État des connaissances sur le devenir et le comportement des déversements de produits pétroliers provenant de navires: Volume 3, Port Hawkesbury et détroit de Canso, Nouvelle-Écosse

Scott A. Ryan[1], Gary Wohlgeschaffen[1], Nusrat Jahan[1], Haibo Niu[2], Alice C. Ortmann[1], Trevor N. Brown[1], Thomas L. King[1], et Jason Clyburne[3]

[1]Centre de recherche sur le pétrole, le gaz et autres sources d'énergie extracôtières, Pêches et Océans Canada, Institut océanographique de Bedford, Dartmouth, NS B2Y 4A2

[2]Département d'ingénierie, Université Dalhousie, Truro, NS B2N 5E3

[3]Département de chimie, Université Saint Mary's, Halifax, NS B3H 3C3

2019

Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques 3176

Pêches et Océans Canada | Fisheries and Oceans Canada

Canada

Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques

Les rapports manuscrits contiennent des renseignements scientifiques et techniques qui constituent une contribution aux connaissances actuelles, mais qui traitent de problèmes nationaux ou régionaux. La distribution en est limitée aux organismes et aux personnes de régions particulières du Canada. II n'y a aucune restriction quant au sujet; de fait, la série reflète la vaste gamme des intérêts et des politiques de Pêches et Océans Canada, c'est-à-dire les sciences halieutiques et aquatiques.

Les rapports manuscrits peuvent être cités comme des publications à part entière. Le titre exact figure au-dessus du résumé de chaque rapport. Les rapports manuscrits sont résumés dans la base de données *Résumés des sciences aquatiques et halieutiques.*

Les rapports manuscrits sont produits à l'échelon régional, mais numérotés à l'échelon national. Les demandes de rapports seront satisfaites par l'établissement auteur dont le nom figure sur la couverture et la page du titre.

Les numéros 1 à 900 de cette série ont été publiés à titre de Manuscrits (série biologique) de l'Office de biologie du Canada, et après le changement de la désignation de cet organisme par décret du Parlement, en 1937, ont été classés comme Manuscrits (série biologique) de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada. Les numéros 901 à 1425 ont été publiés à titre de Rapports manuscrits de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada. Les numéros 1426 à 1550 sont parus à titre de Rapports manuscrits du Service des pêches et de la mer, ministère des Pêches et de l'Environnement. Le nom actuel de la série a été établi lors de la parution du numéro 1551.

Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences

Manuscript reports contain scientific and technical information that contributes to existing knowledge but which deals with national or regional problems. Distribution is restricted to institutions or individuals located in particular regions of Canada. However, no restriction is placed on subject matter, and the series reflects the broad interests and policies of Fisheries and Oceans Canada, namely, fisheries and aquatic sciences.

Manuscript reports may be cited as full publications. The correct citation appears above the abstract of each report. Each report is abstracted in the data base *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts*.

Manuscript reports are produced regionally but are numbered nationally. Requests for individual reports will be filled by the issuing establishment listed on the front cover and title page.

Numbers 1-900 in this series were issued as Manuscript Reports (Biological Series) of the Biological Board of Canada, and subsequent to 1937 when the name of the Board was changed by Act of Parliament, as Manuscript Reports (Biological Series) of the Fisheries Research Board of Canada. Numbers 1426 - 1550 were issued as Department of Fisheries and Environment, Fisheries and Marine Service Manuscript Reports. The current series name was changed with report number 1551.

Rapport manuscrit canadien des
sciences halieutiques et aquatiques 3176

2019

État des connaissances sur le devenir et le comportement des déversements de produits pétroliers provenant de navires: Volume 3, Port Hawkesbury et détroit de Canso, Nouvelle-Écosse

par

Scott A. Ryan[1], Gary Wohlgeschaffen[1], Nusrat Jahan[1], Haibo Niu[2], Alice C. Ortmann[1], Trevor N. Brown[1], Thomas L. King[1], et Jason Clyburne[3]

1. Centre de recherche sur le pétrole, le gaz et autres sources d'énergie extracôtières, Pêches et Océans Canada, Institut océanographique de Bedford, Dartmouth, NS B2Y 4A2
2. Département d'ingénierie, Université Dalhousie, Truro, NS B2N 5E3
3. Département de chimie, Université Saint Mary's, Halifax, NS B3H 3C3

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2019
Cat. N ° Fs97-4/3176F-PDF ISBN 978-0-660-30897-5 ISSN 1488-5468

La présente publication doit être citée comme suit :

Ryan, S.A., Wohlgeschaffen, G., Jahan, N., Niu, H., Ortmann, A.C., Brown, T.N., King, T.L., et Clyburne, J. 2019. État des connaissances sur le devenir et le comportement des déversements de produits pétroliers provenant de navires: Volume 3, Port Hawkesbury et détroit de Canso, Nouvelle-Écosse. Rapp. manus. can. sci. halieut. aquat. 3176: viii + 45 p.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé vii
Abstract viii
1 Introduction 1
2 Géographie 3
3 Hydrographie 7
3.1 Bathymétrie 7
3.2 Courants 8
3.3 Marées 9
3.4 Bassin hydrographique 10
3.5 Salinité et température 11
4 Climat 14
4.1 Température et précipitations 14
4.2 Vent et vagues 14
5 Déversements de pétrole précédents 17
5.1 *Arrow* 18
6 Modélisation 20
6.1 Comportement des hydrocarbures 20
6.1.1 Conditions environnementales 21
6.1.2 Scénarios relatifs au comportement des hydrocarbures 23
6.1.3 Scénarios de déversement de pétrole brut 23
6.1.4 Scénarios de déversement de produits raffinés 25
6.1.5 Scénarios de déversement de mazout intermédiaire 26
6.1.6 Scénarios de déversement d'hydrocarbures non classiques 28
6.2 Transport d'hydrocarbures 31
6.2.1 Intrants et configuration du modèle 32
6.2.2 Résultats du modèle 33
7 Conclusions 41
8 Références 42

FIGURES

Figure 1. Zone d'étude de Port Hawkesbury et du détroit de Canso 3

Figure 2. Carte du détroit de Canso. Données sur les rivières (lignes bleues) du Nova Scotia Geographic Data Directory (Government of Nova Scotia 2019) 4

Figure 3. Photo de la chaussée surélevée de Canso 5

Figure 4. Bathymétrie du détroit de Canso et de la baie Chedabucto, valeurs de profondeur en mètres. 7

Figure 5. Marées mesurées à Port Hawkesbury du 30 avril au 7 mai 2004, heure GMT, hauteur en mètres (Parrott 2010) 10

Figure 6. Écoulement d'eau douce (m^3/s) dans le détroit de Canso (Gregory et al. 1993) 11

Figure 7. Température et salinité le long du détroit de Canso du 1er au 3 mai 1973 (Vilks et al. 1975). 12

Figure 8. Température et salinité le long du détroit de Canso du 13 au 15 août 1973 (Vilks et al. 1975). 13

Figure 9. Rose des vents de Port Hawkesbury, janvier 2003 21

Figure 10. Rose des courants de Port Hawkesbury, janvier 2003 22

Figure 11. Température de l'eau de mer 22

Figure 12. Budget pétrolier en cas de déversement de pétrole brut Arabian Light 24

Figure 13. Évolution prévue de la viscosité en cas de déversement de pétrole brut Arabian Light 25

Figure 14. Évolution prévue de la densité en cas de déversement de pétrole brut Arabian Light 25

Figure 15. Budget pétrolier en cas de déversement de diesel 26

Figure 16. Budget pétrolier en cas de déversement d'IFO180 27

Figure 17. Évolution prévue de la viscosité en cas de déversement d'IFO180 28

Figure 18. Évolution prévue de la densité de l'IFO180 28

Figure 19. Budget pétrolier en cas de déversement a) d'AWB et b) de CLB 30

Figure 20. Évolution prévue de la viscosité en cas de déversement a) d'AWB et 31

Figure 21. Évolution prévue de la densité en cas de déversement a) d'AWB et 31

Figure 22. Zone d'étude et domaine de modélisation avec données bathymétriques 33

Figure 23. Bilans massiques des simulations stochastiques a) numéro 1, ... 35

Figure 24. Étendue de la couverture pétrolière des simulations stochastiques 36

Figure 25. Étendue de la couverture pétrolière des simulations stochastiques 37
Figure 26. Bilans massiques à la fin de chaque simulation de quatre jours 38
Figure 27. Probabilité de contamination de surface 39
Figure 28. Probabilité de contamination du rivage 39

TABLEAUX

Tableau 1. Vitesses du courant de la base de données ODI près de Melford (AMEC Earth and Environmental 2008) 9

Tableau 2. Résumé de l'amplitude de la marée d'après les tables des marées du SHC 10

Tableau 3. Dépassement de la hauteur de houle estimative dans la baie Chedabucto (Canada-Nova Scotia Strait of Canso Environment Committee 1975) 15

Tableau 4. Incidents et accidents notés par le Bureau de la sécurité des transports dans les voies de navigation de Port Hawkesbury 18

Tableau 5. Données environnementales pour la modélisation dans ADIOS2 23

Tableau 6. Propriétés des produits pétroliers utilisés dans la modélisation 23

RÉSUMÉ

Ryan, S.A., Wohlgeschaffen, G., Jahan, N., Niu, H., Ortmann, A.C., Brown, T.N., King, T.L., et Clyburne, J. 2019. État des connaissances sur le devenir et le comportement des déversements de produits pétroliers provenant de navires: Volume 3, Port Hawkesbury et détroit de Canso, Nouvelle-Écosse. Rapp. manus. can. sci. halieut. aquat. 3176: viii + 45 p.

L'augmentation de la production canadienne de pétrole et du trafic de navires-citernes augmente le risque de déversements accidentels de produits pétroliers dans les eaux canadiennes. En réponse, le gouvernement du Canada a annoncé le système de sécurité de classe mondiale pour les navires-citernes et créé le Comité d'experts indépendant sur la sécurité des navires-citernes pour examiner la préparation et l'intervention du Canada en cas de déversement de produits pétroliers par les navires. À l'aide des recommandations du Comité, le gouvernement du Canada établit des plans d'intervention pour quatre zones pilotes où le trafic de navires-citernes est le plus élevé au Canada : Saint John (N.-B.), Port Hawkesbury et le détroit de Canso (N.-É.), la Voie maritime du Saint-Laurent (Qc) et la partie sud de la Colombie-Britannique.

Il s'agit du troisième volume d'un rapport en cinq volumes contenant de l'information pertinente à l'élaboration d'un plan d'intervention régional pour la région de Port Hawkesbury et du détroit de Canso, en Nouvelle-Écosse. Le premier volume du présent rapport contient des renseignements introductifs sur les produits pétroliers et les déversements et devrait accompagner les volumes suivants.

ABSTRACT

Ryan, S.A., Wohlgeschaffen, G., Jahan, N., Niu, H., Ortmann, A.C., Brown, T.N., King, T.L., et Clyburne, J. 2019. État des connaissances sur le devenir et le comportement des déversements de produits pétroliers provenant de navires: Volume 3, Port Hawkesbury et détroit de Canso, Nouvelle-Écosse. Rapp. manus. can. sci. halieut. aquat. 3176: viii + 45 p.

Increasing Canadian oil production and tanker traffic elevates the risk of accidental oil spills in Canadian waters. In response, the Government of Canada announced the World Class Tanker Safety System and created the independent Tanker Safety Expert Panel to review Canada's ship-source oil spill preparedness and response. Using the panel's recommendations, the Government of Canada is establishing response plans for four pilot areas which have the highest tanker traffic in Canada: Saint John, NB, Port Hawkesbury and Canso Strait, NS, St. Lawrence Seaway, Qc, and the southern portion of British Columbia.

This is the third volume of a five volume report and contains information relevant to developing an area response plan for Port Hawkesbury-Canso Strait, NS. The first volume of this report contains introductory information on oil products and spills and should accompany subsequent volumes.

1 INTRODUCTION

En novembre 2013, le Comité d'experts du Système de sécurité de classe mondiale pour les navires-citernes (SSCMNC) a produit son premier rapport (Houston et al. 2013). En réponse à la recommandation du Comité, le gouvernement du Canada souhaite élaborer et mettre en œuvre des plans d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures adaptés dans les quatre zones pilotes suivantes :

- Saint-Jean et la baie de Fundy, au Nouveau-Brunswick.
- Port Hawkesbury et le détroit de Canso, en Nouvelle-Écosse.
- Voie maritime du Saint-Laurent, de Montréal à Anticosti, dans la province du Québec.
- Détroit de Georgie et détroit de Juan de Fuca, en Colombie-Britannique.

Dans le cadre de cette initiative, un rapport en cinq volumes a été rédigé afin de fournir une revue générale des facteurs susceptibles d'influencer les déversements d'hydrocarbures et l'intervention dans les quatre zones pilotes. Le présent rapport se veut un outil pratique plutôt qu'un examen détaillé de la science des déversements d'hydrocarbures ou des scénarios précis qui pourraient survenir.

Le volume 1 du rapport fournit des renseignements communs à l'ensemble de l'étude, notamment sur les produits pétroliers manutentionnés dans les ports, le devenir et le transport des déversements d'hydrocarbures, la modélisation du devenir et du comportement des hydrocarbures déversés, un résumé des méthodes actuellement utilisées dans le cadre des interventions opérationnelles, les techniques utilisées pour surveiller et suivre les déversements, et un aperçu des technologies en cours d'élaboration. Quatre volumes supplémentaires fournissent des renseignements sur l'hydrographie, l'océanographie, le climat, des études de cas de déversements et, lorsqu'elle est disponible, la modélisation des déversements pour chacun des quatre ports pilotes choisis, dans l'ordre indiqué précédemment.

Le présent volume porte sur la région entourant Port Hawkesbury et le Sud du détroit de Canso, en Nouvelle-Écosse (Figure 1). Port Hawkesbury et Point Tupper au sud (Figure 2) sont un centre industriel et d'expédition du détroit de Canso (Prouse 1994). En 1993, la raffinerie de Point Tupper est devenue un terminal pour les superpétroliers disposant d'installations de stockage de pétrole brut et raffiné, de mélange et de transfert vers de plus petits navires. Avec des profondeurs supérieures à 60 m, le détroit de Canso peut accueillir des navires pesant jusqu'à 500 000 tonnes de port en lourd (TPL) et fait figure de port le plus profond de la côte est nord-américaine (Gardner Pinfold 2010). En plus des deux ports publics de Port Hawkesbury et Mulgrave, on dénombre aussi cinq terminaux privés (Invest Cape Breton 2018). Toute la région est connue sous le nom de superport du détroit de Canso et a manutentionné plus de 30 millions de tonnes de marchandises par an de 2005 à 2010 (Strait of Canso Superport 2018a). Sur les 31,6 millions de tonnes métriques de marchandises en 2006, 21,6 millions de tonnes étaient du pétrole brut (Statistics Canada 2011). En 2009, deux tiers de toutes les marchandises en Nouvelle-Écosse ont été manutentionnées par Port

Hawkesbury, bien qu'en 2010 le tonnage ait diminué de 10,5 % (soit 26,3 millions de tonnes), principalement en raison d'une baisse de 12,1 % du tonnage du pétrole brut (Government of Nova Scotia 2010).

