

Sciences et technologies

SOLUTIONS BASÉES SUR LA NATURE POUR LA PROTECTION DES CÔTES AU CANADA : ENSEIGNEMENTS D'EXPÉRIENCES À PLUSIEURS ÉCHELLES EN LABORATOIRE

Acacia Markov

Doctorante
Institut national de la recherche scientifique,
Eau Terre Environnement

Jacob Stolle

Professeur adjoint
Institut national de la recherche scientifique,
Eau Terre Environnement

Ioan Nistor

Professeur
Département de génie civil
Université d'Ottawa

Plus d'un tiers de la population mondiale réside à moins de 100 km de la côte, et cette proportion devrait atteindre 50 % d'ici 2030 (Bilkovic et al., 2017). Une grande partie de la population de la planète se trouve donc directement exposée aux risques côtiers, notamment l'érosion, les inondations et les phénomènes extrêmes tels que les ouragans et les tsunamis. Pendant des décennies, des structures de protection côtière en dur (par exemple, des digues, des brise-lames) ont été mises en place pour se protéger contre ces risques. Toutefois, ces structures ont également eu des effets néfastes sur l'environnement, notamment par la perte de biodiversité due au remplacement de l'habitat et la perte de zones humides côtières en raison de la modification des réserves de sédiments essentiels (Bilkovic et al., 2017).

Ironiquement, les mêmes écosystèmes du littoral qui ont été historiquement dégradés par l'installation des protections côtières en dur peuvent eux-mêmes fournir une protection des berges. Les écosystèmes côtiers végétalisés, tels que les prés-salés (*schorre*), agissent comme des tampons contre les risques côtiers, avec des réductions démontrées de la hauteur des vagues incidentes allant jusqu'à 72 % (Rahman et al., 2019).



Ces environnements sont également autoréparateurs et peuvent s'adapter à l'élévation du niveau de la mer par le dépôt de sédiments (ingénierie des écosystèmes), ce qui signifie qu'ils peuvent fournir une protection dans le contexte d'un climat changeant.

L'efficacité de la végétation côtière en matière d'atténuation des vagues et de protection contre l'érosion a suscité un intérêt pour son utilisation dans les infrastructures de protection côtière. Avec près de 10 % de l'étendue totale des prés-salés du Canada situés le long de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent — 309 km² de marais (Rabinowitz et al., 2022) —, ces milieux pourraient jouer un rôle critique dans les stratégies de protection côtière de la région à long terme. Des efforts sont actuellement mis en œuvre pour comprendre ce que ces écosystèmes peuvent apporter comme protection, comment nous pouvons commencer à les utiliser sur le terrain et dans quels contextes ils peuvent être les plus efficaces.

Cet article vise à donner un aperçu des solutions basées sur la nature (SBN) pour la protection des côtes, en présentant les principaux contrôleurs de l'atténuation des vagues par la végétation, et en explorant les leçons tirées des études expérimentales des SBN réalisées par des chercheurs et chercheuses de l'Université d'Ottawa (Ottawa, Canada) et de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) (Québec, Canada), en collaboration avec le Conseil national de la recherche du Canada (CNRC) (Ottawa, Canada).

Solutions fondées sur la nature et marais côtiers

PRÉSENTATION DES MARAIS CÔTIERS

Les marais côtiers sont des prairies intertidales, souvent situées le long de littoraux protégés ou en bordure d'estuaires (Barbier et al., 2011). Ils sont caractérisés par une faible diversité d'espèces et une donation distincte des plantes entre les régions les plus hautes et les plus basses du marais (Barbier et al., 2011). Dans le contexte de la protection côtière, les plantes des marais côtiers peuvent stabiliser le sol grâce à leurs racines et capturer les sédiments lors des inondations dues aux marées, augmentant ainsi l'élévation de la plate-forme du marais afin de réduire l'érosion, même en cas d'élévation du niveau de la mer. La végétation agit également comme une résistance à l'écoulement, en exerçant une force de frottement sur l'eau, ce qui réduit la vitesse et la hauteur des vagues entrantes (Figure 1). L'inondation fréquente par les marées et l'absorption de nutriments par le biais d'un dépôt sédimentaire accru font également de ces environnements des puits de carbone efficaces et très utiles pour l'atténuation du changement climatique (Barbier et al., 2011).

