

Protocole d'échantillonnage de sédiments d'herbiers marins et étude sur le terrain Colombie-Britannique, Washington et Oregon



Cette étude a été menée par :

F. Short (University of New Hampshire, États-Unis),
M. Hessing-Lewis (Hakai Institute, côte ouest, Colombie-Britannique),
C. Prentice (Hakai et Université Simon Fraser),
R. Sanders-Smith (Hakai et Université de la Colombie-Britannique),
J. Gaeckle (Washington State Department of Natural Resources) et
A. Helms (South Slough National Estuarine Research Reserve, Oregon).

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.*

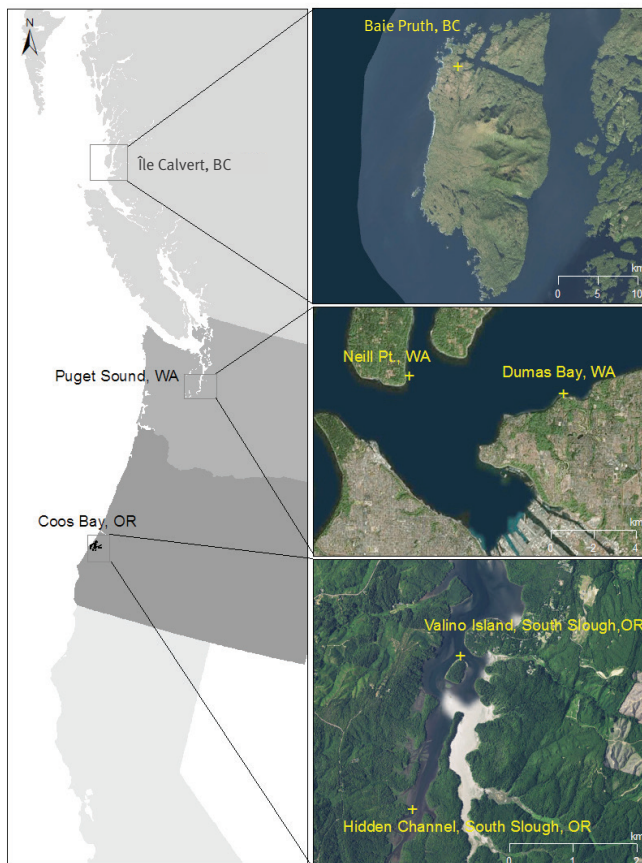
On appelle « carbone bleu » le carbone stocké dans les écosystèmes côtiers et marins. Ce n'est que récemment qu'on a reconnu l'importance des stocks de carbone bleu (ou du stockage du carbone) à l'échelle mondiale (Fourqurean et coll., 2012). Des méta-analyses révèlent que les écosystèmes qui stockent du carbone bleu, plus particulièrement les mangroves, les herbiers marins et les marais salés, jouent un rôle anormalement grand dans la séquestration du carbone par rapport à leur étendue 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). Bien qu'on reconnaisse 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). 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 habitats (Barbier et coll., 2011; Pendleton et coll., 2012).



Collecte de carottes de sédiments, Pruth Bay, Colombie-Britannique.

Afin d'inclure de façon précise le carbone bleu dans les bilans de carbone globaux, il faut quantifier l'étendue spatiale des habitats stockant du carbone bleu et déterminer la variabilité dans le stockage du carbone dans ces habitats et d'un type d'habitat à l'autre. Notre recherche visait deux objectifs : définir une méthode de collecte et de traitement des carottes de sédiments à une profondeur d'au moins un mètre dans les herbiers de zostère (*Zostera marina*), et fournir, à partir des carottes, des estimations du stockage et de la séquestration du carbone dans les herbiers de zostère de la Colombie-Britannique, au Canada, et des États de Washington et de l'Oregon, aux États-Unis. L'échantillonnage de carbone bleu dans les sédiments d'herbiers marins a été effectué dans un site de la Colombie-Britannique, deux sites de Puget Sound, dans l'État de Washington, et deux sites près de Coos Bay, en Oregon (figure 1). De longues carottes (jusqu'à 100 cm) ont été prélevées dans chacun des cinq sites. De plus, trois carottes de 10 cm ont été prélevées le long de transects dans les zones intertidales inférieure, centrale et supérieure des herbiers

Figure 1. Emplacement des sites de prélèvement de carottes de sédiments dans les herbiers marins



Remarque : Les carottes ont été prélevées dans un site de la baie Pruth (PB) de l'île Calvert en Colombie-Britannique, deux sites le long de la partie centrale de Puget Sound, dans l'État de Washington, (WA50.1 – Dumas Bay, WA50.2 – Neill Pt.) et deux sites près de South Slough, en Oregon (OR25.1 - Valino Island, OR HC – Hidden Creek).

marins de chaque site, et trois carottes de référence mesurant chacune 10 cm ont été prélevées juste au-delà de la limite des herbiers. (Nous parlerons plus loin de ces petites carottes.) Chaque site où des carottes de référence ont été prélevées est également un site de surveillance à long terme de SeagrassNet, et toutes les carottes de carbone bleu ont été recueillies parallèlement aux activités de surveillance de SeagrassNet.

Méthode de carottage établie pour la Colombie-Britannique

Les méthodes de carottage sédimentaire dans les herbiers établies par le groupe Hakai en Colombie-Britannique sont fondées sur les méthodes de carottage dans les marais du laboratoire des sciences du système terrestre de la Texas A&M University-Corpus Christi (TAMUCC, Université A&M du Texas à Corpus Christi) (<http://esslab.tamucc.edu/tools-marshcooring.html>); ces méthodes ont cependant été raffinées pour les prélèvements le long de Puget Sound, dans l'État de Washington, et de Coos Bay, en Oregon, pour réduire les problèmes de compactage des sédiments au moment de l'insertion du carottier et faciliter l'enlèvement des carottes. Les carottiers de sédiments ont été fabriqués à partir de tuyaux de PVC 40 d'un diamètre intérieur de 10,16 cm. Les tubes étaient équipés d'un système d'encapsulation en acier ou galvanisé, selon le design de la TAMUCC pour l'enlèvement du tube de carottage.

