



## APPROCHE DES MÉTHODES DE MODÉLISATION ET DE SURVEILLANCE POUR ÉVALUER LA CAPACITÉ DE CHARGE ÉCOLOGIQUE DES BIVALVES DANS LE DÉTROIT DE BAYNES (COLOMBIE-BRITANNIQUE)



Plateau d'huîtres dans le détroit de Baynes (photo gracieusement fournie par Terri Sutherland).

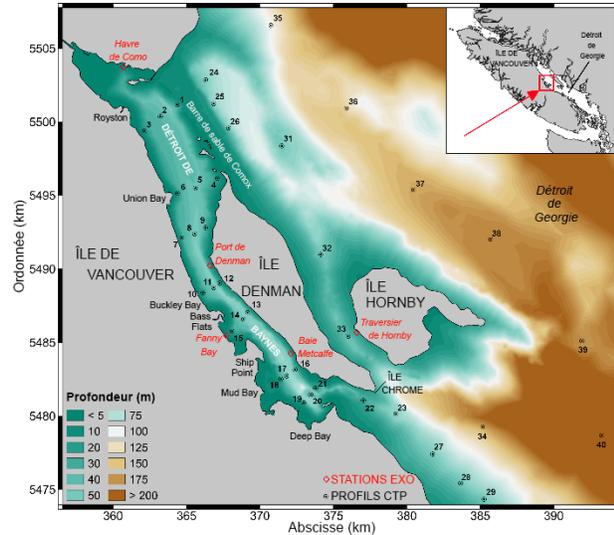


Figure 1. Carte du détroit de Baynes (Colombie-Britannique) indiquant la bathymétrie et les stations hydrodynamiques.

### Contexte :

En Colombie-Britannique, la conchyliculture est principalement pratiquée sur la côte ouest de l'île de Vancouver et dans le détroit de Georgia, la plupart des sites de production les plus prolifiques se trouvant dans les secteurs du détroit de Baynes, de l'île Cortes et de l'inlet Okeover. Même si la conchyliculture se pratique depuis plus de 100 ans en Colombie-Britannique, peu de recherches ont été effectuées sur la capacité écologique de production conchylicole dans ces prolifiques baies abritées. La production conchylicole dépend d'un équilibre entre la qualité de l'eau, l'hydrodynamique et l'approvisionnement en nourriture (plancton). Une évaluation de la capacité de charge est nécessaire pour évaluer cet équilibre et déterminer toute limite potentielle découlant d'une concurrence pour les ressources ou d'un changement dans le fonctionnement de l'écosystème. La Direction de la gestion des pêches – Aquaculture de Pêches et Océans Canada (MPO) a demandé à la Direction des sciences 1) d'évaluer la capacité de charge écologique de la conchyliculture dans le détroit de Baynes à l'échelle de la baie, à l'aide d'un modèle couplé hydrodynamique et biogéochimique à haute résolution et spatialement explicite (modèle des volumes finis d'océanologie côtière [FVCOM] – modèle de l'écosystème de la culture des bivalves [BiCEM]) et 2) de recommander des méthodes de surveillance, y compris des protocoles de terrain et de laboratoire, à l'intention du personnel réglementaire, industriel et scientifique.

Le présent avis scientifique découle de l'examen par les pairs régional(e) du 8 au 12 mars 2021 sur les Méthodes de modélisation et de surveillance visant à évaluer la capacité de charge écologique de la

conchyliculture. Toute autre publication découlant de cette réunion sera publiée, lorsqu'elle sera disponible, sur le [calendrier des avis scientifiques de Pêches et Océans Canada \(MPO\)](#).

## SOMMAIRE

- Les évaluations de la capacité de charge écologique sont généralement réalisées à l'aide de modèles mathématiques qui intègrent des interactions complexes notamment de facteurs physiques et biologiques. En raison de l'importance de l'influence des conditions environnementales locales sur le fonctionnement des écosystèmes, les études sur la capacité de charge sont propres à chaque site. Ces modèles sont réalisés en fonction de chaque site et sont validés à l'aide de données d'observation.
- Cette évaluation s'est appuyée sur deux modèles numériques pour intégrer ces interactions complexes à l'aide d'un modèle 4D à haute résolution. Le modèle des volumes finis d'océanologie côtière (FVCOM) a été combiné à un modèle de l'écosystème de la culture des bivalves (BiCEM) faisant notamment appel à la théorie du bilan énergétique dynamique (BED) pour simuler la physiologie des bivalves et leurs interactions avec l'écosystème.
- Ce modèle de capacité de charge s'est concentré sur la biogéochimie et l'écosystème pélagique des niveaux trophiques inférieurs (plancton et seston organique) et sur leur interaction avec les bivalves d'élevage, en mettant l'accent sur la mesure dans laquelle les bivalves utilisent ces ressources alimentaires. Le modèle a incorporé des huîtres creuses du Pacifique d'élevage et des palourdes japonaises sauvages et d'élevage afin de représenter une plus grande diversité de la population de bivalves.
- Cinq scénarios ont été envisagés pour évaluer les changements prévus par le modèle des propriétés de l'eau décrits ci-dessus : 1) aucune aquaculture (concessions supprimées); 2) conditions actuelles (production aquacole de 2016-2017); 3) conditions actuelles plus production maximale de toutes les concessions; 4) expansion (nouvelles demandes); et 5) expansion plus production maximale de toutes les concessions.
- Les scénarios ont fourni des prédictions modélisées des changements de l'écosystème pélagique (chlorophylle-a, productivité primaire nette, carbone organique particulaire, azote organique particulaire et zooplancton) attribuables aux populations de bivalves d'élevage du détroit de Baynes, en fonction de la variation naturelle et du tiers de la production primaire. Les seuils des changements inacceptables sont définis par la direction en tenant compte du contexte local.
- La capacité de charge écologique des bivalves dans le détroit de Baynes ne serait dépassée dans aucun scénario, scénario 5 compris (expansion plus production maximale). Les résultats modélisés indiquent que les concessions conchylicoles existantes et les augmentations potentielles futures des concessions conchylicoles peuvent être soutenues sur le plan écologique dans le détroit de Baynes, mais qu'il convient de procéder graduellement et parallèlement à des activités de surveillance, en se concentrant sur les zones où une forte densité d'aquaculture existe déjà (baies Mud, Fanny et Deep).
- Les indicateurs et les variables d'appui permettant d'évaluer les changements dans la population de mollusques ainsi qu'au sein de l'écosystème environnant sont présentés, ainsi que les méthodes de surveillance de la collecte d'échantillons sur le terrain et de réalisation d'analyses de laboratoire congruentes (document de recherche distinct). Ces outils sont destinés à orienter l'élaboration de futurs programmes de surveillance.
- La modélisation se fondait sur un ensemble de données de 2016-2017 qui faisaient état d'une année anormalement chaude par rapport aux données historiques. L'augmentation du

mélange de la colonne d'eau et de la production de phytoplancton peut être atténuée en 1) augmentant la résolution horizontale du quadrillage du modèle dans les zones à la topographie abrupte et 2) incluant des apports fluviaux supplémentaires. Des renseignements supplémentaires sur les densités de bivalves et des données sur le zooplancton amélioreraient la précision du modèle.