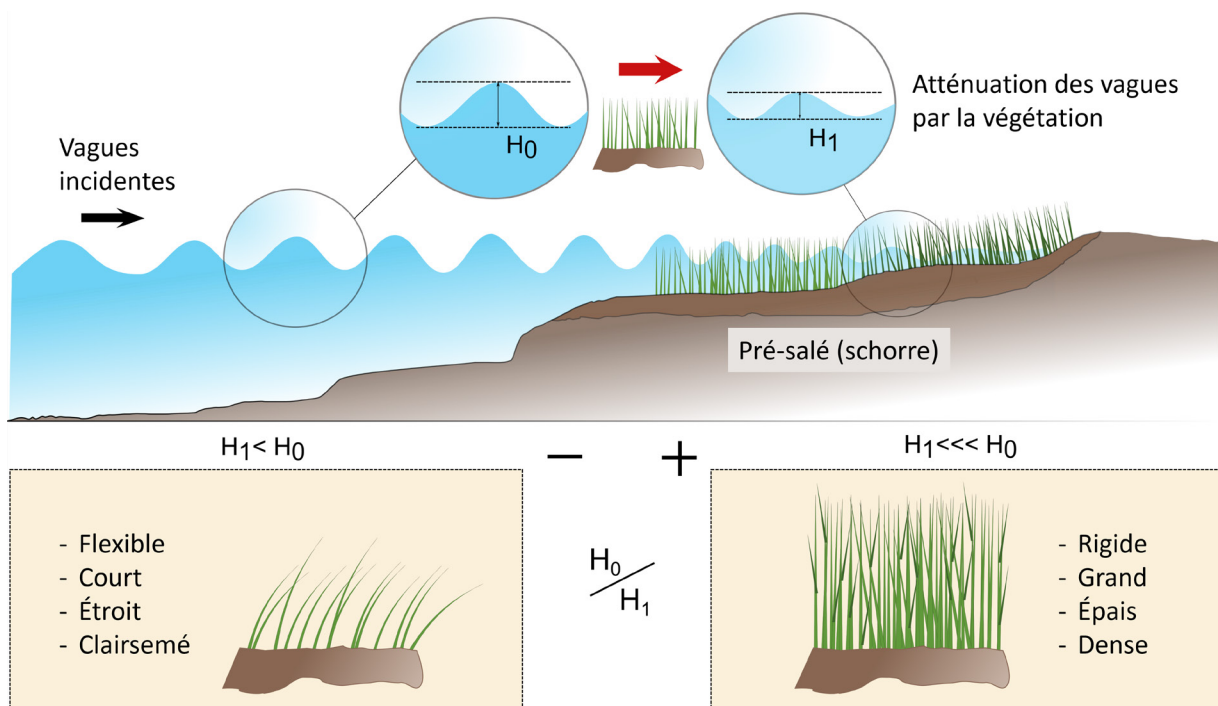


Figure 1. Atténuation des vagues par la végétation des marais côtiers ; la résistance à l'écoulement (friction) induite par la végétation réduit la hauteur et la vitesse des vagues qui se déplacent vers le rivage ($H_1 < H_0$). Le degré de réduction de la hauteur des vagues (exprimé ici comme le rapport entre la hauteur de la vague entrante H_0 , et la hauteur de la vague réduite H_1) est influencé par les paramètres de la végétation, notamment la souplesse, la hauteur de la plante, la densité des tiges et l'épaisseur de la plante.

PROTECTION DES CÔTES PAR LA VÉGÉTATION

Les marais côtiers existent sous de nombreuses formes dans la nature, allant de vastes complexes entourant des criques de marée à d'étroits marais bordant des baies. De même, ils peuvent être utilisés sous de nombreuses formes pour la protection des côtes. Les projets de réaligement côtier gérés à grande échelle soutiennent la protection côtière par la restauration de vastes étendues de zones humides. À plus petite échelle, la végétation des marais peut être directement incorporée dans des structures côtières artificielles souvent appelées « berges vivantes » (Figure 2).

Certains des facteurs clés déterminant le niveau de protection côtière fourni par les SBN avec végétation (par exemple, les « berges vivantes ») sont la **submersion de la végétation** (profondeur de l'eau), la **hauteur de la canopée du marais**, les **propriétés biophysiques de la plante** (morphologie, diamètre de la tige, flexibilité), et les **caractéristiques énergétiques du flux** (vagues, courants) (voir van Veelen et al., 2020). La flexibilité joue un rôle important, car la flexion ou le mouvement passif de la végétation avec l'eau peut réduire la résistance à l'écoulement et donc la dissipation globale de l'énergie des vagues. Nombre de ces facteurs sont très spécifiques à une région — ils dépendent des caractéristiques des espèces végétales indigènes, ainsi que des conditions environnementales locales. Cela souligne la nécessité d'études et de lignes directrices spécifiques à chaque région pour la conception des SBN.

