

Cartographie des herbiers marins stockant du carbone au Canada et aux États-Unis : Colombie-Britannique, Washington et Oregon



Développement d'un algorithme et quantification de l'étendue des herbiers de zostère

Cette étude a été menée par :

F. Short et **D. Torio** (Université du New Hampshire, États-Unis);
M. Hessing-Lewis, **L. Reshitnyk**, **T. Denouden**, **W. McInnes**,
et **C. Prentice** (Hakai Institute, Colombie-Britannique, Canada)

Avec le soutien de la **Commission de coopération environnementale** (CCE) dans le cadre de son projet de 2015-2016 intitulé *Prochaines étapes des recherches scientifiques aux fins de l'élaboration de politiques sur le carbone bleu de l'Amérique du Nord.*

Stocks de carbone dans les herbiers de zostère

La zostère marine (*Zostera marina*) est la principale plante marine à rhizome qu'on trouve dans les eaux de la côte nord-ouest du Pacifique (qui, pour les besoins de cette étude, comprend les États de l'Oregon et de Washington, aux États-Unis, et la Colombie-Britannique, au Canada). Contrairement aux algues, qui n'ont pas de racines, les zostères séquestrent, accumulent et stockent le carbone dans les sédiments. Dans la zone proche du rivage, la distribution des habitats de zostères est variée : vastes plaines et herbiers, zones irrégulières ou étroites bandes le long du littoral. L'habitat de la zostère marine assume de nombreuses fonctions écologiques dans les écosystèmes côtiers, entre autres, celle d'habitat essentiel pour des espèces d'invertébrés et de poissons pêchées à des fins commerciales et récréatives; il protège également le littoral contre les orages en diminuant les courants et l'effet des vagues. Les herbiers de zostères filtrent également les sédiments eaux de ruissellement et les sédiments en suspension, stockant les nutriments et le carbone que contiennent l'eau et les sédiments dans lesquels la plante est enracinée. Enfin, l'habitat de zostères joue un rôle essentiel dans la facilitation de l'accumulation de matière organique dans les sédiments, agissant ainsi comme puits de carbone.

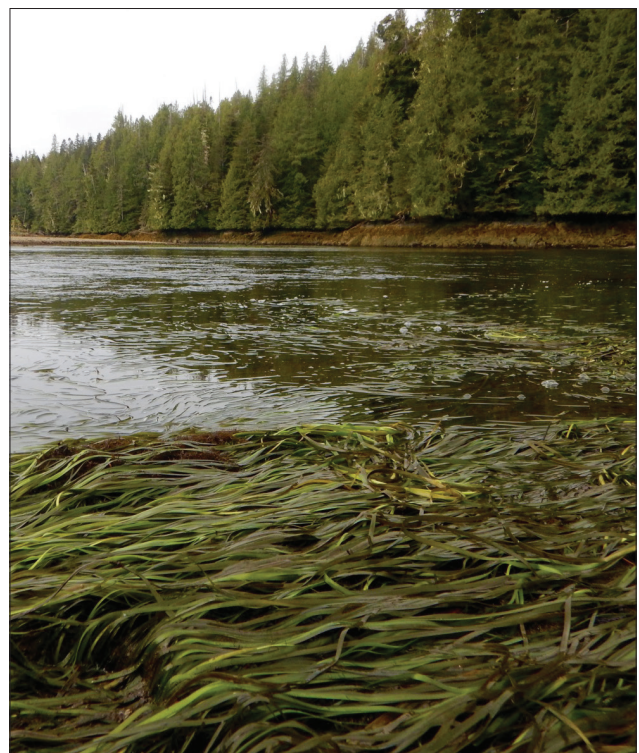


Photo : Carolyn Prentice

Herbiers de zostère, Pruth Bay, Colombie-Britannique

Le carbone stocké dans les écosystèmes côtiers et marins est appelé carbone bleu. Ce n'est que récemment qu'on a reconnu l'importance des stocks de carbone bleu à l'échelle mondiale (Fourqurean et coll., 2012). Des méta-analyses révèlent que les écosystèmes qui stockent du carbone bleu, plus particulièrement les mangroves, les herbiers de zostère et les marais salés, jouent un rôle anormalement grand dans la séquestration du carbone par rapport à leur étendue aréale dans le monde, ce qui en fait des « points chauds » pour le stockage du carbone (Duarte et coll., 2005, McLeod et coll., 2011, Fourqurean et coll., 2012) Par exemple, un hectare de zostère, malgré sa biomasse vivante beaucoup moins importante, peut renfermer autant de carbone qu'un hectare de forêt tropicale humide en raison de la forte accumulation de carbone dans les sédiments et la biomasse souterraine (Pendleton et coll., 2012).