Un système d'encapsulation consiste en une pièce de métal dentelé qui se referme lorsque le tube est retiré des sédiments pour empêcher que les sédiments prélevés s'échappent par le fond du tube (figure 2). On peut utiliser un gabarit pour tailler de nouveaux systèmes d'encapsulation dans des feuilles de métal (épaisseur suggérée de 0,254 mm). Le gabarit est disponible à l'adresse suivante : <http://esslab.tamucc.edu/resources/corecatchertemplate.pdf>.

Le système d'encapsulation a été inséré dans une des extrémités du tube; pour le fixer, des œillets de 1/8 po ont été insérés dans des trous percés dans le PVC et le métal. Il convient de mentionner que l'utilisation de systèmes d'encapsulation pourrait être indiquée seulement dans certains sites et pour certaines longueurs de carottes. Leur utilité pour la conservation des sédiments varie d'un site à l'autre, en fonction des caractéristiques des sédiments. Le système d'encapsulation a été le plus utile pour l'échantillonnage de sédiments granuleux, qu'on trouve fréquemment dans les milieux physiquement dynamiques.

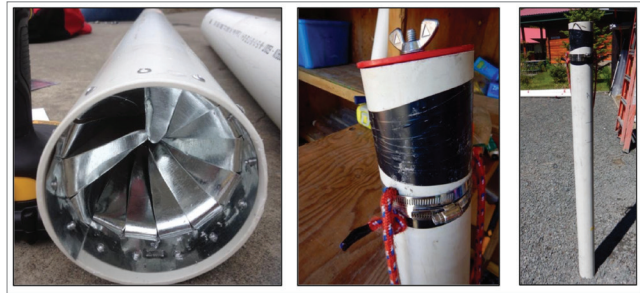
Les longs tubes de carottage faisaient 150 cm; par contre, il faut prévoir un dégagement d'environ 20 cm dans le haut du carottier et la perte de 10 à 15 cm de sédiments sous le système

d'encapsulation. De plus, il se peut que les sédiments soient compactés durant l'insertion. Il importe donc de tenir compte des pertes de sédiments par rapport à la longueur voulue des carottes au moment de déterminer la longueur de tuyau de PVC à couper. Une corde fixée près du haut du carottier avec des brides de serrage servait à retirer le tube (figure 2). Trois trous ont été percés à environ 2,5 cm du haut du carottier pour permettre l'évacuation de l'eau dans les cas où le carottier se trouve totalement ou partiellement sous l'eau, ce qui réduit la pression, permet au carottier de pénétrer les sédiments plus facilement et diminue le compactage de l'échantillon. Les trous percés ont été couverts de ruban isolant avant le retrait des sédiments pour créer un effet de succion. Dans les cas où de nombreuses carottes étaient prélevées en même temps au même endroit, les tubes avaient été étiquetés au préalable.

En Colombie-Britannique, le carottage s'est effectué du 5 au 12 mai 2016. Des carottiers ont été insérés dans les sédiments avec une masse de 17,6 kg. Une plateforme de métal ou de bois a ensuite été fixée sur le tuyau en PVC pour éviter que le tube de carottage craque durant l'insertion, et une ou deux personnes ont guidé le carottier dans les sédiments. Pour minimiser la perturbation, le carottier a été inséré lentement jusqu'à la profondeur voulue dans les sédiments. Nous avons mesuré le compactage durant l'insertion pour savoir comment les taux de compactage évoluaient en fonction de la profondeur; nous avons constaté que le compactage augmente avec la profondeur en raison de la friction de surface. Pour déterminer le compactage, nous avons mesuré la distance (cm) à partir de la partie supérieure de la carotte jusqu'à la surface des sédiments à l'intérieur du tube, et la distance de la partie supérieure de la carotte jusqu'à la surface des sédiments à l'extérieur du tube; nous avons ensuite soustrait la première mesure de la deuxième pour obtenir le taux de compactage. Les données relatives à l'emplacement par GPS, à la profondeur de l'eau, à la période de collecte, à la hauteur estimée de la marée et d'autres données sur les herbiers marins ont été consignées dans chaque site de carottage. Dans les États de l'Oregon et de Washington, un moteur vibratoire a été utilisé pour insérer le carottier dans les sédiments afin de limiter le compactage.

Pour retirer correctement le tube du carottier, il fallait une combinaison de succion adéquate dans le tube et l'activation du système d'encapsulation au moment précis. Pour améliorer la succion, tous les événements du carottier ont été recouverts de ruban isolant pour éviter les fuites d'air ou d'eau. Nous avons ensuite mis un bloc de compression sur le dessus du carottier, qui a été fixé avec un écrou à oreilles pour bien sceller (figure 2). Un tuyau ou un morceau de bois a été inséré dans la corde servant de poignée et deux personnes (une à chaque extrémité) ont tiré vers le haut pour extraire le carottier. Une

Figure 2. Détails du carottier de sédiments



Note: De gauche à droite : système d'encapsulation, corde pour retirer la carotte et carottier prêt à être utilisé

fois la succion relâchée près du fond, le tube s'enlevait avec un minimum d'effort physique.

Une fois le carottier retiré du trou, le fond du tube était rapidement bouché pour garder les sédiments à l'intérieur. Si le système d'encapsulation était bien installé, il suffisait cependant à maintenir l'essentiel des sédiments en place. Pour le transport, les tubes du carottier étaient placés à la verticale et de manière à minimiser la vibration.

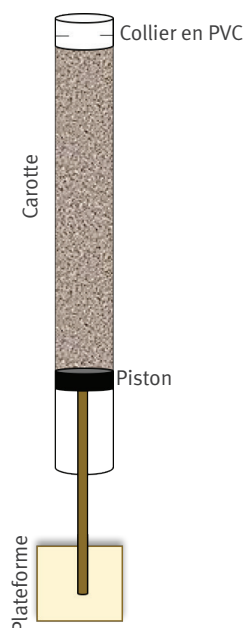
Les carottes de sédiments ont été extraites des tubes à l'aide d'une longue tige métallique (>1,5 m) à laquelle on avait fixé un piston de Teflon avec joint torique. Une petite quantité de graisse à vide de qualité pour laboratoire a été appliquée pour lubrifier le piston.