Expériences de laboratoire pour les SBN des marais côtiers

Les études expérimentales, ou les modèles physiques, des SBN visent à recréer des environnements côtiers naturels en laboratoire afin d'étudier les interactions entre les vagues et la végétation dans un endroit plus contrôlable

et plus accessible que sur le terrain. Ces études peuvent contribuer à l'élaboration de lignes directrices pour la conception des SBN, permettant de quantifier les services de protection côtière en tenant compte des différentes espèces végétales, des environnements côtiers (marées, conditions de vagues) et des configurations de la végétation. Pour la présente étude, une approche expérimentale multiéchelle a été utilisée pour étudier les services de protection côtière associés à *Sporobolus* spp. dans une conception de « berge vivante » (Figure 2 — panneau le plus à gauche — et tableau 1).

Des essais de vagues à grande échelle avec des plantes vivantes de *Sporobolus alterniflorus* (spartine lisse, anciennement *Spartina alterniflora*) et de *Sporobolus pumilus* (*Spartina patens* ou spartine étalée) ont été effectués à l'été 2021 au Laboratoire hydraulique environnemental (LHE) de l'INRS à Québec (QC). Les espèces de *Sporobolus* ont été sélectionnées pour les tests car elles sont à la fois indigènes au Canada et répandues dans le monde. Au Canada, la distribution indigène de *S. alterniflorus* est principalement limitée à la côte est, tandis que *S. pumilus* se trouve également le long de la côte ouest (Natural Resources Conservation Service, 2021). Les plantes vivantes proviennent d'un marais naturel situé près de Trois-Pistoles, au Québec (Figure 3). Dans la nature, *S. alterniflorus*, plante tolérante aux inondations, domine dans les zones basses des marais, tandis que *S. pumilus* prospère dans les zones hautes. Les deux espèces ont été plantées dans l'installation expérimentale en conséquence.

Les expériences avec la végétation vivante ont été réalisées afin d'obtenir des **connaissances fondamentales sur les propriétés biophysiques des plantes**, d'étudier les différences entre les deux espèces et d'observer comment ces différences peuvent avoir un impact sur la fonction de protection côtière. Ce dernier point a été étudié à l'aide de **caméras vidéo sous-marines** (Figure 4), **en observant le mouvement des plantes** lorsqu'elles sont soumises à différentes conditions de vagues et de niveau d'eau.

VERT – TECHNIQUES DE CONCEPTION DOUCES → GRIS – TECHNIQUES DE CONCEPTION DURES

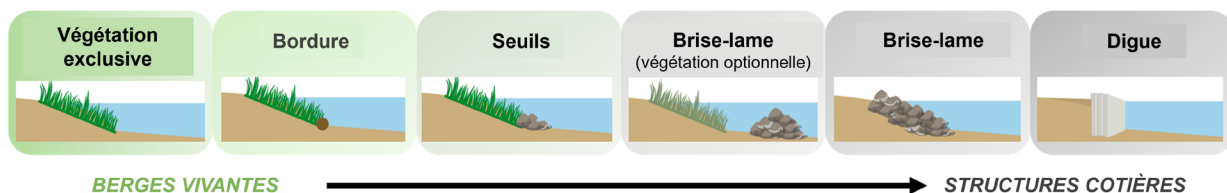


Figure 2. Végétation des marais côtiers dans les applications d'ingénierie, adapté de : NOAA (2015). Les « berges vivantes » sont constituées de végétation plantée sur une pente douce construite, dans le but principal de fournir une dissipation supplémentaire de l'énergie des vagues. L'ajout de bordures, de seuils ou d'un brise-lames plus loin de la berge se rapproche de l'infrastructure grise, mais reste dans le cadre de la conception des « berges vivantes ».

Objectifs expérimentaux

Grande échelle (1:1)		Petite échelle (1:4)					
<ul style="list-style-type: none"> • Développer des méthodes pour tester les vagues en extérieur avec des plantes vivantes • Comparer la flexion de différentes espèces de plantes sous l'effet des vagues • Documenter les propriétés spécifiques aux espèces de plantes qui influencent l'atténuation des vagues 		<ul style="list-style-type: none"> • Développer des méthodes pour tester les vagues avec des imitations de plantes à petite échelle • Estimer l'atténuation des vagues pour une construction de type conception de « berges vivantes » 					
Échelle	Lieu	Espèces végétales	Matériel végétal	Caractéristiques du marais	Pente du rivage	Hauteur de vague (m)	Période de vague (s)
1:1	INRS-LHE, Québec (en extérieur)	<i>S. alterniflorus</i> , <i>S. pumilus</i>	Plantes vivantes	$b_v = 4,5, 1,4$ $l = 62,55$ $N_v = n/a$ $x_b = n/a$	1:18	0,10 - 0,20	2,5 - 10,0
1:4	CNRC-OCRE, Ottawa (en salle)	<i>S. alterniflorus</i>	Chevilles en bois (rigides), tube de latex (souple)	$b_v = 4,5 (9,5)$ $l = 62 (15,5)$ $N_v = 51 (51)$ $x_b = 15 (3,75)$	1:20	0,30 - 0,92 (0,075 - 0,23)	4,0 - 6,5

Tableau 1. Résumé des expériences sur les vagues à grande et petite échelle avec les espèces de *Sporobolus*. Abréviations pour les caractéristiques des marais : b_v = diamètre des tiges des plantes (mm), l = longueur des tiges des plantes (cm), N_v = nombre de tiges par unité de surface (tiges/m²), x_b = longueur du marais (m) dans la direction des vagues. Les propriétés de la végétation sont des moyennes. Pour les expériences à petite échelle, les valeurs à l'échelle du prototype sont indiquées avec les valeurs réelles du modèle entre parenthèses.