Si on a récemment reconnu l'importance de ces écosystèmes dans le bilan de carbone mondial, on comprend beaucoup moins bien la dynamique des stocks de carbone bleu par rapport aux stocks de carbone terrestre (McLeod et coll., 2011), et ce manque de connaissances limite notre capacité à inclure les stocks de carbone bleu dans les stratégies d'atténuation des changements climatiques (Macreadie et coll., 2014, Hejnowicz et coll., 2015). De plus, la destruction et la perturbation des écosystèmes stockant du carbone bleu sont inquiétantes, puisqu'elles pourraient exacerber les impacts des changements climatiques et restreindre les autres services écosystémiques associés à ces importants habitats marins (Barbier et coll., 2011, Hejnowicz et coll., 2015). Partout dans le monde, des écosystèmes stockant du carbone bleu disparaissent; 29 % des herbiers de ruppies, 50 % des marais salés et 35 % des forêts de mangroves sont soit perturbés, soit détruits (Barbier et coll., 2011).

Comblent le déficit de connaissances sur la côte nord-ouest du Pacifique

Ces travaux avaient pour but de produire de nouvelles données sur le carbone bleu stocké dans les herbiers de zostère le long de la côte nord-ouest du Pacifique en Amérique du Nord, afin de combler un important déficit de connaissances. Pour ce faire, nous avons établi un protocole d'évaluation de la répartition des herbiers de zostères sur la côte de la Colombie-Britannique, de Puget Sound, dans l'État de Washington, et de l'Oregon en utilisant les jeux de données géographiques existants sur l'étendue linéaire des herbiers, les données de bathymétrie et un tout nouvel algorithme. Nous avons également fait des estimations de la séquestration et du stockage de carbone dans les herbiers de zostère en analysant des spécimens prélevés sur le terrain dans les trois secteurs. Avant la réalisation de ces travaux, il y avait peu de données sur l'étendue aréale des herbiers de zostère; les registres de polygones cartographiés étaient incomplets, notamment pour la Colombie-Britannique, mais aussi pour l'État de Washington et, dans une certaine mesure, celui de l'Oregon. Par contre, pour les trois secteurs, il existait des données sur l'emplacement des herbiers, sous forme de données linéaires d'observation collectées selon la méthode de cartographie ShoreZone (Berry et coll., 2004). « ShoreZone » est une méthode de cartographie et de classification des habitats (Howes, 2001) qui représente les jeux de données géographiques les plus complets sur les caractéristiques géomorphologiques

et biologiques de la côte nord-ouest du Pacifique, y compris en Colombie-Britannique, au Canada, et dans les États de Washington et de l'Oregon, aux États-Unis. L'actuel jeu de données pour la Colombie-Britannique a été créé à partir d'une vidéo et de photographies géoréférencées prises à marée basse entre la fin des années 1980 et 2004. Ces images géoréférencées ont servi à cartographier la présence et l'absence de zostères ainsi que la distribution linéaire des communautés biologiques (incluant les zostères) le long de portions du littoral.

De plus, les données sur la biomasse des zostères étaient disponibles dans SeagrassNet pour les sites des États de l'Oregon et de Washington; quelques mesures de la biomasse étaient disponibles pour la Colombie-Britannique. Il n'y avait presque aucune donnée préexistante sur les mesures du stockage ou de la séquestration du carbone sédimentaire dans l'ensemble des sites; il a donc fallu mener des travaux sur le terrain pour établir ces données. Pour créer une carte plus complète des herbiers de zostère, nous avons développé un algorithme permettant d'extrapoler les données linéaires de ShoreZone en superficie d'herbiers de zostère, en utilisant l'information bathymétrique dans un système d'information géographique (SIG).

Cartographie des zostères en Colombie-Britannique

Les données suivantes ont été utilisées pour développer l'algorithme d'estimation de la superficie des herbiers de zostères en Colombie-Britannique :

