



CONNECTIVITÉ HYDRODYNAMIQUE ENTRE LES INSTALLATIONS DE PISCICULTURE MARINE EN COLOMBIE-BRITANNIQUE : À L'APPUI D'UNE APPROCHE DE GESTION PAR ZONE

Contexte

La Division de la gestion de l'aquaculture (DGA) de Pêches et Océans Canada (MPO) est l'organisme de réglementation de la gestion de l'aquaculture en Colombie-Britannique. Le régime de gestion de l'aquaculture en Colombie-Britannique, qui est chapeauté par des organismes de réglementation provinciaux et fédéraux, est robuste et complexe. Les permis et les conditions dont ils sont assortis constituent le principal outil de gestion des pêches, et sont délivrés en vertu du *Règlement du Pacifique sur l'aquaculture* et de la *Loi sur les pêches*. La DGA délivre des permis à des éclosiers et installations de production à terre et à des sites de pisciculture et de conchyliculture en milieu marin, dont environ 114 exploitations de pisciculture marine, lesquelles sont au cœur du présent examen. La DGA s'est engagée à adopter la gestion par zone en Colombie-Britannique, ce que recommandent également un certain nombre de groupes externes. Cette nouvelle approche permettra à la DGA de délaissier l'évaluation et la gestion individuelles et isolées des exploitations de pisciculture et facilitera une collaboration continue avec les partenaires externes (p. ex. organisations non gouvernementales de l'environnement, Premières Nations, industrie et autres intervenants).

Les exploitations peuvent être liées les unes aux autres par le flux de l'eau; elles sont également liées aux habitats des poissons sauvages à proximité. La connectivité hydrodynamique entre les installations de pisciculture marine peut présenter des risques de transmission entre les exploitations, ainsi qu'entre le saumon d'élevage et le saumon sauvage, particulièrement en ce qui a trait au pou du poisson (Adams *et al.* 2012; Cantrell *et al.* 2018, 2020) et aux agents pathogènes (Bravo *et al.* 2020; Foreman *et al.* 2015). Les données régionales de la Colombie-Britannique, ainsi que celles d'autres régions où se pratique la pisciculture, indiquent qu'une approche de gestion par zone faisant appel entre autres à des traitements coordonnés, à des plans d'empoissonnement et à la mise en jachère peut être plus efficace que la gestion individuelle des éclosions de maladie et des infestations de ravageurs dans les exploitations. Cette approche peut également réduire la transmission et les risques chez les poissons sauvages.

La DGA demande à la Direction des sciences du MPO de fournir un avis scientifique sur la connectivité hydrodynamique entre les installations de pisciculture marine existantes, afin de délimiter les divisions qui pourraient servir de base à la gestion par zone des installations de pisciculture en Colombie-Britannique.

L'évaluation et l'avis découlant de ce processus de réponse des Sciences du Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS) serviront à orienter les décisions relatives à la gestion par zone et les conditions de permis pour 2022. Des consultations sont prévues en 2021, avant la délivrance des permis. De plus, ces renseignements constitueront l'un des éléments mis de l'avant dans le cadre de vastes discussions multilatérales sur la gestion par zone.

La présente réponse des Sciences découle du processus de réponse des Sciences régional du 15 février 2021 sur la Connectivité hydrodynamique entre les installations de pisciculture marine en Colombie-Britannique : à l'appui d'une approche de gestion par zone.

Renseignements de base

Reprise de travaux antérieurs : modèles hydrodynamiques et de suivi des particules

Le MPO a déjà utilisé des modèles hydrodynamiques océaniques pour évaluer la connectivité entre les sites d'aquaculture en Colombie-Britannique sur le plan du transport et de la transmission des agents pathogènes et du pou du poisson (p. ex. Stucchi *et al.* 2011, Foreman *et al.* 2015a, Foreman *et al.* 2015b, Mimeault *et al.* 2017). La présente étude porte sur la connectivité purement hydrodynamique, c'est-à-dire la façon dont les particules neutres et passives se dispersent à partir des exploitations et atteignent d'autres sites compte tenu uniquement des champs d'écoulement dans le milieu environnant. Cette approche permet d'estimer la portée la plus longue possible des particules (puisque elles ne coulent pas activement et ne se désintègrent pas sous l'effet des conditions environnementales – elles se déplacent simplement avec les champs d'écoulement tridimensionnel) et, par conséquent, la plus grande connectivité possible entre les exploitations. Les particules modélisées ne représentent pas un agent pathogène ou un organisme précis; elles ne présentent pas non plus les caractéristiques d'un agent pathogène ou d'un organisme en particulier. Reprenant les méthodes présentées dans Foreman *et al.* (2015a), nous avons utilisé trois modèles hydrodynamiques océaniques côtiers mis au point par le MPO pour générer des champs d'écoulement tridimensionnel comme intrants dans un modèle de suivi des particules passives. Deux des modèles hydrodynamiques sont décrits dans Foreman *et al.* (2015a) : les modèles de l'archipel Broughton et des îles Discovery (figure 1). Le troisième est le modèle plus récent pour la côte ouest de l'île de Vancouver et nous y reviendrons brièvement dans la prochaine section, en soulignant les différences avec les deux modèles plus anciens. Les trois modèles sont des applications du modèle des volumes finis d'océanologie côtière (FVCOM) à grille non structurée et équations primitives mis au point par Chen *et al.* (2003, 2006, 2013).

Le modèle de suivi des particules PTrack a été élaboré à l'origine par Chen *et al.* (2006, 2013) et intégré dans le FVCOM. Comme les particules n'ont pas d'effet sur l'hydrodynamique, ce modèle est plus efficace, sur le plan du calcul, pour suivre les particules par l'utilisation des champs d'écoulement de sortie du FVCOM plutôt que par l'intégration du suivi des particules dans l'analyse du FVCOM. L'application actuelle du PTrack diffère quelque peu de celle présentée dans Foreman *et al.* (2015a) (voir le récapitulatif dans le tableau 1). Dans cette dernière, 50 particules neutres ont été rejetées toutes les heures à des points répartis aléatoirement dans un prisme rectangulaire tridimensionnel (100 m x 100 m x 10 m) dans la zone de la concession d'une exploitation; dans la présente étude, 30 particules neutres ont été rejetées à la surface toutes les deux heures, réparties aléatoirement à l'intérieur d'un carré de 100 m x 100 m (nous avons utilisé une surface plutôt qu'un volume, étant donné que les particules ne coulent pas). Ces changements ont permis d'établir un équilibre entre le coût informatique et une résolution suffisante du forçage des marées. La durée du suivi a été prolongée de 11 à 14 jours pour tenir compte des scénarios représentant des particules plus longévives. Afin de permettre une répétabilité dans nos expériences de suivi, la représentation du mouvement des particules à l'échelle des sous-grilles au moyen d'un processus aléatoire de type marche (comme cela a été fait dans Foreman *et al.* 2015a) n'a pas été incluse ici. Ptrack simule la trajectoire des particules jusqu'à ce que l'une des trois conditions de fin se produise : l'advection à l'extérieur du domaine du modèle, le dépassement de la limite de suivi de 14 jours

ou le contact avec la terre. Dans Foreman *et al.* (2015a), la fin liée au contact avec la terre incluait une condition qui permettait aux particules entraînées par advection vers la terre de poursuivre leur trajectoire si un champ d'écoulement subséquent les ramenait dans l'eau.

Alors que les calculs internes dans FVCOM sont effectués à l'échelle des secondes, les champs de sortie tridimensionnels sont stockés à des intervalles plus longs (p. ex. heures). Foreman *et al.* (2015a) ont examiné l'effet de la réduction de l'intervalle de sortie dans le FVCOM pour l'utiliser dans le modèle de suivi des particules. Ils ont jugé que les avantages d'une résolution temporelle accrue étaient variables selon la région et la période, pour une charge de calcul supplémentaire toujours importante. C'est pourquoi, dans la présente étude, nous avons utilisé des fichiers d'écoulement horaire, comme dans Foreman *et al.* (2015a), à savoir un intervalle qui constitue une résolution temporelle suffisante pour résoudre les principaux constituants des marées.

De plus, dans PTrack, il faut définir deux intervalles de temps, l'un pour déterminer à quelle fréquence calculer la position de la particule et l'autre pour produire la position de la particule. Étant donné que nos FVCOM côtiers utilisent des grilles irrégulières dont la résolution peut aller jusqu'à 60 m dans des chenaux étroits, de forts courants peuvent rapidement faire passer des particules à travers plusieurs éléments de la grille. Pour résoudre les déplacements des particules, nos simulations dans PTrack ont donc calculé la position des particules toutes les deux minutes et l'ont enregistrée dans un fichier de sortie toutes les 20 minutes.

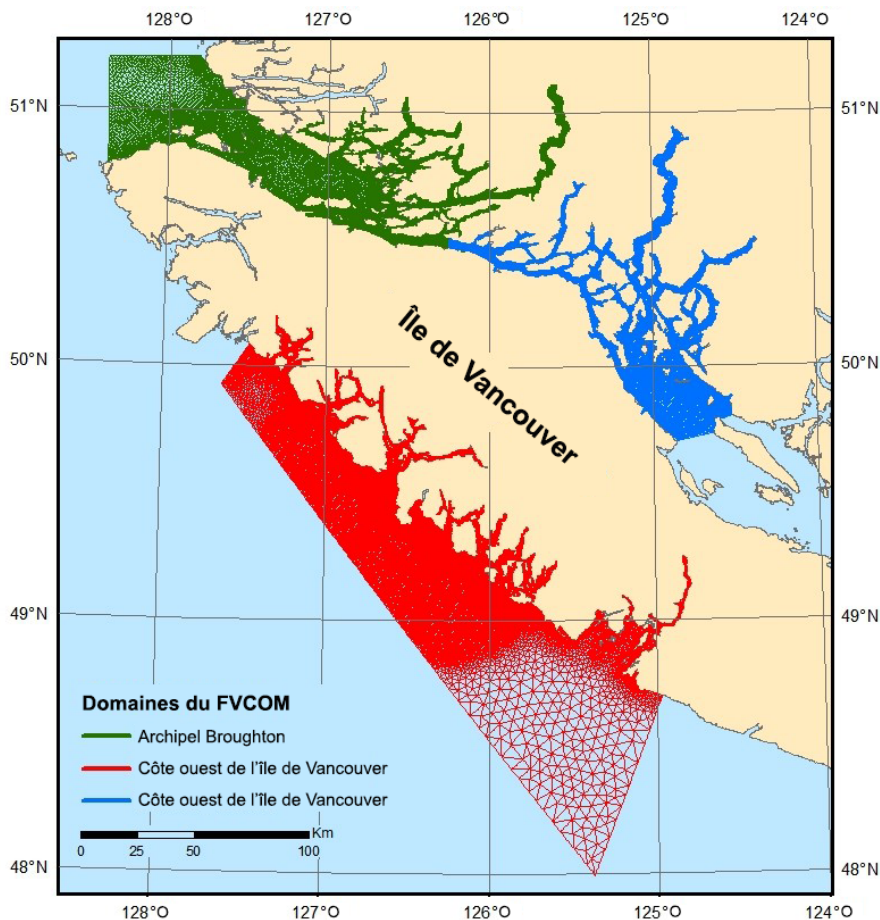


Figure 1. Trois domaines du FVCOM. Archipel de Broughton (AB, cyan), îles Discovery (ID, bleu) et côte ouest de l'île de Vancouver (COIV, rouge), en Colombie-Britannique, Canada.