- Le paramétrage individuel et le couplage des modèles FVCOM-BiCEM en résultant ont constitué une nouvelle approche permettant d'obtenir un modèle couplé hydrodynamique et biogéochimique à haute résolution et spatialement explicite en 4D, ce qui a donné lieu à une approche efficace pour évaluer la capacité de charge écologique de la conchyliculture.
- Cette approche de modélisation associant la physique et la biologie est recommandée comme méthode pour évaluer la capacité de charge écologique de la gestion de l'aquaculture sur d'autres sites potentiels envisagés pour des demandes aquacoles propres au site.

## INTRODUCTION

Le détroit de Baynes est l'une des zones d'élevage de bivalves les plus productives de la Colombie-Britannique (figure 1). La production conchylicole dépend d'un équilibre entre la qualité de l'eau, l'hydrodynamique (p. ex. renouvellement de l'eau de la baie, mélange) et l'approvisionnement en nourriture (plancton). Le détroit s'étend sur 90 km<sup>2</sup> et comprend des baies abritées, des vasières et des platins de sable intertidaux, des marais et des substrats rocheux. Alors que la majeure partie de la zone subtidale se situe entre 20 et 30 m de profondeur, le cours supérieur consiste en un bassin large et profond (40 à 80 m) et le cours inférieur s'élargit pour former les baies Mud et Deep, en amont de l'entrée sud restreinte. Une zone intertidale diversifiée borde le littoral et domine le rivage occidental avec de larges vasières et platins de sable soumis à une amplitude de marée de quatre mètres (au printemps). La rivière Courtenay fournit le plus grand apport d'eaux de ruissellement, tandis que les entrées restreintes nord et sud assurent l'échange d'eau entre le détroit de Baynes et le détroit de Georgia sous forme de jets de marée.

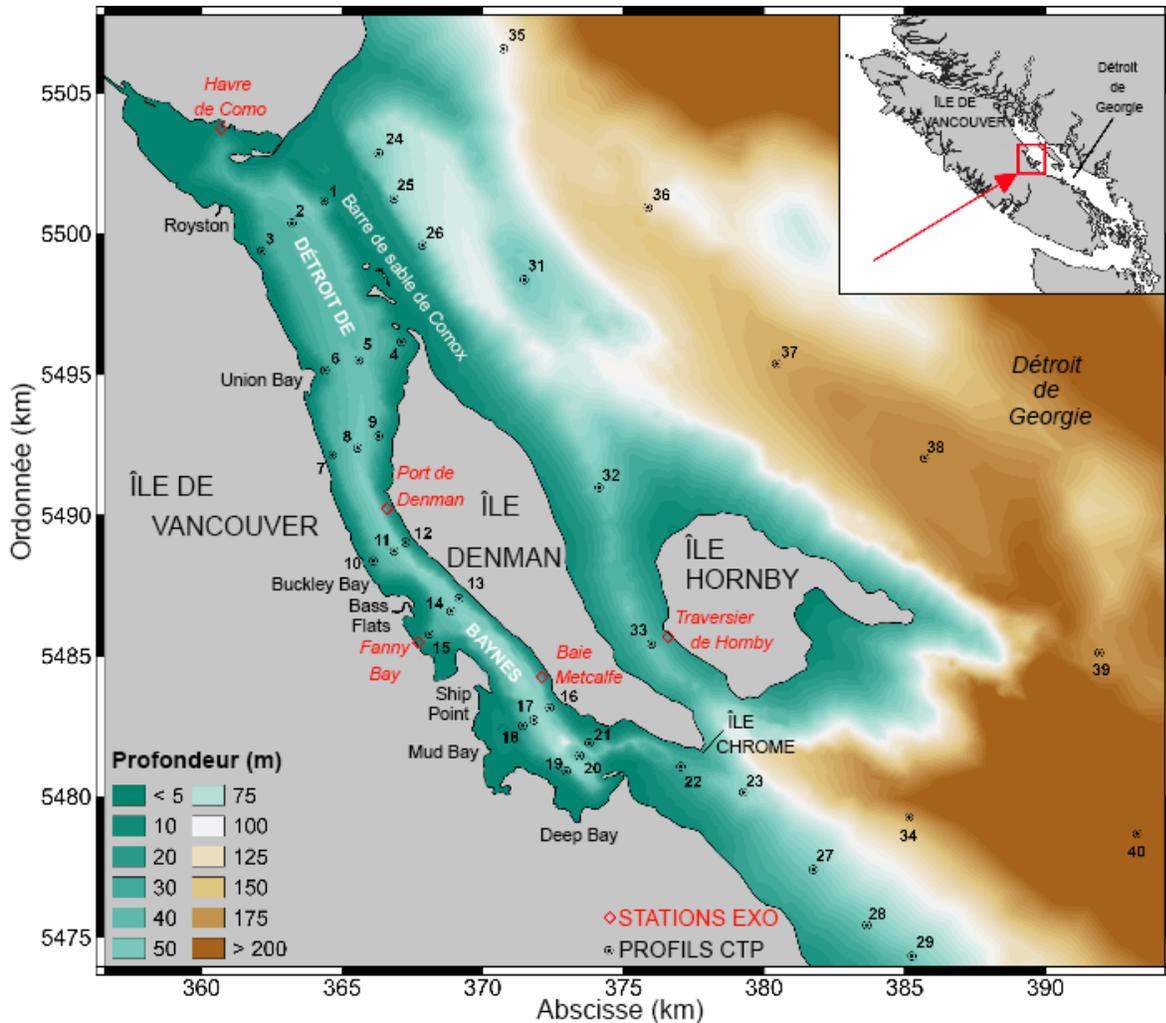


Figure 1. Carte du détroit de Baynes (Colombie-Britannique) comprenant les stations bathymétriques et hydrodynamiques ainsi que les zones d'intérêt local.

Les évaluations de la capacité de charge et les seuils et indicateurs de gestion potentiels sont propres aux baies, ce qui reflète la pertinence des modèles hydrodynamiques et des caractéristiques à l'échelle de la baie sur le fonctionnement de l'écosystème. Les indices fondés sur la comparaison de processus océanographiques et biologiques clés ont servi d'approximation de la capacité de charge des sites d'élevage de bivalves. Ces indices comparent la demande en énergie des populations de bivalves (selon les taux de filtration) et la capacité de l'écosystème à reconstituer ces ressources. De plus, les méthodes de surveillance associées aux indicateurs potentiels de capacité de charge peuvent fournir une référence pour un futur programme de surveillance de l'écosystème. Grâce aux renseignements recueillis dans le cadre des programmes de surveillance à long terme, les seuils de gestion réglementaires pour les indicateurs écologiques pourraient être établis.

Les approches de modélisation des capacités de charge des mollusques ont été examinées dans le cadre d'une évaluation similaire menée dans la région du Golfe (MPO 2015, Filgueira et al. 2015). L'examen par les pairs de 2015 du Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS) a permis de déterminer qu'un modèle à haute résolution et spatialement explicite était l'approche la plus efficace pour évaluer la capacité de charge écologique de la conchyliculture.