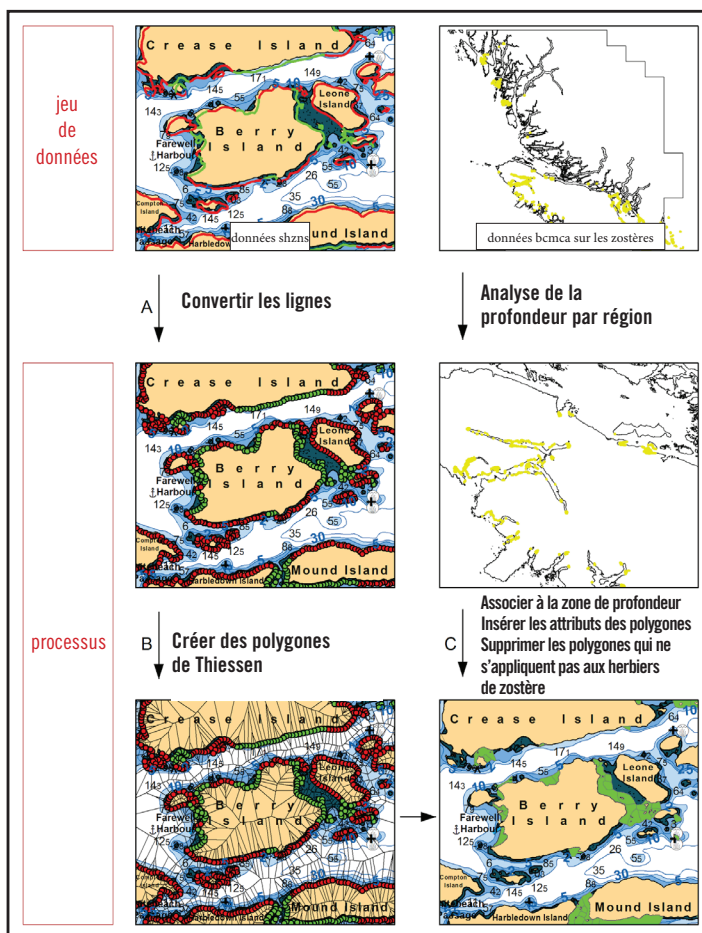
1. Jeu de données ShoreZone fournies par la province de la Colombie-Britannique;
2. Jeux de données bathymétriques du Service hydrographique du Canada pour l'essentiel de la partie continentale de la Colombie-Britannique et l'île de Vancouver, à l'exclusion de Haida Gwaii, et données bathymétriques pour Haida Gwaii fournies par la réserve de parc national Gwaii Haanas, la réserve de parc marin national Gwaii Haanas et le site patrimonial Haida (Parcs Canada);
3. Herbiers de zostère cartographiés provenant de la base de données en ligne de *British Columbia Marine Conservation Analysis* (BCMCA, analyse de la conservation marine de la Colombie-Britannique) et du Hakai Institute pour la côte centrale et Haida Gwaii. De plus, nous avons examiné la distribution de la profondeur des herbiers de zostère dans les jeux de données pour deux régions géographiques : (1) le détroit de Georgia et (2) le reste de la Colombie-Britannique. Cette distinction a été faite pour tenir compte de la différence régionale qu'il pourrait y avoir dans la distribution en profondeur des herbiers de zostère en Colombie-Britannique.

Nous avons converti les lignes ShoreZone en polygones pour pouvoir estimer la superficie des herbiers de zostère à l'aide d'un outil (le « Gregrator ») dans ArcGIS (v. 10.4), basé sur les méthodes associées au modèle des parcelles de hauts-fonds créé par Gregr et coll., (2013) (voir les étapes à la figure 1).

L'évaluation de l'exactitude a été calculée pour les cas où les polygones des jeux de données sur les zostères (n = 2807) chevauchaient les polygones ShoreZone indiquant la présence de zostères. Aucune donnée n'était cependant disponible pour déterminer la précision des prédictions de ShoreZone quant à l'absence de zostères.

Les résultats montrent que la profondeur maximale moyenne (lisière profonde des herbiers de zostère) était de 3 mètres pour le détroit de Georgia et de 5 mètres pour le reste de la Colombie-Britannique. Les polygones de

Figure 1 . Représentation graphique de la conversion des « lignes » de zostères ShoreZone en polygones



zostères générés à partir des données linéaires ShoreZone sont illustrés à la figure 2 (page suivante). La superficie totale des herbiers de zostère a été estimée à 416,12 km². L'évaluation de la précision montre que 60 % des polygones générés chevauchaient le jeu de données ShoreZone.

En résumé, en Colombie-Britannique, où la côte s'étend sur 35 000 km, la capacité de cartographier les herbiers de zostère à cette échelle dépend directement du seul jeu de données, celui de ShoreZone, qui couvre cette étendue géographique. L'algorithme développé pour estimer la superficie des zostères à partir d'une extrapolation de l'étendue linéaire actuelle de l'espèce donne vraisemblablement une sous-estimation de la présence de zostères sur la côte de la Colombie-Britannique, parce qu'une vérification a permis de démontrer que les données linéaires de ShoreZone sous-estiment la présence de zostères (Harper et Morris, 2008). En outre, le jeu de données utilisé pour

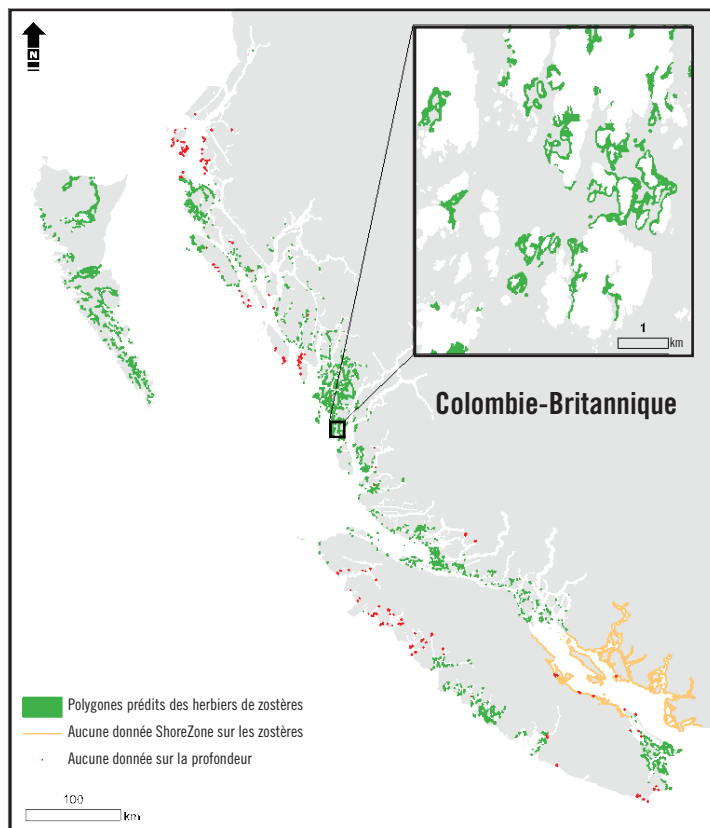
évaluer l'exactitude de l'analyse de ShoreZone représente un conglomérat de jeux de données sur les zostères provenant de diverses sources et recueillies par diverses méthodes sur de nombreuses décennies. Ces données montrent que ShoreZone avait tendance à ne pas classer les plus petits herbiers de zostère.