Tableau 1. Différences de configuration du modèle de suivi des particules entre celui utilisé dans Foreman et al. (2015a) et le présent rapport.

Détails du modèle	Foreman et al. (2015a)	Configuration actuelle
<i>Particules rejetées</i>	50 particules Rejetées toutes les heures À partir d'un prisme de 100 m x 100 m x 10 m Suivies pendant 11 jours	30 particules Rejetées toutes les deux heures À partir d'une superficie de 100 m x 100 m Suivies pendant 14 jours
<i>Marche aléatoire</i>	Oui	Non
<i>Particules atteignant la terre</i>	Ne s'échouent pas. Restent à leur dernier emplacement dans l'eau et s'éloignent sous l'effet des courants.	S'échouent. Arrêt du suivi.

Analyse et réponse

Description des modèles hydrodynamiques

Comme nous l'avons mentionné dans la section Renseignements de base, nous avons utilisé les simulations du FVCOM pour les îles Discovery (ID) et l'archipel Broughton (AB), selon les descriptions données dans Foreman *et al.* (2015a). La simulation couvrait la période du 1^{er} avril au 31 octobre 2010 (214 jours) pour les îles Discovery et du 1^{er} mars au 31 juillet 2009 (153 jours) pour l'archipel Broughton. Le modèle de l'archipel Broughton est une version mise à jour (avec une grille améliorée) du modèle décrit dans Foreman *et al.* (2009); le modèle des îles Discovery a été décrit pour la première fois dans Foreman *et al.* (2012). Les domaines du modèle sont illustrés sur la figure 1 et d'autres détails à leur sujet se trouvent dans Foreman *et al.* (2015a) et dans le tableau 2.

Le troisième modèle représente la côte ouest de l'île de Vancouver et s'étend du détroit Barkley au sud jusqu'au détroit Kyuquot au nord (figure 1). La résolution horizontale va de moins de 60 m dans les bras de mer côtiers jusqu'à 9,2 km au bord du plateau continental. En particulier, la plus haute résolution se trouve dans les détroits Clayoquot et Nootka, qui abritent la plupart des exploitations. Cette version du modèle a tiré parti de la nouvelle version de FVCOM (version 4.1; [dépôt GitLab](#) du MPO et Chen *et al.* 2013). Elle a également repris plusieurs des recommandations de travaux futurs présentées dans Foreman *et al.* (2015a). Par exemple, elle utilise un modèle atmosphérique régional pour fournir des renseignements sur le forçage de surface (c.-à-d. les vents et les flux de chaleur en surface), le Système à haute résolution (2,5 km) de prévision déterministe (SHRPD) élaboré par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) (Milbrandt *et al.* 2016). De plus, elle applique un modèle océanique régional pour obtenir ses conditions initiales et de frontières ouvertes, le Système côtier de prévision océan-glace pour la côte ouest du Canada (CIOPS-W) mis au point par le Réseau opérationnel canadien de systèmes couplés de prévision environnementale (CONCEPTS) (Paquin *et al.* 2019, Blanken *et al.* 2019). Les simulations disponibles à ce jour couvrent la période du 1^{er} mars au 30 juin 2016 (122 jours). De plus amples détails sont donnés dans le tableau 2 et dans une publication à venir de Foreman *et al.*¹.

Tableau 2. Détails de la configuration du FVCOM pour les trois domaines (AB : archipel de Broughton, ID : îles Discovery, COIV : côte ouest de l'île de Vancouver).

Détails du modèle	AB	ID	COIV
<i>Grille :</i>			
<i>Nœuds</i>	97 192	35 859	76 611
<i>Éléments</i>	166 602	65 930	137 644
<i>Couches verticales</i>	20	20	20
<i>Profondeur minimale – maximale</i>	5 à 500 m	5 à 678 m	5 à 366 m

¹ Foreman M., P. Chandler, D. Wan, M. Krassovski, P. Thupaki, L. Bianucci, G. Cooper et D. Spears. 2022. A Circulation Model for Inlets along the Central West Coast of Vancouver Island. En préparation.

**Réponse des Sciences : Connectivité hydrodynamique
entre les installations de pisciculture marine**

<i>Détails du modèle</i>	<i>AB</i>	<i>ID</i>	<i>COIV</i>
<i>Forçage atmosphérique (vents et flux de chaleur en surface)</i>	D'après les observations	D'après les observations	Par le Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD)
<i>Conditions initiales</i>	D'après les observations	D'après les observations	Par le Système côtier de prévision océan-glace pour la côte ouest du Canada (CIOPS-W)
<i>Conditions de frontières ouvertes</i>	D'après les observations	D'après les observations	Par le CIOPS-W
<i>Forçage du fleuve</i>	D'après les observations	D'après les observations	D'après les observations, les analyses de régression et les zones des bassins hydrographiques
<i>Version du FVCOM</i>	2.7	2.7	4.1

Analyse du suivi des particules et de la connectivité hydrodynamique : procédure

La Direction de la gestion de l'aquaculture du MPO a fourni l'emplacement de 90 exploitations qui se trouvent dans les domaines du FVCOM (31 dans l'archipel de Broughton, 21 dans les îles Discovery et 38 sur la COIV). Toutes ces exploitations sont titulaires d'un permis, sauf une (Ga-guump est un projet d'exploitation dans la région de l'archipel de Broughton). Aux fins du présent document, nous considérons que toutes les exploitations de chaque domaine du FVCOM fonctionnent de façon synchronisée. En utilisant les latitudes et longitudes centrales des 90 installations, des boîtes représentatives de 100 m sur 100 m centrées à ces endroits ont été identifiées comme des « exploitations » pour le rejet et le captage de particules. Dans cinq cas (baie Doctor dans les îles Discovery, Ghi Ya et baie Hardy dans l'archipel de Broughton, et la baie Jane et San Mateo sur la COIV), les boîtes ont été légèrement éloignées de la terre (figure 2). À ces endroits, la résolution des modèles n'était pas assez élevée pour représenter correctement le littoral de ces petites baies (à noter que ces zones n'étaient pas au cœur de l'étude pendant l'élaboration du modèle). En particulier, l'exploitation de la baie Jane n'était même pas incluse dans le domaine du modèle (figure 2a). À l'exception de la baie Doctor, de la baie Hardy, de la baie Jane et de San Mateo (voir la figure 2), nous avons confirmé que toutes les boîtes carrées finales se trouvaient dans la zone de concession de chaque exploitation. Bien que nous puissions appeler ces boîtes des « exploitations » dans le présent document, il s'agit d'une représentation simplifiée des exploitations plutôt que d'une caractérisation réaliste, étant donné que les installations réelles peuvent varier en forme, en superficie et en orientation.

À l'intérieur de chaque boîte carrée, 30 particules neutres réparties aléatoirement ont été rejetées toutes les deux heures à partir du 9^e jour de la simulation (les 8 premiers jours n'ont pas été utilisés pour éviter les effets des conditions initiales du modèle sur le champ d'écoulement). Chaque particule s'est déplacée avec les courants tridimensionnels pendant 14 jours ou jusqu'à ce qu'elle atteigne une frontière (la terre ou la frontière océanique ouverte du modèle, selon la première de ces éventualités). Il est à noter que les simulations ont suivi les

particules neutres passives et que la trajectoire n'a pas été influencée par le comportement des particules, comme de flotter ou de couler sous l'effet de leur propre poids. Les particules flottantes qui restent à la surface ont également été étudiées, mais les particules neutres ont présenté un résultat plus prudent (elles avaient une plus grande portée) et ont donc été utilisées (voir l'annexe). La connectivité hydrodynamique entre les exploitations dans une région modélisée a été déterminée par le nombre de particules du total rejeté par une « exploitation émettrice » qui ont atteint ou traversé d'autres boîtes carrées (les « exploitations réceptrices »). Nous avons évalué cette connectivité pendant 14 périodes : 1 jour (c.-à-d. dans les 24 heures) suivant le rejet de chaque particule, 2 jours (48 heures) après le rejet de chaque particule, etc., jusqu'à 14 jours après le rejet de chaque particule.