## ÉVALUATION

La capacité de charge écologique se définit comme l'ampleur de l'activité aquacole dans une zone donnée qui peut être soutenue sans entraîner de changements inacceptables dans les processus écologiques, les espèces, les populations, les communautés et les habitats dans l'environnement aquatique (MPO 2015). La capacité de charge écologique exige l'analyse de toute la gamme des interactions à l'échelle de l'écosystème, mais selon les principes directeurs de l'approche écosystémique de l'aquaculture (Soto *et al.* 2008). La capacité de charge écologique est généralement évaluée en se concentrant sur l'interaction bivalve-phytoplancton. La plupart des modèles utilisés pour évaluer la capacité de charge écologique de l'aquaculture de bivalves se sont concentrés sur le couplage d'un modèle hydrodynamique avec un modèle trophique inférieur représentant la dynamique des nutriments, du phytoplancton et du zooplancton en plus d'une composante bivalve (Pete *et al.* 2020). Les espèces bivalves, indigènes et d'élevage font partie intégrante des écosystèmes marins et, couplées aux processus hydrodynamiques, peuvent avoir des effets directs et indirects sur diverses autres communautés biotiques (MPO 2006). En raison de l'importance de l'influence des conditions environnementales locales sur le fonctionnement des écosystèmes, les études sur les capacités de charge sont propres à chaque écosystème.

Dans la région du Pacifique, le modèle des volumes finis d'océanologie côtière (FVCOM) a été combiné à un modèle de l'écosystème de la culture des bivalves (BiCEM) ayant recours à la théorie du bilan énergétique dynamique (BED) pour simuler la physiologie des bivalves et leurs interactions avec l'écosystème. Cette combinaison a donné lieu à un modèle biogéochimique en 4D à haute résolution et spatialement explicite, qui a fourni des évaluations locales et à l'échelle de la baie, intégrées sur la profondeur et sur des périodes déterminées.

Le paramétrage individuel et le couplage des modèles FVCOM et BiCEM en résultant sont la première initiative du genre, fournissant une approche nouvelle dont la première application a eu lieu dans la région du Pacifique (détroit de Baynes). Comme la Gestion de l'aquaculture du MPO a désigné le détroit de Baynes comme site prioritaire en 2009, en raison de son statut de production, la Direction des sciences du MPO a effectué un suivi en acquérant des données de recherche pertinentes à l'appui d'une évaluation de la capacité de charge. En conséquence, cette approche de modélisation met l'accent sur les variables traditionnelles de base de la capacité de charge écologique (boucle nutriments-phytoplancton-zooplancton-mollusques) avec l'ajout de sous-modèles de bivalves. L'inclusion d'autres composantes de la pêche commerciale, récréative et autochtone ou d'une évaluation benthique nécessiterait un modèle de réseau trophique et benthique plus large. Cette approche accroîtrait la complexité et l'incertitude des résultats concernant les mollusques et n'entre donc pas dans le cadre du présent avis.

### Approche de modélisation du détroit de Baynes

Le détroit de Baynes est une baie côtière du détroit de Georgia, avec une entrée de renouvellement restreinte à l'extrémité sud et une zone d'échange de surface associée à un grand banc de sable à l'entrée nord (figure 1). Le nord du détroit de Georgia, qui chevauche le domaine du modèle, présente une source relativement élevée de nutriments et de concentrations de phytoplancton flagellé le long de la limite nord-est du détroit de Baynes (Olson *et al.* 2020). Afin de réaliser la modélisation de l'écosystème, un certain nombre de paramètres destinés à soutenir les évaluations de la capacité de charge écologique des bivalves ont été collectés à une fréquence et une résolution spatiale variables. Les conditions océanographiques physiques ont été simulées à l'aide du modèle FVCOM. Des applications du FVCOM ont déjà été élaborées pour aider à résoudre les problèmes d'aquaculture dans les régions de l'archipel Broughton et des îles Discovery en Colombie-Britannique.

Ce modèle spatial résout les équations primitives tridimensionnelles (3D) de la vitesse et de l'élévation de la surface, conjointement aux équations de transport/diffusion en 3D de la salinité et de la température en présence d'un mélange turbulent. Des variables telles que la température et la salinité en fonction de la profondeur ont été collectées sur le terrain pour initialiser le modèle et fournir un forçage aux limites pendant la simulation du modèle. Le modèle FVCOM estime la région d'intérêt à l'aide d'un quadrillage triangulaire dont la résolution et l'orientation varient à l'horizontale et les couches varient à la verticale.

La présente étude repose également sur le couplage hors ligne du modèle FVCOM avec une composante biogéochimique, le modèle de l'écosystème de la culture des bivalves (BiCEM, figure 2). En bref, le modèle BiCEM simule le cycle de l'azote, qui est considéré comme l'élément limitant de la productivité du détroit de Baynes, en fonction des nutriments inorganiques, du phytoplancton, de la matière organique non vivante en suspension, du zooplancton et des bivalves sauvages et d'élevage. L'écophysologie des bivalves est abordée par des modèles précis de bilan énergétique dynamique (BED) dans la structure BiCEM. Ainsi, le modèle couplé FVCOM-BiCEM fournit une représentation dynamique et spatialement explicite de l'écosystème résultant des interactions entre toutes les variables.

La procédure de simulation couplée FVCOM/BiCEM consistait d'abord à exécuter le modèle FVCOM et à enregistrer ces résultats de température, salinité, vitesse et mélange (à des intervalles de 20 minutes) pour utiliser ces valeurs dans le modèle BiCEM. Comme la plus grande période de collecte de données biologiques s'est étendue de 2016 (mai) à 2017 (avril), cette date a été choisie pour initialiser et évaluer le modèle BiCEM.