Comme les herbiers de zostère de la Colombie-Britannique présentent un potentiel élevé de stockage de carbone qui est important dans le contexte des politiques de lutte contre les changements climatiques et pour la gestion et la conservation des écosystèmes côtiers, ces résultats ne sont qu'une première étape dans l'établissement d'estimations du potentiel de stockage de carbone dans la région. Lorsqu'on les combine à l'étendue des herbiers de zostère et à l'estimation de leur stockage de carbone pour Puget Sound, Washington et la côte de l'Oregon, ils fournissent la première description spatiale du carbone stocké dans les herbiers de zostère sur la côte nord-ouest du Pacifique.

Cartographie des zostères de Puget Sound, dans l'État de Washington

L'algorithme créé pour estimer les herbiers de zostère à partir des données linéaires et des données bathymétriques pour la Colombie-Britannique a été légèrement modifié pour cartographier les herbiers de zostère de Puget Sound, dans l'État de Washington. Les données linéaires, la topo-bathymétrie de haute résolution et une combinaison des valeurs minimales et maximales de profondeur ont été intégrées à l'algorithme. Nous avons utilisé le *Washington State ShoreZone Inventory* (inventaire ShoreZone pour l'État de Washington) (ShoreZone, 2016), de même qu'un jeu de données sur les zostères, constitué de polygones produits par le *Submerged Vegetation Monitoring Program* (programme de surveillance de la végétation immergée) (SVMP, 2012). Les données de topo-bathymétrie ont servi à déterminer les limites inférieure et supérieure des herbiers de zostère à partir des fourchettes de profondeur du SVMP (Finlayson et coll., 2000).

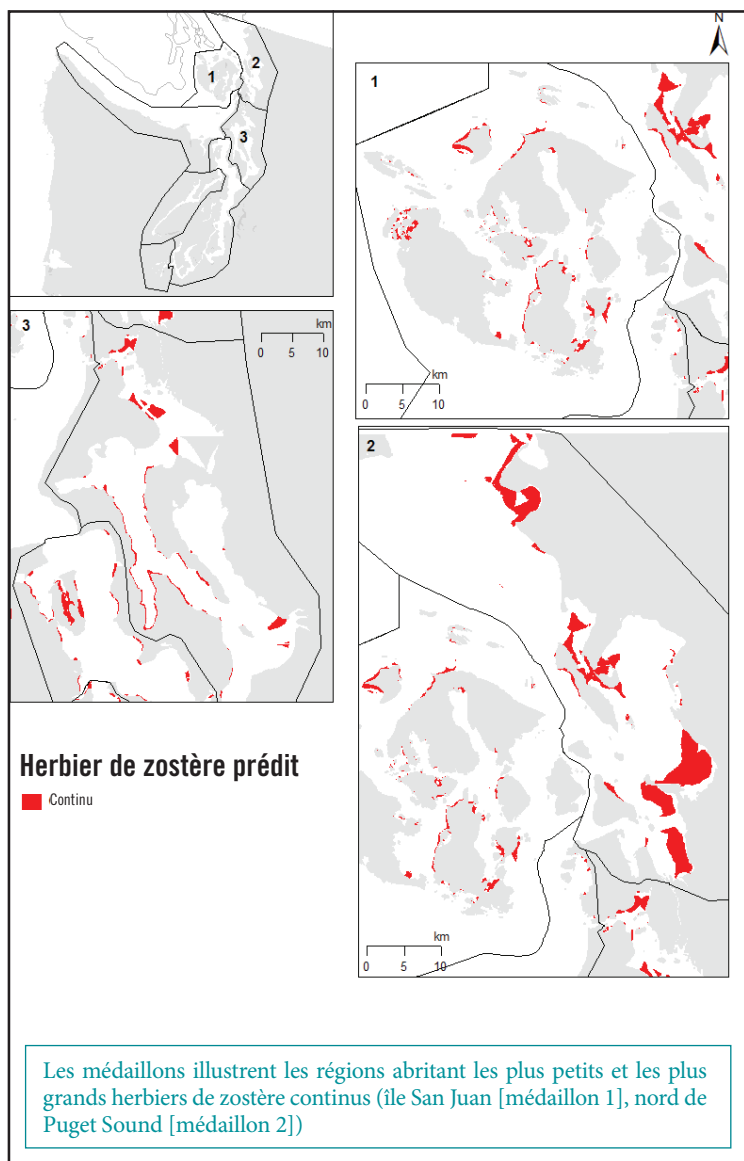
Figure 2. Polygones prédits des herbiers de zostères créés à partir des données de ShoreZone, zones pour lesquelles aucune donnée ShoreZone / sur la profondeur n'était disponible