Le bouchon inférieur et le système d'encapsulation ont été retirés des longs tubes avant l'insertion du piston au fond du carottier. Le bouchon supérieur est demeuré en place pour maintenir la succion lors du retrait des œillets du système d'encapsulation à l'aide d'une perceuse et d'un chasse-clous et de l'installation du piston. Le bouchon inférieur et le système d'encapsulation ont été enlevés une fois les rivets retirés, et on a rapidement et soigneusement descendu le carottier sur le piston; pendant cette opération, deux personnes soutenaient la structure par en dessous et une autre personne, qui se trouvait dans une échelle, tenait le haut.

Des sections circulaires ont été découpées à intervalles déterminés. Chaque section a été mesurée à l'aide d'un collier d'un diamètre identique à celui de la carotte, puis déposée sur le dessus de la carotte extraite du carottier (figure 3). On a utilisé des colliers de hauteurs variées pour obtenir des échantillons de différentes hauteurs (p. ex., colliers de 2 cm, 5 cm, 6 cm et 10 cm) à différents intervalles de profondeur¹.

1. De façon générale, la couche de surface a été découpée en disque de 6 cm d'épaisseur. À 20 cm de profondeur dans la carotte, des disques de 3 cm d'épaisseur ont été découpés. Entre 20 et 50 cm, les disques faisaient 5 cm d'épaisseur. De 50 cm jusqu'au fond de la carotte, on a découpé des disques de 10 cm d'épaisseur.

Figure 3. Structure du système d'extraction



Pour extruder la carotte, nous l'avons soigneusement poussée sur le piston jusqu'à ce que les sédiments arrivent à la hauteur de la partie supérieure du collier. Une mince pièce de plastique a servi à couper la section de carotte. Si la surface de la carotte n'était pas plate à l'interface eau-sédiments, on a estimé une hauteur moyenne à partir des mesures prises autour du collier.

Chaque section de sédiments prise à différentes profondeurs a été placée dans un sac étiqueté, puis homogénéisée. S'il y avait des roches, des brindilles, des coquillages ou d'autres débris dans la moitié d'une section et la moitié d'une autre, tous les débris étaient regroupés dans la section qui en contenait le plus, et le tout était consigné. Des notes d'observation qualitative supplémentaires ont été prises durant le découpage des carottes, à savoir : les changements dans la composition, la couleur, l'odeur, la grosseur du grain des sédiments, ainsi que l'endofaune comme des myes ou des vers, les types de débris ou les obstructions à l'échantillonnage.

Une fois homogénéisées, les sections ont été analysées pour en déterminer la grosseur des grains, la teneur en carbone et en isotopes stables, la masse volumique apparente à sec et la géochronologie (analyse du ^{210}Pb). Des fractions de sédiments de 30 cc ont été collectés à l'aide d'une seringue de 30 ml dont l'extrémité avait été coupée (pour en faire un mini carottier), afin de mesurer la masse volumique apparente sèche; tous les échantillons destinés à l'analyse chimique et toutes les fractions ont été placés dans un petit sac Whirlpak. Le reste de l'échantillon a été placé dans un sac Ziploc

pour analyse de la grosseur des grains et archivage des sédiments excédentaires. Tous les échantillons ont été conservés sur glace dans une glacière durant le processus d'extraction. Le nom du site et l'emplacement de la carotte, la date d'extraction, le type d'échantillon et la taille de la section (p. ex., 8–10 cm) ont été inscrits sur les sacs d'échantillons.

Le poids humide (en grammes ou kilogrammes) des deux sacs (fraction de sédiments de 30 cc à des fins d'analyses chimiques et plus gros échantillon pour mesurer la grosseur des grains/archivage) préparés pour chaque intervalle de profondeur a été enregistré pour les calculs volumétriques et l'interprétation géochronologique des taux de carbone. Les échantillons de sédiments conservés pour analyse de la grosseur des grains/archivage ont été gardés au réfrigérateur, tandis que les autres échantillons ont été placés dans un congélateur à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

De plus, dans chaque site, six petites carottes ont été prélevées avec une seringue (10 cm de longueur, volume de 30 cc) parallèlement à la surveillance SeagrassNet. Trois échantillons ont été collectés le long de transects dans les zones intertidales inférieure, centrale et supérieure de l'herbier marin, et trois carottes de référence ont été prélevées tout juste au-delà de la limite de l'herbier. Les mini carottes ont été extraites directement dans les sacs étiquetés et conservées au congélateur jusqu'à leur traitement.

Modification de la méthode de carottage dans les États de Washington et de l'Oregon

Les méthodes de carottage et d'échantillonnage des sédiments ont été raffinées pour les États de Washington (dates d'échantillonnage : du 19 au 24 mai 2016) et de l'Oregon (dates d'échantillonnage : 25 et 26 mai 2016), à la suite de l'échantillonnage initial effectué en Colombie-Britannique. L'étude visait à obtenir des données sur le stockage de carbone dans les deux États à partir de carottes de sédiments prélevées en profondeur (~1 m) et de carottes peu profondes et réparties spatialement dans les herbiers marins. L'échantillonnage de sédiments d'herbiers marins contenant du carbone bleu a été effectué dans deux sites du Puget Sound, État de Washington, et deux sites de Coos Bay, en Oregon. Chaque site d'échantillonnage de carottes est également un site de surveillance à long terme SeagrassNet, et les carottes de sédiments contenant du carbone bleu ont été prélevées en même temps que la surveillance annuelle SeagrassNet. Dans chaque herbier, les échantillons prélevés incluaient des mini carottes (10 cm) extraites le long des transects de SeagrassNet et dans les sites de référence (trois répliqués chacun) et trois carottes

de sédiments contenant du carbone bleu (~1 m) prélevées à proximité du transect du site permanent de SeagrassNet.

Les échantillons de carottes ont été collectés de la même façon qu'en Colombie-Britannique, à l'exception du fait que le tube a été inséré dans les sédiments avec un moteur vibratoire (un marteau perforateur *Milwaukee*), qui a permis de pousser le tube dans les sédiments en exerçant une force de compactage moindre qu'avec une masse (voir la figure 4). (Les essais effectués dans l'État de Washington lors de l'insertion du carottier pour déterminer le degré de compactage résultant de l'utilisation de la masse par rapport au moteur vibratoire ont montré un taux de compactage type de 18–27 % avec la masse et de 4–10 % avec le moteur vibratoire.)