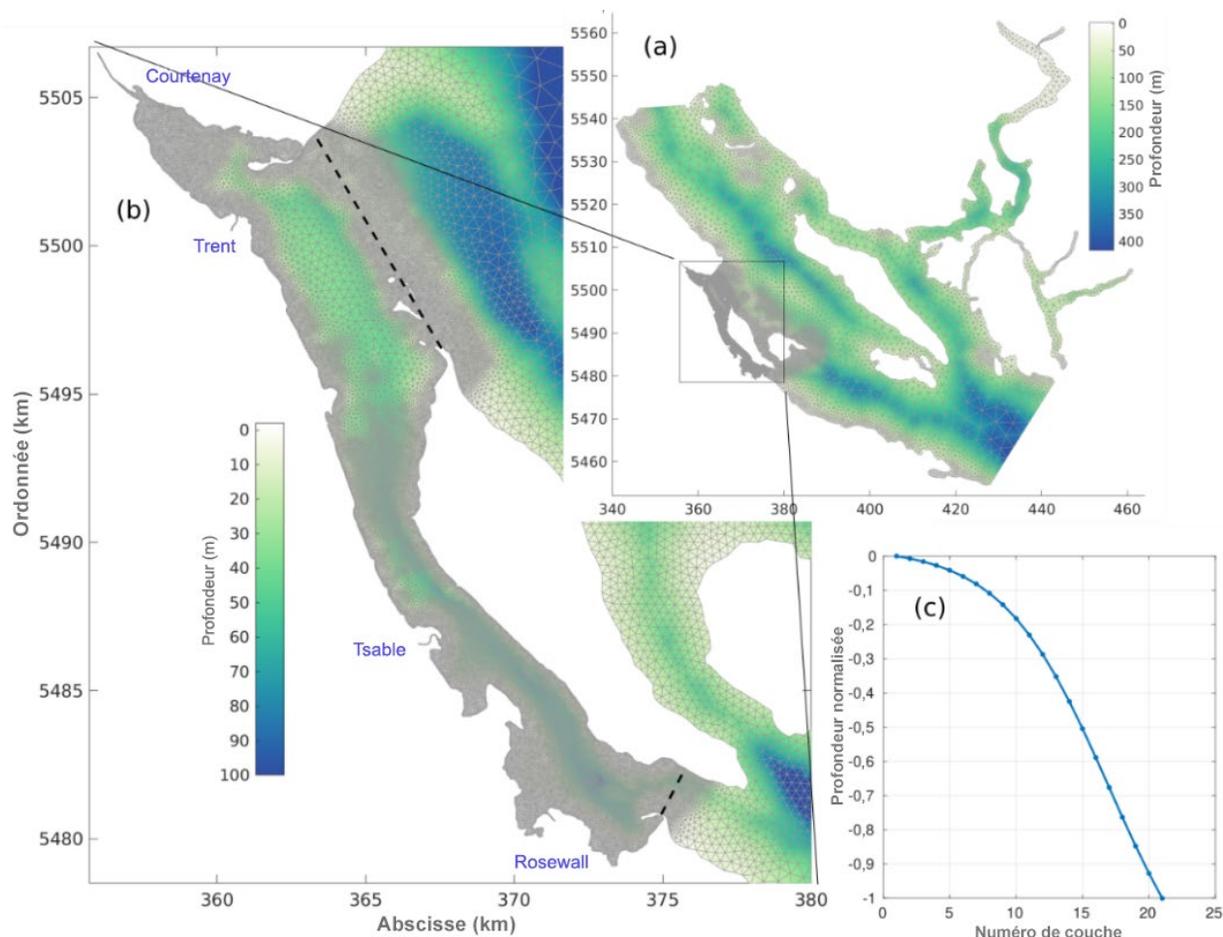


Figure 2. Quadrillage triangulaire et bathymétrie pour le modèle couplé : (a) pour l'ensemble du domaine du modèle, (b) vue rapprochée de la zone du détroit de Baynes avec les rivières Courtenay, Trent, Tsable et Rosewall incluses dans le modèle, et (c) limites des couches verticales du modèle.

### Le modèle permet-il d'obtenir une bonne approximation de l'hydrodynamique dans le détroit de Baynes?

Des comparaisons entre les résultats hydrodynamiques et les observations de données collectées principalement en 2016-2017 ont été utilisées pour évaluer la précision du modèle. Plusieurs paramètres, dont i) la température et la salinité, ii) les courants et iii) l'élévation de la surface de la mer, ont été utilisés pour valider le modèle, car ces paramètres sont les variables physiques qui influent le plus sur la conchyliculture. Des séries temporelles de température ont été prises dans cinq zones distinctes en plus du phare de l'île Chrome pendant une partie ou la totalité de l'année 2016-2017. La salinité a été recueillie à partir de stations de profilage de conductivité-température-profondeur (CTP) à des périodes fixes, tandis que des profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) ont été utilisés pour recueillir les courants entre les quais de BC Ferries (au milieu du chenal entre la baie Buckley et l'île Denman) et dans la baie Union (figure 1).

Dans l'ensemble, le modèle FVCOM a donné de bons résultats pour la température avec un écart global de moins d'un degré Celsius. Alors que la salinité près de la surface était en accord raisonnable, le modèle prévoyait une salinité légèrement trop élevée en profondeur, en particulier à l'entrée sud du détroit de Baynes. Cela pourrait être le résultat d'imprécisions dans

le mélange, du lissage bathymétrique du plancher océanique nécessaire pour éviter les courants parasites ou de l'exclusion de plusieurs réseaux hydrographiques au sud du détroit de Baynes. Dans l'ensemble, les différences de salinité moyenne quadratique pour l'ensemble de la simulation de l'année modèle 2016-2017 étaient de 1,46 USP (unité de salinité pratique) pour l'île Chrome. L'estimation de la précision du courant était difficile en raison de la rareté des courantomètres disponibles. Bien que quatre courantomètres aient été initialement déployés dans le détroit de Baynes, deux d'entre eux n'étaient pas utilisables en raison d'un dysfonctionnement pendant une partie du déploiement. Toutefois, deux des quatre ADCP ont réussi à recueillir des données sur le site de BC Ferries (du 25 février au 12 avril 2012) et sur le site de la baie Union (du 15 juin au 30 août 2016). Ces ADCP orientés vers le haut et montés sur le fond ont collecté des observations horaires de 38,5 à 1,5 m par intervalles d'un mètre. Dans l'ensemble, le modèle s'est avéré représenter l'hydrodynamique du détroit de Baynes avec une précision raisonnable.

**Y a-t-il suffisamment de ressources pour soutenir l'augmentation actuelle et proposée de la conchyliculture dans le détroit de Baynes?**

La capacité de charge de la conchyliculture d'un plan d'eau précis est généralement évaluée en comparant le taux de renouvellement de la nourriture des bivalves par la productivité primaire et les taux d'échange d'eau et de consommation de nourriture par l'ensemble de la population de bivalves d'élevage dans la zone d'étude (Dame et Prins 1998). Hay et Co (2003) ont utilisé cette approche pour leur estimation de la capacité de charge du détroit de Baynes, en considérant l'ensemble du détroit comme une seule masse d'eau homogène et en utilisant les résultats du modèle pour dériver les taux moyens (à la fois dans l'espace et dans le temps) de renouvellement de la nourriture et des données expérimentales limitées pour fournir le taux de filtration des bivalves. Dans la présente étude, la même approche conceptuelle de comparaison des taux a été appliquée dans un cadre spatialement explicite. Cette approche de modélisation intégrée fournit des résultats à une échelle spatiale très petite pour examiner plus avant la réponse de l'écosystème pélagique du détroit de Baynes et des bivalves sauvages et d'élevage dans divers scénarios de développement de l'aquaculture. La figure 3 montre comment le modèle BiCEM intègre les différents paramètres.

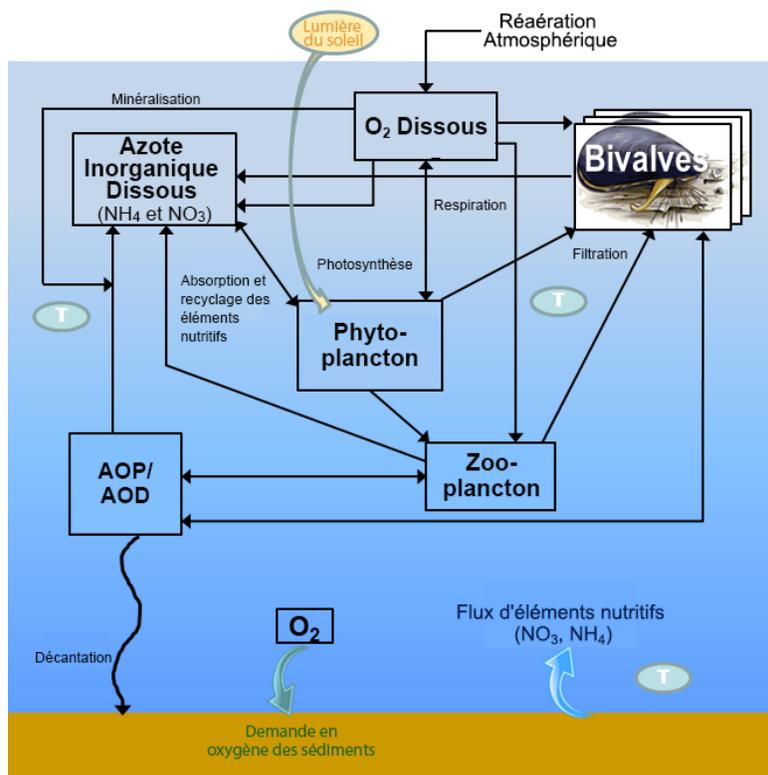


Figure 3. Structure trophique du modèle de l'écosystème de la culture des bivalves (BiCEM); AID : azote inorganique dissous, AOP/AOD : azote organique en particules/azote organique dissous.