Les données linéaires ShoreZone ont été converties en polygones en utilisant l'algorithme pour la Colombie-Britannique, auquel nous avons apporté les modifications suivantes : a) nous avons créé une couche de raster avec une valeur de 1 représentant des profondeurs appropriées de zostères selon une technique de seuillage conditionnel et en utilisant une combinaison des statistiques sur la plus faible et la plus grande profondeur de zostère; b) nous avons converti la matrice obtenue en polygone vectoriel et nous l'avons utilisée pour associer les polygones de Thiessen dérivés des données de ShoreZone. Pour évaluer la précision de la projection de zostères, nous avons calculé le nombre de polygones du SVMP chevauchant les polygones prédits à partir des données linéaires ShoreZone, ainsi que leur superficie.

Les résultats montrent que la profondeur des herbiers de zostère de Puget Sound est variable, allant de +2,33 à -12,40 m. L'algorithme a produit 1 047 polygones couvrant 227 km² d'herbiers de zostère sur la ligne de données ShoreZone continue pour Puget Sound (figure 3 ci-contre). Les plus petits herbiers se trouvaient dans les régions du détroit Juan de Fuca et des îles San Juan et les plus grands se trouvaient dans le nord de Puget Sound. L'évaluation de la précision a montré que 83 % des polygones du SVMP chevauchaient les polygones prédits.

Figure 3. Polygones d’herbiers de zostère prédits par algorithme, à partir des données ShoreZone de 1994–2000 pour l’État de Washington.



Globalement, pour Puget Sound, l’algorithme a produit une bonne prédiction de l’étendue des herbiers de zostère à partir des données linéaires ShoreZone. L’algorithme a estimé à 227 km² la superficie des herbiers de zostère, soit un peu plus que la superficie répertoriée à ce jour par le SVMP, soit 218 km². Certaines incohérences ont été relevées – surtout relativement aux herbiers en eaux profondes ou troubles – et elles nécessiteront un examen plus poussé.

Cartographie des zostères sur la côte de l’Oregon

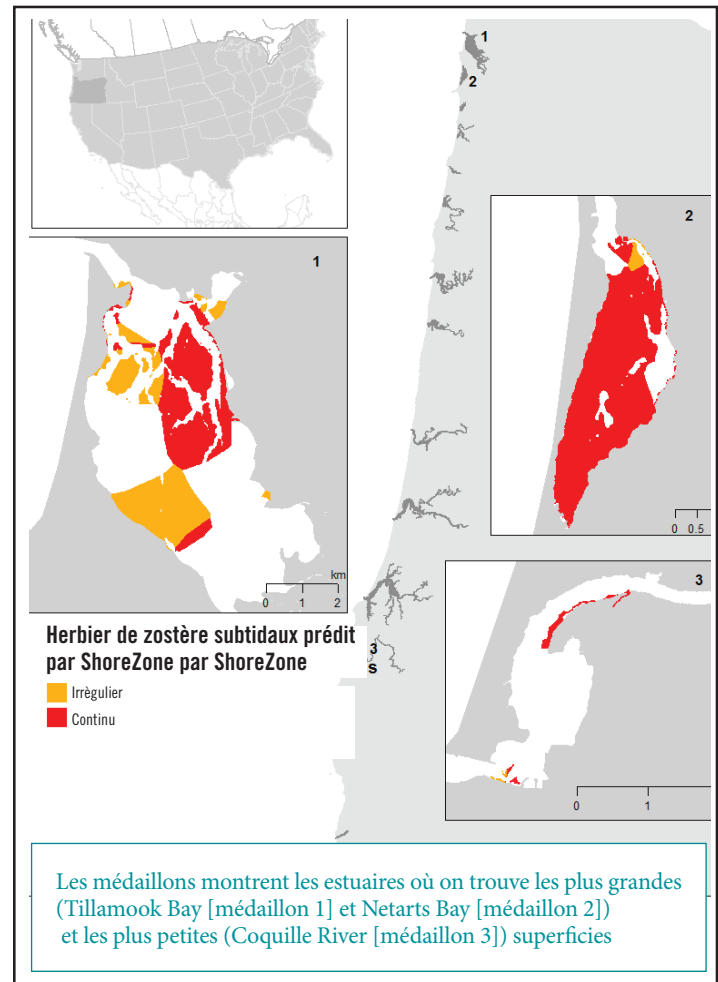
L’algorithme développé pour la Colombie-Britannique a été utilisé pour estimer la distribution des zostères sur la côte de l’Oregon par rapport aux données de 2014 de ShoreZone pour l’ensemble de l’État (ShoreZone, 2014a). La côte de l’Oregon présente des caractéristiques topographiques, hydrologiques et bathymétriques différentes de celles de la Colombie-Britannique, et les estuaires où on trouve des herbiers de zostère sont discontinus et leur taille, leur profondeur et les niveaux d’eau varient. Nous avons utilisé les données de topo-bathymétrie du laboratoire de l’environnement marin du Pacifique du NOAA Center for Tsunami Research (NOAA, 2016) et les données de 2003 de la commission géologique des États-Unis (NGDC, 2003). Deux séries de polygones de zostères ont servi à valider les résultats du modèle : les polygones des habitats essentiels du poisson de la Pacific State Fishery Management Commission (PSFMC, commission de gestion des pêches dans les États du Pacifique) (PSFMC, 2004) et les polygones de distribution des herbiers de zostère de l’US EPA (Agence de protection environnementale des États-Unis) dans certains estuaires de l’Oregon (Young et coll., 2009; Young et coll., 2012). Ni les jeux de données des polygones des herbiers de zostères de ShoreZone ni ceux de la PSFMC ne fournissaient d’information sur les gammes de profondeur de zostère; celles-ci ont donc été tirées de la littérature : -0,5 à -2,25 m du niveau moyen de la mer (NMM) (Boese et coll., 2009).