Port Hawkesbury manutentionne à la fois du pétrole brut et des produits raffinés (Gardner Pinfold 2010). De plus en plus de pétrole étranger est transbordé vers le Nord-est des États-Unis : du pétrole brut en provenance d'Europe est transporté dans des pétroliers de 250 000 TPL (20 en provenance de Norvège en 1998) et transféré dans des pétroliers plus petits de l'ordre de 80 000 TPL, car de nombreux pétroliers étrangers sont trop gros pour accoster dans les ports des États-Unis (SL Ross Environmental Research 1999). Cette activité de transbordement a plus que doublé depuis 1994, atteignant environ 11 millions de tonnes en 1998, soit 14 % de tous les hydrocarbures transportés par navire transocéanique au Canada, ce qui représente un risque de déversement important (SL Ross Environmental Research 1999).

2 GÉOGRAPHIE

Port Hawkesbury est situé près de l'extrémité sud-ouest de l'île du Cap-Breton, du côté nord du détroit de Canso, dans la province de la Nouvelle-Écosse, au Canada. La zone d'étude de Port Hawkesbury s'étend au nord-est le long de la côte du Cap-Breton et au sud-ouest le long de la côte est de la Nouvelle-Écosse (Figure 1).

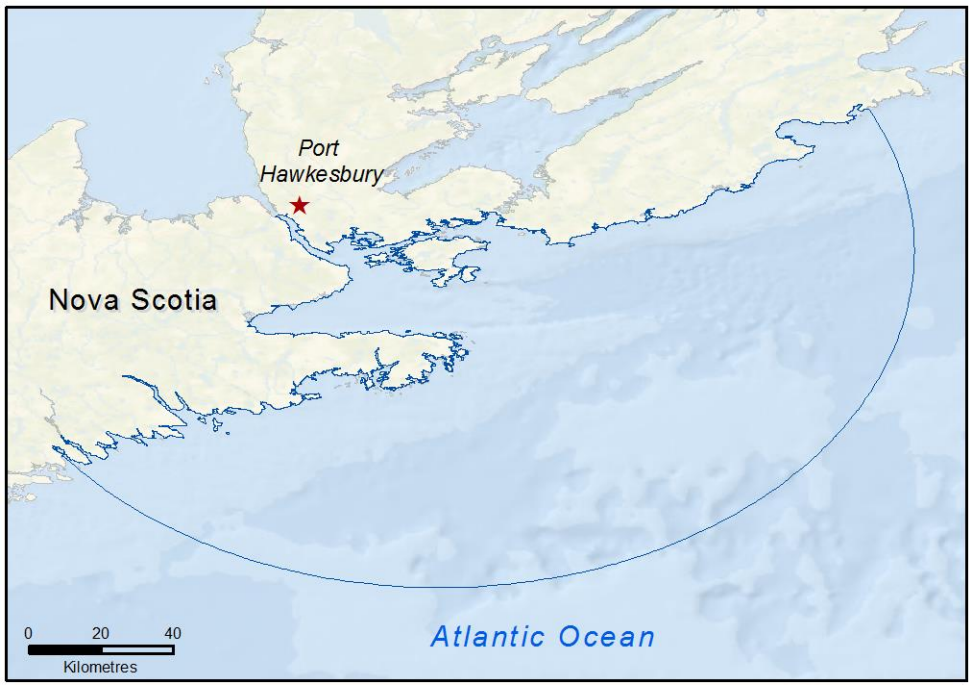

Figure 1. Zone d'étude de Port Hawkesbury et du détroit de Canso

Le détroit de Canso mesure environ 20 km de long sur 1 km de large au point le plus étroit et sépare la partie continentale de la Nouvelle-Écosse et l'île du Cap-Breton (Figure 2). Autrefois, le détroit était un important passage ouvert entre l'Atlantique et la baie St. Georges, dans le golfe du Saint-Laurent. Il a été fermé artificiellement en 1954 à l'extrémité nord par la construction des écluses remplies de pierres et de la chaussée surélevée de Canso (Figure 3), qui forment un lien permanent entre le Cap-Breton et la partie continentale de la Nouvelle-Écosse. La chaussée surélevée bloque l'écoulement de l'eau et divise le détroit en deux corps océanographiques distincts au nord et au sud. La chaussée surélevée est dotée d'une seule écluse Seawaymax qui peut accueillir les navires transitant dans la Voie maritime du Saint-Laurent (Strait of Canso Superport 2018b).

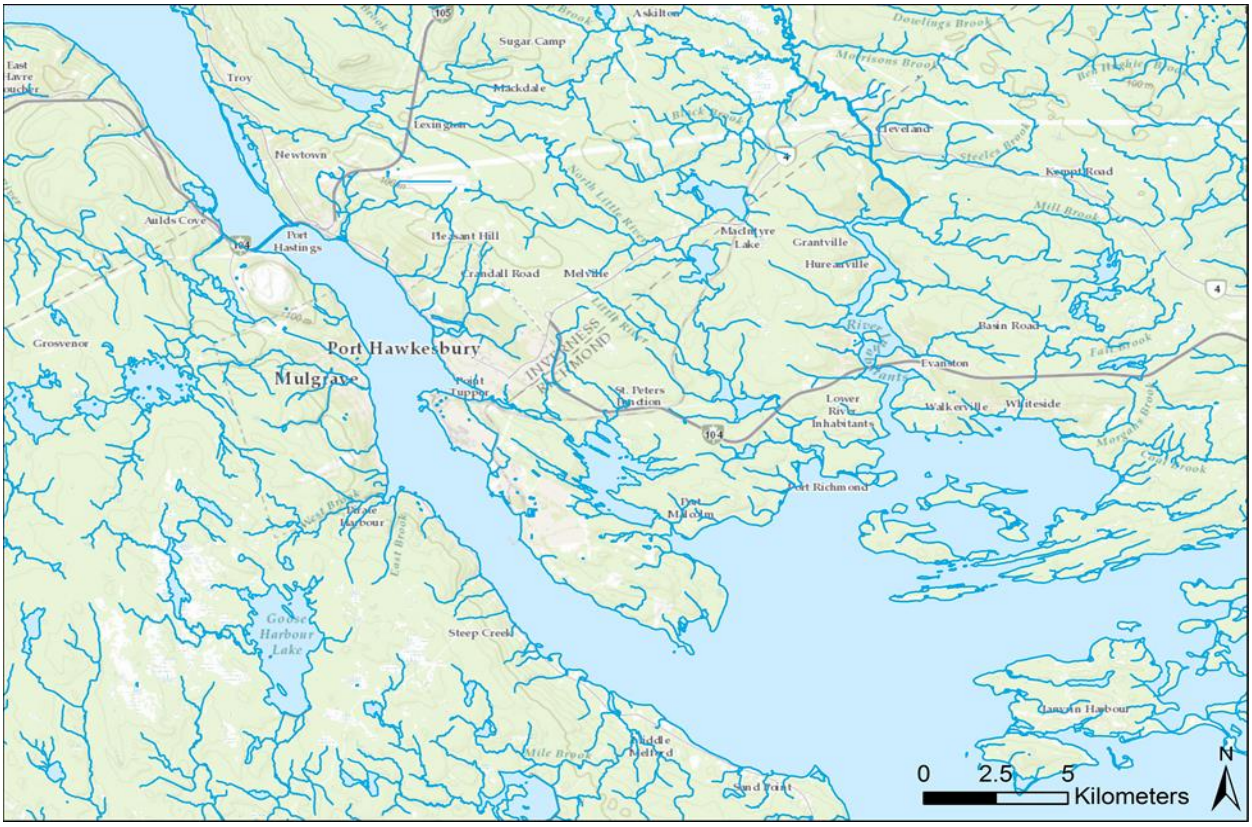

Figure 2. Carte du détroit de Canso. Données sur les rivières (lignes bleues) du Nova Scotia Geographic Data Directory (Government of Nova Scotia 2019)

Figure 3. Photo de la chaussée surélevée de Canso

La partie sud du détroit est reliée à la baie Chedabucto par un chenal relativement profond, abrité et libre de glace. Cet endroit est très important pour le transport maritime mondial puisqu'il se trouve à environ la moitié de la distance entre l'Europe et le détroit de Canso, comparativement aux ports du golfe du Mexique.

La région du détroit de Canso comprend les collectivités environnantes des comtés de Guysborough, de Richmond, d'Inverness, de Port Hawkesbury, de Port Hastings et de Mulgrave (Pinfold, 2010). Les principales villes du détroit sont Port Hawkesbury et Mulgrave. La petite collectivité de Point Tupper est adjacente à la ville de Port Hawkesbury. Elle possède un parc industriel et s'y trouve le terminal de GNL de Bear Head. En plus de l'usine de GNL, on y trouve une usine de pâtes et papiers, un centre de transbordement de pétrole brut, une raffinerie de pétrole, une centrale électrique au charbon de Nova Scotia Power avec terminal charbonnier, une usine de US Gypsum avec des quais pour la manutention de la pierre concassée sortante et Stora Forest Industries (AMEC Earth and Environmental 2008; JWEL 2004). Au cours des 55 dernières années, ce port artificiel libre de glace est devenu le port de marchandises qui connaît la croissance la plus forte au Canada et le plus important en Nouvelle-Écosse. Il est vital pour les entreprises locales qui exportent des produits finis vers les

marchés nationaux et internationaux et importent des matières premières, des fournitures et du matériel pour la fabrication locale (Strait of Canso Superport 2018c).

3 HYDROGRAPHIE

3.1 BATHYMÉTRIE

Avant la construction de la chaussée surélevée, l'océan Atlantique communiquait directement avec le détroit de Canso. L'interaction des marées dans le détroit, due à l'amplitude de la marée légèrement plus importante de l'océan Atlantique (Fothergill 1955), a créé une légère pente descendante de la surface moyenne du niveau de la mer de la baie St. Georges à l'océan Atlantique et de la glace provenant du golfe du Saint-Laurent a rempli le détroit tout l'hiver (Pemberton 1976).

Le détroit de Canso, long de 18 km, est étroit (0,8 à 2,0 km) et a généralement une section transversale en forme de U, avec une profondeur au centre du détroit de 38 à 65 m (Figure 4) et une profondeur moyenne d'environ 45 m (Parrott et al. 2005). Au nord de la chaussée surélevée, la profondeur minimale dans le détroit est de 35 mètres à l'entrée de la baie St. Georges, tandis que la profondeur atteint 51 mètres près de la chaussée surélevée (Buckley et al. 1974; Stewart and White 2001).

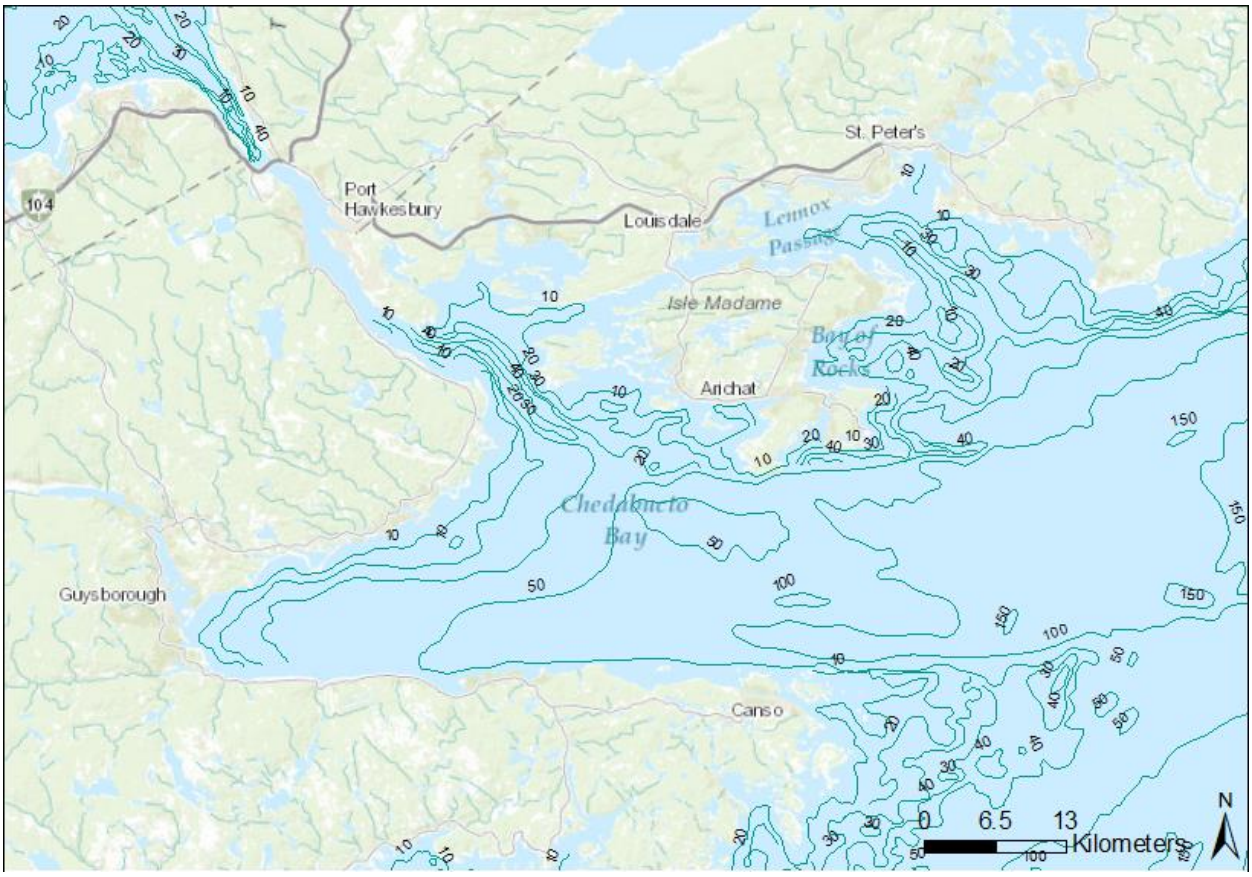

Figure 4. Bathymétrie du détroit de Canso et de la baie Chedabucto, valeurs de profondeur en mètres.