Les résultats du modèle ont été analysés pour évaluer la capacité de charge écologique du détroit de Baynes relative à la conchyliculture dans cinq scénarios précis :

- **Actuel** : censé être aussi représentatif que possible des conditions du détroit de Baynes en 2016-2017.
- **Aucune aquaculture** : toutes les exploitations conchylicoles sont supprimées du scénario actuel. Ce scénario a servi de référence pour comparer tous les autres scénarios.
- **Actuel – Maximum** : toutes les exploitations existantes dans le scénario actuel fonctionnent à une densité de peuplement maximale dérivée des critères de production maximale fournis par la Direction générale de la gestion de l'aquaculture du MPO, ce qui correspond à 50 t ha<sup>-1</sup> pour la culture à plat et 200 t ha<sup>-1</sup> pour la culture en suspension (environ 6 % de la surface pour le détroit de Baynes).
- **Expansion** : exploitations qui ne sont pas incluses dans le scénario actuel soit parce qu'elles n'existaient pas en 2016-2017, soit parce qu'elles existaient, mais n'ont pas déclaré de production en 2015 et 2016. Ce scénario inclut les nouvelles demandes actuellement en cours d'examen (en décembre 2020) par la DGGA.
- **Expansion – Maximum** : combine les deux scénarios précédents en tenant compte de toutes les exploitations (existantes + nouvelles) à la densité de peuplement maximale (augmentation à environ 9 % de la surface pour le détroit de Baynes).

L'évaluation de la capacité de charge écologique se fondait sur la comparaison des résultats des modèles des scénarios ci-dessus et de deux critères distincts. Le premier critère comparait les diminutions prévues de la biomasse du phytoplancton avec la variabilité naturelle de ce

paramètre (Grant et Filgueira 2011), tandis que le second évaluait la fraction de la productivité primaire nette du phytoplancton consommée par la population de bivalves d'élevage (ASC 2019).

Un indice de changement relatif pour les variables pélagiques, notamment le phytoplancton, l'azote organique particulaire et le zooplancton, a été obtenu pour chaque scénario d'aquaculture. Un résumé des variables les plus pertinentes est présenté dans le tableau 1.

Tableau 1. Tableau récapitulatif des résultats du modèle pour chaque scénario, axé sur le phytoplancton et la productivité primaire nette.

Scénario	Productivité primaire nette (gC m <sup>-2</sup> )	Variation relative (%)		Absorption de phytoplancton des bivalves d'élevage	
		PPN	Phytoplancton	(gC m <sup>-2</sup> )	PPN (%)
Aucune d'aquaculture	329,48	-	-	-	-
Actuel	328,61	-0,26	-3,27	0,90	0,28
Actuel – Maximum	328,34	-0,35	-3,03	1,43	0,44
Expansion	326,07	-1,04	-5,58	1,47	0,45
Expansion – Maximum	324,96	-1,37	-5,61	2,17	0,67

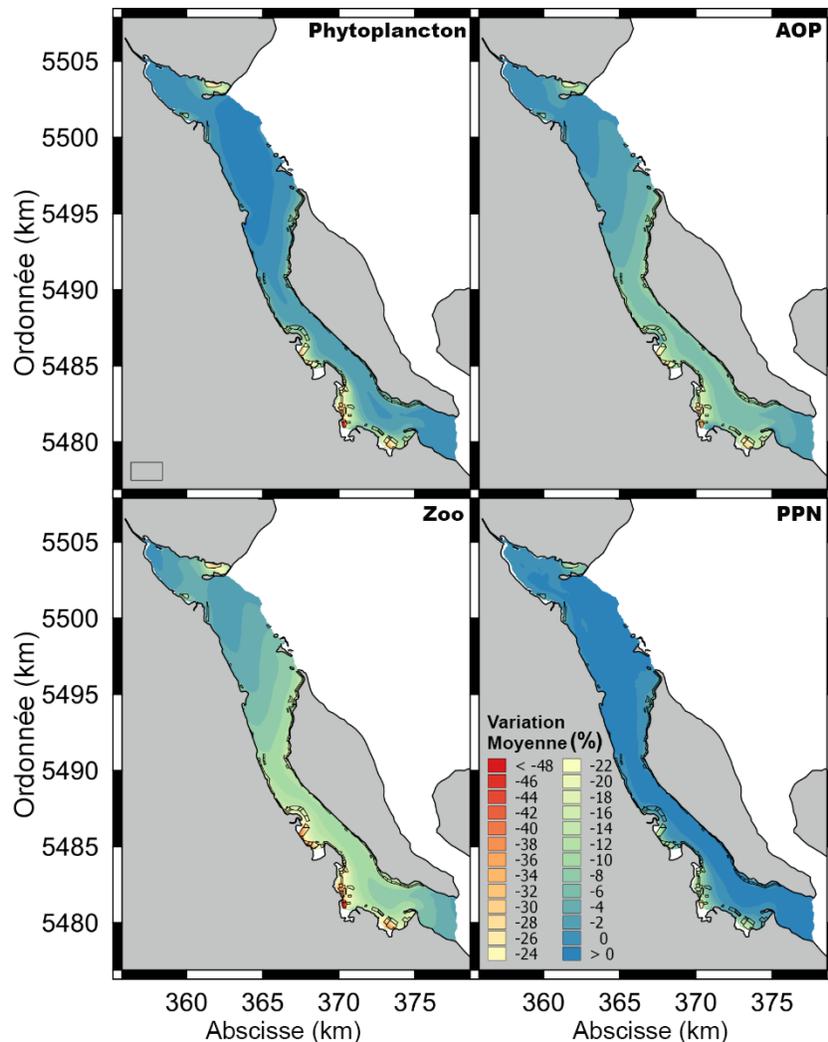


Figure 4. Résumé des résultats modélisés pour le scénario actuel (2016-2017) sous forme de cartes de la diminution moyenne de la biomasse du phytoplancton (phyto), de la concentration d'azote organique particulaire (AOP), de la biomasse du zooplancton (Zoo) et de la productivité primaire nette (PPN).

Les effets des bivalves d'élevage sur la productivité primaire se limitent aux zones très proches du rivage, avec une légère prééminence dans le cours inférieur du détroit. Les diminutions dans les petites zones peu profondes comme la baie Mud peuvent atteindre jusqu'à 30 %, comme le montre la figure 4. La diminution du phytoplancton reste inférieure à 2 % pour la plupart des zones d'eaux libres et inférieure à 15-20 % dans la zone littorale, à l'exception de quelques zones limitées de la baie Mud (réduction allant jusqu'à 30 %). Lors du calcul de la moyenne pour le détroit de Baynes, le modèle prédit une diminution relative de la productivité primaire du phytoplancton d'environ 4 % aux niveaux d'aquaculture actuels (2016-2017).