La technique de retrait du tube d'échantillonnage a aussi été améliorée après le carottage en Colombie-Britannique. Avant l'extraction du carottier, un tuyau de 1,5 m (section d'un diamètre de 1,27 cm d'un conduit en acier) a été fixé au bas du tuyau avec un boulon de carrosserie de 2,5 cm. Le tuyau a été poussé dans les sédiments le long de la partie extérieure du carottier, jusqu'à ce que la partie supérieure arrive à égalité avec le haut du carottier. En remontant le tuyau de 1,27 cm, on a libéré le boulon de sorte que le tuyau devenait une buse permettant à l'air de relâcher la succion à la base de la carotte. On a retiré le tube selon la méthode utilisée en Colombie-Britannique. De même l'extraction des carottes s'est faite selon le même protocole. Plusieurs des carottes de sédiments prélevées dans l'État de Washington étaient perturbées par un substrat rocheux et la présence de coquillages de grande dimension et de palourdes royales.

Figure 4. Carottage de sédiments à l'aide d'un marteau perforateur



Remarque : Le carottage de sédiments a été grandement facilité par l'utilisation d'un moteur vibratoire - un marteau perforateur à batterie - placé sur une barre de métal posée sur le dessus du tube. En appliquant une pression, nous avons lentement descendu le tube dans les sédiments avec un minimum de compactage.

Méthodes de laboratoire et résultats

Les analyses en laboratoire visaient à (1) déterminer les stocks de carbone sédimentaire (en kg C/m²) jusqu'à 1 m sous la surface des sédiments dans les herbiers marins et les herbiers marins de référence, (2) déterminer les sources de carbone sédimentaire organique, (3) calculer les taux d'accumulation de sédiments et de carbone (g C/m²/année) dans les différentes régions, et (4) décrire les caractéristiques des sédiments qui pourraient aider à expliquer l'écart dans les stocks de carbone organique.

Les méthodes décrites ci-après suivent les procédures mentionnées au début de ce rapport. Les carottes ont été extraites dans les sites et placées dans des sacs étiquetés : a) un échantillon de 30 cc pour les analyses en laboratoire et b) le reste de la section dans un plus grand sac pour analyse de la grosseur des grains et de sédiments supplémentaires. Les échantillons de sédiments de 30 cc ont été conservés au congélateur à -20 °C. Les autres échantillons (analyse de la grosseur des grains) doivent être conservés au réfrigérateur ou au congélateur, mais ne doivent pas être dégelés et recongelés plusieurs fois. Les échantillons étaient congelés durant le transport vers l'Université de la Colombie-Britannique (UBC) et n'ont été sortis du congélateur que pour la préparation du processus de lyophilisation. Les échantillons ont été traités au laboratoire de géochimie de la faculté des sciences de la terre et des océans et au Stable Isotope Facility (laboratoire des isotopes stables) de la faculté de la conservation et de la foresterie) de l'Université de la Colombie-Britannique.

La première étape des analyses en laboratoire consistait à assécher les échantillons de 30 cc. Dans les cas où le poids humide n'avait pas été noté lors de l'échantillonnage, il a été obtenu avant le séchage pour le calcul de la porosité et de la teneur en eau. Les échantillons ont été asséchés dans un lyophilisateur Edwards Modulyo[®] pendant environ une semaine, ou jusqu'à ce qu'ils soient complètement secs. On a entrouvert les sacs Whirlpak ou Ziploc avant de les placer dans le lyophilisateur pour s'assurer que les échantillons seraient complètement asséchés. Une fois cette étape terminée, on a établi un poids en milligramme pour chaque échantillon de 30 cc en utilisant une balance Mettler Toledo XP205.

Une fois le poids sec établi, chaque échantillon a été réduit en une fine poudre à l'aide d'un broyeur Herzog HSM 100. La présence de particules de grande taille (p. ex., pierres, morceaux de bois, endofaune, matière végétale morte, coquillages), et toute autre observation générale sur l'échantillon (p. ex., sédiment très fin, coquillages sablonneux) avaient été préalablement notées. Toute la biomasse vivante visible des herbiers (pousses, racines

ou rhizomes) a été retirée des échantillons; nous reconnaissons tout de même que les échantillons pourraient contenir de très petits fragments de matière vivante (comme des racines), surtout les échantillons de surface. Les contenants utilisés pour le broyage ont été nettoyés à fond entre chaque échantillon pour prévenir toute contamination croisée. Chaque échantillon a été broyé pendant trois minutes. Dans le cas des échantillons contenant de grandes quantités de coquillages ou des particules plus grosses, il a fallu diviser l'échantillon en deux ou trois plus petits échantillons pour s'assurer de bien le broyer (le tout a été remélangé après le broyage). Les échantillons broyés ont été remis dans leur sac respectif.

Les échantillons broyés ont fait l'objet de quatre analyses différentes. (Voir le tableau en annexe qui contient la liste de tous les échantillons de carottes, les échantillons Seagrass-Net de 30 cc et les échantillons de référence, ainsi que les analyses effectuées sur chacun d'eux.) Les quatre analyses étaient : (1) analyses élémentaires du carbone total (% C) et de l'azote (% N), (2) analyses coulométriques pour déterminer le carbone inorganique total (% TIC, selon l'acronyme anglais), (3) analyses des isotopes stables pour le $\delta^{13}\text{C}$ et le $\delta^{15}\text{N}$, et (4) analyses du ^{210}Pb et du ^{226}Ra pour établir l'âge des sédiments et les taux d'accumulation de sédiments.

Les résultats des analyses montrent que, en moyenne, le pourcentage d'azote et de carbone total était le plus élevé dans le site de l'Oregon, suivi par la Colombie-Britannique, puis par Washington. Les valeurs moyennes \pm l'erreur type, pour toutes les carottes longues et les mini carottes de chaque région, étaient de $1,31 \pm 0,053$, $0,67 \pm 0,060$ et $0,32 \pm 0,025$ % de carbone et $0,08 \pm 0,004$, $0,06 \pm 0,005$ et $0,02 \pm 0,001$ % d'azote pour l'Oregon, Washington et la Colombie-Britannique, respectivement.