Lorsque cette information est organisée dans un tableau (avec des lignes et des colonnes montrant les exploitations réceptrices et émettrices, respectivement), nous obtenons 14 matrices de connectivité (une par période d'analyse). En outre, le nombre de particules atteignant chaque exploitation réceptrice a également été présenté en pourcentage du nombre total de particules rejetées, c.-à-d. le nombre de particules atteignant l'exploitation réceptrice divisé par le nombre total de particules rejetées par l'exploitation émettrice (il convient de noter que chacune des 14 périodes a compté avec le même nombre total de particules rejetées, que nous ayons analysé les 24 premières heures ou les 14 jours). Ainsi, pour chaque région modélisée, nous créons les informations suivantes :

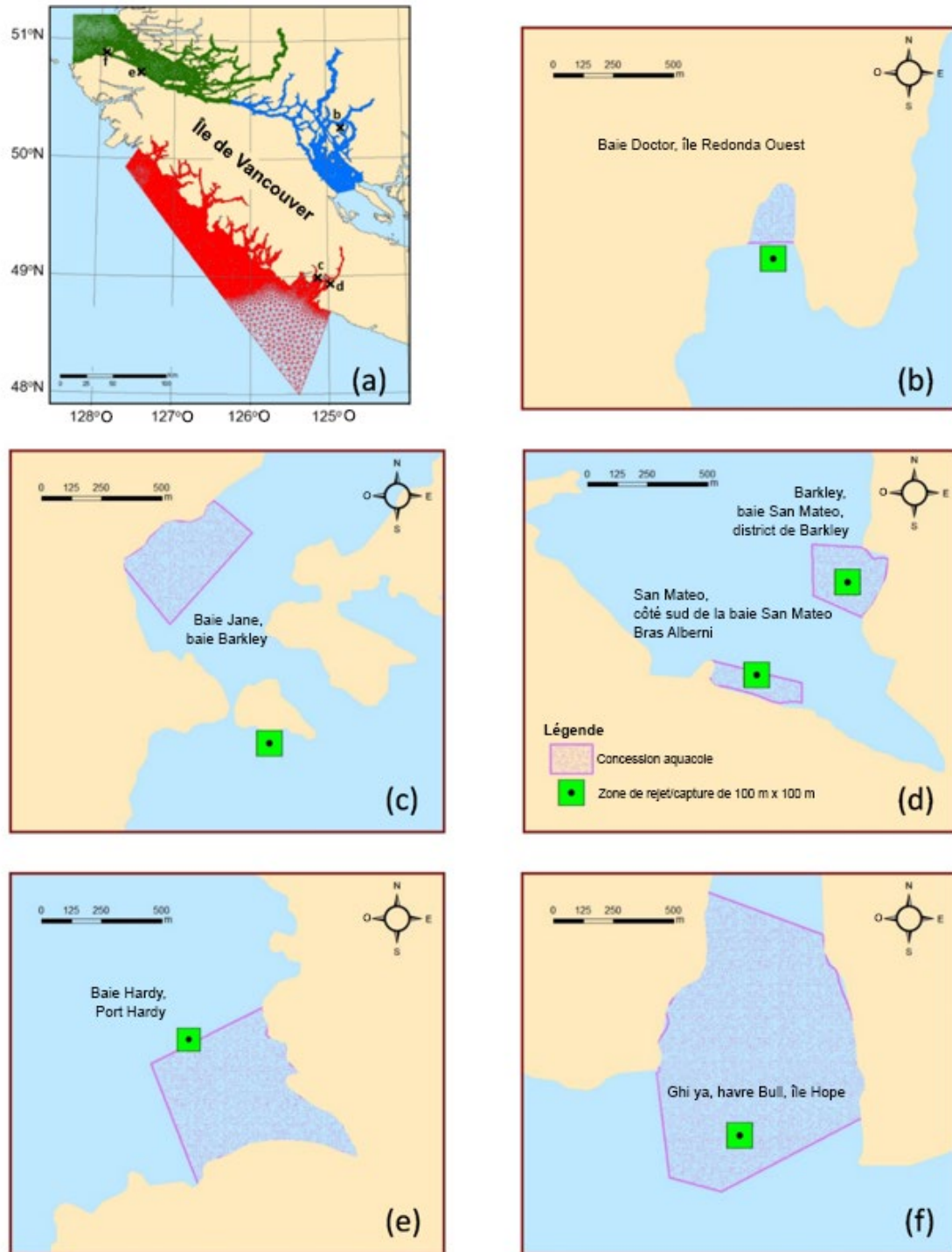


Figure 2. (a) Carte montrant (par les croix noires) l'emplacement général des cinq boîtes de 100 m sur 100 m qui ont été déplacées de leur emplacement central vers le large pour éviter les problèmes dus à la faible résolution du littoral. Les croix sont étiquetées selon le graphique qui indique l'emplacement final détaillé (en vert) des boîtes de 100 m x 100 m : b) baie Doctor dans les îles Discovery; c, d) baie Jane et San Mateo sur la COIV; e, f) baie Hardy et Ghi Ya dans l'archipel de Broughton. Les régions en rose indiquent les zones de concession des permis.

Région du Pacifique

- Une feuille de calcul avec 28 sous-feuilles : 14 feuilles avec les matrices de connectivité indiquant le nombre de particules et 14 feuilles avec les matrices de connectivité indiquant des pourcentages (une feuille par période d'analyse, c.-à-d. 1, 2, 3, ..., 14 jours après le rejet).
- Quatorze diagrammes matriciels (un par période d'analyse) montrant les nombres de particules et le codage en couleur en pourcentage.

Les diagrammes matriciels illustrent la connectivité estimée entre les sites des exploitations réceptrices et émettrices. Le degré élevé de connectivité le long de la diagonale montre que l'exploitation rejetant les particules reçoit également toutes ces particules. La symétrie par rapport à la diagonale dénote un échange mutuel de particules entre les exploitations, tandis que l'asymétrie peut s'expliquer en grande partie par les champs d'écoulement de base (estuarien en surface) moyens. Tous les renseignements générés sont examinés par région modélisée dans les sous-sections qui suivent. Nous avons également créé des cartes montrant les trajectoires des particules pendant les dernières 24 heures pour chaque période d'analyse (c.-à-d. les trajectoires du temps de rejet à 24 heures, de 24 à 48 heures, etc.); un exemple est fourni en annexe (figure A1). Étant donné le grand nombre de figures et de fichiers, seul un sous-ensemble est présenté dans ce document.

Côte ouest de l'île de Vancouver (COIV)

Le modèle de la COIV a simulé les conditions océaniques du 1^{er} mars au 30 juin 2016 (122 jours). Le rejet de 30 particules toutes les deux heures du 9 mars 2016 à 0 h jusqu'à deux semaines avant la fin de la simulation (17 juin à 0 h) a permis de suivre un total de 36 000 particules rejetées par chacune des 38 exploitations (emplacement indiqué sur la figure 3).

Un certain degré de connexion a été relevé entre la plupart des exploitations et les installations avoisinantes dans les 24 heures suivant le rejet des particules (figure 4), et peut être observé par la coloration ou la numérotation des cellules sur la ligne de chaque exploitation émettrice (au-delà de la cellule rouge qui représente les particules rejetées par cette même exploitation). Les exceptions étaient l'île Surprise, dans le détroit Kyuquot (exploitation n° 1872) et la baie Jane, dans le détroit Barkley (exploitation n° 270), qui a commencé à recevoir des particules des exploitations du détroit Barkley (San Mateo et Barkley, exploitations n° 224 et 169, respectivement) après les 24 premières heures (figure 5); toutefois, ces particules représentaient toujours moins de 0,1 % des 36 000 particules rejetées.

À mesure que le temps s'écoulait jusqu'au 14^e jour (figure 6), la connectivité hydrodynamique s'établissait davantage dans la plupart des régions. Plus de cellules colorées sont apparues (établissement de la connectivité entre des exploitations plus éloignées) et les couleurs sont passées du gris au violet et au bleu (intensification de la connectivité entre les exploitations avoisinantes). Ces changements ont été les plus notables dans le détroit Clayoquot (exploitations de la baie Eagle à la baie Dixon dans les figures 3, 4 et 5), mais aussi dans le bras Esperanza (exploitations de Charlie's Place à l'île Whiteley) et le détroit Nootka (exploitations d'Hécate à la pointe Steamer). Les exceptions étaient le détroit Barkley (exploitations de San Mateo à la baie Jane) et l'île Surprise à Esperanza, où la connectivité établie durant les 24 premières heures n'a pas beaucoup changé pendant les 14 jours de l'analyse.

Dans cette étude, les installations les plus connectées étaient San Mateo et Barkley (dans le détroit Barkley) et Hécate et ruisseau Lutes (n° 1862 et 1078, respectivement, dans le bras Esperanza). Les deux dernières ont conservé le même degré de connectivité (à 70 et 75 %

pour les deux) pendant les 14 jours de l'analyse (c.-à-d. de 24 heures à 14 jours après le rejet). En revanche, dans le détroit Barkley, San Mateo a reçu la plupart des particules de Barkley (jusqu'à 65-70 %), mais la connexion était plus faible dans l'autre sens (jusqu'à 15 %).

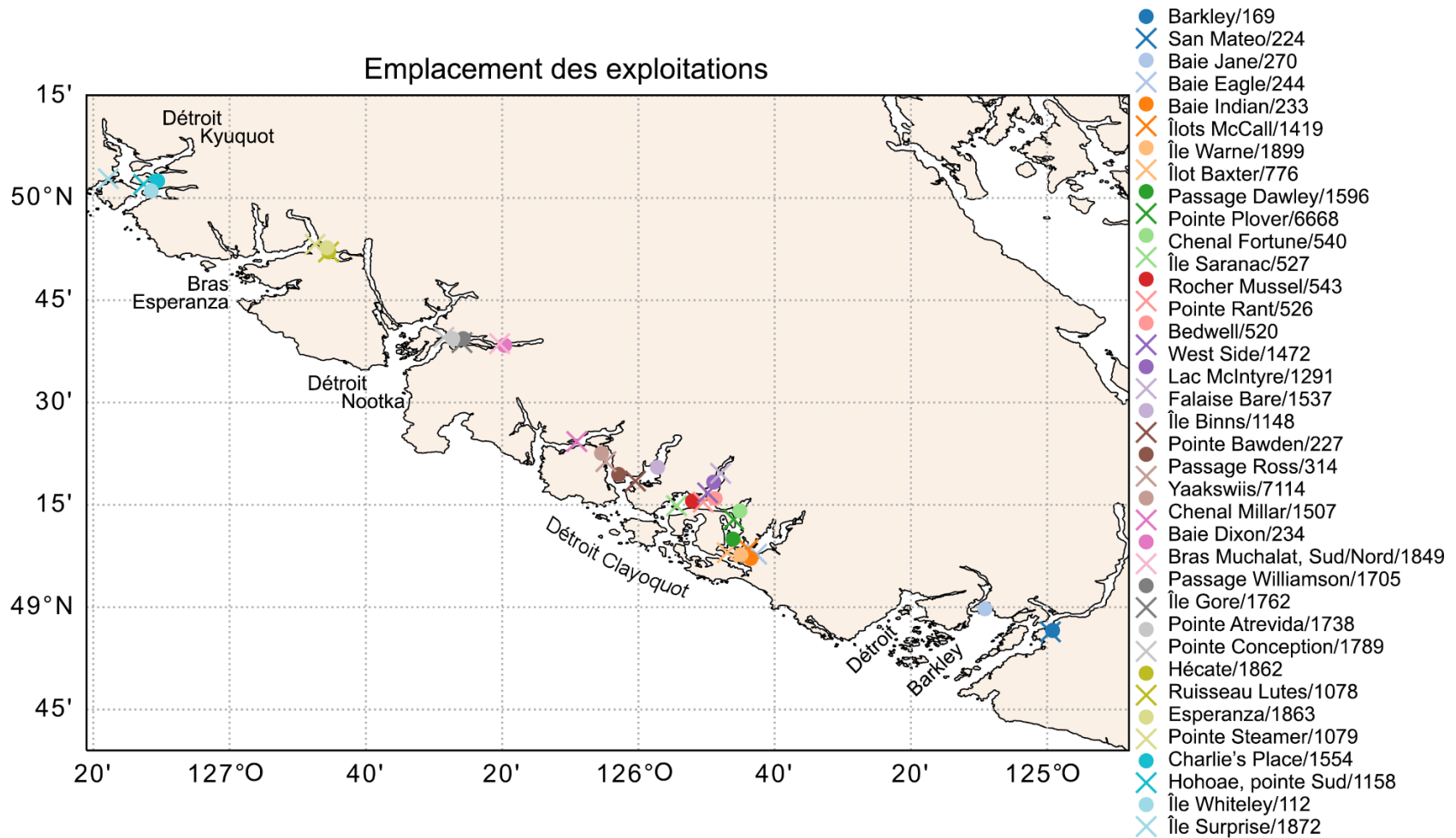


Figure 3. Emplacement des 38 exploitations utilisées pour l'analyse de la connectivité hydrodynamique avec le modèle de la côte ouest de l'île de Vancouver. La légende indique le nom de l'exploitation et le numéro de référence de l'installation.