Les scénarios mis à l'essai dans le cadre de cette étude visaient à évaluer la réponse de l'écosystème pélagique du détroit de Baynes à une éventuelle augmentation de la couverture spatiale et de la densité de peuplement de la conchyliculture. L'évaluation du modèle biogéochimique laisse entendre que les bivalves d'élevage exercent une influence très limitée, avec des réductions globales de la biomasse du phytoplancton (< 6 %) et de la productivité (< 1,5 %) pour chacun des scénarios. Aux densités de peuplement les plus élevées, l'absorption de plancton (source de nourriture principale) représente moins de 1 % de la

productivité primaire du détroit de Baynes. L'Aquaculture Stewardship Council (ASC 2019) a proposé un critère selon lequel pas plus d'un tiers de la productivité primaire du phytoplancton devrait être utilisée pour les bivalves d'élevage. Les prévisions pour l'ensemble du détroit de Baynes sont inférieures à ces niveaux, mais des zones plus petites, telles que la baie Mud, peuvent avoisiner ces niveaux à une échelle plus réduite et nécessiteraient une surveillance.

Les effets localisés des nouvelles exploitations sur la disponibilité des aliments et, en fin de compte, sur la production des exploitations, ont été examinés dans le cadre du modèle BiCEM en comparant le scénario actuel et le scénario d'expansion. On observe une variabilité interannuelle au sein des populations de mollusques sauvages et d'élevage. Dans le scénario d'expansion maximale, près du havre de Comox, les diminutions maximales du phytoplancton étaient d'environ 20 % et la diminution correspondante de la croissance des mollusques d'environ 0,3 % (changement relatif de la longueur de la coquille). Dans le milieu du détroit, on observe en général des renouvellements d'eau plus lents, une diminution maximale du plancton d'environ 8 % et des réductions de croissance prévues pour les myes (max. 0,25 %) et les huîtres (max. 1,1 %). Les effets les plus importants sont prévus dans le cours inférieur, où la plus grande partie de la nouvelle couverture conchylicole devrait augmenter d'environ 190 ha (dont environ 168 ha se concentrent dans la région des baies Mud et Deep). Dans les petites zones, la diminution du phytoplancton peut atteindre 30 %.

#### **Quels outils de surveillance et quelles variables/indicateurs peuvent être utilisés pour décrire les changements liés à la conchyliculture ?**

La Division de la gestion de l'aquaculture du MPO (Pacifique) a demandé quelles méthodes de surveillance et quels protocoles de terrain et de laboratoire associés peuvent être utilisés par le personnel réglementaire, industriel et scientifique lors de l'évaluation des écosystèmes. Les méthodes d'échantillonnage sont destinées à soutenir une grande variété d'approches allant de programmes généraux de surveillance par zone à des problèmes locaux émergents liés à d'importantes lacunes dans les connaissances. Une série de variables environnementales qui soutiennent les évaluations de la culture des bivalves a été sélectionnée d'après les éléments suivants : 1) les recommandations émanant de processus consultatifs gouvernementaux ou de la communauté scientifique; et 2) la capacité de l'indicateur à détecter les changements potentiels dans les conditions et les processus écosystémiques. Chaque variable écosystémique a fait l'objet d'une analyse documentaire établissant la pertinence de la surveillance de chaque variable/indicateur et des seuils de gestion disponibles.

Des techniques détaillées de collecte sur le terrain et d'analyse en laboratoire sont présentées pour trois régimes d'habitat : 1) les substrats mous benthiques (texture des sédiments, matières organiques, sulfure/redox, éléments traces, faune, bivalve et zostère), 2) les substrats benthiques solides (relevés vidéo/par caméra) et 3) l'écosystème pélagique (propriétés de l'eau, seston, plancton, nutriments). Les attributs pertinents des bivalves sont la densité, la diversité et les indices de condition des populations sauvages et d'élevage. Les indicateurs pélagiques et bivalves représentent une boucle nutriments-seston-plancton-bivalve qui peut soutenir un modèle couplé hydrodynamique-biogéochimique à haute résolution, spatialement explicite, capable d'évaluer la capacité de charge écologique des bivalves. En général, les variables recommandées peuvent être utilisées dans n'importe quelle combinaison en fonction des objectifs de surveillance, de la nature de l'estuaire et de paramètres particuliers. Le tableau 2 présente les variables environnementales qui permettraient d'évaluer différents thèmes de surveillance environnementale. Les évaluations de la capacité de charge des bivalves dans les baies aquacoles intégreraient une série de variables pélagiques qui constituent la boucle nutriments-phytoplancton-seston-bivalve nécessaire à l'application d'un modèle hydrodynamique-biogéochimique (Filgueira *et al.* 2015). Ces variables de surveillance peuvent

ne pas avoir de signification pour un objectif général de l'écosystème si elles sont mesurées indépendamment des autres variables pélagiques.

Ce document ne fournit pas de conseils prescriptifs sur la conception de la surveillance, car le plan d'échantillonnage est propre au site et à l'objectif d'intérêt. Les recherches futures doivent 1) valider davantage les seuils réglementaires de gestion entourant les indicateurs des taxons formant le tapis, tels que les bactéries qui oxydent les sulfures et le complexe de polychètes opportunistes dans une variété de substrats et de milieux; 2) établir des seuils pour les variables indicatrices clés; et 3) examiner les agents de stress multiples dans un contexte environnemental d'effets cumulatifs.

Tableau 2. Variables d'échantillonnage benthiques et pélagiques classées selon les thèmes de surveillance des écosystèmes. CCE = capacité de charge écologique, EOB = enrichissement organique benthique, EP = eutrophisation pélagique, HS = habitat sensible, IP = installations physiques.

VARIABLES/INDICATEURS	THÈMES/OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE DES BIVALVES				
	Capacité de charge écologique	Enrichissement organique benthique	Eutrophisation pélagique	Habitat sensible (zostère)	Installations physiques (filet, radeau)
<b>Variables relatives aux substrats mous</b>					
Taille des grains de sédiments	-	EOB	-	HS	IP
Porosité/matières organiques des sédiments	-	EOB	-	HS	IP
Éléments traces présents dans les sédiments	-	EOB	-	HS	IP
Sulfures dans les eaux interstitielles des sédiments	-	EOB	-	HS	IP
Redox des sédiments	-	EOB	-	HS	IP
Aflux/reflux de nutriments dans les sédiments	CCE	EOB	-	-	-
Bactéries oxydant les sulfures	-	EOB	-	HS	IP
Complexe de polychètes opportunistes	-	EOB	-	HS	IP
Macrofaune (> 0,5 mm)	-	EOB	-	-	IP
Méiofaune (0,063 à 0,5 mm)	-	EOB	-	HS	IP
Abondance/diversité des bivalves	CCE	EOB	-	-	IP
Recrutement de bivalves (intertidal)	CCE	EOB	-	-	IP
Indice de condition des bivalves	CCE	EOB	-	-	IP
Macroalgues	-	EOB	EP	-	IP
Zostère	-	EOB	EP	HS	IP
<b>Variables relatives aux substrats solides</b>					
Composition du substrat	-	EOB	-	-	IP
Abondance de l'épifaune	-	EOB	-	-	IP
Bactéries oxydant les sulfures	-	EOB	-	-	IP
Complexe de polychètes opportunistes	-	EOB	-	-	IP
<b>Variables relatives aux méthodes pélagiques</b>					
Température, salinité, oxygène	CCE	-	EP	HS	IP