La teneur en carbone des sédiments et le pourcentage de carbone inorganique étaient globalement plutôt faibles (<1 % dans presque tous les cas), mais pour certains échantillons, plus particulièrement ceux du site de Washington, le carbone total était considérablement faible et, par conséquent, le carbone inorganique comptait pour 20 à 60 % du carbone total. On a généralement observé des valeurs élevées de carbone inorganique total (TIC) lorsqu'il y avait des coquillages bivalves dans les sections. Les valeurs moyennes en % de TIC \pm l'erreur type, pour toutes les carottes longues et les mini carottes de chaque région, étaient de $0,017 \pm 0,003$, $0,099 \pm 0,024$ et $0,068 \pm 0,015$ pour l'Oregon, la Colombie-Britannique et l'État de Washington, respectivement, ce qui représentait en moyenne 1,3, 14,7 et 21 % du carbone total pour l'Oregon, la Colombie-Britannique et l'État de Washington, respectivement.

Pour calculer le pourcentage de carbone inorganique de chaque sous-section de chaque carotte, nous avons soustrait le pourcentage de carbone inorganique du pourcentage de carbone total. Les valeurs moyennes en pourcentage de carbone organique \pm l'erreur type, pour toutes les carottes longues et les mini carottes de chaque région, étaient de $1,285 \pm 0,053$, $0,569 \pm 0,051$ et $0,248 \pm 0,053$ pour l'Oregon, la Colombie-Britannique et l'État de Washington, respectivement.

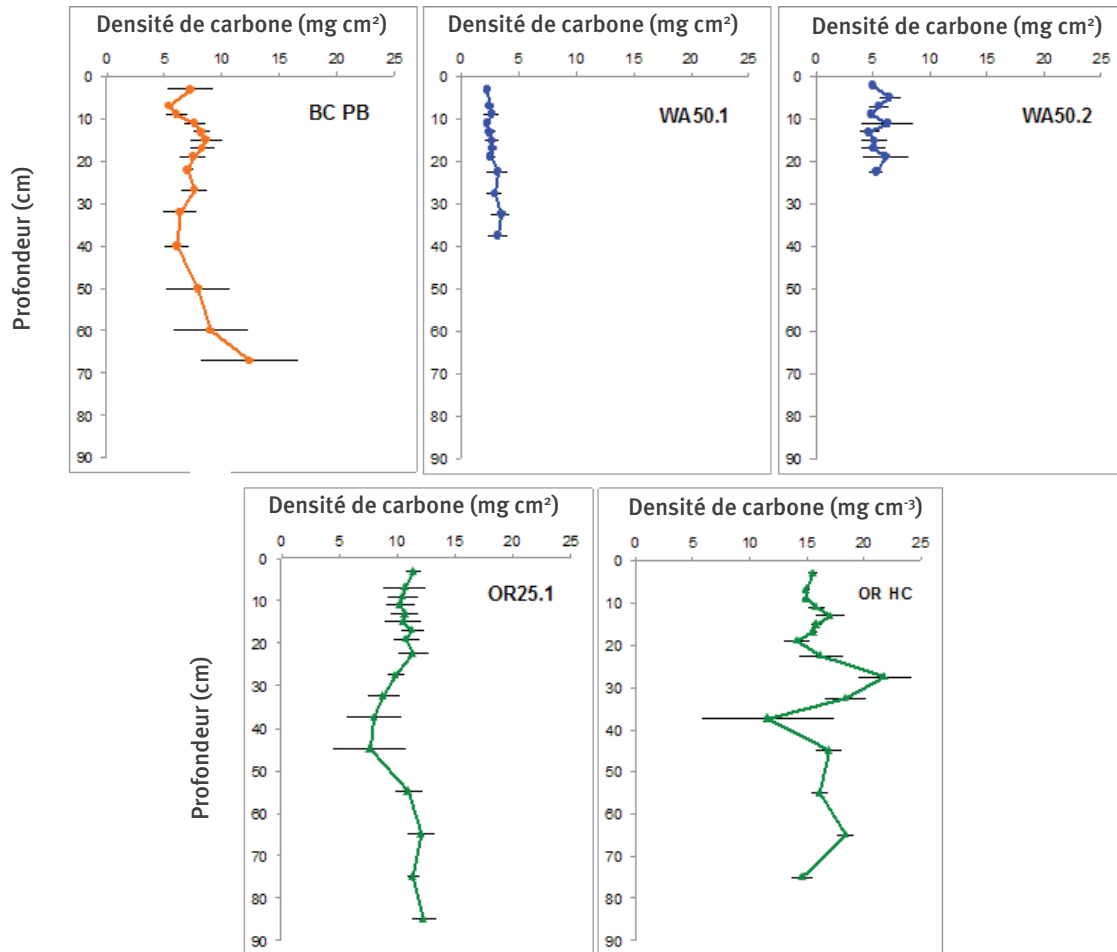
Tous les sédiments mesurés étaient surtout composés de sable fin; la surface des sédiments du site de Hidden Creek en Oregon (OR HC) contenait le plus de boue (25–46 %) et le moins de sable grossier (26 %). Le plus fort pourcentage de sable se retrouvait dans le site WA50.2, en Colombie-Britannique et dans le site OR 25.1, où la fraction sableuse était la même. Le site WA50.1 contenait la plus faible proportion de boue (2 %) et la plus grande quantité de sable grossier (35 %).

La masse volumique apparente moyenne des sédiments des herbiers de zostère dans les cinq sites variait de $\sim 1,0$ à $1,6$ g/m³, et n'indiquait aucune tendance constante avec la profondeur de la carotte. Les poids humide et sec des échantillons de 30 cc ont servi à calculer la masse volumique apparente sèche et le pourcentage d'humidité. Le site OR HC affichait une masse volumique apparente plus faible que tous les autres sites. La densité du carbone sédimentaire (mg C m⁻³) a été calculée à partir de la masse volumique apparente et de la teneur en carbone des sédiments (figure 5).