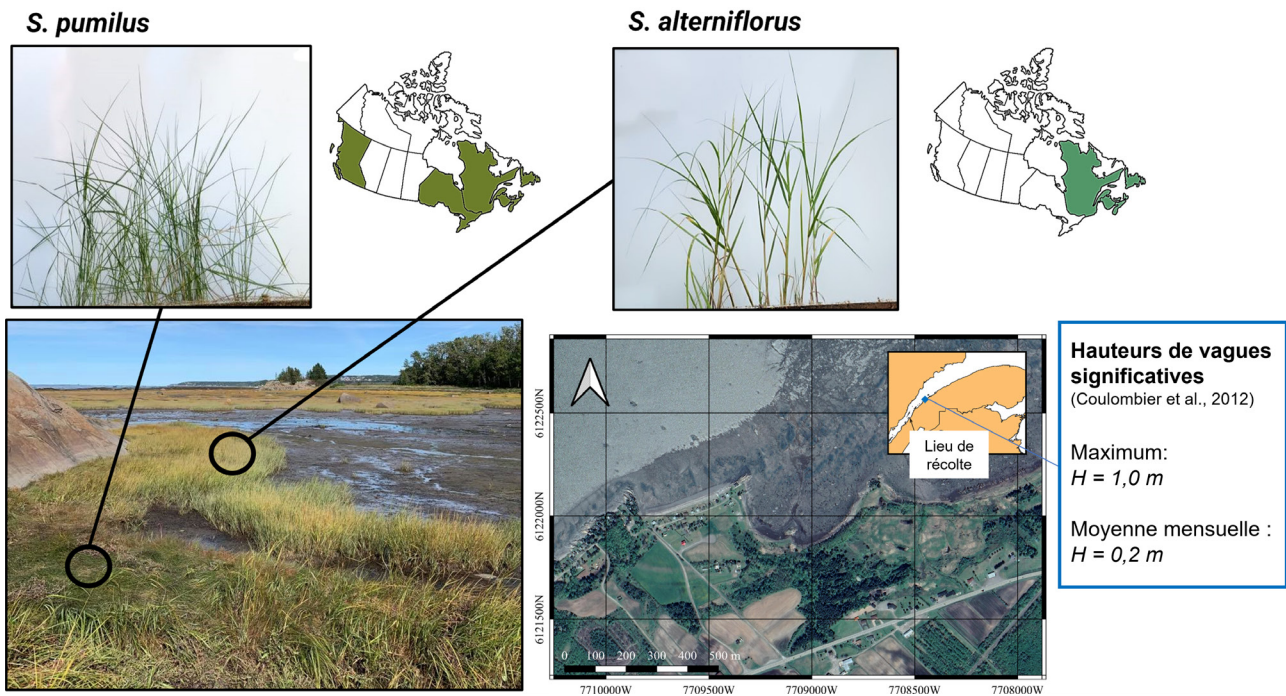


Figure 3. Végétation utilisée dans les essais de vagues à grande échelle (*S. pumilus*, *S. alterniflorus*), indiquant leur distribution indigène au Canada, le lieu de récolte des plantes près de Trois-Pistoles, au Québec, et le climat de vagues approximatif pour le site de récolte (Coulombier et al., 2012). Cartes de distribution adaptées de : Natural Resources Conservation Service (2021).