La profondeur de l'eau est d'environ 44 m dans le chenal près de la région de Melford. Elle diminue graduellement vers le sud et prend fin à un seuil de 35 m de profondeur dans la baie Chedabucto; toutefois, le seuil se situe sous la profondeur de la thermocline estivale, de sorte que les courants du détroit devraient être directement touchés par la remontée d'eau, la plongée d'eau et les vagues internes côtières provenant du plateau (AMEC Earth and Environmental 2008).

3.2 COURANTS

Les courants marins dans le détroit de Canso sont largement influencés par la longueur, la largeur étroite, la section transversale en U, la bathymétrie relativement profonde et les vents dominants de l'ouest et du nord-ouest du détroit (Buckley et al. 1974; Lawrence et al. 1973). Du fait de la construction de la chaussée surélevée de Canso, l'extrémité sud du détroit, jusqu'à Melford et Bear Head, présente les caractéristiques d'un goulet de marée où se produisent peu d'échanges d'eau entre les parties nord et sud du détroit. Un courant de fond de 1,85 km/h relativement faible existe dans le détroit (Buckley et al. 1974), mais les courants générés par le vent peuvent être importants toute l'année puisqu'il n'y a pas de couverture de glace (JWEL 2004; Lawrence et al. 1973; Pemberton 1976). La chaussée surélevée bloque l'écoulement glaciaire, ce qui permet à la partie sud du détroit et à la baie Chedabucto de demeurer libres de glace toute l'année (Buckley et al. 1974; McCracken 1979; Messieh and El-Sabh 1988; Stewart and White 2001).
Lawrence et al. (1973) ont constaté que les courants à mi-chemin environ entre la chaussée surélevée et Melford avaient une magnitude d'approximativement 0,02 m/s. Les courants de marée maximaux à proximité de Sand Point, tels qu'ils sont modélisés à l'aide de l'outil WebTide du MPO (Dupond et al. 2002), devraient être de l'ordre de 0,10 m/s.

En revanche, des courants de surface de 2,5 à 3 % de la vitesse du vent (0,5 m/s pour un vent de 40 nœuds) mesurés 10 m au-dessus de la surface de l'eau peuvent apparaître (Canada-Nova Scotia Strait of Canso Environment Committee 1975; CBCL 2015). La marée ne représente que 10 % à 20 % (maximum = 0,2 m/s) du courant total, le reste étant dû aux vents et à la circulation côtière (Buckley et al. 1974; MacLaren Marex Inc. 1978).

Des données locales ont été recueillies par le MPO dans les années 1970 et au début des années 1980 sur certains sites, notamment dans la baie Chedabucto, à l'entrée du détroit entre Bear Head et Melford Point, et dans le détroit au-delà de Wright Point. Les statistiques directionnelles d'un site à l'entrée du détroit montraient que la direction du courant était généralement la même que celle du détroit et que des valeurs maximales de 0,3 à 0,6 m/s se produisent à une profondeur de 8 m. Les valeurs typiques de 0,1 à 0,2 m/s diminuaient avec la profondeur. Les courants près de la surface de 0,2 m/s passaient à moins de 0,1 m/s sous la profondeur intermédiaire. Un faible régime de circulation estuarien à une vitesse d'environ 0,01 à 0,08 m/s a également été suggéré, avec un écoulement à la surface et au fond se déplaçant vers la mer et un écoulement à une profondeur intermédiaire se déplaçant vers la chaussée surélevée (CBCL 2015; Lawrence et al. 1973; Parrott et al. 2005).

Les données sur le courant relatives à la région de Melford provenant de la base de données ODI (Ocean Data Inventory) de l'Institut océanographique de Bedford (IOB) (Bedford Institute of Oceanography 2007) ont révélé de faibles valeurs moyennes, confirmant les observations antérieures dans le détroit (Tableau 1). Les valeurs moyennes des vitesses du courant enregistrées pour toutes les saisons étaient assez constantes (entre 0,01 et 0,11 m/s) et les courants dans la colonne d'eau supérieure avaient tendance à être légèrement plus rapides.

Tableau 1. Vitesses du courant de la base de données ODI près de Melford (AMEC Earth and Environmental 2008)

Season	Depth	Mean current speed range (m/s)	Max current speed range (m/s)
Fall	Upper water column (7-8m)	0.01-0.07	0.18-0.50
	Lower water column (23m)	0.01-0.05	0.22-0.29
Winter	Upper water column (8m)	0.01-0.11	0.13-0.55
	Lower water column (23m)	0.01-0.05	0.09-0.34
Summer	Upper water column (8m)	0.02-0.08	0.14-0.58
	Lower water column (11-12m)	0.01-0.04	0.15-0.31

Les conditions océanographiques sur le site de GNL de Bear Head sont influencées par de faibles courants de marée de 0,04 m/s, une houle réduite au large et des vagues locales au fetch plus restreint (CBCL 2015; JWEL 2004). Lawrence et al. (1973) ont fait état d'un courant de marée moyen d'environ 0,02 m/s à mi-chemin entre la chaussée surélevée et Bear Head, l'écoulement se produisant dans une couche de surface et une couche de fond déplaçant l'eau par advection vers la mer, tandis qu'une couche intermédiaire se déplaçait vers la rive. Les courants à cet endroit sont habituellement de 0,15 m/s, mais peuvent atteindre 0,35 m/s occasionnellement (Lawrence et al. 1973).

3.3 MARÉES

Les marées dans le détroit de Canso sont semi-diurnes (deux marées hautes et deux marées basses par jour). Les marées, telles qu'elles figurent dans les tableaux du Canadian Hydrographic Services (2007) (SHC) pour la station 0576 au nord-ouest à Point Tupper et la station 0563 au sud-est à Sand Point, sont résumées dans le Tableau 2. L'analyse la plus approfondie des courants dans le détroit a été effectuée par Lawrence et al. (Lawrence et al. 1973), qui ont fait état d'une amplitude moyenne de la marée de 1,4 m correspondant aux données du SHC.

Tableau 2. Résumé de l'amplitude de la marée d'après les tables des marées du SHC

Station	Niveau moyen de l'eau (m)	Amplitude (m)	
		Marée moyenne	Grande marée
0576 (Point Tupper)	0,9	1,4	2,0
0563 (Sand Point)	0,9	1,4	2,0

Les marées moyennes de vives-eaux montent de 2,4 m et les marées moyennes de mortes-eaux montent de 2 m (Pub 145 2014).

Avant les levés marégraphiques de Port Hawkesbury d'avril à mai 2004 (Parrott 2010), les marées étaient prévues à l'aide du logiciel Tides and Currents Pro de Nautical Software Inc. et la marée haute se situait entre 1,5 et 2 m environ. Les valeurs du marégraphe des levés (Figure 5) étaient de 0 à 2 m. Selon le Canada-Nova Scotia Strait of Canso Environment Committee (1975), l'amplitude dans cette région était de 0,7 m au-dessus du niveau moyen de l'eau et 0,6 m sous le niveau moyen de l'eau.

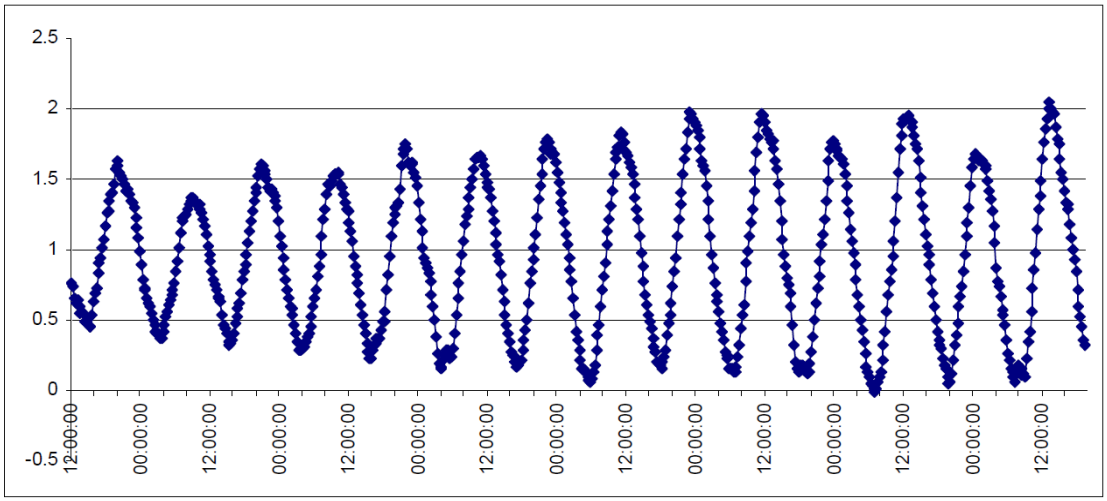

Figure 5. Marées mesurées à Port Hawkesbury du 30 avril au 7 mai 2004, heure GMT, hauteur en mètres (Parrott 2010)

3.4 BASSIN HYDROGRAPHIQUE

Les rivières Inhabitants et Little (Figure 2) se jettent dans la baie Inhabitants. Les bassins hydrographiques de la région du détroit de Canso sont petits (Canada-Nova Scotia Strait of Canso Environment Committee 1975) et il n'y a pas de rivières importantes le long du détroit. Les sources d'eau douce le long du détroit comprennent les ruisseaux et le ruissellement; toutefois, les débits sortants combinés des industries dans la région détournent d'importantes quantités d'eau douce vers le détroit, ce qui cause probablement une légère diminution de la salinité de la couche de surface

(Buckley et al. 1974). L'écoulement d'eau douce dans le détroit de Canso atteint entre 9 et 13 m^3/s de mars à mai et de novembre à décembre (Figure 6) et chute à un minimum de 2 à 4 m^3/s de juin à septembre (Gregory et al. 1993).

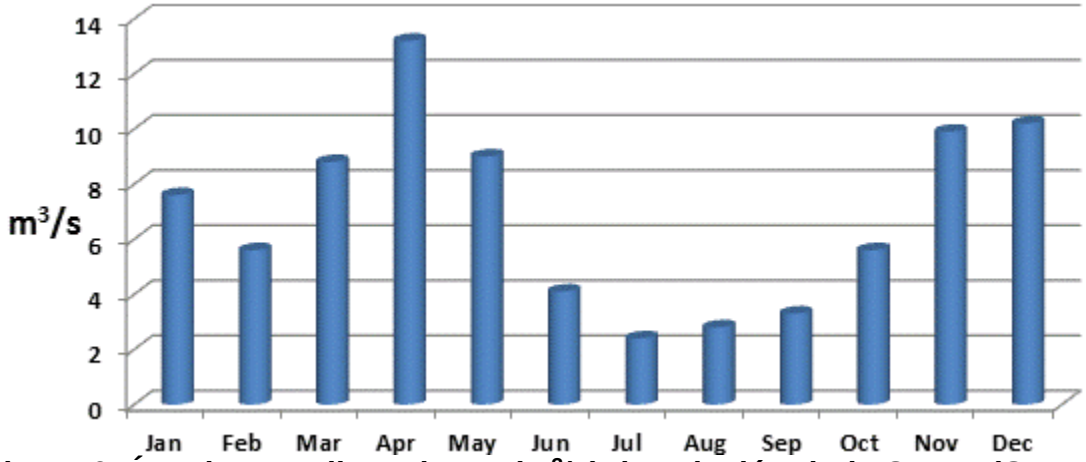

Figure 6. Écoulement d'eau douce (m^3/s) dans le détroit de Canso (Gregory et al. 1993)

3.5 SALINITÉ ET TEMPÉRATURE

Comme les eaux environnantes de l'océan Atlantique, la rive sud du détroit de Canso est généralement très stratifiée en été, avec une couche d'eau relativement chaude et de faible salinité qui recouvre une eau plus froide et plus salée (Buckley et al. 1974; Vilks et al. 1975). Les 20 mètres supérieurs de la colonne d'eau ont généralement une température supérieure à 15 °C, avec une salinité inférieure à 29 % (Stewart and White 2001), tandis que les profondeurs inférieures à 35 m ont des températures de 3 à 7 °C et une salinité de 31 %. Les eaux profondes du détroit peuvent être affectées par les remontées d'eau côtière, les plongées d'eau et les vagues internes produites par le plateau continental (JWEL 2004; SNC-Lavalin 2015). Une évaluation de cette zone a laissé entendre qu'il existait une grande variabilité des propriétés de l'eau tout au long de l'année, en raison de la circulation météorologique dans les eaux stratifiées par le réchauffement local et les apports en eau douce (Cranston et al. 1974; Lawrence 1972; Vilks et al. 1975).

Les forts courants dus au vent près de la baie Chedabucto peuvent entraîner une remontée importante d'eau salée froide (environ 3 °C), ce qui crée une circulation semblable à celle des estuaires, évacuant l'eau de surface chaude et douce de la chaussée surélevée de Canso et renouvelant les eaux de fond (Buckley et al. 1974; JWEL 2004; Stewart and White 2001). Le passage des systèmes météorologiques peut entraîner une évacuation rapide des couches de surface comme ailleurs sur la côte Atlantique (Heath 1973; Platt et al. 1972).

Vilks et al. (1975) ont étudié les variations saisonnières de la température et de la salinité dans dix localités du détroit de Canso et de la baie Inhabitants entre le début

mai et la mi-août 1973. Début mai, la colonne d'eau est hétérogène, avec une salinité entre 27 % et 31 %, et la température est proche du point de congélation dans toute la colonne d'eau (Figure 8a). Début juin, une pycnocline se forme dans les 10 m supérieurs pendant le réchauffement printanier et en raison du ruissellement. En été, les eaux superficielles piégées par la pycnocline se réchauffent jusqu'à environ 20 °C et la salinité varie de 28 % à 32 % tandis que les eaux plus profondes restent proches de 2 °C (Figure 8b).

Du côté du golfe du Saint-Laurent de la chaussée surélevée de Canso, les eaux sont moins stratifiées et les températures de l'eau sont plus élevées en été (Stewart and White 2001).