Pour le $\delta^{13}\text{C}$, les valeurs de l'Oregon étaient en moyenne plus négatives, suivies de celles de l'État de Washington et de la Colombie-Britannique, légèrement moins négatives (figure 6); les valeurs moyennes \pm l'erreur type étaient de $-23,19 \pm 0,275$, $-19,48 \pm 0,863$ et $-16,23 \pm 0,635$ pour l'Oregon, l'État de Washington et la Colombie-Britannique, respectivement. Pour l'ensemble des échantillons et des sites, la fourchette allait de $-11,94$ à $-24,26$ ‰ $\delta^{13}\text{C}$. En ce qui a trait aux valeurs du $\delta^{15}\text{N}$, ce sont celles de la Colombie-Britannique qui étaient les plus positives, suivies de celles de l'Oregon et de Washington; les valeurs moyennes \pm l'erreur type étaient de $7,18 \pm 0,201$, $6,94 \pm 0,125$ et $6,80 \pm 0$ pour la Colombie-Britannique, l'Oregon et Washington, respectivement. Les valeurs moyennes étaient similaires d'un échantillon et d'un site à l'autre, soit de $6,3$ à $8,2$ ‰ $\delta^{15}\text{N}$.

Pour les trois sites, les isotopes ^{13}C et ^{15}N des sédiments de zostères montrent clairement des sources de carbone distinctes, tandis que seuls la Colombie-Britannique et l'État de Washington montrent des différences dans les sources d'azote. Les

Figure 5. Densité de carbone dans les carottes de sédiments extraites des sites en Colombie-Britannique, dans l'État de Washington et en Oregon.



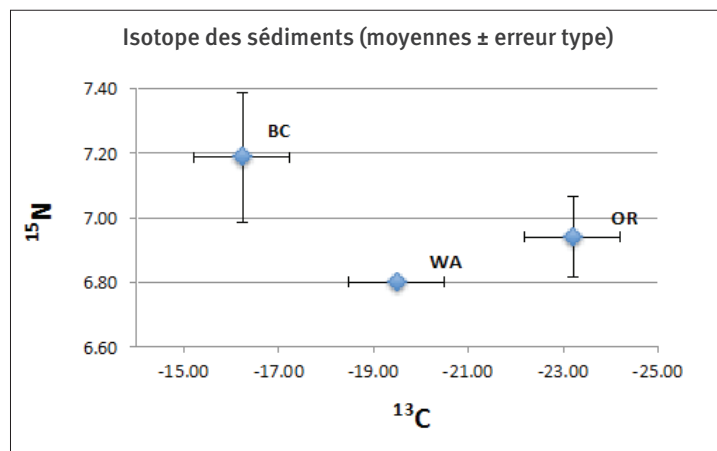
valeurs de ¹³C dans les herbiers marins de Washington et de la Colombie-Britannique sont comparables à celles des sédiments de zostère (Rohr et coll., 2016). La valeur de ¹³C pour le site de l'Oregon est considérablement inférieure à celles de Washington et de la Colombie-Britannique (figure 6).

À partir du taux d'accumulation de la masse de sédiments obtenu par l'analyse du ²¹⁰Pb, avec la fraction de carbone organique, nous avons déterminé les taux d'accumulation de carbone à différentes profondeurs pour cinq carottes longues. (Voir la colonne ²¹⁰Pb du tableau en annexe.) L'accumulation de sédiments dans les sites de la Colombie-Britannique et de l'Oregon, mesurée par la datation au ²¹⁰Pb, variait d'un site à l'autre et semblait liée à l'étendue de zostère à différentes périodes. Le site de la Colombie-Britannique affichait un taux d'accumulation de sédiments de faible à

constant dans ce qui est maintenant un herbier de zostère à couverture moyenne; il y a eu une accumulation rapide des années 1950 aux années 1990, suivie par une période de très forte accumulation vers 2004, puis d'un déclin en 2016. Au site de Hidden Creek, en Oregon (OR HC), il y a eu une accumulation modérée de sédiments aux endroits où la zostère était clairsemée en 2016. Au site SeagrassNet de South Slough, OR 25.1, il y a une forte accumulation de sédiments dans un herbier de zostère dense; à cet endroit, le taux d'accumulation des sédiments augmente depuis le début des années 1900.

L'accumulation de carbone correspondait au taux global d'accumulation de sédiments. Lorsque nous avons comparé les stocks de carbone dans la tranche supérieure de 18 cm plutôt que la tranche supérieure de 10 cm de toutes les

Figure 6. Données sur les isotopes du carbone (^{13}C) et de l'azote (^{15}N) pour les sédiments des herbiers de zostère dans les sites de la Colombie-Britannique, de Washington et de l'Oregon



carottes, nous avons observé la même tendance d'accumulation de carbone; les deux carottes de l'État de Washington contenaient le moins de carbone et celles de Hidden Creek en Oregon (2 carottes) en contenaient le plus (tableau 1). La comparaison entre les sites de l'Oregon et de la Colombie-Britannique a révélé que le taux d'accumulation était le

plus faible dans le site canadien (1 carotte) et le plus élevé dans le site OR 25.1. Il a été impossible d'obtenir de l'information sur la datation ou les taux d'accumulation de carbone à partir des carottes des sites de l'État de Washington, car les données sur le ^{210}Pb correspondaient au niveau naturel et aucun signal n'a pu être détecté.

Tableau 1. Pourcentage de la couverture de zostère, stocks de carbone et taux d'accumulation de carbone pour la Colombie-Britannique et deux sites de l'Oregon, à partir des longues carottes prélevées dans chaque site ($\text{t C km}^{-2} \text{ an}^{-1} = \text{g C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$)

Site	Couverture de zostère %	Stock de carbone (tranche sup. de 18 cm) kg C m^{-2}	Stock de carbone (tranche sup. de 10 cm) kg C m^{-2}	Taux d'accumulation de carbone (tranche sup. de 10 cm) $\text{g C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$
BC PB	65	1,37	0,62	7,8
WA 50.1	34	0,42	0,22	-
WA 50.2	10	0,71	0,27	-
OR 25.1	70	2,35	1,32	32,4
OR HC	25	2,81	1,56	26,4

Conclusions

Le protocole de prélèvement de carottes de sédiments en profondeur dans les herbiers de zostère (*Zostera marina*), décrit précédemment a été utilisé pour prélever des carottes de sédiments dans des herbiers de zostère de la Colombie-Britannique et des États de Washington et de l'Oregon afin d'évaluer les taux de séquestration et de stockage du carbone dans ces habitats du Pacifique Nord-Ouest en Amérique du Nord. La teneur en carbone des sédiments était relativement constante dans les répliqués, mais différait entre les États et la province, de même qu'entre les différents sites. En Oregon, le site Hidden Creek se démarque des autres sites étudiés par une teneur en carbone considérablement supérieure dans tous les profils de profondeur. La teneur en carbone des couches de surface observée dans les cinq carottes variait de 0,16 à 1,92 %. La teneur en carbone des sédiments de surface est similaire à celle trouvée dans les herbiers de zostère de la Finlande et du Danemark (Röhr et coll., 2016).