Les données des lignes d’herbiers de zostère de ShoreZone ont été converties en polygones, avec l’algorithme développé pour cette étude, et appliquées à la fois aux segments de droite subtidiaux et aux segments de droite (subtidiaux + intertidaux) qui combinaient toutes les données sur les zostères. Pour évaluer la précision, nous avons calculé le pourcentage des polygones et le pourcentage de la superficie qui se chevauchent entre les jeux de données de polygones de l’EPA et les

polygones d'herbiers de zostères prédits par l'algorithme. L'algorithme a produit 1 611 polygones d'herbiers de zostères subtidiaux couvrant 31,5 km² en Oregon (figure 4), soit une superficie un peu plus grande que celle répertoriée par la PSFMC. En ce qui concerne la précision, les polygones d'herbiers de zostère subtidiaux prédits par l'algorithme chevauchaient les polygones de validation de l'EPA et de la PSFMC dans une proportion de 43 %. Dans la majorité des baies, le taux de précision de la prédiction était inférieur à 50 %. Lorsque toutes les données de segments de droite d'herbiers (intertidaux et subtidiaux) de ShoreZone étaient utilisées, la précision de l'algorithme était de 63 % pour les estuaires par rapport aux polygones de validation de l'EPA.

En résumé, les herbiers de zostère de l'Oregon se trouvent pour la plupart à une profondeur optimale de -0,5 à -2,25 m NMM. Cette gamme de profondeurs se rapproche des valeurs rapportées par Young et coll., (2012) et par Boese et coll., (2009) en ce qui concerne les limites supérieures et inférieures de profondeur d'herbiers de zostère dans certains estuaires de l'Oregon. Dans cette gamme de profondeurs, les polygones prédits d'herbiers de zostère intertidaux et subtidiaux étaient relativement bien représentés dans la majorité des estuaires de l'Oregon. L'algorithme a prédit un total de 43,68 km² d'herbiers intertidaux et subtidiaux en Oregon.

Figure 4. Polygones d'herbiers de zostère subtidiaux en Oregon, tels que prédits par l'algorithme.



Stocks de carbone dans les herbiers de zostère sur la côte nord-ouest du Pacifique

C'est en Colombie-Britannique qu'on a répertorié la plus grande superficie d'herbiers, soit 361,6 km² selon la prédiction de l'algorithme, pour un total de 1 004,4 km² lorsqu'on l'ajoute aux herbiers de zostère déjà documentés (CCE, 2016), soit 56 % de plus que ce qui avait déjà été estimé. Dans Puget Sound, dans l'État de Washington, la superficie approximative prédite par notre algorithme était environ 24 % plus grande que la superficie déjà évaluée par le SVMP. Dans les estuaires côtiers de l'Oregon, la superficie d'herbiers de zostère prédite par l'algorithme était également beaucoup plus grande que les estimations antérieures, à 823 %. La précision globale fournit de l'information sur la robustesse et l'applicabilité de notre

méthode à l'échelle des sites, tandis que les niveaux de précision sous-régionale montrent l'importance de l'utilisation de données d'intrant fiables et mettent en évidence les limites des données régionales.

En utilisant des données propres à un site sur le taux de séquestration de CO₂ par les zostères dans ces trois sites (CCE, 2017), nous avons pu conclure que les herbiers de zostère de la Colombie-Britannique absorbent jusqu'à 23 403 tonnes de CO₂ annuellement; que ceux de Puget Sound, dans l'État de Washington, en absorbent 11 722 tonnes annuellement; et que ceux de l'Oregon en absorbent 4 217 tonnes annuellement.