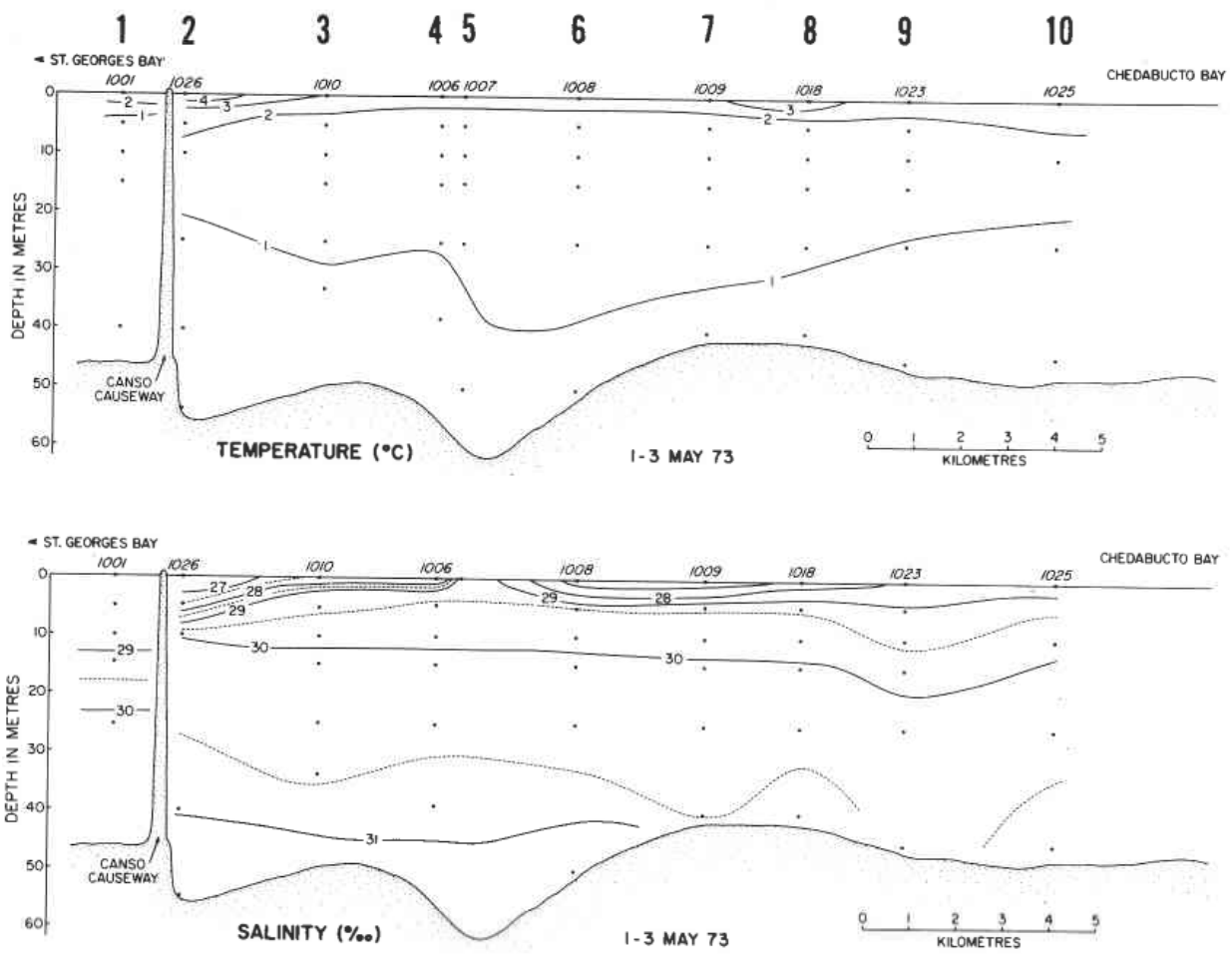

Figure 7. Température et salinité le long du détroit de Canso du 1er au 3 mai 1973 (Vilks et al. 1975).

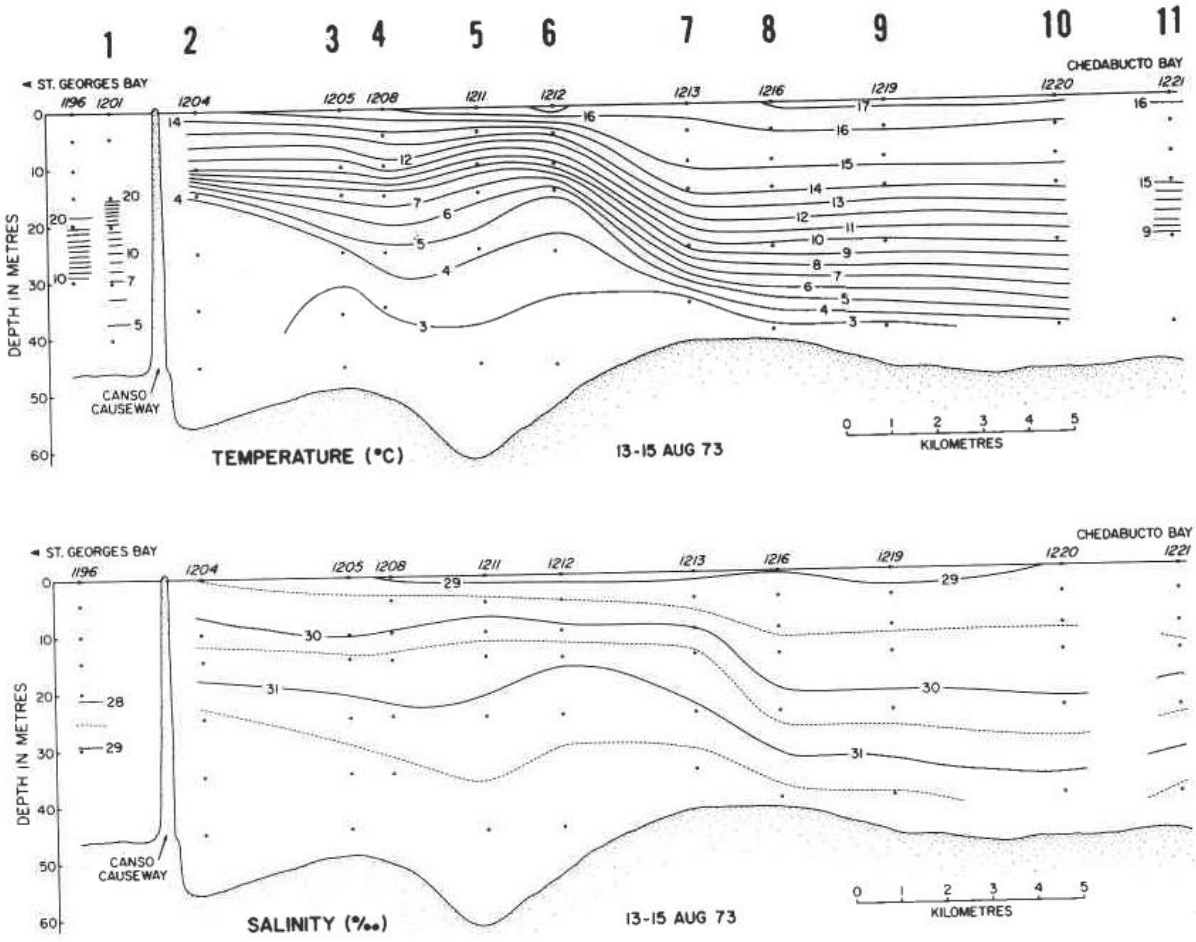

Figure 8. Température et salinité le long du détroit de Canso du 13 au 15 août 1973 (Vilks et al. 1975).

4 CLIMAT

4.1 TEMPÉRATURE ET PRÉCIPITATIONS

Le climat à Port Hawkesbury et dans le détroit de Canso est à peu près le même. Ces lieux se situent dans la zone tempérée du Nord et bénéficient d'un climat continental humide aux étés chauds et sans saison sèche. D'après les relevés de 2010 à 2013, la température moyenne est de -5,7 °C en février et de 18 °C en août. Elle est rarement inférieure à -13 °C ou supérieure à 27 °C (WeatherSpark.com 2016).

Les précipitations dans cette région sont de 1 417 mm par an en moyenne, avec une moyenne minimale de 91 mm en juillet et une moyenne maximale de 163 mm en décembre (Climate-Data.org 2018). Les précipitations sont les plus élevées de décembre à février. Elles prennent la forme de neige légère, de neige abondante et de pluie légère. Les précipitations en été tombent sous forme de pluies légères.

La présence de la chaussée surélevée empêche les floes d'atteindre la partie sud du détroit de Canso, ce qui signifie généralement que Port Hawkesbury demeure libre de glace toute l'année. Parmi les exceptions à ce qui précède, mentionnons le temps calme de l'hiver 1957, qui a entraîné la formation d'une couche de glace de 15 cm d'épaisseur dans le détroit. Mentionnons également les périodes relativement rares où la glace dérivante du large atteint l'entrée sud du détroit de Canso (Canada-Nova Scotia Strait of Canso Environment Committee 1975).

4.2 VENT ET VAGUES

La vitesse mensuelle moyenne des vents à Port Hawkesbury varie de 1 à 10 m/s, avec un maximum de 6 m/s en décembre et un maximum quotidien moyen de 9 m/s à cette période de l'année. Une moyenne minimale de 3 m/s se produit en août, lorsque la moyenne quotidienne maximale est de 6 m/s (WeatherSpark.com 2016).

Les vents dominants près de Port Hawkesbury ont tendance à souffler de l'ouest au nord-ouest en hiver, tandis que les vents dominants proviennent du nord-ouest, du sud-ouest et, dans une moindre mesure, du sud-est pendant les mois d'été (WeatherSpark.com 2016). En raison de l'effet d'entonnoir du détroit de Canso, la direction du vent la plus probable tout au long de l'année est le sud-ouest, entraînant des vents particulièrement forts lorsque les directions dominantes sont le nord-ouest et le sud-est. En général, les vents les plus forts dans cette région ont tendance à venir du nord-ouest et peuvent parfois dépasser 10,7 m/s, mais des vents du sud d'environ 14 m/s ont aussi été enregistrés dans cette région lors d'une étude du NSCC Applied Geomatics Group en septembre 2014 (Canada-Nova Scotia Strait of Canso Environment Committee 1975; Pub 145 2014; Webster et al. 2014). Le Code national du bâtiment du Canada indique que la vitesse horaire extrême du vent à Port Hawkesbury est de 35,2 m/s avec une vitesse de rafales de 30 secondes à 46,6 m/s sur un intervalle de récurrence de 100 ans et d'environ 30 m/s (vitesse de rafales de

39,3 m/s) sur un intervalle de récurrence de 10 ans (CBCL 2015). Aux terminaux de Statia, situés à environ 3,5 km au nord de Bear Head, une vitesse maximale du vent de 25 m/s a été observée à une occasion entre décembre 2005 et mars 2016 (CBCL 2015).

Les vents les plus forts dans la région autour de Port Hawkesbury et du détroit de Canso se produisent près de la pointe Eddy, à l'entrée sud du détroit de Canso. Dans cette région, les vents de l'ouest et du nord-ouest étaient les plus forts, atteignant environ 28 m/s de novembre à février, devenant des vents du sud et du sud-ouest rarement supérieurs à 15 m/s de juin à août (AMEC Earth and Environmental 2008; JWEL 2004).

L'entrée du détroit de Canso et de la baie Chedabucto est relativement protégée, mais les ondes de tempête de l'Atlantique peuvent pénétrer dans le détroit. On s'attend à ce que l'atténuation et la réfraction des houles au large se déplaçant dans le détroit de Canso entraînent une perte d'énergie et donc une diminution de l'état de la mer (AMEC Earth and Environmental 2008). Entre le 31 mai 1972 et le 15 février 1973, la hauteur de l'onde significative a atteint entre 1,5 et 1,8 m (périodes de 5 à 6 s), tandis que la hauteur de houle maximale était d'environ 2,4 m (Canada-Nova Scotia Strait of Canso Environment Committee 1975). La hauteur de l'onde significative maximale à l'ouest du terminal Bear Head proposé à Point Tupper est de 1,8 m, ce qui est considéré comme négligeable pour les grands navires transocéaniques (inventaire du milieu naturel du détroit de Canso, 1975). Ces résultats ont été appuyés par un effort de modélisation des vagues qui a estimé des hauteurs de l'onde significative inférieures à un mètre (CBCL 2015). Neu (1972) a déterminé que les hauteurs de l'onde significative estimatives dans la baie Chedabucto atteignaient jusqu'à 6 m (Tableau 3).

Tableau 3. Dépassement de la hauteur de houle estimative dans la baie Chedabucto (Canada-Nova Scotia Strait of Canso Environment Committee 1975)

Hauteur de l'onde significative (m) comme moyenne des 33 % les plus élevés	Hauteur de houle maximale (m)	Nombre de périodes de 6 heures par année
3	5,5	48
4	7	16,5
5	9	5,5
6	11	1

Des vagues internes, peut-être dues à l'activité des tempêtes, ont également été détectées dans le détroit. Cependant, elles restent relativement faibles avec une vitesse maximale de 0,08 m/s et une période de trois à quatre jours (Buckley et al. 1974; Lawrence et al. 1973; MacLaren Marex Inc. 1978).

La direction des vagues a été calculée à l'aide du modèle MSC50, une estimation a posteriori des données horaires fournies par le Service météorologique du Canada à

partir des données de 1954 à 2005, y compris en périodes de couvert de glace (Swail et al. 2006). La direction prédominante des vagues provenait du sud-est 32 % du temps, d'où proviennent également les vagues les plus hautes venant du large (AMEC Earth and Environmental 2008). En fonction de la configuration des vents, les vagues ont tendance à être plus hautes en hiver qu'en été.

Au large du détroit de Canso, les vagues sont plus susceptibles de provenir du sud et du sud-ouest, et les vagues de grande amplitude de l'est, du sud ou de l'ouest. D'octobre à mars, les vagues ont tendance à venir de l'ouest, du sud-ouest et du sud alors que le reste de l'année est dominé par les vagues du sud qui sont généralement inférieures à 3 m de haut (JWEL 2004).

5 DÉVERSEMENTS DE PÉTROLE PRÉCÉDENTS

Le Bureau de la sécurité des transports du Canada (BSTC) tient à jour une base de données sur les incidents et accidents aériens, maritimes, ferroviaires et de pipeline, appelés collectivement événements, et publie des rapports annuels accompagnés de statistiques (Transportation Safety Board of Canada 2018). La base de données sur les événements maritimes contient des renseignements sur les navires en cause, leur cargaison, l'emplacement, la pollution signalée et d'autres données. Comme les exigences en matière de rapports ont changé au fil du temps, le nombre d'événements maritimes saisis dans la base de données chaque année a augmenté. La mise à jour la plus récente des exigences en matière de rapports du BSTC remonte à 2014 (Transportation Safety Board of Canada 2014), et les données concernant de nombreux autres événements sont disponibles à partir de cette date. Des statistiques ont été compilées ici concernant les événements d'intérêt de l'ensemble de la période couverte par la base de données (1975-2018) et sur une base annuelle moyenne pour des années complètes depuis l'entrée en vigueur des nouvelles exigences en matière de rapports (2015-2017).