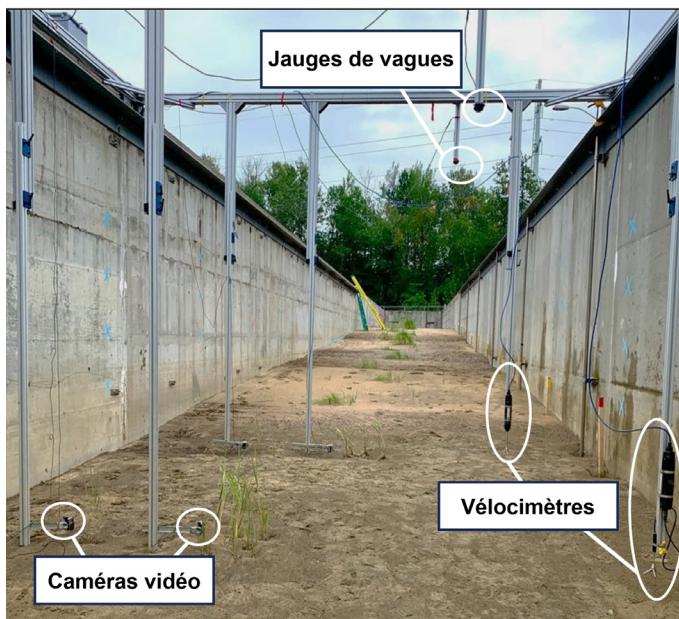


Figure 4. Installation expérimentale avec des plantes *Sporobolus* spp. dans le canal à grandes vagues du LHE-INRS. Les plantes vivantes ont été transplantées directement dans l'installation d'essai des vagues et ont été arrosées et surveillées pendant trois semaines pour permettre leur implantation dans le sol avant les expériences.

Les expériences de laboratoire à petite échelle menées dans le cadre de ce projet visaient à étudier l'**atténuation des vagues fournie par une structure de type « berge vivante »** végétalisée avec *S. alterniflorus* (Figure 5). La structure construite dans le laboratoire du Centre de recherche en génie océanique, côtier et fluvial du CNRC représentait un modèle à l'échelle 1:4 et utilisait des imitations simplifiées de plantes pour représenter *S. alterniflorus*. Les imitations de plantes ont été développées à partir des propriétés mesurées lors d'expériences sur la végétation vivante et comprenaient à la fois un matériau souple (tuyau en caoutchouc de silicone) et rigide (cheville en bois).

Le diamètre et la densité des plantes ont été choisis de manière à préserver les interactions entre les tiges et l'écoulement, et à obtenir une fraction de volume de végétation équivalente à celle d'une rive vivante à l'échelle d'un prototype, avec des plantations espacées de 15 cm. On obtient ainsi une prairie dont la densité végétale est inférieure à celle d'un marais naturel du Canada atlantique (100-350 tiges/m², Virgin et al., 2020), mais qui représente plutôt un scénario de marais nouvellement construit ou planté. Les prairies d'imitation de plantes souples et rigides ont été soumises à des tests de vagues séparément, afin d'étudier l'influence de la souplesse dans les expériences à petite échelle des SBN. Un champ de végétation d'une longueur totale de 15 m (3,75 m en laboratoire) a été testé sous une gamme de vagues de plus en plus énergiques, avec des hauteurs de

vagues comprises entre 0,3 m et 0,9 m (0,075 m — 0,23 m en laboratoire), et deux profondeurs d'eau (conditions de végétation partiellement submergée et entièrement submergée).

Résultats

T très peu d'études expérimentales sur les SBN utilisent de la végétation vivante, en raison des difficultés liées à l'approvisionnement, au transport et à l'entretien des plantes au laboratoire. En revanche, la majorité des expériences utilisent des imitations de plantes avec différents matériaux et différentes complexités pour représenter la végétation vivante en laboratoire. L'utilisation d'imitations permet non seulement d'éliminer les difficultés liées à l'entretien des plantes vivantes, mais aussi de tester des modèles à des échelles réduites et d'offrir une meilleure polyvalence (c'est-à-dire que de nombreux scénarios de conception peuvent être testés de manière efficace). Cependant, ces études peuvent perdre en précision, car la végétation est réduite à une morphologie simple avec des propriétés matérielles uniformes. Il est donc essentiel d'utiliser des plantes vivantes dans les études de laboratoire pour étudier les comportements fondamentaux de la végétation des marais en milieu côtier (c'est-à-dire sous l'effet des vagues). Les études sur les plantes vivantes rendent compte de manière réaliste de la structure

de la végétation et permettent d'effectuer des tests comparatifs sur différentes espèces de plantes, en intégrant l'hétérogénéité inter- et intra-espèces des propriétés des plantes, ainsi que des phénomènes tels que la flexion et le mouvement des tiges.

Dans l'ensemble, l'utilisation d'une approche multiéchelle dans ce projet a bénéficié des deux cadres expérimentaux, soutenant une approche plus holistique pour comprendre les SBN et la protection côtière par *Spartina* spp. Certains résultats clés des expériences sont présentés ci-dessous.