Îles Discovery

Les simulations pour les îles Discovery ont été les plus longues, couvrant la période du 1^{er} avril au 31 octobre 2010 (214 jours). En rejetant 30 particules toutes les deux heures à partir du 9 avril à 0 h, le modèle a suivi un total de 69 120 particules rejetées par chacune des 21 exploitations.

La plus forte connectivité hydrodynamique a été observée principalement entre les exploitations qui se trouvaient dans les mêmes chenaux et à proximité les unes des autres (figures 7, 8 et 9). Par exemple :

- Chenal Okisollo : connexion allant jusqu'à 15 % entre les exploitations de la baie Barnes (n° 871), de l'île Sonora (n° 211), de la pointe Venture (n° 306) et de l'île Brent (n° 401)
- Chenal Hoskyn : connexion allant jusqu'à 20 % entre l'île Read (exploitation n° 447) et la baie Dunsterville (n° 138), mais la connexion dans le sens inverse était toujours inférieure à 5 %
- Chenal Chancellor : connexion allant jusqu'à 20 % entre le chenal Chancellor (n° 790) et la baie Lees (n° 100), mais la connexion dans le sens inverse était toujours inférieure à 5 %

La plupart des exploitations ont reçu entre 0,1 et 5 % des 69 120 particules rejetées par au moins une autre (cellules grises dans les figures 8 et 9). Une exploitation, dans la baie Doctor (n° 456), était complètement isolée des autres (c.-à-d. qu'elle n'a ni reçu, ni émis de particules pendant les 14 jours de l'analyse; figures 7 et 9). Cet isolement était dû à son emplacement, loin des autres exploitations, dans un chenal isolé (figure 7). Les exploitations de l'île Raza (n° 304) et de l'est de l'île Maude (n° 216), qui n'ont pas d'exploitation voisine, étaient également assez isolées du reste et n'ont reçu que 5 et 22 particules des autres pendant les 14 jours, respectivement ($\leq 0,03$ % du nombre total de particules rejetées).

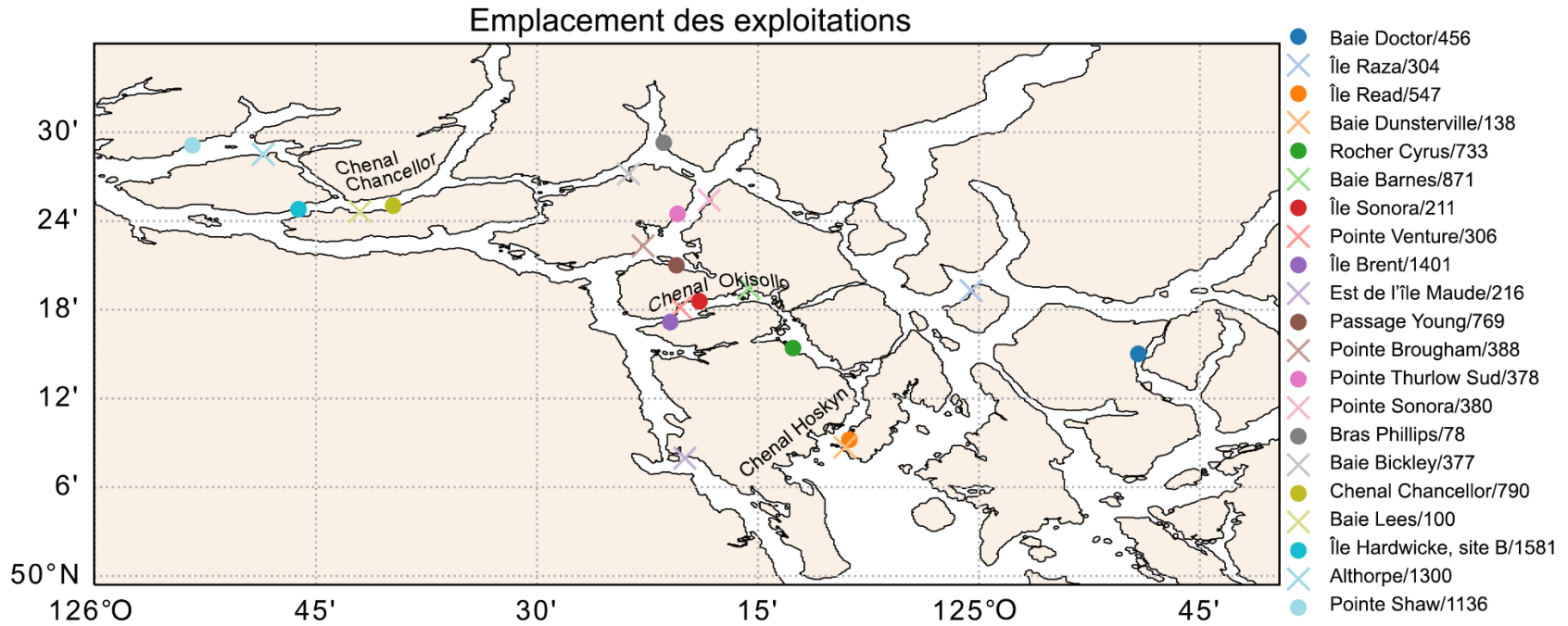


Figure 7. Emplacement des 21 exploitations utilisées pour l'analyse de la connectivité hydrodynamique avec le modèle des îles Discovery. La légende indique le nom de l'exploitation et le numéro de référence de l'installation.

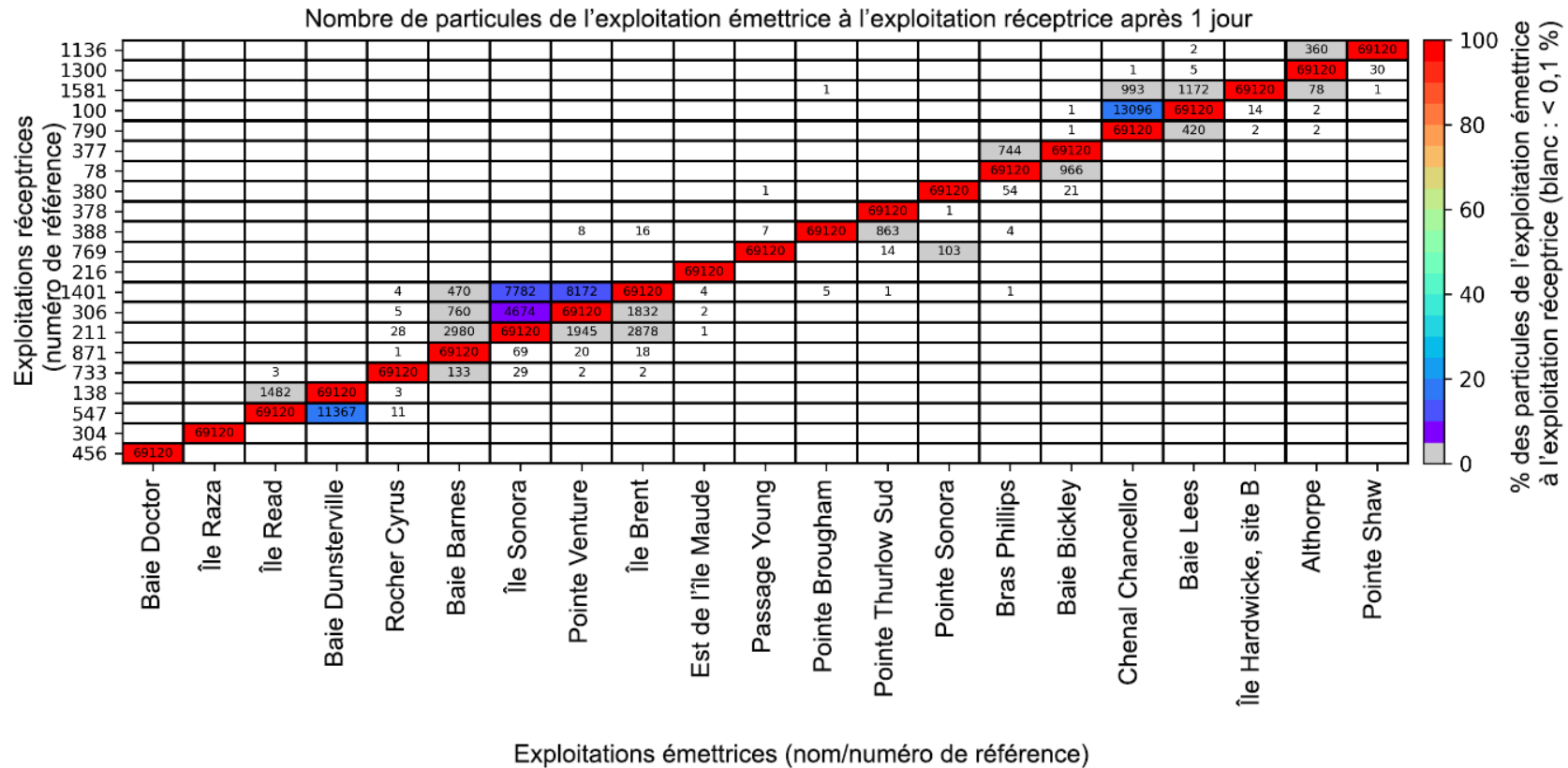


Figure 8. Matrice de connectivité hydrodynamique pour les 21 exploitations utilisées dans le domaine des îles Discovery, 24 heures après le rejet de particules. Les exploitations émettrices et réceptrices des particules sont indiquées sur les axes des abscisses et des ordonnées, respectivement. Chaque cellule indique le nombre de particules qui ont atteint une « exploitation réceptrice » donnée (zéros non montrés). L'échelle de couleurs représente le pourcentage de particules rejetées qui atteignent l'exploitation réceptrice (les couleurs changent tous les 5 %, sauf pour les valeurs inférieures à 0,1 %, qui sont indiquées en blanc). La figure 7 illustre l'emplacement des exploitations.