Des statistiques ont été compilées pour quatre types différents d'événements maritimes : 1) les événements mettant en cause des navires de charge, qu'il s'agisse de navires-citernes ou de barges transportant des produits pétroliers; 2) les événements au cours desquels une pollution a été signalée ou une cargaison, quelle qu'elle soit, a été perdue par-dessus bord; 3) les événements au cours desquels des produits pétroliers ont été déversés à bord ou dans l'eau; 4) les événements au cours desquels des navires ont coulé, chaviré ou ont subi de graves avaries sans possibilité de réparation et au cours desquels un rejet de carburant dans l'environnement est possible.

Les statistiques concernant Port Hawkesbury ont été compilées en filtrant les événements dans la province de la Nouvelle-Écosse ou dans les eaux internationales, dans l'aire de répartition latitudinale allant du point 45° N au pont 46° N et dans l'aire de répartition longitudinale allant du point 59,7° O au point 61,9° O. La région du lac Bras d'Or, à peu près au nord du point 45,65° N et entre les points 60,4° O et 61,2° O, a été exclue. Cela correspond au détroit de Canso, à la baie Chedabucto et aux eaux environnantes le long de la côte de l'île du Cap-Breton et le long de la côte du continent de la Nouvelle-Écosse. Cela inclut également la baie St. Georges à l'ouest, qui ne serait pas touchée par un déversement à Port Hawkesbury grâce à la chaussée surélevée de Canso, mais qui enregistre un trafic maritime transitant par le canal Canso. Voir le Tableau 4 pour obtenir des statistiques.

Tableau 4. Incidents et accidents notés par le Bureau de la sécurité des transports dans les voies de navigation de Port Hawkesbury

Événements mettant en cause...	Toutes les années (1975-2018)	Moyenne annuelle (2015-2017)
Tous les événements	141	16,3
Navires de charge transportant du pétrole	2	0
Pollution ou perte de cargaison par-dessus bord	5	0
Déversements de pétrole à bord ou par-dessus bord	0	0
Navires coulés, chavirés ou détruits	7	0

Il y a eu très peu d'événements maritimes dans la région de Port Hawkesbury entre 1975 et 2018. Tous les événements de pollution ou de navires perdus concernaient des bateaux de pêche, et quatre événements ont été classés dans les deux catégories. L'un des événements mettant en cause des navires de charge transportant des produits pétroliers était grave : le pétrolier *Thalassa Desgagnes* est entré en collision avec la rive aux abords du canal de Canso et sa coque a été endommagée. Cependant, aucun rejet de produits pétroliers n'a été signalé. Aucun bulletin de nouvelles sur cet événement n'a été trouvé.

Bien que relativement peu d'accidents se soient produits dans la région au cours des dernières années, le détroit de Canso a été le théâtre de l'un des plus importants déversements d'hydrocarbures de l'histoire du Canada, celui du pétrolier *Arrow* en 1970 (environ 10 000 tonnes métriques, soit environ 12 millions de litres) (Office of the Auditor General of Canada 2010).

5.1 *ARROW*

Le pétrolier *Arrow* était l'un des plus anciens pétroliers de la flotte d'Aristote Onassis et avait été affrété par la Compagnie Pétrolière Impériale Limitée lorsqu'il est arrivé d'Aruba le 4 février 1970 avec 10 millions de litres de combustible de soute C destinés à une fabrique de papier près de Point Tupper (Maritime Museum of the Atlantic 2018). Des coups de vent dans la baie Chedabucto (Figure 2) l'ont fait s'échouer sur le rocher Cerberus, un danger submergé bien connu. Une nappe d'hydrocarbures s'est formée le lendemain. Le 8, le navire s'est scindé en deux, la poupe s'enfonçant en eaux plus profondes (Crowley 1970).

Environ 2 000 m^3 de combustible de soute C ont été déversés. L'agent dispersant chimique Corexit a été répandu dans un premier temps, mais cette mesure de lutte a été interrompue, par crainte de sa toxicité potentielle (Crowley 1970). L'utilisation d'un barrage flottant et de l'écrémage s'est révélée inefficace en raison des intempéries. De plus, en raison des vents dominants, les nappes de surface ont recouvert 300 km de rivage. Une partie du pétrole qui restait dans le pétrolier a été transférée dans la barge

Irving Whale. La machinerie la moins nuisible a été utilisée sur les rivages, notamment des râteaux, de la mousse de tourbe et des pelles. Aucun agent dispersant n'a été utilisé (Owens 1972). Malgré les efforts, moins de 50 km ont été nettoyés (Lee et al. 2003) et les hydrocarbures ont persisté pendant plusieurs années sur le rivage de la baie Chedabucto (Keizer et al. 1978).

Trente ans après le déversement, des sédiments et des eaux interstitielles ont été recueillis dans une lagune abritée de Black Duck Cove fortement touchée par le déversement et qu'on a laissé se rétablir naturellement. L'analyse chimique des sédiments a confirmé que le pétrole restant avait subi une altération importante, y compris une photooxydation, une usure par abrasion due à l'érosion par la glace, une dissolution, une dispersion avec de fines particules minérales, une évaporation des composants volatils et une biodégradation (Lee et al. 2003). À l'automne 2015, 33 000 litres de pétrole et d'eau huileuse ont été aspirés depuis l'épave du pétrolier *Arrow* par des plongeurs engagés par la Garde côtière canadienne (CBC News 2015).

6 MODÉLISATION

Des modèles prédictifs de scénarios de déversement ont été élaborés afin d'illustrer le transport et le comportement prévus des hydrocarbures les plus courants jusqu'à Port Hawkesbury. Port Hawkesbury se classe au deuxième rang au Canada après Vancouver, en Colombie-Britannique, pour ce qui est du tonnage annuel, en raison des volumes importants d'expéditions de pierre concassée et de gravier et de transbordements d'hydrocarbures. Le port a manutentionné 21,6 millions de tonnes de pétrole, dont environ 94 % de pétrole brut et 6 % de produits raffinés (Garde côtière canadienne, 1999; Statistique Canada, 2006) : de ce fait, la modélisation s'est axée sur : 1) les produits raffinés (huile combustible pour diesel); 2) le pétrole brut (Arabian Light); 3) le mazout intermédiaire (IFO180); et 4) les produits pétroliers non classiques, le mélange Cold Lake (CLB) et le mélange Access Western (AWB), qui sont les bitumes dilués les plus susceptibles de se déverser en quantités nécessitant une intervention en cas de déversement. Afin de démontrer le transport et les risques causés par les déversements dans cette zone, un cas de simulation de transport pétrolier pour l'IFO180 a également été réalisé d'après le modèle de déversements d'hydrocarbures OSCAR (contingence et intervention lors de déversements d'hydrocarbures). Il est reconnu que d'autres huiles comme l'huile de lubrification et l'huile hydraulique peuvent aussi être déversées, mais en quantités minimes et ne nécessitent donc pas d'intervention particulière autre que la surveillance.

6.1 COMPORTEMENT DES HYDROCARBURES

Le comportement potentiel de différents déversements à Port Hawkesbury a été simulé par l'Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS2), en tenant compte des conditions estivales et hivernales. Le progiciel ADIOS2 est un modèle d'altération des hydrocarbures fourni par la National Oceanic and Atmospheric Administration (http://response.restoration.noaa.gov/adios). La base de données ADIOS2 comprend des estimations des propriétés physiques du pétrole et des produits dérivés de différentes sources, dont l'industrie, Environnement Canada et le Département de l'Énergie des États-Unis. Le modèle utilise des équations mathématiques et l'information de la base de données pour prédire les changements dans le temps de la densité, de la viscosité et de la teneur en eau du pétrole ou des produits pétroliers, la vitesse d'évaporation de la surface de la mer et de dispersion dans l'eau, et la vitesse à laquelle une émulsion de type aqueux peut se former (Samuels et al. 2013). Les résultats du modèle sous forme graphique et textuelle peuvent être utilisés pour répondre aux questions qui se posent habituellement au cours de l'intervention en cas de déversement et du nettoyage. Par exemple, en prédisant l'évolution de la viscosité du pétrole (résistance à l'écoulement) au fil du temps, ADIOS2 peut fournir des renseignements sur la possibilité d'utiliser avec succès des agents chimiques de dispersion du pétrole.

6.1.1 Conditions environnementales

Des données sur les températures à Port Hawkesbury ont été obtenues (Environment Canada 2015), mais il n'y a pas de données sur les vents. Par ailleurs, aucune donnée sur la température de la surface de la mer et les courants n'étaient disponibles auprès d'Environnement Canada; par conséquent, les données correspondantes sur les vents (Figure 9) et les courants (Figure 10) ont été produites à partir des résultats du modèle des volumes finis d'océanologie côtière (FVCOM). La température de la surface de la mer (Figure 11) a été obtenue à partir de la bouée disponible la plus proche dans l'anse Herring (SmartAtlantic 2015). Par conséquent, les paramètres environnementaux pour la simulation dans ADIOS2 ont été déterminés (Tableau 5). D'après les données disponibles, la période de simulation allait du 1er au 31 janvier 2003.

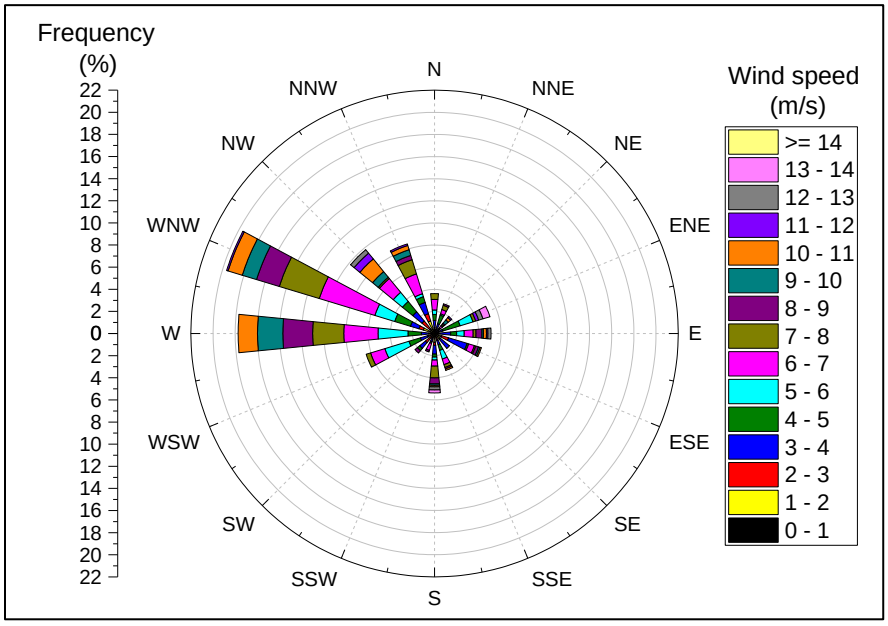

Figure 9. Rose des vents de Port Hawkesbury, janvier 2003

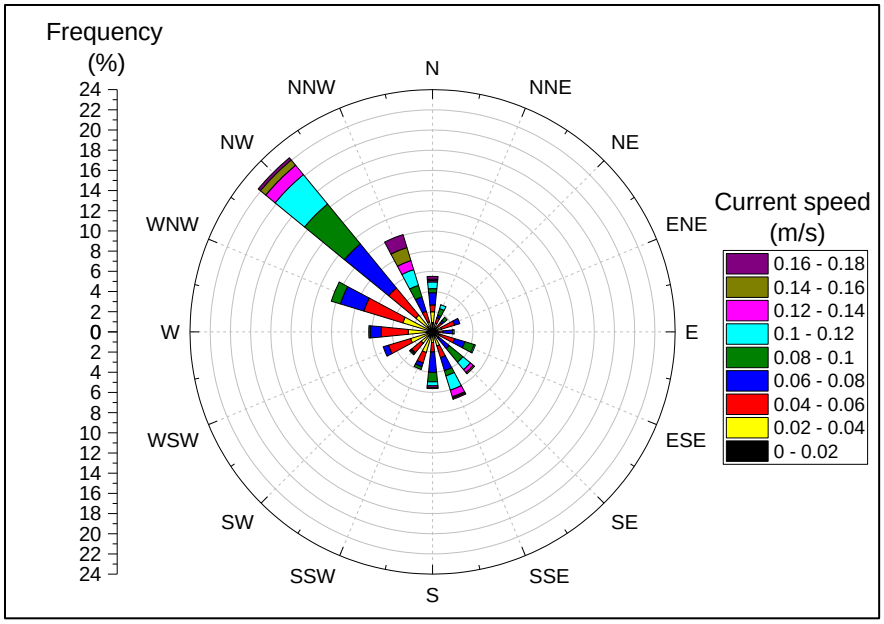

Figure 10. Rose des courants de Port Hawkesbury, janvier 2003

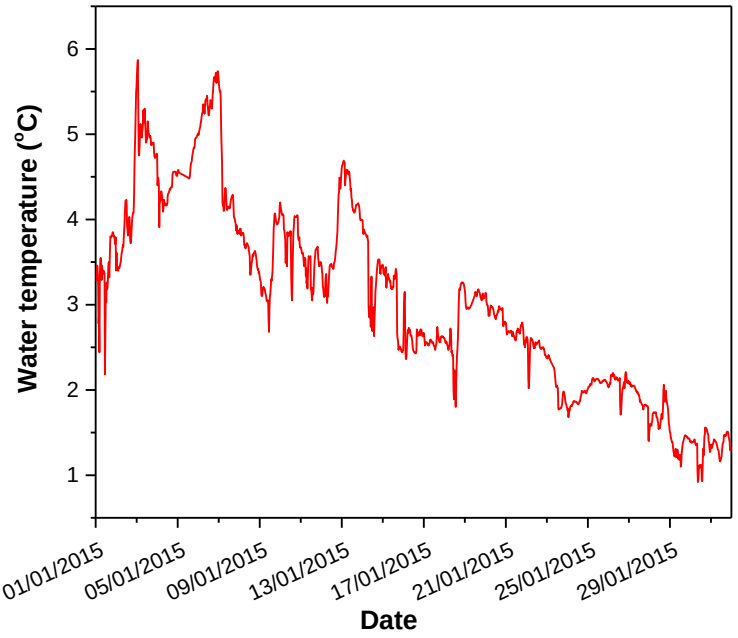

Figure 11. Température de l'eau de mer

Tableau 5. Données environnementales pour la modélisation dans ADIOS2

Paramètre	Unité	Intrants du modèle
Température de l'eau	°C	3
Vitesse du vent	m/s	7
Direction du vent	Degré	290
Vitesse du courant	m/s	0,06
Direction du courant	Degré	315
Salinité	ppm	35
Charge sédimentaire	g/m^3	5

6.1.2 Scénarios relatifs au comportement des hydrocarbures

Les propriétés détaillées des produits pétroliers sont énumérées (Tableau 6). Pour étudier le comportement potentiel des hydrocarbures lors d'une collision avec un pétrolier, le modèle a simulé un déversement de 1 000 m^3 sur une période d'une heure. Cette quantité est représentative de la fuite du réservoir d'un pétrolier typique navigant actuellement dans l'Atlantique canadien.