PROPRIÉTÉS DES PLANTES ET ATTÉNUATION DES VAGUES

Les propriétés des plantes mesurées au cours des expériences avec végétation vivante ont mis en évidence des différences essentielles entre *S. alterniflorus* et *S. pumilus* qui peuvent influencer leur rôle respectif dans la conception des SBN. Les plantes de *S. alterniflorus* se caractérisent par une tige individuelle semi-rigide, avec plusieurs feuilles larges et flexibles. Les plantes de *S. pumilus*, quant à elles, sont constituées d'un ensemble de plusieurs tiges flexibles et étroites, avec des feuilles longues et plates. Ces différences, en particulier dans la flexibilité des tiges, ont conduit à des différences significatives dans le mouvement des plantes lorsqu'elles sont exposées aux vagues ; les plantes *S. pumilus* ont constamment montré plus de flexion des tiges que *S. alterniflorus* dans des conditions de vagues incidentes comparables (Figure 5).

La végétation côtière adopte souvent l'une des deux stratégies suivantes lorsqu'elle est confrontée à une contrainte de flux : une stratégie « d'évitement » ou une stratégie de « résistance ». Les plantes qui « évitent » le flux sont souvent petites, très flexibles et peuvent se plier ou se déplacer passivement avec les vagues pour minimiser le stress. Les plantes qui « résistent » peuvent être plus grandes ou plus rigides pour résister aux forces de l'écoulement. Les deux stratégies aboutissent à un compromis pour la protection des côtes. Les plantes d'évitement offrent peu de résistance à l'écoulement et donc moins de dissipation de l'énergie des vagues. Les plantes résistantes offrent un plus grand potentiel de dissipation des vagues, mais sont également plus susceptibles d'être endommagées dans des environnements à forte énergie. En fait, il y a des avantages à combiner les deux types d'espèces dans les stratégies de protection côtière, car les espèces résistantes offrent une plus grande protection en dessous de leur seuil de rupture, et les espèces d'évitement peuvent offrir une protection prolongée avec une plus grande chance de survie (Schoutens et al., 2020).

En ce qui concerne les espèces de *Sporobolus* spp. testées dans le cadre de ce projet, *S. pumilus* semble adopter une stratégie d'évitement et *S. alterniflorus* une stratégie de résistance. Cela indique que nous pouvons potentiellement tirer des avantages combinés de la capacité d'atténuation de *S. alterniflorus* et de la résilience de *S. pumilus*, lorsqu'elles sont associées dans des stratégies de protection côtière.

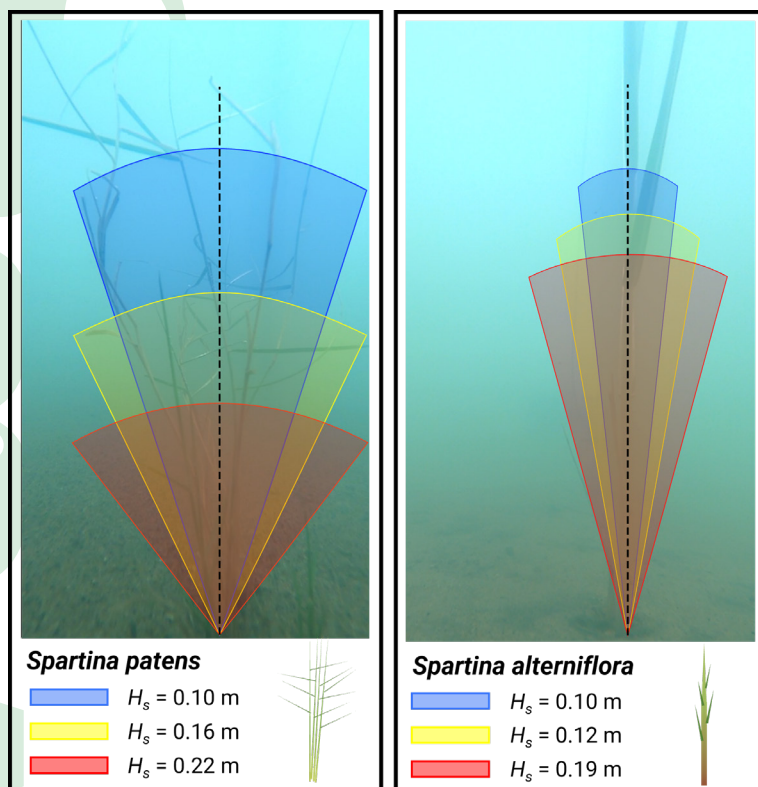


Figure 5. Gamme de flexion des tiges de *S. pumilus* et de *S. alterniflorus* obtenues à partir de séquences vidéo sous-marines, correspondant à des échantillons de vagues lors d'expériences à grande échelle. Les résultats proviennent d'essais de vagues irrégulières avec une période de vague (T_p) d'environ 2,5 s.

SBN ET CONCEPTION DES « BERGES VIVANTES »

Dans les expériences à petite échelle, des imitations de *S. alterniflorus* ont été utilisées pour étudier directement l'atténuation des vagues associée à une structure de type « berges vivantes ». Des exemples de résultats de ces expériences sont présentés à la figure 6. Dans l'ensemble, les tests effectués avec des imitations de plantes souples ou rigides ont donné des résultats très similaires.