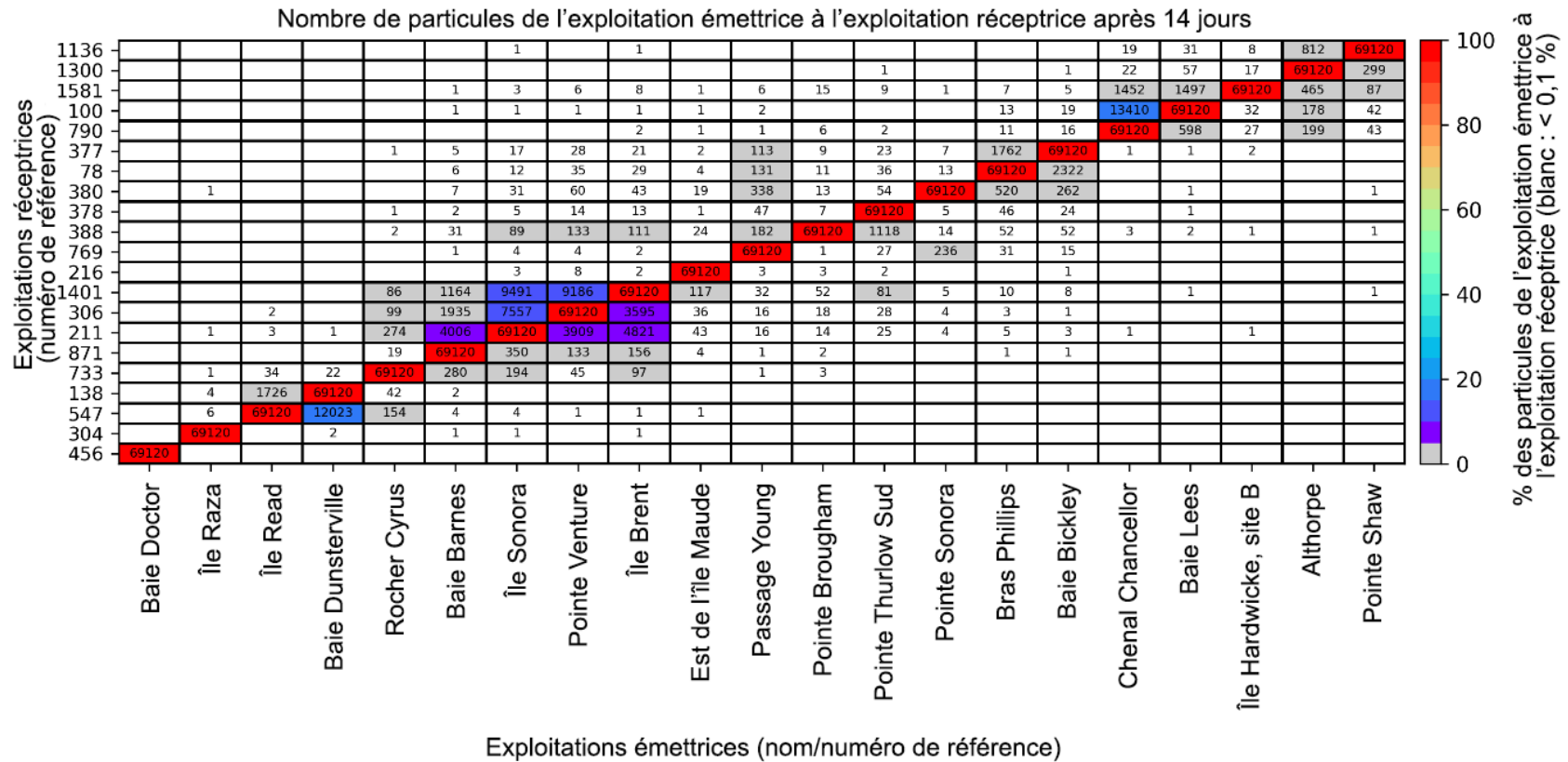


Figure 9. Matrice de connectivité hydrodynamique pour les 21 exploitations utilisées dans le domaine des îles Discovery, 14 jours après le rejet de particules. La légende est identique à celle de la figure 8. La figure 7 illustre l'emplacement des exploitations.

Archipel de Broughton

Les simulations dans l'archipel de Broughton couvraient la période du 1^{er} mars au 31 juillet 2009 (153 jours). Le nombre total de particules suivies était de 47 160 par exploitation (30 particules toutes les deux heures à partir du 9 mars 2009 à 0 h).

La connectivité hydrodynamique entre les exploitations de cette région (figure 10) était relativement faible au cours des 24 premières heures (figure 11), lorsque seules deux exploitations réceptrices ont reçu plus de 5 % des particules d'une exploitation émettrice (Ghi Ya, n° 7053, a capturé moins de 15 % des particules de Wanx Talis, n° 7054, et Whelis Bay, n° 1335, en a reçu moins de 10 % de Simmonds Bay, n° 1336). En fait, la connectivité était inférieure à 5 % pour la plupart des exploitations pendant les 14 jours de l'analyse (cellules blanches ou grises sur la figure 12), à quelques exceptions près :

- Chenal Goletas : connexion allant jusqu'à 15 % entre Ghi Ya (ferme n° 7053) et Wanx Talis (n° 7054), mais la connexion dans le sens inverse était toujours inférieure à 5 %;
- Passage Wells : connexion allant jusqu'à 10 % entre les exploitations de Wanx Talis (n° 7054) et de Simmonds Bay (n° 1336);
- Détroit de Greenway : connexion allant jusqu'à 10 % entre l'île Cecil (n° 819) et l'île Maude (n° 869), mais la connexion dans le sens inverse était toujours inférieure à 5 %;
- Chenal Clio : connexion allant jusqu'à 10 % entre Tsa-ya (n° 7273) et Noo-La (n° 1825), mais la connexion dans le sens inverse était toujours inférieure à 5 %;
- Limite nord du détroit de la Reine-Charlotte : connexion allant jusqu'à 10 % entre l'île Robertson (n° 1382) et la baie Marsh (n° 1351) et à la baie Shelter (n° 1350), mais la connexion dans le sens inverse était toujours inférieure à 5 %.

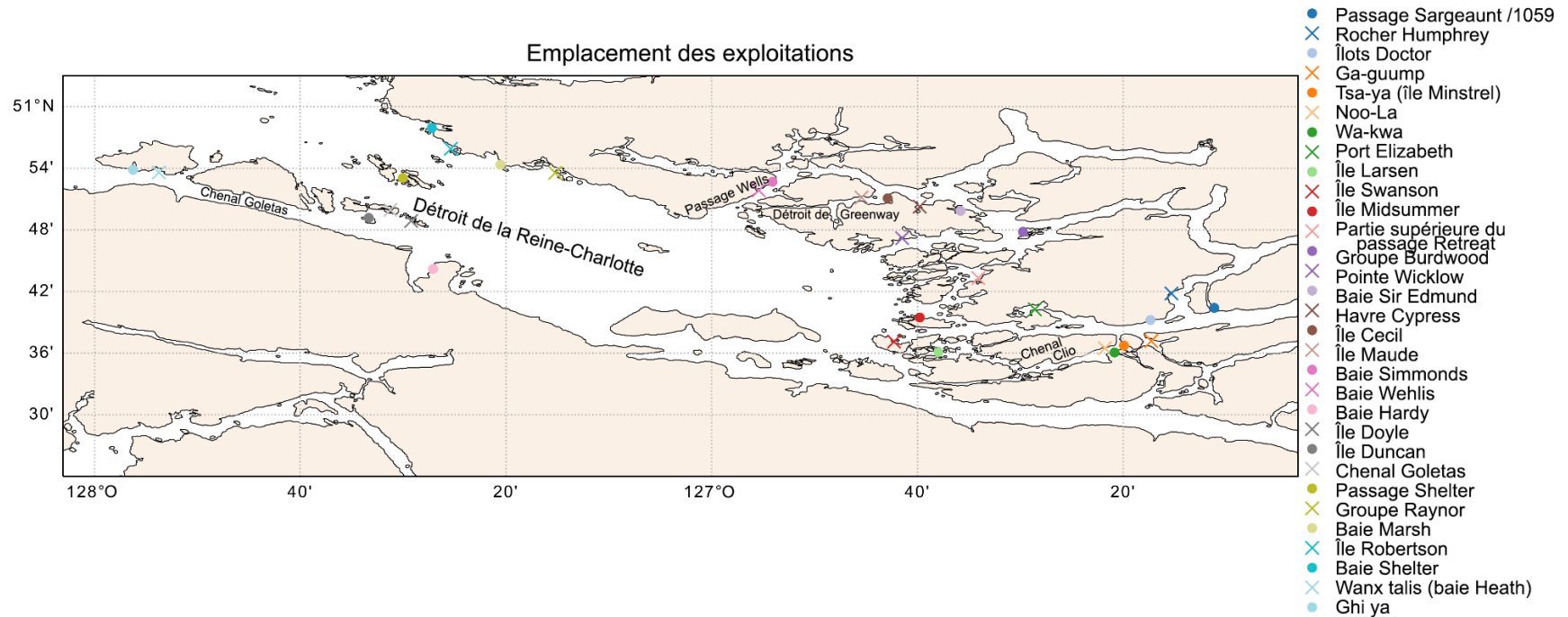


Figure 10. Emplacement des 31 exploitations utilisées pour l'analyse de la connectivité hydrodynamique avec le modèle de l'archipel de Broughton. La légende indique le nom de l'exploitation et le numéro de référence de l'installation.