La masse volumique apparente est une mesure du poids de la portion non aqueuse des sédiments par unité de volume. Une faible masse volumique apparente indique une plus forte teneur en eau. Lorsqu'elle est connue, la masse volumique apparente permet de calculer la quantité de carbone par volume de sédiments. Les sédiments à plus forte teneur en carbone retiennent plus d'eau et ont donc une masse volumique apparente plus faible. Les masses volumiques apparentes à sec mesurées en Colombie-Britannique, dans l'État de Washington et en Oregon sont représentatives de celles d'autres herbiers de zostère (Rohr et coll., 2016), bien que celle du site Hidden Creek, en Oregon, soit inférieure à celle des autres sites de notre étude. Les profils de profondeur de la masse volumique apparente montrent un milieu sédimentaire différent depuis un siècle dans le site Hidden Creek par rapport à nos autres sites. Les données sur la grosseur des grains de sédiments des différents sites montrent clairement le caractère plus boueux des sédiments du site Hidden Creek, qui se trouve dans un canal reculé (figure 1), dans la zostère et dans les zones de référence non végétalisées.

La densité de carbone, calculée à partir de la masse volumique apparente et sa fraction de carbone, constitue une mesure utile de la distribution de carbone dans le profil de sédiments (figure 5). Ces profils montrent clairement la quantité moyenne de carbone dans les différents sites de carottage et dans les couches de sédiments de chaque site. Le site OR HC présente la plus forte densité de carbone sur toute la longueur de la carotte, avec une moyenne de 16 mg C m⁻³. En comparaison, les valeurs les plus faibles ont été observées dans le site WA50.1, où la moyenne de la densité de carbone s'établissait à 2,8 mg C m⁻³ sur toute la longueur de la carotte.

L'analyse du ²¹⁰Pb d'une carotte de sédiments de chacun des sites a permis d'évaluer les taux d'accumulation de carbone dans les sédiments. L'âge des sections de carotte a été déterminé par une mesure de la quantité excédentaire de ²¹⁰Pb par rapport aux isotopes naturels du Pb. L'analyse des sédiments des sites de l'Oregon et de la Colombie-Britannique montre un taux d'accumulation plus élevé aujourd'hui que dans un passé récent. Dans ces sites, la profondeur de carotte maximale remonte aux années 1950 pour la Colombie-Britannique, aux années 1930 pour le site OR HC et à 1910 pour le site OR25. Dans le cas de Puget Sound, dans l'État de Washington, la teneur excédentaire en ²¹⁰Pb était trop faible pour obtenir des dates des carottes de sédiments, vraisemblablement en raison de la forte teneur en sable des sédiments (>95 %) et de la faible teneur en carbone organique (0,02 %). Nous avons calculé le taux d'accumulation de carbone et constaté qu'il était le plus élevé dans le site OR25.1, soit 32,4 g C m⁻² an⁻¹, et le plus faible dans le site de la Colombie-Britannique, soit 7,8 g C m⁻² an⁻¹ (tableau 1). Le stockage de carbone connexe dans la tranche supérieure de 18 cm des sédiments dans ces trois sites est de 1,4, 2,4 et 2,8 kg C m⁻² pour les sites de la Colombie-Britannique, OR HC et OR25.1, respectivement. Le stockage de carbone pour des profondeurs de sédiments comparables dans les sites de l'État de Washington était considérablement plus faible, soit 0,43 et 0,71 kg C m⁻² pour les sites WA50.1 et WA50.2, respectivement.

Les taux de séquestration du carbone (taux d'accumulation) et les valeurs de stockage du carbone fournissent des mesures concrètes de la capacité de séquestration de carbone bleu des trois emplacements, mais ne sont pas représentatifs de tout le territoire des régions. Il faut mener d'autres études dans différents types d'habitats de zostère et dans l'ensemble de ces emplacements pour fournir une échelle de valeurs représentative. Il y a lieu de tenir compte

de certaines préoccupations dans les prochaines études, afin d'améliorer les mesures du carbone sédimentaire : pour atténuer le compactage des carottes dû à l'insertion vigoureuse du tube dans les sédiments, on peut utiliser un marteau à vibration plutôt qu'une masse, et éviter d'enfoncer le carottier en deçà de la couche de sédiments de zostère; la perte d'eau interstitielle après le prélèvement de la carotte, qui influe sur les mesures de l'humidité et de la masse volumique apparente; la présence de coquillages, de roches et de myes dans la carotte.

Nous avons analysé les isotopes stables des sédiments pour connaître l'origine du carbone sédimentaire. Une comparaison des isotopes de l'azote (N) à ceux du carbone (C) permet d'examiner les matières sources et montre nettement des sources de ^{13}C dans les différents endroits. L'écart entre les valeurs de ^{15}N est beaucoup moins grand. Pour comprendre les sources qui pourraient être en cause dans les différents endroits, nous avons superposé nos données sur les isotopes à un schéma des domaines sources dérivé de Cloern et coll. (2002).

En Oregon, la matière organique sédimentaire provient essentiellement de la zostère, avec une partie qui pourrait provenir de plantes à C_4 de marais salés; dans le site de l'État de Washington, les sédiments sur la rive exposée de Puget Sound sont probablement un mélange de zostère, de phytoplancton et d'algues; et dans le site de la Colombie-Britannique, la zostère, les plantes marécageuses à C_4 et le phytoplancton prédominent. La distribution des isotopes ^{15}N dans les trois sites indique qu'ils se trouvent tous dans la fourchette inférieure des valeurs de zostère, ce qui donne à entendre que ces herbiers de zostère sont peu touchés par des sources d'azote anthropiques. Les valeurs excédentaires de ^{13}C pour la Colombie-Britannique et l'État de Washington correspondaient aux fourchettes calculées pour des sites échantillonnés dans la Baltique (Röhr et coll., 2016), mais les valeurs des sites de l'Oregon, situés dans un terrain marécageux entouré de marais salé, étaient quelque peu supérieures et ces sites contenaient plus de ^{13}C .