Les berges vivantes consistent souvent en une structure en pente végétalisée par des plantations de marais côtiers. La pente seule peut modifier les vagues entrantes par des processus tels que le déprofondissement des vagues (*wave shoaling* : la hauteur des vagues augmente lorsque la profondeur de l'eau diminue) et la brisure des vagues. Cette dernière se produit si la vague devient trop raide, alors que l'eau devient de moins en moins profonde. Par conséquent, lors de l'étude des apports de la végétation dans la conception de SBN telle que les berges vivantes, il est important de prendre en compte la contribution relative de la végétation par rapport à l'effet de la pente elle-même dans la dissipation de l'énergie des vagues.

Dans les expériences actuelles, l'atténuation la plus importante due à la végétation s'est produite pour les conditions de vagues incidentes les plus faibles

(laboratoire : 0,075 m ; monde réel : 0,30 m), avec une réduction maximale de la hauteur de vague de 11 à 19 %, selon la période de la vague, par rapport à la pente seule. Avec l'augmentation de la hauteur des vagues, l'atténuation des vagues due à la végétation diminue par rapport à l'atténuation obtenue par la pente seule ; pour les plus grandes vagues testées (laboratoire : 0,23 m ; monde réel : 0,92 m), la végétation a fourni une dissipation d'énergie presque négligeable par rapport à la pente seule. À des fins de conception, on s'attend à ce que la réduction de la hauteur des vagues puisse être améliorée en augmentant la densité de la végétation ; cependant, cela pourrait ne pas apporter d'améliorations dans les cas de grandes vagues entrantes, en raison de la prédominance des effets de pente.

Les résultats de ces expériences ont également démontré l'importance de l'emplacement de la végétation par rapport au niveau de l'eau au repos (NLR). Dans les cas où le niveau de l'eau au repos était situé à l'extrémité du champ de plantes (Figure 6 — gauche), le premier mètre (ou ~25 %) de végétation modèle a un impact mesurable sur les vagues. Cependant, lorsque le NLR est plus élevé (Figure 6 — droite), les effets de la végétation ne sont pas évidents jusqu'à plusieurs mètres dans la canopée. Cela indique que la longueur totale des marais sur une berge vivante peut ne pas être équivalente à la longueur de la végétation qui produira des effets d'atténuation des vagues, et cela devrait être pris en compte dans leur conception.