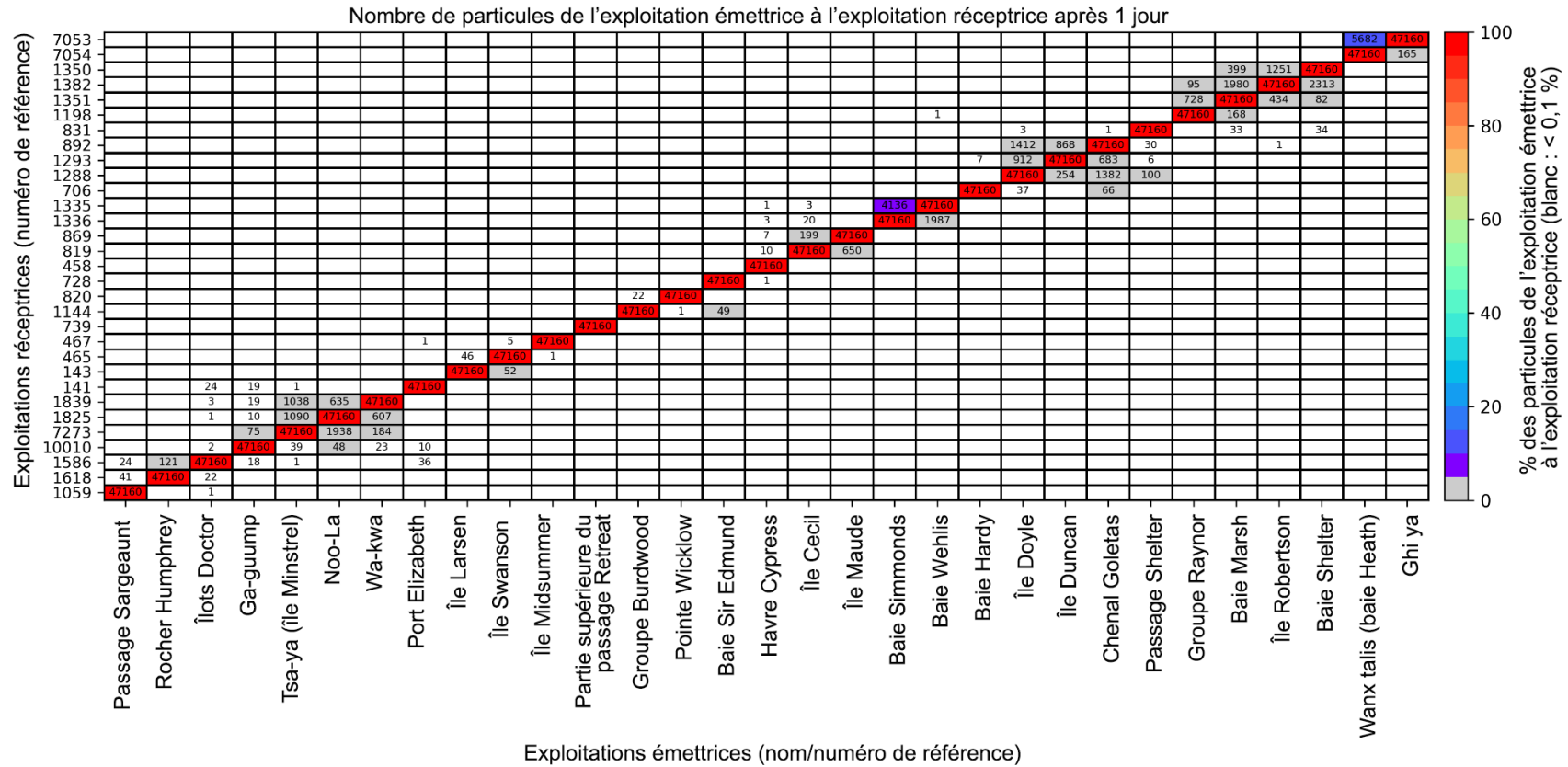


Figure 11. Matrice de connectivité hydrodynamique pour les 31 exploitations utilisées dans le domaine de l'archipel de Broughton, 1 jour après le rejet de particules. Les exploitations émettrices et réceptrices des particules sont indiquées sur les axes des abscisses et des ordonnées, respectivement. Chaque cellule indique le nombre de particules qui ont atteint une « exploitation réceptrice » donnée (zéros non montrés). L'échelle de couleurs représente le pourcentage de particules rejetées qui atteignent l'exploitation réceptrice (les couleurs changent tous les 5 %, sauf pour les valeurs inférieures à 0,1 %, qui sont indiquées en blanc). La figure 10 illustre l'emplacement des exploitations.

Réponse des Sciences : Connectivité hydrodynamique entre les installations de pisciculture marine

Région du Pacifique

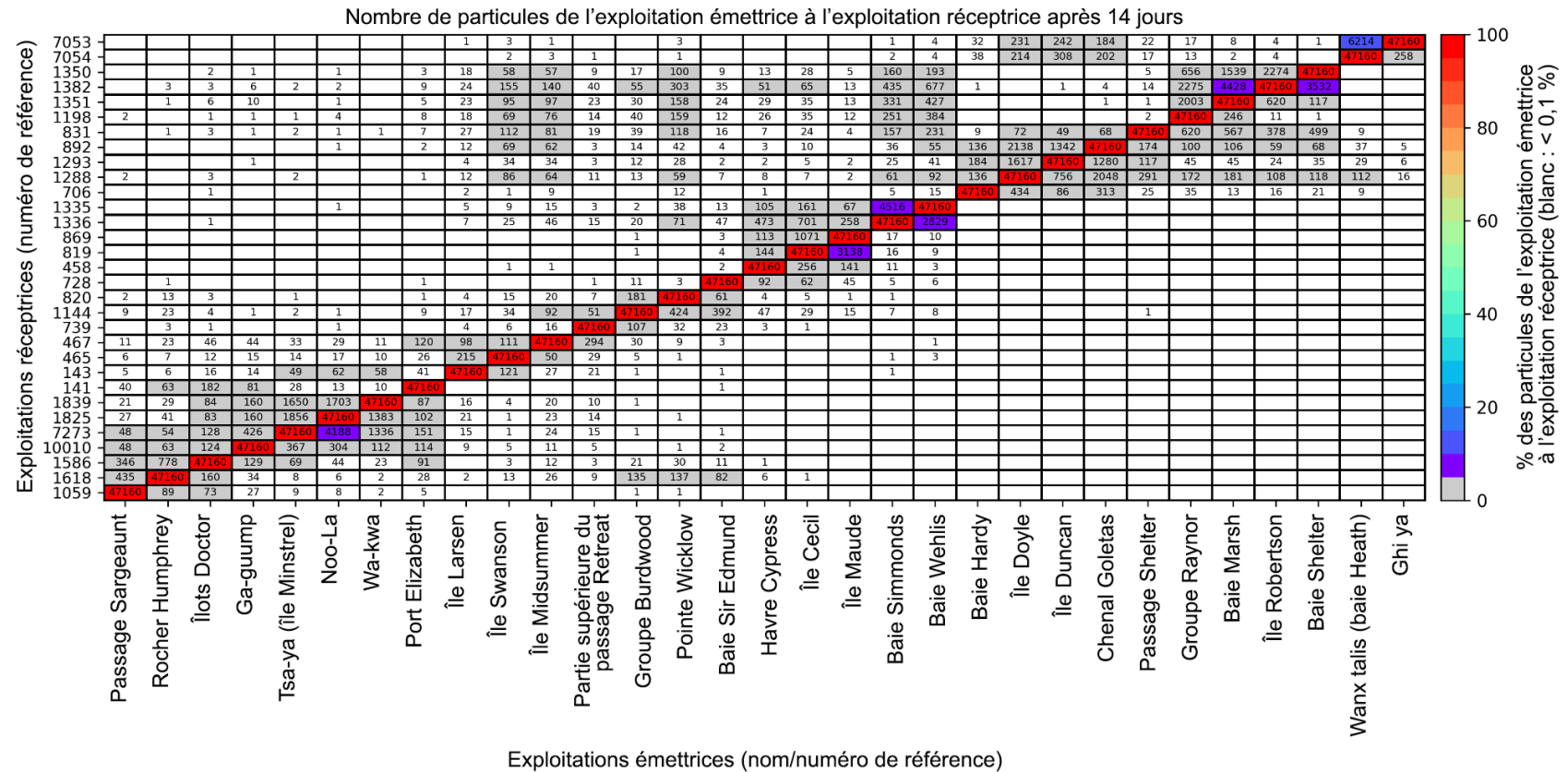


Figure 12. Matrice de connectivité hydrodynamique pour les 31 exploitations utilisées dans le domaine de l'archipel de Broughton, 14 jours après le rejet de particules. La légende est identique à celle de la figure 11. La figure 10 illustre l'emplacement des exploitations.

Conclusions

Dans le présent rapport, nous avons décrit trois modèles hydrodynamiques pour la côte de la Colombie-Britannique qui existent au MPO et nous avons suivi l'approche adoptée dans Foreman *et al.* (2015a) pour produire des matrices quotidiennes de connectivité hydrodynamique pendant 14 jours pour chaque exploitation existante en Colombie-Britannique. Ces matrices de connectivité étaient définies comme l'objectif unique dans le mandat du présent document. Notre analyse des matrices de connectivité a été intentionnellement brève, puisqu'une analyse détaillée sort de la portée du mandat. Néanmoins, toutes les données produites (matrices de connectivité en format graphique et tableur, ainsi que les trajectoires des particules comme celle présentée en annexe) sont disponibles si la Direction de la gestion de l'aquaculture souhaite les examiner de manière plus approfondie. Dans cette section, nous profitons de l'occasion pour souligner certaines réserves et limites de l'étude en cours, ainsi que certaines recommandations de travaux futurs.