Tableau 6. Propriétés des produits pétroliers utilisés dans la modélisation

Pétrole	Degré API (°)	Point d'écoulement (°C)	Point d'éclair (°C)	Densité à 12 °C (kg/m^3)	Viscosité à 12 °C (cSt)	Composés aromatiques (en %)
Diesel	39,4	-30	40	872	2,9	-
IFO180	14,7	-10	91	969	2 848,3	51
Pétrole brut Arabian Light	33,4	-53	-20	872	15,2	39
Mélange Cold Lake	21,0	-25	-2	947	361,2	29
Mélange Access Western	20,9	-25	-5	949	438,8	21

6.1.3 Scénarios de déversement de pétrole brut

Le comportement d'un déversement de pétrole brut Arabian Light a été analysé au moyen d'ADIOS2. Environ 25 % du pétrole brut Arabian Light s'évaporerait et se disperserait dans les 36 premières heures. La majeure partie des hydrocarbures déversés devrait donc être récupérée pendant l'intervention (Figure 12). Le taux de dispersion est inférieur à 2 %. Au cours de la même période, la viscosité (Figure 13) et la densité (Figure 14) du déversement augmentent également de façon significative, réduisant ainsi le délai disponible de recours à certaines techniques d'intervention, comme l'utilisation d'agents dispersants. Avec une viscosité cinématique supérieure à 10 000 cSt et une densité légèrement supérieure à 1,00 au bout de 15 heures, il est

possible que le pétrole soit légèrement submergé et non dispersible, auquel cas les seules options de nettoyage pourraient être les écrémeurs et les pompes mécaniques. Une fois que l'équipement d'intervention arrive sur place, il est possible que les efforts d'intervention deviennent plus efficaces, car le pétrole frais remonterait constamment à la surface, ce qui laisse la possibilité de mener des opérations réussies. Malgré cela, les défis logistiques tels que la gestion des déchets et les enjeux liés à la santé et à la sécurité seraient très difficiles à surmonter.

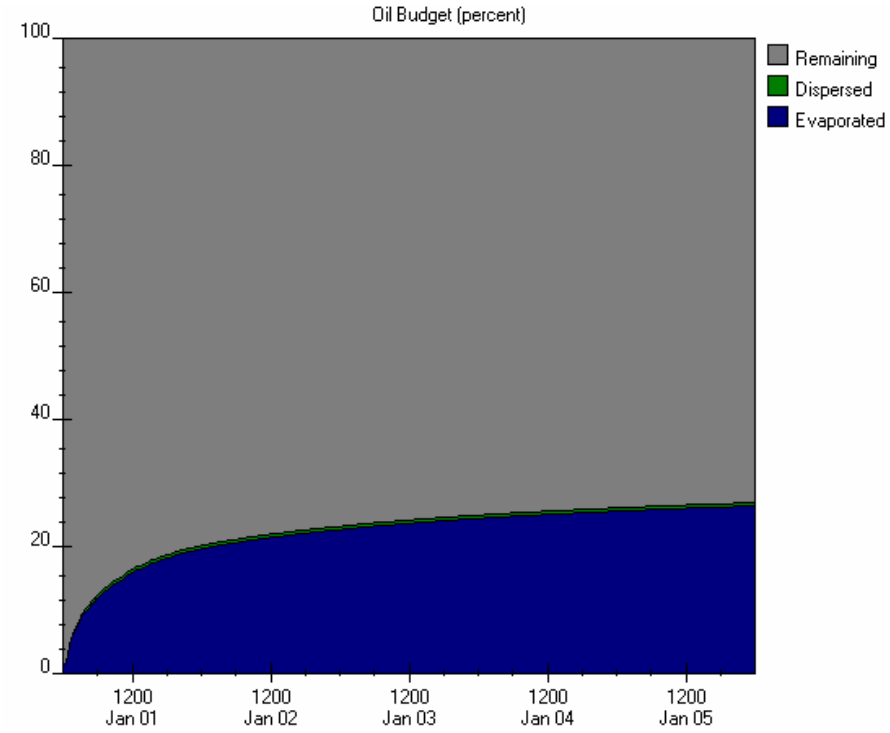

Figure 12. Budget pétrolier en cas de déversement de pétrole brut Arabian Light

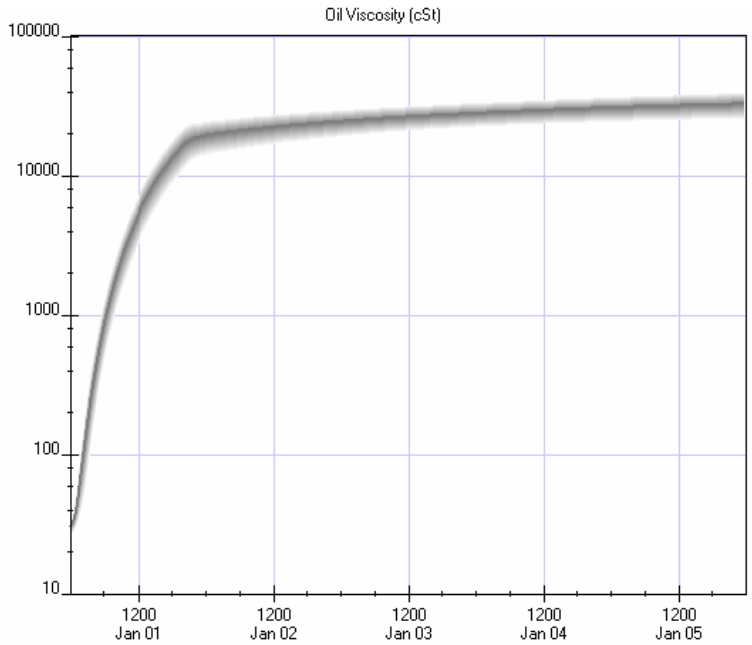

Figure 13. Évolution prévue de la viscosité en cas de déversement de pétrole brut Arabian Light

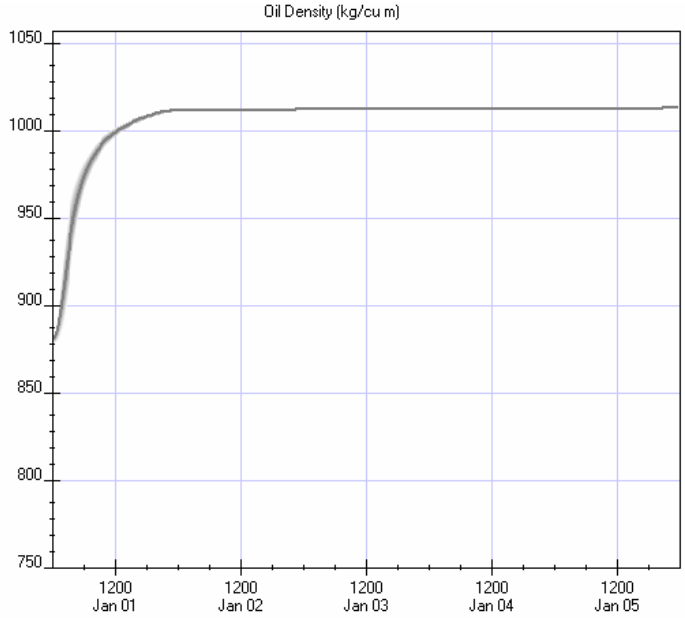

Figure 14. Évolution prévue de la densité en cas de déversement de pétrole brut Arabian Light

6.1.4 Scénarios de déversement de produits raffinés

L'huile combustible pour diesel est un type de produits raffinés légers dont le degré API est de 39,4°. Les déversements extracôtiers de ces hydrocarbures sont susceptibles

d'être causés par une collision entre des pétroliers ou des navires. Si ce produit léger était déversé, la modélisation ADIOS2 prévoit qu'il se disperserait et s'évaporerait considérablement dans les 30 premières heures suivant son rejet en mer (Figure 15). Pour cette raison, les déversements de produits raffinés légers ne représentent pas un problème environnemental important, du fait de leur faible persistance. Il est peu probable que des efforts de récupération importants soient nécessaires, si ce n'est peut-être l'utilisation de produits absorbants à proximité d'environnements sensibles spécifiques. La surveillance de l'atténuation naturelle (rétablissement naturel) serait la stratégie d'intervention de premier choix.

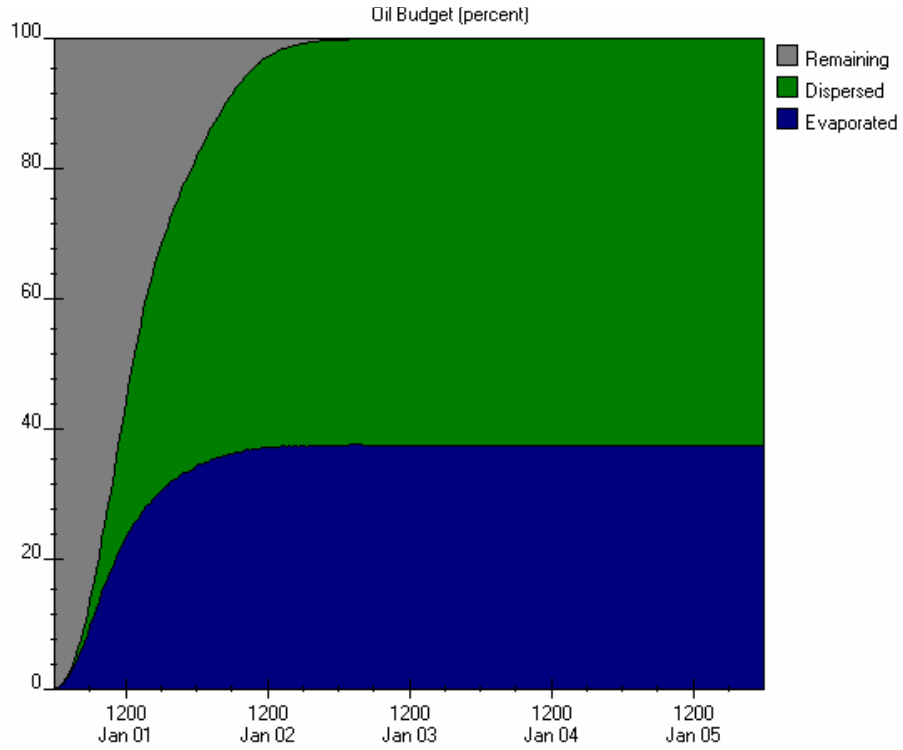

Figure 15. Budget pétrolier en cas de déversement de diesel

6.1.5 Scénarios de déversement de mazout intermédiaire

Les pétroliers et les cargos, entre autres, navigants actuellement dans l'Atlantique utilisent l'IFO180 comme carburant de propulsion. L'IFO180 est un hydrocarbure plus lourd avec un point d'écoulement de -10 °C, ce qui laisse entendre qu'il pourrait devenir semi-solide aux températures généralement observées en hiver. Les IFO pourraient être rejetés dans l'environnement à la suite de dommages à la coque lors d'une collision. D'après la modélisation de l'altération par ADIOS2, la majeure partie des hydrocarbures (environ 87 %) resterait dans l'environnement et les processus d'altération auraient peu d'effet (Figure 16). La dispersion naturelle et l'évaporation sont des processus d'altération marginaux avec ce type d'hydrocarbures. La récupération des hydrocarbures nécessiterait l'utilisation de techniques mécaniques, car les agents dispersants ne seraient pas efficaces compte tenu de la viscosité cinématique élevée,

bien supérieure à 10 000 cSt au moment du déversement, et qui atteint plus de 50 000 cSt au bout d'un jour (Figure 17). Une viscosité et une densité élevées (Figure 18), combinées à des températures basses, rendraient très difficiles les efforts de récupération à l'aide de pompes et d'écrémeurs, en raison du gel des prises d'eau et des problèmes de débit de l'équipement. Comme en cas de déversement de pétrole brut, la majeure partie de l'IFO180 dériverait probablement avec les courants marins et finirait par atteindre le rivage, où l'on pourrait tenter une récupération plus poussée. Plus de renseignements seront donnés dans la section relative au transport pétrolier.