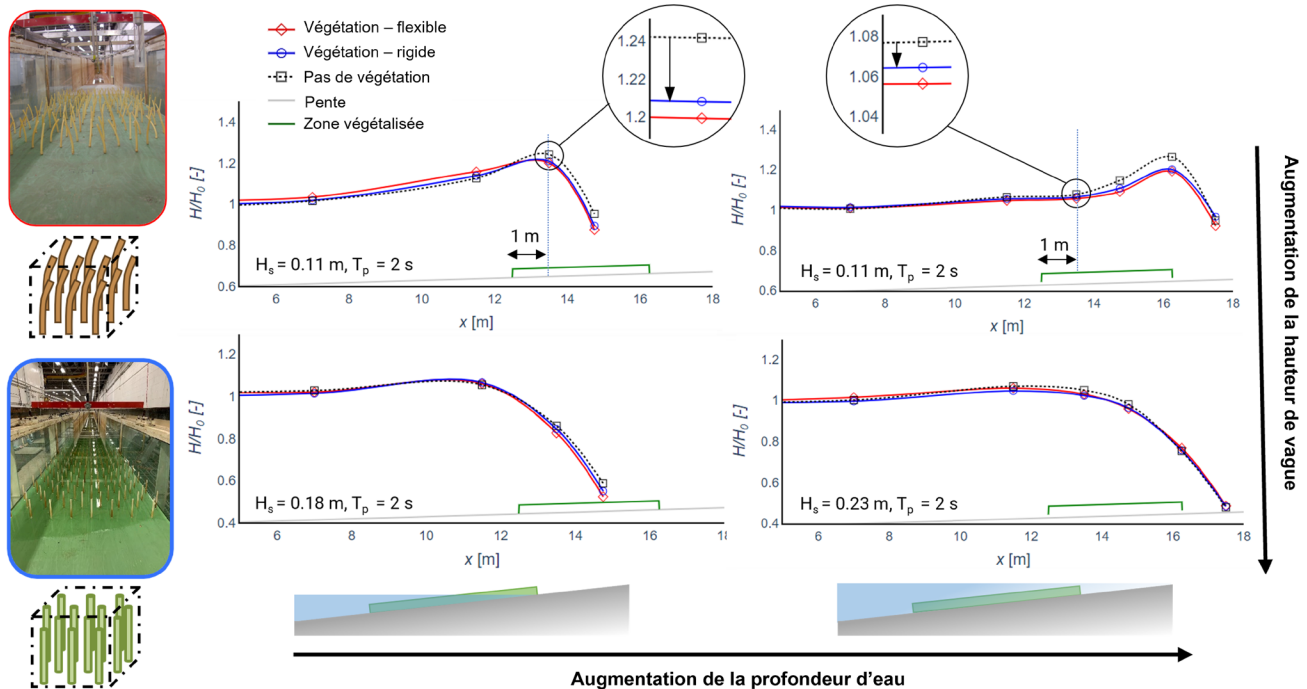


Figure 6. Exemples de résultats de l'évolution de la hauteur des vagues sur un modèle de « berges vivantes » à échelle réduite avec une végétation mimétique (rigide et flexible) pour représenter *S. alterniflorus*.

Dans l'ensemble, les résultats des expériences à cette échelle modèle doivent être interprétés en gardant à l'esprit leurs limites, dues à l'utilisation de plantes mimétiques et aux effets de réduction d'échelle.

Conclusions et perspectives

L'intégration de la végétation indigène des marais (comme *Sporobolus pumilus* et *Sporobolus alterniflorus* sur la côte est du Canada) dans l'infrastructure côtière a le potentiel de fournir une protection côtière adaptative dans le contexte des changements climatiques. Afin d'améliorer le taux de mise en œuvre de ces solutions sur le terrain, d'autres études, telles que celles présentées ici, sont nécessaires pour soutenir le développement de guides de conception de SBN qui utilisent les marais côtiers. Bien que ces recherches soient menées dans le monde entier, des études spécifiques à chaque région sont également indispensables. Sur la base des résultats et des limites de ce projet, il est recommandé pour les études futures sur la mise en œuvre de SBN au Canada de :

- Identifier les seuils de dommages à la végétation et les réductions potentielles de la protection côtière qui en découlent.
- Étudier les effets saisonniers, notamment la présence de glace et les fluctuations de la biomasse végétale.
- Envisager d'autres espèces indigènes des marais côtiers, en particulier pour la côte Pacifique du Canada où *S. alterniflorus* est considérée comme une plante envahissante et donc exclue de la conception des SBN.
- Mettre en œuvre des projets pilotes de berges vivantes, pour tester les hypothèses dérivées des modèles de laboratoire.

RÉFÉRENCES

- Barbier, E., Hacker, S., Kennedy, C., Koch, E., Stier, A. et Silliman, B. (2011).** The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169-193. doi :
- Bilkovic, D., Mitchell, M., La Peyre, M. et Toft, J. (2017).** *Living shorelines: the science and management of nature-based coastal protection*. CRC Press. doi : 10.1890/10-1510.1
- Coulombier, T., Neumeier, U., et Bernatchez, P. (2012).** Sediment transport in a cold climate salt marsh (St Lawrence Estuary, Canada), the importance of vegetation and waves. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 101, 64-75. doi: 10.1016/j.ecss.2012.02.014
- Natural Resources Conservation Service. (2021).** Plants Database. United States Department of Agriculture.
- NOAA. (2015).** *Guidance for Considering the Use of Living Shorelines*.
- Rabinowitz, T.R.M., et Andrews, J. (2022).** Valuing the salt marsh ecosystem: Developing ecosystem accounts. *Environment Accounts and Statistics Analytical and Technical Paper Series*. Statistics Canada Catalogue no. 16-001-M.
- Rahman, H., Sherren, K. et van Proosdij, D. (2019).** Institutional Innovation for Nature-Based Coastal Adaptation: Lessons from Salt Marsh Restoration in Nova Scotia, Canada. *Sustainability*, 11. doi: 10.3390/su11236735
- Schoutens, K., Heuner, M., Fuchs, E., Minden, V., Shulte-Ostermann, T., Belliard, J.-P., Tjeerd, B. J., et Temmerman S.(2020).** Nature-based shoreline protection by tidal marsh plants depends on trade-offs between avoidance and attenuation of hydrodynamic forces. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 236. doi: 10.1016/j.ecss.2020.106645
- van Veelen, T., Fairchild, T., Reeve, D. et Karunarathna, H. (2020).** Experimental study on vegetation flexibility as control parameter for wave damping nd velocity structure. *Coastal Engineering*, 157. doi: 10.1016/j.coastaleng.2020.103648
- Virgin, S.D.S., Beck, A.D., Boone, L.K., Dykstra, A.K., Otterhead, J., Barbeau, M.A., et McLellan, N.R. (2020).** A managed realignment in the upper Bay of Fundy: Community dynamics during salt marsh restoration over 8 years in a megatidal, ice-influenced environment. *Ecological Engineering*, 149, 105713. doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.105713