Mises en garde et limites

Comme pour tout travail de modélisation numérique, une interprétation correcte est primordiale. Voici quelques-uns des principaux points à garder à l'esprit pour analyser les résultats de la connectivité hydrodynamique et les utiliser :

- Dans cette étude, les particules ont été considérées comme passives (uniquement déplacées par les courants) et neutres (elles ne coulent pas sous leur propre poids), et l'intention n'est pas qu'elles représentent un type particulier de rejet provenant des exploitations (p. ex. pou du poisson, virus, pesticides). Des espèces et des polluants différents se comportent différemment, peuvent couler et être soumis à des courants à des profondeurs différentes, et peuvent devoir faire l'objet d'un suivi sur des périodes différentes. Pour répondre aux questions sur la connectivité concernant un organisme ou un contaminant en particulier, l'approche de modélisation peut être modifiée pour représenter des caractéristiques de dispersion précises (capacité de la particule de flotter ou d'éviter certaines conditions océaniques, de couler, de se désintégrer à un rythme connu sous un rayonnement ultraviolet, etc.). Par exemple, une telle modélisation a été entreprise pour Mimeault *et al.* (2017). Dans l'étude qui nous intéresse, la sélection de particules neutres passives faisant l'objet d'un suivi pendant une période maximale de 14 jours représente le plus grand potentiel de connectivité entre les exploitations au cours de cette période. Les particules modélisées ne représentent pas un agent pathogène ou un organisme précis; elles ne présentent pas non plus les caractéristiques d'un agent pathogène ou d'un organisme en particulier.
- Les champs de circulation océanique du FVCOM ne peuvent représenter que la période indiquée pour chaque modèle (îles Discovery : 1^{er} avril au 31 octobre 2010; archipel de Broughton : du 1^{er} mars au 30 juin 2009; COIV : du 1^{er} mars au 30 juin 2016). Ces périodes correspondent à plusieurs mois d'une année donnée et ne peuvent donc pas représenter le cycle saisonnier complet ou la variabilité interannuelle. De plus, bien que les courants de marée soient généralement assez réguliers et prévisibles, les composantes du courant, c'est-à-dire le courant estuarien et le vent, et donc les modèles de dispersion qui en découlent, peuvent varier sur des échelles de temps très différentes. Les résultats du suivi des particules et de la connectivité peuvent ainsi être différents si des périodes différentes sont modélisées. L'exécution de nos modèles pour un plus large éventail de conditions et l'utilisation de ces résultats pour estimer la variabilité et l'incertitude seraient une façon de régler ce problème, mais une telle approche nécessiterait des ressources importantes

(personnel et ordinateurs) et une analyse des risques pourrait montrer qu'elle n'est pas justifiée.

- Bien que les modèles océaniques visent à représenter l'océan réel, leurs résultats sont des occurrences simulées (ne reflètent pas forcément la réalité). Les inexactitudes du modèle de circulation s'expliquent par diverses raisons, comme une résolution de grille insuffisante, des champs de forçage et des conditions de frontières inexacts, une bathymétrie inexacte (p. ex. lissée), des approximations numériques inexacts des équations (primitives) de gouvernance, les paramétrages du mélange et de la diffusion inexacts, et les paramètres physiques non reflétés par les équations de gouvernance. Certaines des lacunes des modèles sont connues, mais d'autres sont plus difficiles à cerner ou à isoler. Par conséquent, des inexactitudes dans les résultats du suivi des particules proviendront de celles des champs du modèle de circulation. Des publications antérieures ont évalué l'exactitude de plusieurs versions des modèles de l'archipel de Broughton (Foreman *et al.* 2009) et des îles Discovery (Foreman *et al.* 2012, 2015b) par rapport aux observations disponibles.
- Nous avons maintenant accès à des modèles atmosphériques et régionaux qui peuvent fournir un forçage de surface et de frontière pour nos simulations, comme le recommandent Foreman *et al.* (2015a) (l'application plus récente pour la COIV utilise ces forçages). L'immense avantage d'utiliser ces modèles à plus grande échelle est que nous pouvons facilement obtenir les intrants nécessaires pour simuler différentes périodes. Cependant, la résolution des modèles atmosphériques disponibles (à une résolution de 2,5 et 1 km) n'est toujours pas suffisante pour représenter adéquatement les vents sur les côtes complexes de la Colombie-Britannique. Des améliorations peuvent donc encore être apportées en ce qui concerne le forçage de surface disponible pour nos modèles hydrodynamiques côtiers.

Recommandations

D'autres essais et expériences seraient souhaitables pour améliorer les méthodes présentées dans le présent document :

- Comme nous le mentionnons dans le deuxième point de la sous-section précédente, des simulations plus longues du FVCOM pourraient être mises à l'essai, à condition que les ressources humaines et informatiques requises soient disponibles. Par exemple, on pourrait choisir une année représentative ou une année de conditions extrêmes pour faire simuler une année complète par le FVCOM. Il convient toutefois de noter que, bien que nos ressources informatiques aient augmenté considérablement depuis les travaux de Foreman *et al.* (2015a), les frais de calcul et de stockage des extraits obtenus pourraient encore être conséquents. Les fichiers de sortie mensuels du FVCOM sont actuellement de 20, 68 et 74 Go pour les îles Discovery, l'archipel de Broughton et la COIV, respectivement.
- Bien que le coût de simulations à long terme puisse être prohibitif (tant sur le plan informatique que sur celui des ressources humaines), l'exécution et la comparaison de simulations pour différentes périodes ou dans différentes conditions pourraient fournir des renseignements utiles. Par exemple, en effectuant des simulations dans le FVCOM qui ne changent qu'un seul forçage (comme le débit des rivières ou les vents), on pourrait mieux comprendre le rôle de ce forçage dans la dispersion des particules.
- Ici, nous avons rejeté 30 particules passives et neutres simultanément toutes les deux heures; Foreman *et al.* (2015a) en rejetaient une quantité similaire (50). Les essais préliminaires ont montré que 30 peut être un nombre acceptable, du moins dans le domaine de la COIV. Par exemple, 30 particules ont été rejetées à des endroits légèrement différents (également aléatoires) dans les boîtes de 100 m sur 100 m de la COIV, ce qui a donné des

matrices de connectivité assez semblables. Cet essai nous a également permis de constater que, bien que le nombre réel de particules atteignant une autre exploitation puisse varier, le pourcentage qu'elles représentaient par rapport au nombre total de rejets est habituellement demeuré le même ou n'a changé que de plus ou moins 5 %, à quelques exceptions près où les différences de pourcentage étaient plus importantes. Un autre essai avec des rejets de 100 particules d'une des exploitations du détroit Nootka a révélé essentiellement la même connectivité que celui où l'on rejetait 30 particules. Néanmoins, les résultats pourraient différer si ce dernier essai était effectué dans une région où les courants de marée sont plus forts (p. ex. détroit Clayoquot). Il serait donc utile de procéder à d'autres essais pour être absolument certain du nombre de particules nécessaires dans chaque région pour refléter toute la variabilité des champs de circulation modélisés. Idéalement, ces tests seraient effectués chaque fois qu'on analyserait une nouvelle région ou une nouvelle période. L'objectif des essais serait de trouver le plus petit nombre de particules pour lequel les résultats ne changent pas de façon significative si a) on rejette plus de particules et b) les rejets se produisent à des endroits légèrement différents.

- Nous avons relevé des incohérences sur le moment du rejet qui pourraient être liées à l'utilisation d'une précision unique (p. ex. l'horodatage du rejet n'est pas exactement toutes les 20 minutes, mais peut varier, par exemple, entre 19,6875 et 20,039062 minutes). Les tests préliminaires ont permis d'évaluer que les incohérences ne découlent pas de la sortie de la variable de temps avec une seule précision. Il faut vérifier le code PTrack pour les calculs de précision simple ou double et, si effectivement certains calculs sont actuellement effectués avec une seule précision, modifier le code et effectuer les simulations avec une double précision pour vérifier que le choix de la précision n'influence pas les résultats. Toutefois, nous ne nous attendons pas à ce que les résultats changent de façon importante (ou du tout) une fois que les petites incohérences du vecteur temporel seront corrigées.

Collaborateurs

Collaborateur	Organisme d'appartenance
Laura Bianucci	MPO, Sciences, région du Pacifique
Wendy Callendar	MPO, Sciences, région du Pacifique
Peter Chandler	MPO, Sciences, région du Pacifique
Michael Foreman	MPO, Sciences, région du Pacifique
Jon Chamberlain	MPO, Sciences, région du Pacifique

Approuvé par

Andrew Thomson
Directeur régional
Direction des sciences, Région du Pacifique
Pêches et Océans Canada

30 septembre 2021

Sources de renseignements

Adams, T., Black, K., MacIntyre, C., MacIntyre, I., and Dean, R. 2012. Connectivity modelling and network analysis of sea lice infection in Loch Fyne, west coast of Scotland. *Aquacult. Environ. Interact.* 3, 51–63.

- Blanken, H., Paquin, J.-P., Lu, Y., Smith, G., and Taylor, S. 2019. Coastal ice-ocean prediction system (CIOPS-W): a snapshot of Northeast Pacific conditions in 2018. In: State of the Physical, Biological and Selected Fishery Resources of Pacific Canadian Marine Ecosystems in 2018 (Editors: Boldt, J.L., Leonard, J., and Chandler, P.C.). Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 3314: vii + 248 p.
- Bravo, F., Sidhu, J.P.S., Bernal, P., Bustamante, R.H., Condie, S., Gorton, B., Herzfeld, M., Jimenez, D., Mardones, F.O., Rizwi, F., and Steven, A.D.L. 2020. Hydrodynamic connectivity, water temperature, and salinity are major drivers of piscirickettsiosis prevalence and transmission among salmonid farms in Chile. *Aquacult. Environ. Interact.* 12, 263–279.
- Cantrell, D.L., Groner, M.L., Ben-Horin, T., Grant, J., and Revie, C.W. 2020. Modeling Pathogen Dispersal in Marine Fish and Shellfish. *Trends Parasitol.*
- Cantrell, D.L., Rees, E.E., Vanderstichel, R., Grant, J., Filgueira, R., and Revie, C.W. 2018. The use of kernel density estimation with a bio-physical model provides a method to quantify connectivity among salmon farms: spatial planning and management with epidemiological relevance. *Frontiers in veterinary science.* 5, 269.
- Chen, C., Liu, H., and Beardsley, R.C. 2003. An unstructured, finite-volume, three-dimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 20: 159-186.
- Chen, C., Beardsley, R.C., and Cowles, G. 2006. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. *Oceanography, Special Issue on Advances in Computational Oceanography.* 19: 78-89.
- Chen, C., Beardsley, R.C., Cowles, G., Qi, J., Lai, Z., Gao, G., Stuebe, D., Liu, H., Xu, Q., Xue, P., Ge, J., Hu, S., Ji, R., Tian, R., Huang, H., Wu, L., Lin, H., Sun, Y., and Zhao, L. 2013. An unstructured grid, finite-volume community ocean model. FVCOM user manual. SMAST/UMASSD-13-0701
- Foreman, M.G.G., Czajko, P., Stucchi, D.J., and Guo, M. 2009. A finite volume model simulation for the Broughton Archipelago, Canada. *Ocean Modelling*, 30(1), pp.29-47.
- Foreman, M.G.G., Stucchi, D.J., Garver, K.A., Tuele, D., Isaac, J., Grime, T., Guo, M., and Morrison, J. 2012. A circulation model for the Discovery Islands, British Columbia. *Atmosphere-Ocean* 50(3): 301-16.
- Foreman, M.G.G., Chandler, P.C., Stucchi, D.J., Garver, K.A., Guo, M., Morrison, J., and Tuele, D. 2015a. [The ability of hydrodynamic models to inform decisions on the siting and management of aquaculture facilities in British Columbia](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2015/005. vii + 49 p.
- Foreman, M.G.G., Guo, M., Garver, K.A., Stucchi, D., Chandler, P.C., Wan, D., Morrison, J., and Tuele, D. 2015b. Modelling Infectious Hematopoietic Necrosis Virus Dispersion from Marine Salmon Farms in the Discovery Islands, British Columbia, Canada. *PLoS One*, 10, e0130951.
- Milbrandt, J.A., Bélair, S., Faucher, M., Vallée, M., Carrera, M.L., and Glazer, A. 2016. The Pan-Canadian High Resolution (2.5 km) Deterministic Prediction System. *Weather and Forecasting*, 31(6), 1791-1816.