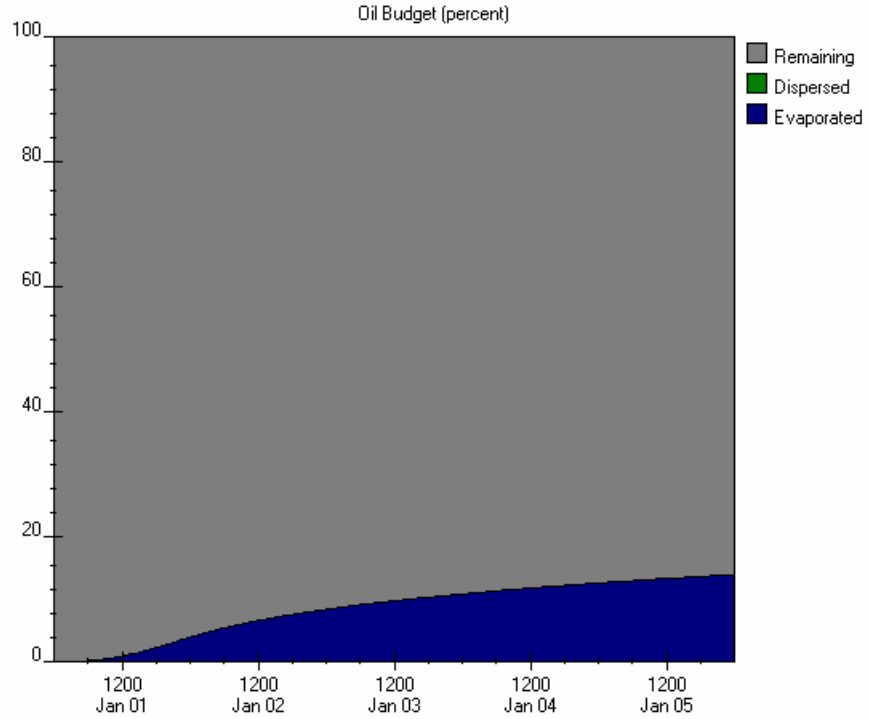

Figure 16. Budget pétrolier en cas de déversement d'IFO180

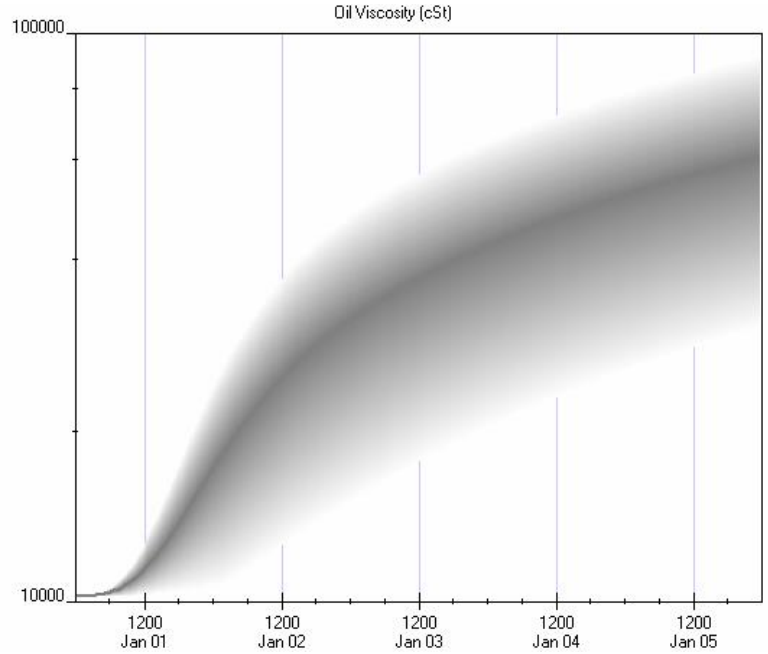

Figure 17. Évolution prévue de la viscosité en cas de déversement d'IFO180

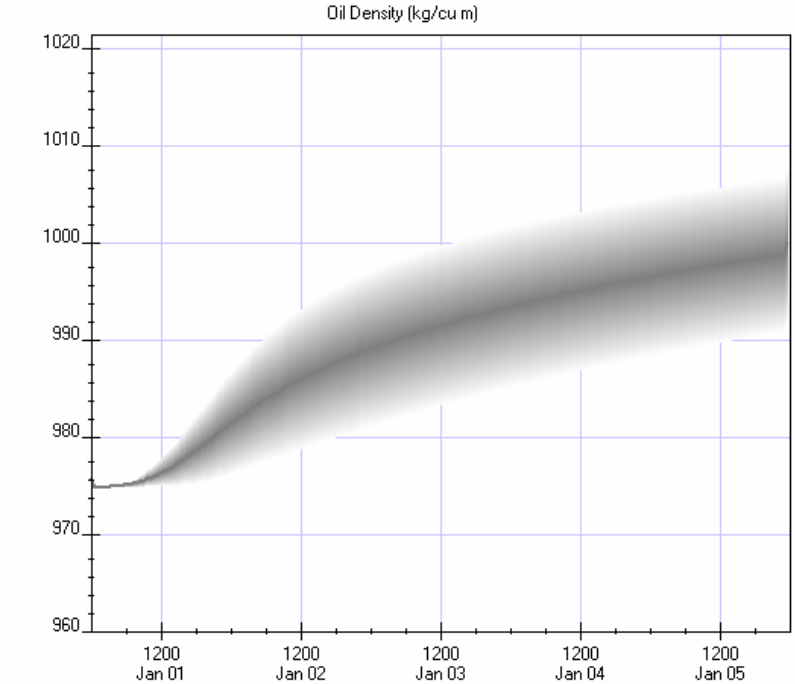

Figure 18. Évolution prévue de la densité de l'IFO180

6.1.6 Scénarios de déversement d'hydrocarbures non classiques

La simulation dans ADIOS2 indique qu'environ 20 % des deux bitumes dilués se dispersera ou s'évaporera au cours des 15 à 18 premières heures et que les

déversements deviendront stables par la suite (Figure 19). La dispersion est détectable dans la simulation du CLB, mais indétectable dans le cas de l'AWB. Au cours de la même période, la viscosité (Figure 20) et la densité (Figure 21) des deux bitumes dilués augmentent de façon significative, réduisant ainsi le délai disponible de recours à certaines techniques d'intervention, comme l'utilisation d'agents dispersants. Étant donné que la viscosité cinématique dépasse 10 000 cSt et que la densité dépasse 1,00, il est possible que ces bitumes dilués soient légèrement submergés et non dispersables. Ainsi, les écrémeurs et les pompes mécaniques pourraient faire figure d'options de nettoyage. La clé du nettoyage du bitume dans cette zone est une réponse rapide dans une courte fenêtre temporelle.

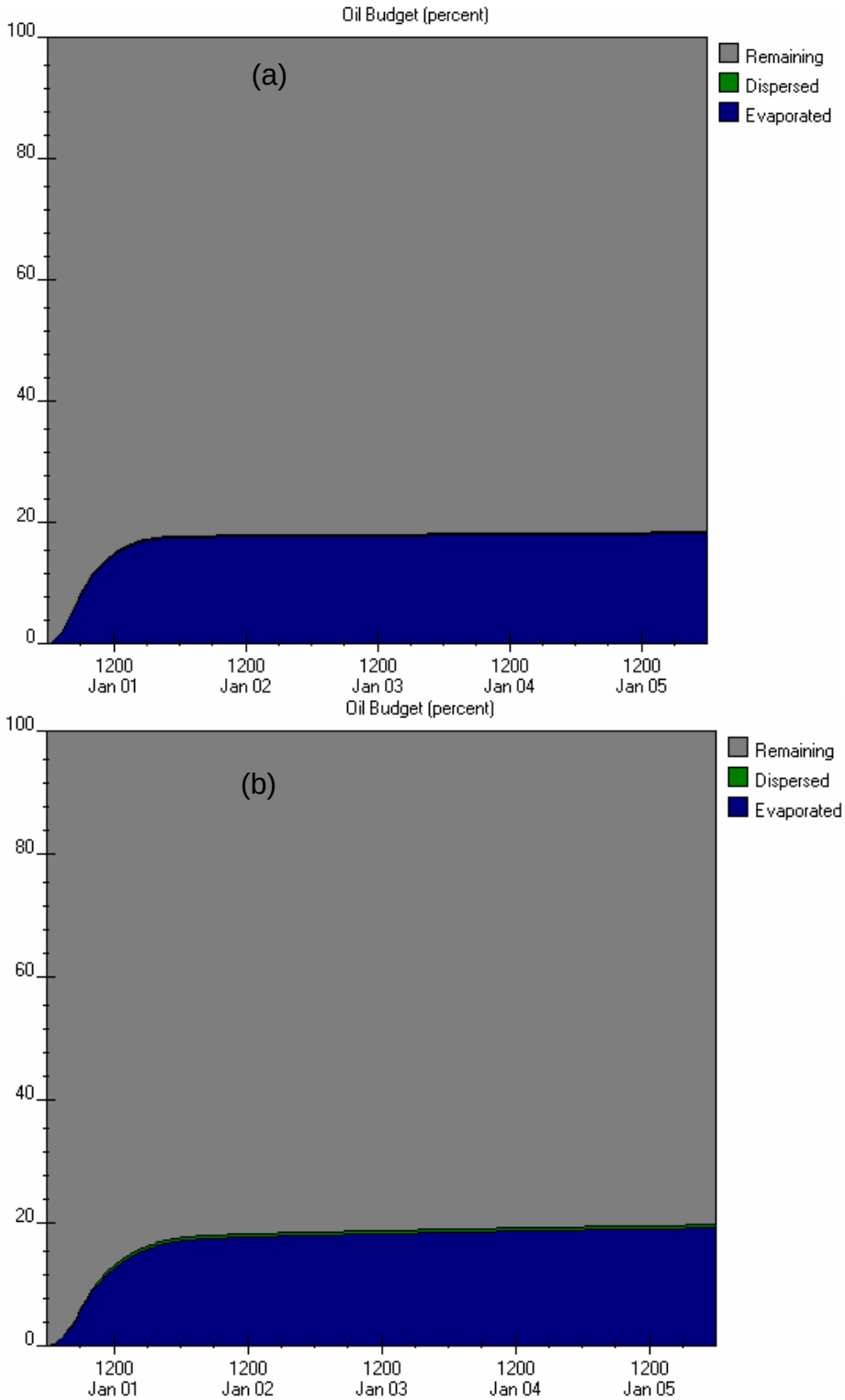

Figure 19. Budget pétrolier en cas de déversement a) d'AWB et b) de CLB

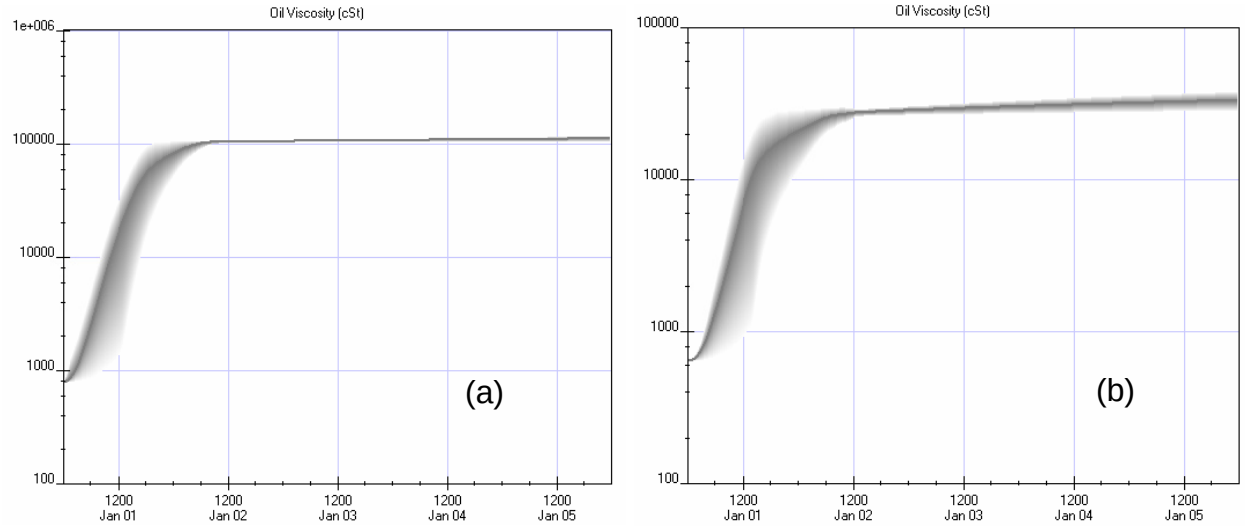

Figure 20. Évolution prévue de la viscosité en cas de déversement a) d'AWB et b) de CLB

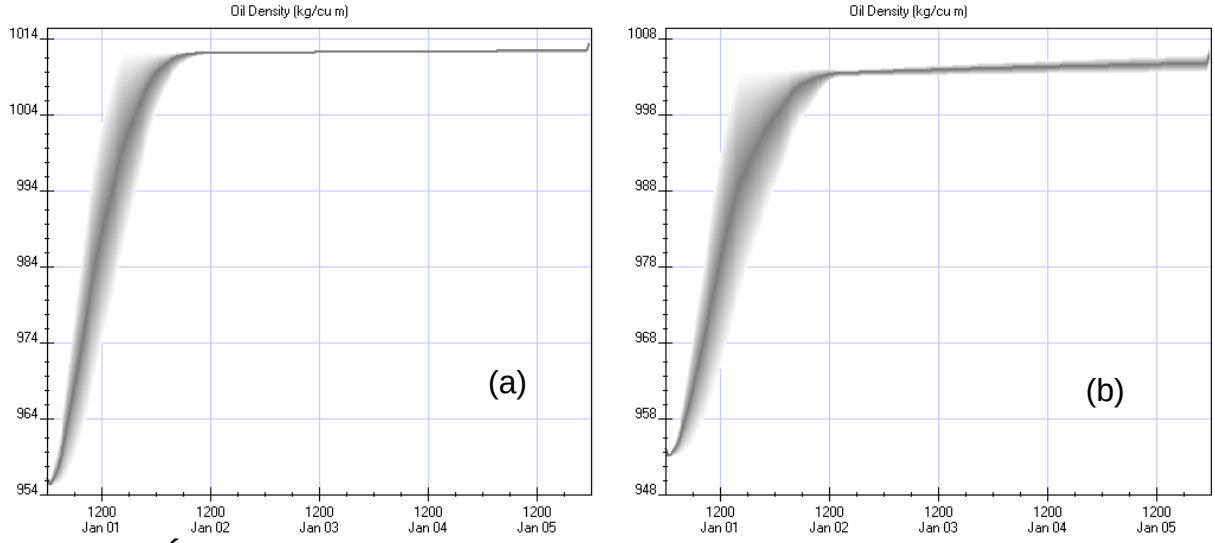

Figure 21. Évolution prévue de la densité en cas de déversement a) d'AWB et b) de CLB

6.2 TRANSPORT D'HYDROCARBURES

Afin d'étudier le transport des hydrocarbures lors d'un déversement à Port Hawkesbury avec et sans application d'agent dispersant, une simulation du transport des hydrocarbures a été réalisée. Elle se fondait sur un déversement de 1 000 m^3 d'IFO180 et utilisait le modèle de déversements d'hydrocarbures OSCAR (contingence et intervention lors de déversements d'hydrocarbures), en hiver comme en été. Le modèle OSCAR est spécialement conçu pour appuyer la prise de décisions en matière de contingence et d'intervention lors de déversements d'hydrocarbures (Aamo et al. 1997; Reed et al. 1995; Reed et al. 1999; Reed et al. 2004). Ce modèle tridimensionnel fondé

sur des particules simule l'évolution des hydrocarbures sur la surface de l'eau et le long des rivages, ainsi que les concentrations d'hydrocarbures dispersés et dissous dans la colonne d'eau. Les processus comprennent l'épandage, la dérive, la dispersion naturelle et chimique, l'évaporation, l'échouement, la dissolution, l'absorption, la sédimentation, l'émulsification et la biodégradation. Le modèle comporte trois éléments clés : un modèle d'altération des hydrocarbures fondé sur une base de données, un modèle tridimensionnel du devenir/de la trajectoire et un modèle d'intervention/de lutte en cas de déversement d'hydrocarbures. Le modèle OSCAR a été validé de façon très détaillée (Reed et al. 1996; Reed et al. 2000).

