire du Pic Champlain; À droite, image géorectifiée du couvert de glace dans le Chenal du Bic.

Spectre directionnel ($m^2 Hz^{-1} deg^{-1}$)

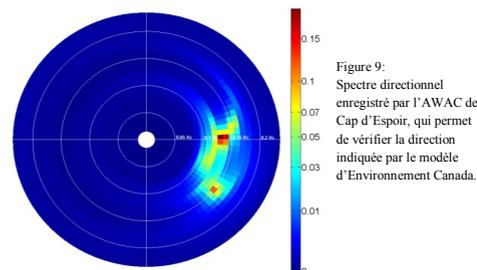
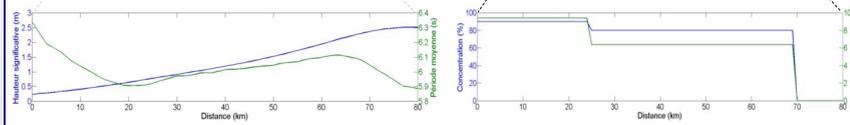
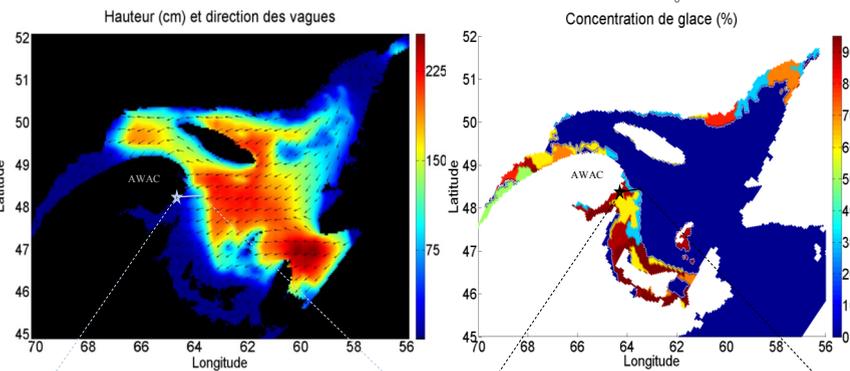


Figure 9: Spectre directionnel enregistré par l'AWAC de Cap d'Espoir, qui permet de vérifier la direction indiquée par le modèle d'Environnement Canada.



Le tableau de droite indique la hauteur significative ainsi que la période moyenne des vagues à l'emplacement de l'AWAC de Cap d'Espoir, enregistrées par l'AWAC, et modélisées par le modèle d'Environnement Canada et WIM, à la fin du transect montré sur les cartes ci-dessus. Les deux modèles surestiment l'atténuation subie par les vagues par rapport à l'enregistrement de l'AWAC, et nécessitent d'être ajustés aux conditions du St-Laurent.

	Hauteur significative	Période moyenne
AWAC	91 cm	6.7 s
EC	23 cm	6.3 s
WIM	< 1 cm	2.0 s

Tableau 1: Comparaison des paramètres de vagues enregistrées par le mouillage (AWAC), et prévues par le modèle d'Environnement Canada (EC) et par WIM.

5. Travaux à venir

Il est prévu d'implémenter la génération de vagues par le vent dans WIM, afin de disposer d'un outil capable d'atténuer les vagues lors de leur propagation sous la glace, et d'en générer dans les zones d'eau libre. Ce modèle permettra d'estimer le rôle protecteur de la banquise face à l'érosion, tout en révélant l'implication des vagues dans la dislocation de la glace et l'accélération de sa fonte. L'amélioration de WIM et l'utilisation d'indices climatiques, comme les degrés-jour de gel, permettront donc d'évaluer le régime de vagues en fonction de la rigueur de l'hiver, qui détermine l'ampleur du couvert de glace.

Les résultats de cette étude pourront ultimement être utilisés, conjointement à des simulations climatiques, pour estimer l'impact d'une éventuelle réduction du couvert de glace sur le régime de vagues et les risques côtiers.

Références

DUMONT, D., KOHOUT, A., BERTINO, L., 2011. A wave-based model for the marginal ice zone including a floe breaking parameterization. *Journal of geophysical research*, 116: C04001, 12p.
 GALBRAITH, P.S., CHASSÉ, J., GILBERT, D., LAROCHE, P., BRICKMAN, D., PETTIGREW, B., DEVINE, L., GOSSELIN, A., PETTIPAS, R.G., LAFLÉUR, C., 2012. Physical Oceanographic Conditions in the Gulf of St. Lawrence in 2011. DFO Can. Sci. Adv. Res. Rep. 2012/023, iii + 85 p.
 JACOB, D., PERRIE, W., TOULANY, B., SAUCIER, F., LEFEBVRE, R., TURCOTTE, V. (2002) Wave model validation in the St. Lawrence river estuary. Proceedings of the 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Banff, Alberta, October 21-25, 477-483.
 SERVICE CANADIEN DES GLACES, 2005. *Manuel des normes d'observations des glaces*. Environnement Canada, Gouvernement du Canada, Ottawa, 155p.
 SQUIRE, V.A., MOORE, S.C., 1980. Direct measurement of the attenuation of ocean waves by pack ice. *Nature*, 283: 365-368.

Remerciements

Nous remercions Denis Jacob, pour les sorties du modèle d'Environnement Canada, ainsi que Simon Senneville, pour les fichiers des cartes de glace. Le projet est financé par le ministère des Transports du Québec dans le cadre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques, Action 23C – volet érosion côtière.