- Mimeault, C., Wade, J., Foreman, M.G.G., Chandler, P.C., Aubry, P., Garver, K.A., Grant, S.C.H., Holt, C., Jones, S.R.M., Johnson, S.C., Trudel, M., Burgetz, I.J., and Parsons, G.J. 2017. [Assessment of the risks to Fraser River Sockeye Salmon due to Infectious Hematopoietic Necrosis Virus \(IHNV\) transfer from Atlantic Salmon farms in the Discovery Islands of British Columbia](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2017/075. vii + 75 p.
- Paquin, J.-P., Smith, G., Lu, Y., Taylor, S., Blanken, H., Davidson, F., Le Clainche, Y., Bernier, N., Dupont, F., Lei, J., Marcotte, G., Roy, F., Sutherland, G., Holden, J., Babalola, S., Hu, X., and Zhai, L. 2019. CIOPS-W: An operational forecasting model for oceans off Canada's West Coast to support the Ocean Protection Plan. OceanPredict'10 – GODAE OceanView Symposium, 6 - 10 May 2019, Halifax, NS, Canada.
- Stucchi, D., Guo, M., Foreman, M.G.G., Czajko, P., Galbraith, M., Mackas, D.L., and Gillibrand, P.A. 2011. Modelling sea lice production and concentrations in the Broughton Archipelago, British Columbia. In *Salmon Lice: An integrated approach to understanding parasite abundance and distribution*. Edited by S. Jones and R.J.Beamish. Wiley-Blackwell, Oxford. pp 117-150.

Annexe

Cartes des trajectoires des particules

Outre les matrices de connectivité pour les trois régions, nous avons créé des cartes montrant les trajectoires des particules pendant les dernières 24 heures pour chaque période de l'analyse (c.-à-d. les trajectoires du temps de rejet à 24 heures, de 24 à 48 heures, etc., jusqu'au tout dernier 14^e jour). Nous avons ainsi produit 14 cartes pour chaque exploitation émettrice, soit un total de $90 \times 14 = 1\,260$ cartes. L'élément le plus intéressant de ces cartes est qu'elles montrent qu'au 14^e jour, certaines particules peuvent être très loin de leur point de rejet, tandis que d'autres en sont encore proches (exemple de la zone de la COIV illustré sur la figure A1).

Particules rejetées depuis le ruisseau Lutes, chenal Hecate, entre les jours 13 et 14

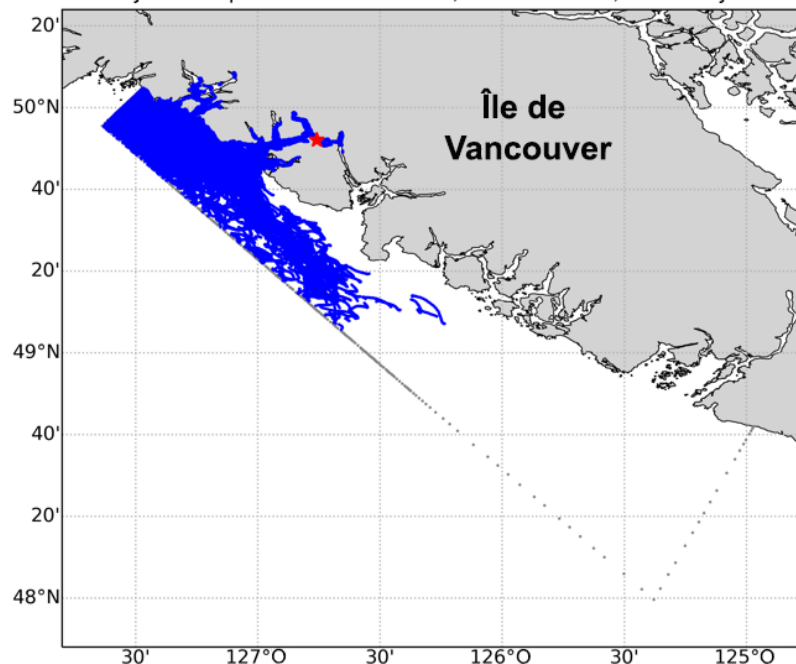


Figure A1. Particules (points bleus) rejetées du ruisseau Lutes (exploitation n° 1078) entre les jours 13 et 14 (dernier jour de la période de 14 jours de l'analyse). L'emplacement de l'exploitation est indiqué en rouge. La ligne en pointillés gris représente la frontière du domaine du modèle de la COIV.

Trajectoires des particules flottantes par rapport aux particules neutres

Nous avons étudié les particules flottantes et neutres; les premières restent à la surface et ne sont déplacées que par les courants de surface, tandis que les secondes peuvent changer de profondeur lorsqu'elles suivent des champs d'écoulement tridimensionnel. Les particules neutres se déplaçaient constamment plus loin, offrant donc une solution plus prudente à la question de la connectivité entre les exploitations. La figure ci-dessous montre les trajectoires de particules provenant de trois installations; des particules neutres et des particules flottantes ont été rejetées en même temps, mais les particules flottantes sont restées près de l'exploitation émettrice ou se sont échouées rapidement (les trajectoires des particules flottantes sont indiquées en noir; celles des particules neutres sont codées en fonction de leur profondeur). La distance moyenne parcourue par les particules flottantes émises par les exploitations de la pointe Concepcion, de la falaise Bare et de San Mateo était de 14 km, 9 km et 24 km, respectivement. Pour les particules neutres rejetées des trois mêmes exploitations, la distance moyenne parcourue était de 34 km, 38 km et 28 km.

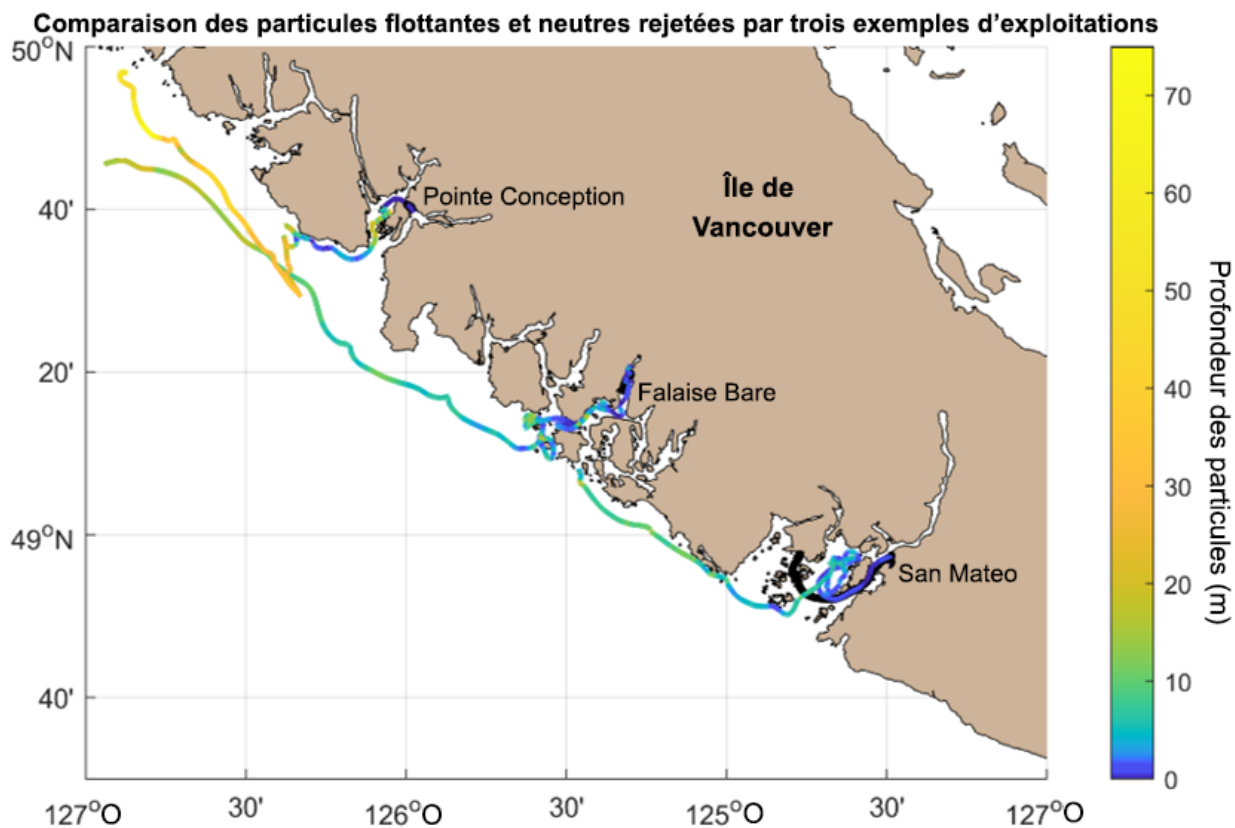


Figure A2. Comparaison des particules flottantes et neutres rejetées par trois exemples d'installations. Les trajectoires noires indiquent les particules flottantes qui restent à la surface; les trajectoires multicolores indiquent les particules neutres, la couleur dénotant la profondeur de la particule.

Le présent 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

Adresse Internet : www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/

ISSN 1919-3815

ISBN 978-0-660-40761-6 N° cat. Fs70-7/2021-042F-PDF

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2022



La présente publication doit être citée comme suit :

MPO. 2022. Connectivité hydrodynamique entre les installations de pisciculture marine en Colombie-Britannique : À l'appui d'une approche de gestion par zone. Secr. can. des avis sci. du MPO. Rép. des Sci. 2021/042.

Also available in English:

DFO. 2022. *Hydrodynamic Connectivity between Marine Finfish Aquaculture Facilities in British Columbia: in support of an Area Based Management Approach.* DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Resp. 2021/042.