VARIABLES/INDICATEURS	THÈMES/OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE DES BIVALVES				
	Capacité de charge écologique	Enrichissement organique benthique	Eutrophisation pélagique	Habitat sensible (zostère)	Installations physiques (filet, radeau)
Matière particulaire en suspension	CCE	-	EP	HS	IP
Production de phytoplancton	CCE	-	EP	-	-
Productivité primaire du phytoplancton	CCE	-	EP	-	-
Nutriments dissous	CCE	-	EP	HS	-
Zooplancton	CCE	-	EP	-	-
Courants marins	CCE	-	EP	HS	IP

### Sources d'incertitude

- Les paramétrages et les coefficients du modèle ont calculé un mélange de la colonne d'eau verticale supérieur à celui mesuré, ce qui peut entraîner une surestimation du phytoplancton dans le modèle BiCEM. Le surmélange est également faussé par la bathymétrie et l'aplatissement forcé du bassin.
- Trois rivières n'ont pas été prises en compte dans le modèle (Englishman, Big/Little Qualicum) et représentent une partie de l'eau à faible salinité arrivant par l'entrée sud. Dans l'ensemble, on s'attend à un faible effet sur le modèle BiCEM, mais leur inclusion aurait probablement amélioré les valeurs de salinité mesurées par rapport aux valeurs modélisées dans le détroit de Baynes.
- En général, plus de renseignements sur les densités de bivalves amélioreraient la précision du modèle, en particulier en ce qui concerne les huîtres du Pacifique sauvages et de culture à plat.
- L'incertitude résulte de l'incapacité du modèle à saisir avec précision certaines caractéristiques de la dynamique du phytoplancton, à savoir la distribution verticale et la prolifération d'automne.
- Des données supplémentaires sur le zooplancton, en particulier la couverture temporelle, aideraient à mieux contraindre cette variable du modèle. Il convient de souligner que, par conception, cette variable est la moins réaliste de toutes les variables du modèle. Le zooplancton modélisé reflète la quantité d'énergie du système disponible pour transfert à des niveaux trophiques supérieurs autres que les bivalves sauvages et d'élevage, et n'essaie pas de simuler un groupe de zooplancton réel précis ou la dynamique des communautés.
- L'ensemble de données utilisé pour étalonner le modèle provenait d'une année anormalement chaude (2016-2017).

### CONCLUSIONS

- Les modèles spatiaux sont des outils utiles pour explorer la capacité de charge écologique. Dans ce cas, deux modèles FVCOM et BICEM-BED ont été choisis pour modéliser les composantes de l'écosystème benthique et pélagique. L'intégration de ces deux modèles était souhaitable, car ils fournissent une description précise d'une zone hydrodynamique et biogéochimique très complexe. L'hydrodynamique du détroit de Baynes est complexe. Le détroit est en effet doublement relié au détroit de Georgia par une entrée étroite et profonde au sud et une entrée plate et large au nord. Diverses données et observations ont été recueillies pendant une période d'un an (2016-2017), ainsi que d'autres ensembles de données à plus long terme (c'est-à-dire des stations marégraphiques) pour étalonner et valider le modèle. La concordance entre les prévisions rétrospectives du modèle et les observations des données recueillies sur le terrain était bonne. Les modèles ont permis d'établir des prévisions rétrospectives des conditions hydrodynamiques et biologiques dans l'ensemble de la baie et à une échelle plus locale, notamment dans les baies Fanny et Mud. Cette résolution s'intègre à la capacité de charge écologique de l'ensemble de la baie et à l'échelle plus locale.
- Le niveau d'aquaculture actuel (scénario 2) n'a pas dépassé la capacité du détroit de Baynes à soutenir l'aquaculture des bivalves, selon une analyse de l'épuisement du phytoplancton et de la productivité primaire. Les valeurs simulées pour le détroit de Baynes sont bien inférieures au seuil de capacité de charge relevé dans la documentation en ce qui

concerne l'épuisement du phytoplancton et le modèle de productivité primaire, et les incertitudes n'auraient pas d'effets sur la conclusion générale relative à la capacité de charge écologique du détroit de Baynes.

- Le niveau d'aquaculture Expansion – Maximum (scénario 5) ne dépasserait pas la capacité de charge écologique. La fraction des ressources déjà exploitées varie dans le détroit de Baynes et est la plus importante dans les baies Fanny, Deep et Mud. Le rendement actuel des cultures pourrait en subir les effets à l'échelle locale si des scénarios d'expansion maximale étaient envisagés dans ces zones. Par conséquent, une approche prudente serait recommandée en cas de poursuite de l'expansion, y compris l'attribution progressive de nouvelles concessions et un suivi du rendement des bivalves dans le cadre de ce scénario hypothétique.
- L'examen des méthodes englobe les variables de surveillance benthiques et pélagiques qui sont associées à la capacité de charge écologique des bivalves et à d'autres évaluations de l'effet sur les écosystèmes. Les méthodes de surveillance comprenaient des techniques relatives aux sédiments de fond solides et mous, et un ensemble limité de méthodes pélagiques s'appuyant sur une variété de dispositifs de surveillance. Les méthodes comprennent également une collecte sur le terrain et la gestion des seuils réglementaires et des techniques d'analyse. Des valeurs seuils ont été fournies pour de nombreux paramètres à partir d'analyses documentaires. Le document est complet dans ses méthodes, mais n'est pas prescriptif sur la conception de l'étude, telle que la taille de l'échantillon, les emplacements de référence, etc. Les utilisateurs doivent déterminer clairement l'objectif de l'effort de surveillance pour proposer un plan d'étude détaillé propre au site.

## CONSIDÉRATIONS RELATIVES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les analyses de longues séries chronologiques et les résultats des modèles de prévision semblent indiquer que les cultures de bivalves dans le détroit de Baynes subiront les effets du changement climatique (Masson et Cummins 2007; Amos *et al.* 2015). La croissance potentiellement plus rapide des bivalves et l'augmentation de la production due à une augmentation des températures de l'eau pourraient être entravées par une diminution globale de la capacité de charge du détroit, en raison de la pression accrue sur les ressources en phytoplancton. Outre une augmentation de la température moyenne de l'eau, le changement climatique pourrait potentiellement entraîner des décalages temporels du cycle saisonnier de la température et des communautés de plancton (Mackas *et al.* 2011, 2013; Allen et Wolfe 2013; Filgueira *et al.* 2015). De tels changements peuvent avoir un effet sur la phénologie de différentes espèces ou groupes d'espèces de différentes manières et conduire à une nouvelle adéquation/un nouveau déséquilibre entre l'offre et la demande de ressources pélagiques. Le changement climatique peut également produire d'éventuelles tendances néfastes en matière d'acidification des océans et d'hypoxie (Ianson *et al.* 2016, Evans *et al.* 2019). Comme pour tout changement d'origine climatique, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour comprendre les conséquences ultimes de ces changements sur les écosystèmes côtiers en général et sur leur capacité de charge pour l'aquaculture des bivalves.