Les résultats montrent que les habitats de zostère séquestrent et stockent du carbone non seulement des zostères, mais aussi de l'habitat environnant. C'est en Oregon qu'on trouve le plus haut taux de stockage de carbone par mètre carré et les taux les plus élevés de séquestration; les taux de la Colombie-Britannique correspondent à la moitié de ceux de l'Oregon, et ceux de l'État de Washington, à la moitié de ceux de la Colombie-Britannique. Or, compte tenu des caractéristiques différentes de ces sites – grosseurs des grains de sédiments très différentes, sources de carbone organique et conditions apparentes d'exposition aux vagues – il est probable que les différences entre la Colombie-Britannique, Washington et l'Oregon ne soient pas le fait de la séparation géographique. Nos constatations donnent donc à penser que cette région géographique a un taux de stockage minimum de $0,4$ à $2,8 \text{ kg C m}^{-2}$ et un taux de séquestration minimum de $7,8$ à $32,4 \text{ g C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Nos constatations sur la séquestration sont comparables à celles concernant l'estuaire K'ómoks, en Colombie-Britannique, avec $22,8 \text{ g C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (Hodgson et Spooner, 2016) et celles de la Finlande, $5,2 \text{ g C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, et de la Norvège, $35,2 \text{ g C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (Röhr et coll., 2016).

Les méthodes d'échantillonnage décrites dans ce document, qui utilisent des tubes de carottage peu coûteux, des appareils d'extrusion assemblés, un moteur vibratoire pour éviter le compactage de la carotte lors de l'insertion et un tube de type buse pour l'extraction, ont permis d'évaluer le carbone piégé dans divers habitats de zostère dans le Pacifique Nord-Ouest. Les résultats obtenus ont permis d'établir des mesures préliminaires de carbone bleu dans cette région et de calculer les taux de stockage et de séquestration de carbone.

Remerciements

Merci aux nombreux scientifiques et bénévoles qui ont collaboré à ce projet : Dante Torio (University of New Hampshire, États-Unis), les scientifiques, membres du personnel et bénévoles du Hakai Institute (côte ouest de la Colombie-Britannique), de l'Université de la Colombie-Britannique, du *Washington State Department of Natural Resources* (Département des ressources naturelles de l'État de Washington) de la Western Washington University et de la South Slough National Estuarine Research Reserve (Oregon). Nous remercions tout particulièrement Cathy Short pour la rédaction et la révision.

Références

- BARBIER, E.E.B., S.D.S. HACKER, C. KENNEDY, E.W. KOCH, A.C. STIER et B.R. SILLIMAN (2011). « The value of estuarine and coastal ecosystem services », *Ecological Monographs*, vol. 81, n° 2.
- CLOERN, J.E., E.A. CANUEL et D. HARRIS (2002). « Stable carbon and nitrogen isotope composition of aquatic and terrestrial plants of the San Francisco Bay estuarine system », *Limnol. Oceanogr.*, vol. 47, p. 713–729.
- 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.
- FOURQUREAN, J.W., C.M. DUARTE, H. KENNEDY, N. MARBÀ, M. HOLMER, M.A. MATEO, 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. MCGLATHERY et O. SERRANO (2012). « Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. », *Nature Geoscience*, vol. 5, n° 7, p. 505–509.
- 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 (juin), p. 1–22.
- HODGSON, C. et A. SPOONER (2016). *The K'ómoks and Squamish Estuaries: A Blue Carbon Pilot Project 2014*. Rapport final au Partenariat nord-américain pour l'action communautaire en environnement (PNAACE), Comox Valley Project Watershed Society.
- MACREADIE, P.I., M.E. BAIRD, S.M. TREVATHAN-TACKETT, A.W.D. LARKHAM et P.J. RALPH (2014). « Quantifying and modeling the carbon sequestration capacity of seagrass meadows - A critical assessment », *Marine Pollution Bulletin*, vol. 83, n° 2, p. 430–439.
- MCLEOD, E., G.L. CHMURA, S. BOUILLON, R. SALM, M. BJÖRK, 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.
- PENDLETON, L., D.C. DONATO, B.C. MURRAY, S. CROOKS, W.A. JENKINS, S. SIFLEET et A. BALDERA (2012). « Estimating global “blue carbon” emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems », *PloS One*, vol. 7, n° 9.
- RÖHR M.E., C. BOSTRÖM, P. CANAL-VERGÉS et M. HOLMER (2016). « Blue carbon stocks in Baltic Sea eelgrass (*Zostera marina*) meadows », *Biogeosciences*, vol. 13, p. 6139–6153.

Annexe : Carottes prélevées et analysées

Région	Carottes	Longueur totale de la carotte (cm)	Nombre de sous-sections	Carbone total	Carbone inorganique total	Datation par ²¹⁰ Pb	Isotopes stables
Colombie-Britannique	Pruth Bay A	80	16	✓	✓	✓	✓
	Pruth Bay B	74	16	✓	✓		✓
	Pruth Bay C	70	15	✓	✓		✓
	SeagrassNet	10	0 (3 répliquats)	✓	✓		✓
	Référence	10	0 (3 répliquats)	✓	✓		✓
Washington	50.1-1	57	16	✓	✓	✓	✓
	50.1-2	57	16	✓	✓		✓
	50.1-3	40	12	✓	✓		✓
	50.2-1	10	4	✓	✓		✓
	50.2-2	25	10	✓	✓		✓
	50.2-3	25	10	✓	✓	✓	✓
	SeagrassNet	10	0 (3 répliquats)				
	Référence	10	0 (3 répliquats)	✓	✓		✓
Oregon	HC-1	100	18	✓	✓	✓	✓
	HC-2	78	16	✓	✓		✓
	HC-3	100	18	✓	✓		✓
	SeagrassNet	10	0 (2 répliquats)	✓	✓		✓
	Référence	10	0 (3 répliquats)	✓	✓		✓
	25.1-1	90	17	✓	✓	✓	✓
	25.1-2	105	19	✓	✓		✓
	25.1-3	100	18	✓	✓		✓
	SeagrassNet	10	0 (3 répliquats)	✓	✓		✓
	Référence	10	0 (3 répliquats)	✓	✓		✓