Travaux à venir

L'algorithme développé pour cette étude est un outil de SIG pour d'autres jeux de données de ShoreZone et de bathymétrie. L'algorithme a été développé pour la côte de la Colombie-Britannique et adapté pour les États de Washington et de l'Oregon, où il existe des jeux de données similaires. Il s'agit d'un nouvel outil qui peut facilement être appliqué à de nouvelles zones. Les cartes et les résultats d'analyse pourront servir de source d'information sur le potentiel de stockage de carbone bleu dans les habitats de zostères.

Les données compilées dans le cadre de cette étude, de même que les cartes et analyses produites, serviront de base à la détermination : 1) des zones sous-régionales précises où il n'y a pas de données vérifiées au sol ou celles où les données sont trop anciennes pour être utiles; 2) des différences régionales dans la précision du jeu de données de ShoreZone; 3) des méthodes appropriées de manipulation des données régionales sur les herbiers de zostère, incluant l'utilisation de différentes technologies d'acquisition d'images; 4) les zones où les données bathymétriques sont inadéquates; et 5) les zones où les données sur la gamme de profondeur des herbiers de zostère sont inadéquates. Il est essentiel de cartographier les herbiers marins sur la côte nord-ouest du Pacifique et ailleurs dans le monde pour évaluer les stocks de carbone côtier. Les cartes seront également utiles dans le cadre d'autres initiatives de planification marine, comme la désignation et la création de réseaux d'aires protégées, la gestion des pêcheries et des invertébrés, de même que l'évaluation des changements résultant des demandes de nouveaux développements côtiers et de leur création.

Remerciements

Fred Short, de l'Université du New Hampshire, a dirigé le projet, et Margot Hessing-Lewis et ses collègues du Hakai Institute, en Colombie-Britannique, ont participé au développement et à l'utilisation de l'algorithme, et aux travaux sur le terrain en Colombie-Britannique. Dante Torio a secondé M. Short à l'Université du New Hampshire, notamment pour la cartographie. Jeffrey Gaeckle, du département des Ressources naturelles de l'État de Washington à Puget Sound, et Mme Alicia Helms, de la South Slough Estuarine Research Reserve, en Oregon, ont participé aux évaluations sur le terrain du carbone dans la biomasse et les sédiments dans leurs secteurs. Merci à Cathy Short pour la rédaction et la révision.

En Colombie-Britannique, nous remercions Mary Morris, qui a participé à la création du volet biologique de ShoreZone, pour la révision du document sur la Colombie-Britannique; Patrick Bartier, qui a fourni les données bathymétriques pour Haida Gwaii; Carol Orborne, qui nous a donné accès aux plus récentes données de ShoreZone pour la Colombie-Britannique; et Ed Greg, pour ses conseils sur les méthodes de SIG.

À Washington et en Oregon, nous remercions Walt Nelson, de l'US EPA, ainsi que Patrick J. Clinton et Ron Thom, qui ont contribué aux jeux de données de validation des herbiers de zostère et fourni de l'information sur la topo-bathymétrie de haute résolution.

Références

BARBIER, E., S. HACKER, C. KENNEDY, E.M. KOCH, A.C. STIER ET B.R. SILLIMAN (2011). « The value of estuarine and coastal ecosystem services », *Ecological Monographs*, vol. 81, n° 2, p.169-193.

BERRY, H.D., J.R. HARPER, T.F. MUMFORD Jr., B.E. BOOKHEIM, A.T. SEWELL et L.J. TAMAYO (2004). *Washington State ShoreZone Inventory User's Manual, Summary of Findings, and Data Dictionary*. Rapports rédigés pour le programme des habitats côtiers du département des Ressources naturelles de l'État de Washington.

BOESE, B.L., W.G. NELSON, C.A. BROWN, R.J. OZRETICH, H. LEE II, P.J. CLINTON, C.L. FOLGER, T.C. MOCHON COLLURA ET T.H. DEWITT (2009). « Lower depth limit of *Zostera marina* (eelgrass) in seven target estuaries », dans (Lee II, H. et C.A. Brown, réd.) *Classification of regional patterns of environmental drivers and benthic habitats in Pacific Northwest estuaries*. Rapport EPA/600/R-09/140 (octobre 2009). US Environmental Protection Agency, Washington, DC. pp. 219 – 241. Disponible en ligne : <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1006Q2H.txt> (site consulté le 5 décembre 2016).

CCE (2016). *Le carbone bleu en Amérique du Nord : Évaluation de la répartition et des puits de carbone des herbiers marins, des marais salés et des mangroves*. Rapport de Chmura, G., F.T. Short et D. Torio. Montréal, Canada, Commission de coopération environnementale, 54 p.

CCE (2017). *Seagrass Sediment Sampling Protocol and Field Study: British Columbia, Washington and Oregon*. Préparé par l'Université du New Hampshire pour la Commission de coopération environnementale.

DUARTE, C.M., J.J. MIDDLEBURG et N. CARACO (2005). « Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle », *Biogeosciences*, vol. 2, p. 1–8.