**LISTE DES PARTICIPANTS DE LA RÉUNION**

Nom	Prénom	Organisme d'appartenance
Bianucci	Laura	Direction des sciences du MPO, région du Pacifique
Campbell	Jill	Direction des sciences du MPO, Centre des avis scientifiques du Pacifique
Chasse	Joel	Direction des sciences du MPO, région du Golfe
Christensen	Lisa	Direction des sciences du MPO, Centre des avis scientifiques du Pacifique
Filgueira	Ramon	Université Dalhousie
Foreman	Mike	Direction des sciences du MPO, région du Pacifique
Grant	Jon	Université Dalhousie
Guyondet	Thomas	Direction des sciences du MPO, région du Golfe
Han	Guoqi	Direction des sciences du MPO, région du Pacifique
Heath	Bill	Project Watershed
Krassovski	Maxim	Direction des sciences du MPO, région du Pacifique
LaCoste	Cher	Direction des sciences du MPO, région du Pacifique
Marrie	Chris	Direction de la gestion des pêches du MPO – Aquaculture
McKindsey	Chris	Direction des sciences du MPO, région du Québec
Munro	Alex	Raincoast Sea Farms
Olson	Elise	Université de la Colombie-Britannique
Parsons	Jay	Direction des sciences du MPO, administration centrale nationale
Paylor	Adrienne	Direction de la gestion des pêches du MPO – Aquaculture
Pearce	Chris	Direction des sciences du MPO, région du Pacifique
Ruesink	Jennifer	Université de Washington
Russell	Jim	BC Shellfish Growers Association
Scott	Melinda	Direction de la gestion des pêches du MPO – Aquaculture
Sutherland	Terri	Direction des sciences du MPO, région du Pacifique

**SOURCES DE RENSEIGNEMENTS**

Le présent avis scientifique découle de l'examen par les pairs régional(e) du 8 au 12 mars 2021 sur les Méthodes de modélisation et de surveillance visant à évaluer la capacité de charge écologique de la conchyliculture. Toute autre publication découlant de cette réunion sera publiée, lorsqu'elle sera disponible, sur le [calendrier des avis scientifiques de Pêches et Océans Canada \(MPO\)](#).

Allen, S.E. and Wolfe, M.A. 2013. Hindcast of the timing of the spring phytoplankton bloom in the Strait of Georgia, 1968 – 2010. *Progress in Oceanography*, 115: 6-13.

Amos, C.L., Martino, S., Sutherland, T.F., and Al Rashidi, T. 2015. Sea Surface Temperature Trends in the Coastal Zone of British Columbia, Canada. *Journal of Coastal Research*, 31(2), 434-446.

ASC (Aquaculture Stewardship Council). 2019. ASC bivalve standard–version 1.1. March 2019. ASC, Utrecht.

- Dame R.F. and Prins T.C. 1998. Bivalve carrying capacity in coastal ecosystems. *Aquat Ecol* 31: 409–421.
- Evans W., Pocock K., Hare A., Weekes C., Hales B., Jackson J., Gurney-Smith H., Mathis J.T., Alin S.R. and Feely R.A. 2019. Marine CO<sub>2</sub> Patterns in the Northern Salish Sea. *Front. Mar. Sci.* 5:536.
- Filgueira, R., Brown, M.S., Comeau, L.A., & Grant, J. 2015. Predicting the timing of the pediveliger stage of *Mytilus edulis* based on ocean temperature. *Journal of Molluscan Studies*, 81(2), 269-273.
- Grant, J. and Filgueira, F. 2011. The application of dynamic modelling to prediction of production carrying capacity in shellfish farming. (Ed.) Shumway, S.E., In: *Shellfish Aquaculture and the Environment*. pp. 135-154.
- Hay and Company Consultants, 2003. Baynes Sound Carrying Capacity Study Technical Report, MAFF.001, Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, Ministry of Sustainable Resource Management and Environment Canada, Environmental Protection, Pacific and Yukon Region.
- Ianson, D., Allen, S.E., Moore-Maley, B.L., Johannessen, S.C., and Macdonald, R.W. 2016. Vulnerability of a semi-enclosed estuarine sea to ocean acidification in contrast with hypoxia, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 5793–5801, doi:10.1002/2016GL068996.
- Mackas, D.L., Thomson, R, and Galbraith, M. 2011. Changes in the zooplankton community of the British Columbia continental margin, 1985–1999. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*. 58:685 – 702.
- Mackas, D., Galbraith, M., Faust, D., Masson, D., Young, K., Shaw, W., Romaine, S., Trudel, M., Dower, J., Campbell, R., Sastri, A., Bornhold Pechter, E.A., Pakhomov, E., and El-Sabaawi. R. 2013. Zooplankton time-series from the Strait of Georgia: Results from year-round sampling at deep water locations, 1990-2010. *Progress in Oceanography*, 115: 129 – 159.
- Masson, D., and Cummins, P.F. 2007. Temperature trends and interannual variability in the Strait of Georgia, British Columbia, *Continental Shelf Research*, doi:10.1016/j.csr.2006.10.009.
- MPO. 2006. Évaluation des risques pour l’habitat liés à l’élevage des bivalves en milieu marin. *Secr. can.de consult. sci. du MPO, Avis sci.* 2006/005.
- MPO. 2015. Capacité de charge pour la conchyliculture par référence à la mytiliculture dans la baie Malpeque, à l’île-du-Prince-Édouard. *Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci.* 2015/003.
- Olson, E. M., Allen, S. E., Do, V., Dunphy, M., & Ianson, D. 2020. Assessment of nutrient supply by a tidal jet in the northern Strait of Georgia based on a biogeochemical model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125.
- Pete, R., Guyondet, T., Bec, B., Derolez, V., Cesmat, L., Lagarde, F., Pouvreau, S., Fiandrino, A., and Richard, M. 2020. A box-model of carrying capacity of the Thau lagoon in the context of ecological status regulations and sustainable shellfish cultures. *Ecological Modelling*, 426 (C), 109049.

Soto, D., Aguilar-Manjarrez, J., Brugère, C., Angel, D., Bailey, C., Black, K., Edwards, P Costa-Pierce, B., Chopin, T., Deudero, S., Freeman, S., Hambrey, J., Hishamunda, N., Knowler, D., Silvert, W., Marba, N., Mathe, S., Norambuena, R., Simard, F., Tett, P., Troell, M. & Wainberg, A. 2008. Applying an ecosystem-based approach to aquaculture: principles, scales and some management measures, in: Soto, D., Aguilar-Manjarrez, J., Hishamunda, N. (Eds.), Building an ecosystem approach to aquaculture. In: Building an ecosystem approach to aquaculture. FAO/Universitat de les Illes Balears Expert Workshop. 7–11 May 2007, Palma de Mallorca, Spain. FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings. No. 14. Rome, FAO. pp 15–35.

**CE RAPPORT EST DISPONIBLE AUPRÈS DU :**

Centre des avis scientifiques (CAS)  
Région du Pacifique  
Pêches et Océans Canada  
3190, chemin Hammond Bay  
Nanaimo (Colombie-Britannique) V9T 6N7

Téléphone : (250) 756-7208

Courriel : [csap@dfo-mpo.gc.ca](mailto:csap@dfo-mpo.gc.ca)

Adresse Internet : [www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/](http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/)

ISSN 1919-5117

ISBN 978-0-660-38322-4 Cat No. Fs70-6/2021-012E-PDF

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2021



La présente publication doit être citée comme suit :

MPO. 2021. Approche des méthodes de modélisation et de surveillance pour évaluer la capacité de charge écologique des bivalves dans le détroit de Baynes (Colombie-Britannique). Secr. can. de consult. sci du MPO. Avis sci. 2021/036.

*Also available in English:*

DFO. 2021. *Modelling and Monitoring Methods Approach to Evaluate Ecological Bivalve Carrying Capacity in Baynes Sounds, British Columbia. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2021/036.*