FINLAYSON, D.P., R.A. HAUGERUD, H. GREENBERG et M.G. LOGSDON (2000). *Puget Sound digital elevation model*. Université de Washington. Disponible en ligne : <http://www.ocean.washington.edu/data/pugetsound/> (site consulté le 21 octobre 2016)

FOURQUREAN, J.W., C.M. DUARTE, H. KENNEDY, N. MARBÀ, M. HOLMER, M.A. MATEO, E.T. APOSTOLAKI, G.A. KENDRICK, D. KRAUSE-JENSEN, K.J. MCGIATHERY et O. SERRANO (2012). « Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock », *Nature Geoscience*, vol. 5, n°6, p. 505-509.

GREGG, E.J., J. LESSARD et J. HARPER. 2013. « A spatial framework for representing nearshore ecosystems », *Progress in Oceanography*, vol. 115, p. 189-201.

HARPER, J.R. et M.C. MORRIS (2008). *British Columbia ShoreZone verification project*. Rapport préparé par Coastal and Ocean Resources Inc., Sidney (Colombie-Britannique), pour la Direction générale de la gestion intégrée des terres, ministères des Forêts, Victoria (Colombie-Britannique), 39 p.

HEJNOWICZ, A.P., H. KENNEDY, M.A. RUDD et M.R. HUXHAM (2015). « Harnessing the climate mitigation, conservation and poverty alleviation potential of seagrasses: prospects for developing blue carbon initiatives and payment for ecosystem service programmes », *Frontiers in Marine Science*, vol. 2, p. 1–22.

HOWES, D. (2001). « British Columbia biophysical ShoreZone mapping system: a systematic approach to characterize coastal habitats in the Pacific Northwest. Seattle », *Proceedings of the Puget Sound Research Conference*, 11 p.

MCLEOD, E., G.L. CHMURA, S. BOUILLON, R. SALM, M. BJÖRK, C.M. DUARTE, Catherine E. LOVELOCK, William H. SCHLESINGER et B.R. SILLIMAN (2011). « A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂ », *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 9, n° 10, p. 552–560. Doi:10.1890/110004.

NGDC (2003). *US Coastal Relief Model - Northwest Pacific and Central Pacific*. National Geophysical Data Center. National Oceanic and Atmospheric Administration. doi:10.7289/V5H12ZXJ. Disponible en ligne : www.ngdc.noaa.gov/mgg/coastal/grddas08/grddas08.htm; www.ngdc.noaa.gov/mgg/coastal/grddas07/grddas07.htm (site consulté le 5 décembre 2016).

NOAA (2016). *National Oceanic and Atmospheric Administration tsunami inundation digital elevation models (DEM)*. Disponible en ligne : www.ngdc.noaa.gov/mgg/inundation/tsunami/ (site consulté le 5 décembre 2016)

PSFMC (2004). *Pacific State Fishery Management Commission - groundfish essential fish draft EIS*. Disponible en ligne : www.oregonocean.info/index.php/home/downloads/maps-data/gis-data/shapefiles/biology-1/plants-1/352-alternative-b-4-seagrass-for-west-coast-groundfish-essential-fish-habitat-draft-eis-psmfc-2004 (site consulté le 5 décembre 2016).

PENDLETON, L., D.C. DONATO, B.C. MURRAY, S. CROOKS, W.A. JENKINS, S. SIFLEET, C. CRAFT, J.W. FOURQUREAN, J.B. KAUFFMAN, N. MARBÀ et P. MEGONIGAL (2012). « Estimating global “blue carbon” emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems », *PloS one*, vol. 7, n° 9, p. 1-7.

SHOREZONE (2014a). *Coastal habitat monitoring program*. Oregon Department of Fish and Wildlife. Disponible en ligne : <http://oregonshorezone.info/> (site consulté le 5 décembre 2016).

SHOREZONE (2014b). *Coastal habitat monitoring program – Rapport sommaire*. Oregon Department of Fish and Wildlife. Disponible en ligne : http://oregonshorezone.info/docs/Oregon_Summary_Report_14July14_final.pdf (site consulté le 5 décembre 2016).

SHOREZONE (2016). *Washington nearshore habitat inventory*. Disponible en ligne : www.dnr.wa.gov/programs-and-services/aquatics/aquatic-science/nearshore-habitat-inventory (site consulté le 9 septembre 2016).

YOUNG, D.R., P.J. CLINTON, H. LEE II, D.T. SPECHT et T.C. MOCHON COLLURA (2009). *Aerial measure of estuarine intertidal and shallow subtidal Zostera marina coverage*, dans (Lee II, H. et C.A. Brown, éd.) *Classification of regional patterns of environmental drivers and benthic habitats in Pacific Northwest estuaries*. Washington, DC, US Environmental Protection Agency Report EPA/600/R-09/140 (octobre 2009), p. 219 – 241. Disponible en ligne : <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1006Q2H.txt>.

YOUNG, D., P. CLINTON, D. SPECHT, T. COLLURA et I.I. LEE (2012). « Determining bathymetric distributions of the eelgrass *Zostera marina* L. in three turbid estuaries on the eastern North Pacific coast », *Botanica Marina*, vol. 55, p. 229-240.