6.2.1 Intrants et configuration du modèle

Les courants océaniques utilisés dans cette modélisation des déversements d'hydrocarbures provenaient d'un modèle hydrodynamique fondé sur le modèle des volumes finis d'océanologie côtière (FVCOM), un modèle océanique éprouvé tridimensionnel, à volume fini et fondé sur une grille non structurée (Chen et al. 2007). Les extrants du modèle FVCOM sont des données en haute résolution (résolution spatiale jusqu'à 10 m et résolution temporelle d'une heure) se présentant sous forme de maillage triangulaire. Ces données sont très performantes dans des topographies complexes caractérisées (par exemple, rivière et rivage). Le modèle a été évalué par rapport à des données d'observation indépendantes, y compris l'élévation de la marée, le courant de marée (dans la colonne d'eau et la couche inférieure), le courant résiduel de marée et les indicateurs d'asymétrie de la marée. L'évaluation a montré que le modèle était en accord avec les observations. Pour plus d'information sur la configuration et la validation du modèle hydrodynamique, consultez Wu et al. (2011).

Le domaine de modélisation de l'étude (Figure 22) a été divisé en 640 cellules de grille par 450. Les profondeurs de la simulation ont été tirées de la base de données bathymétriques mondiales à haute résolution d'une minute d'arc, ETOPO1 (Amante and Eakins 2009). Les données climatiques, telles que le vent et la température de l'air, sont les mêmes que celles utilisées pour les analyses du comportement des hydrocarbures (Figure 9, Figure 10 et Figure 11). Les vagues ont été calculées à l'interne par le modèle comme une fonction de la vitesse, du fetch et de la durée du vent. Afin d'adapter les formats des données au modèle OSCAR, les données sur les courants du modèle FVCOM ont été interpolées à partir des cellules de grille définies et du domaine de modélisation. Après interpolation, la résolution horizontale du courant était de 55 m. De plus, 10 couches ont été définies pour les grilles verticales avec une résolution de 1 m. La résolution temporelle était d'une heure.

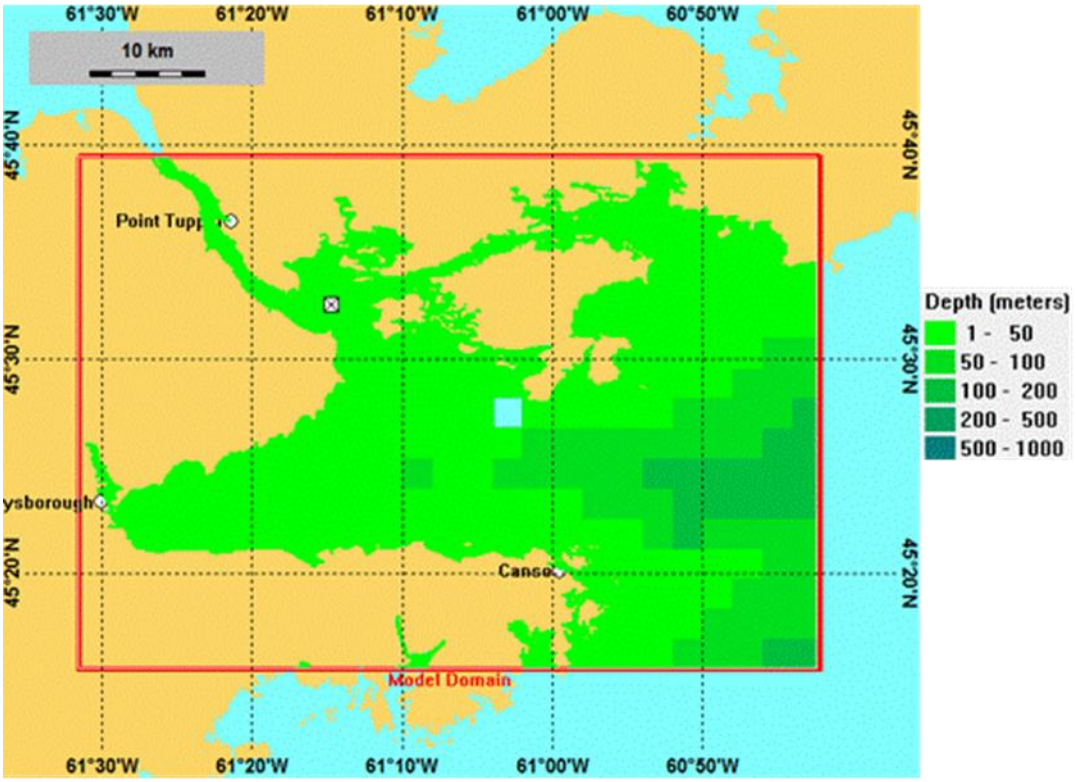

Figure 22. Zone d'étude et domaine de modélisation avec données bathymétriques

6.2.2 Résultats du modèle

Les conditions environnementales, en particulier le vent, jouent un rôle important sur le devenir et le transport des hydrocarbures déversés. Étant donné que le vent dominant correspondant à une saison particulière de l'année varie considérablement, les effets doivent être étudiés séparément. En raison de la disponibilité des données, les simulations concernent la période du 2 au 31 janvier 2003. Habituellement, la dispersion des hydrocarbures se produit au cours des deux premiers jours suivant le déversement. Ils deviennent indétectables par la suite. Par conséquent, la période de simulation a été fixée à 4 jours.

La simulation stochastique comprend une date de déversement aléatoire, qui survient au cours des 27 premiers jours (du 2 au 28 janvier). La même approche peut être appliquée à l'aide des données environnementales pour d'autres saisons. Les vents et courants dominants pendant la période d'étude (Figure 9 et Figure 10) indiquent que les vents dominants proviennent de l'ouest-nord-ouest, avec une certaine variabilité, et que les courants dominants proviennent du nord-ouest. Une approche stochastique a été utilisée dans cette étude pour estimer la probabilité que des trajectoires particulières se produisent, d'après les données historiques sur la vitesse et la direction du vent. Le modèle a simulé une série de trajectoires dans diverses conditions éoliennes à partir

des données historiques sur les vents, puis a combiné les résultats pour produire un résultat global, illustrant la probabilité de déplacement des hydrocarbures.

Les bilans massiques des 27 simulations stochastiques ont été calculés. Par exemple, les bilans massiques (Figure 23) de la première simulation (2 janvier), de la sixième (7 janvier), de la quinzième (16 janvier) et de la vingt-septième (28 janvier) indiquent diverses proportions de fractions de pétrole dues au vent dominant et à la direction du courant. Par exemple, si le déversement se produit le 16 janvier alors que le courant de dérive dominant est un courant de nord-est, une quantité importante d'hydrocarbures déversés s'échouerait sur la côte (Figure 23c, Figure 24a). Si le déversement se produit le 2 ou le 28 janvier, le courant de dérive dominant est un courant de sud-sud-est, de sorte que la majeure partie du pétrole se trouverait encore à la surface et subirait un taux de dispersion relativement élevé (Figure 23a et d; Figure 24a et Figure 25b). Si le courant de dérive dominant est un courant de sud-sud-est, une forte proportion (environ 35 %) des hydrocarbures déversés quitteraient le domaine après 4 jours (Figure 23b, Figure 24b). Cela s'explique par le fait que le domaine de modélisation a été limité par le peu de données disponibles. Davantage de données et de renseignements relatifs à une zone d'étude élargie seront nécessaires à l'avenir.

Une comparaison visuelle des bilans massiques des 27 simulations (Figure 26) a indiqué qu'un pourcentage élevé d'hydrocarbures atteignait le rivage ou flottait à la surface, et qu'il en restait très peu dans la colonne d'eau après 4 jours. L'évaporation n'était importante dans aucun des cas, variant de 5 à 10 %, et la sédimentation n'était apparente dans aucun cas.

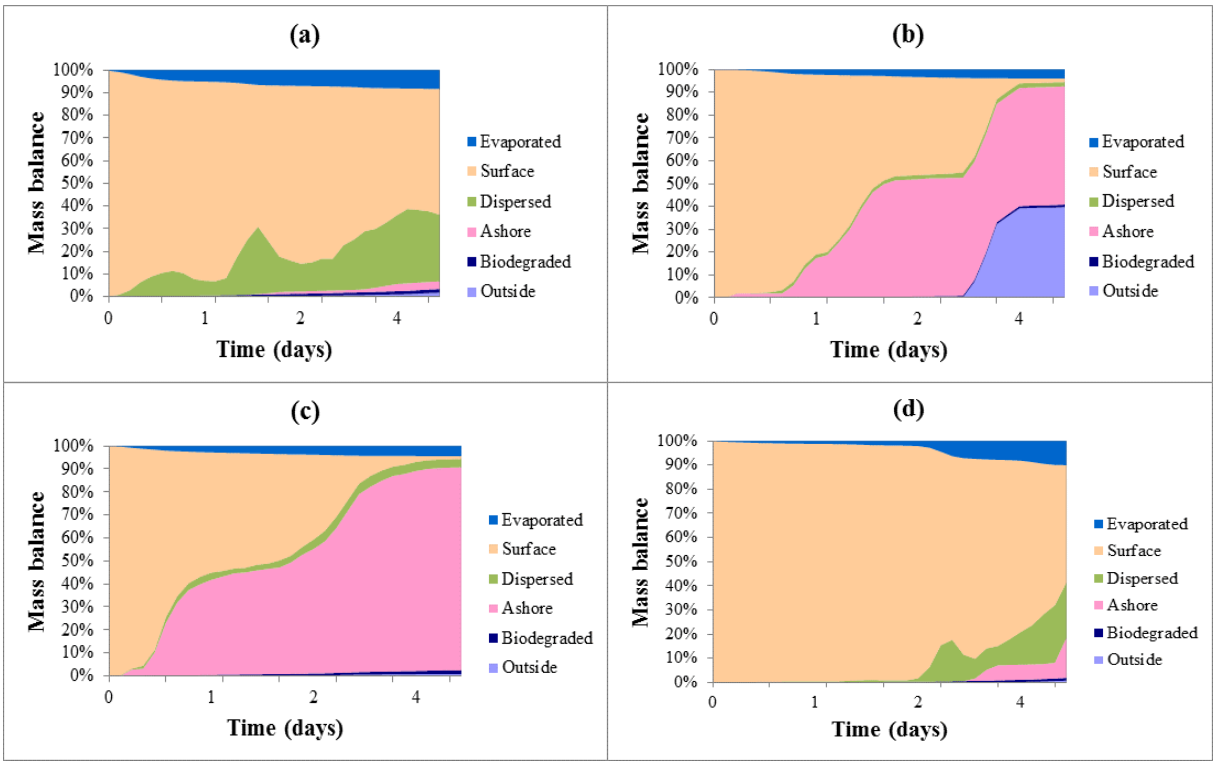

Figure 23. Bilans massiques des simulations stochastiques a) numéro 1, b) numéro 6, c) numéro 15 et d) numéro 27

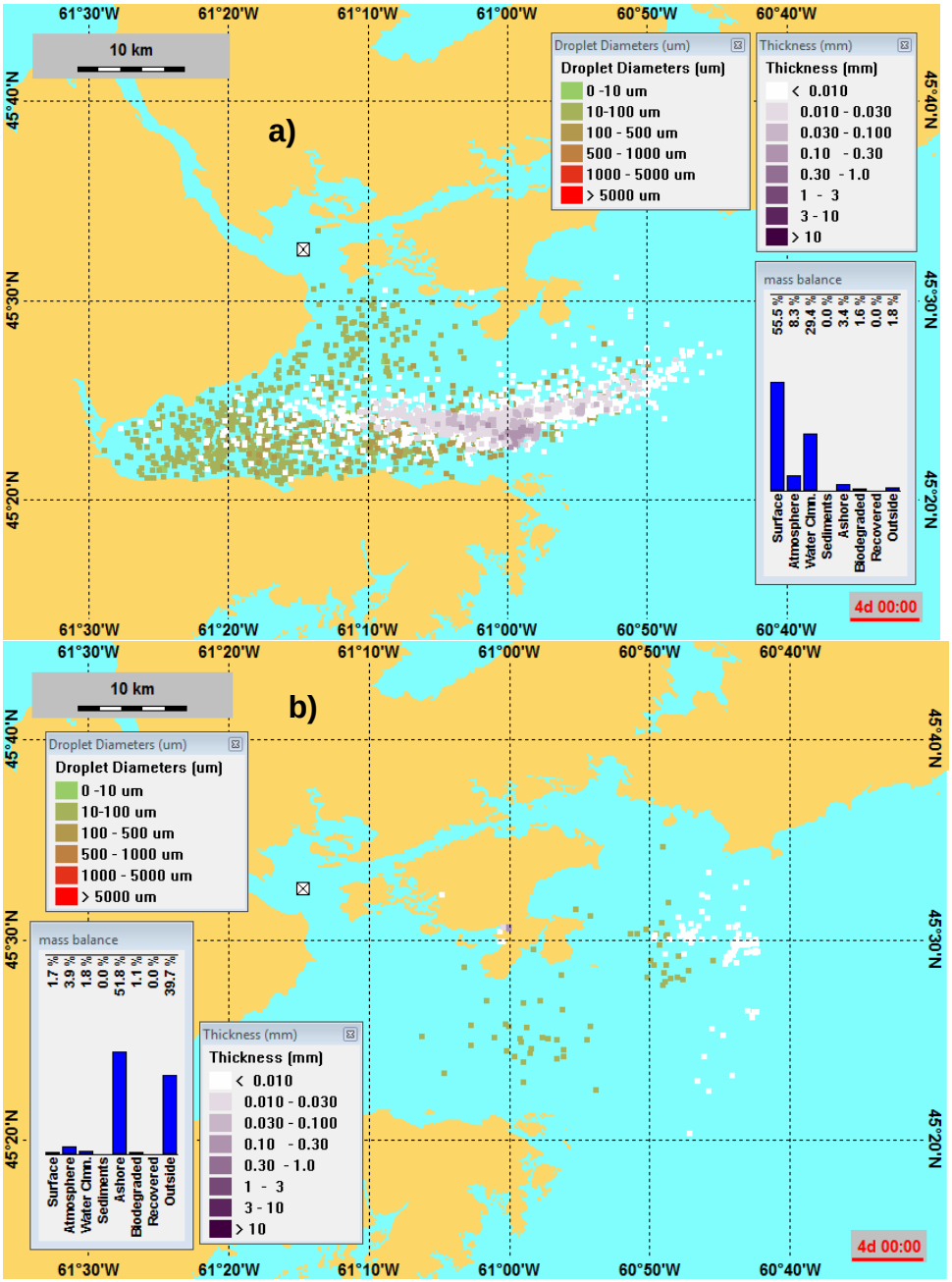

Figure 24. Étendue de la couverture pétrolière des simulations stochastiques a) numéro 1, et b) numéro 6

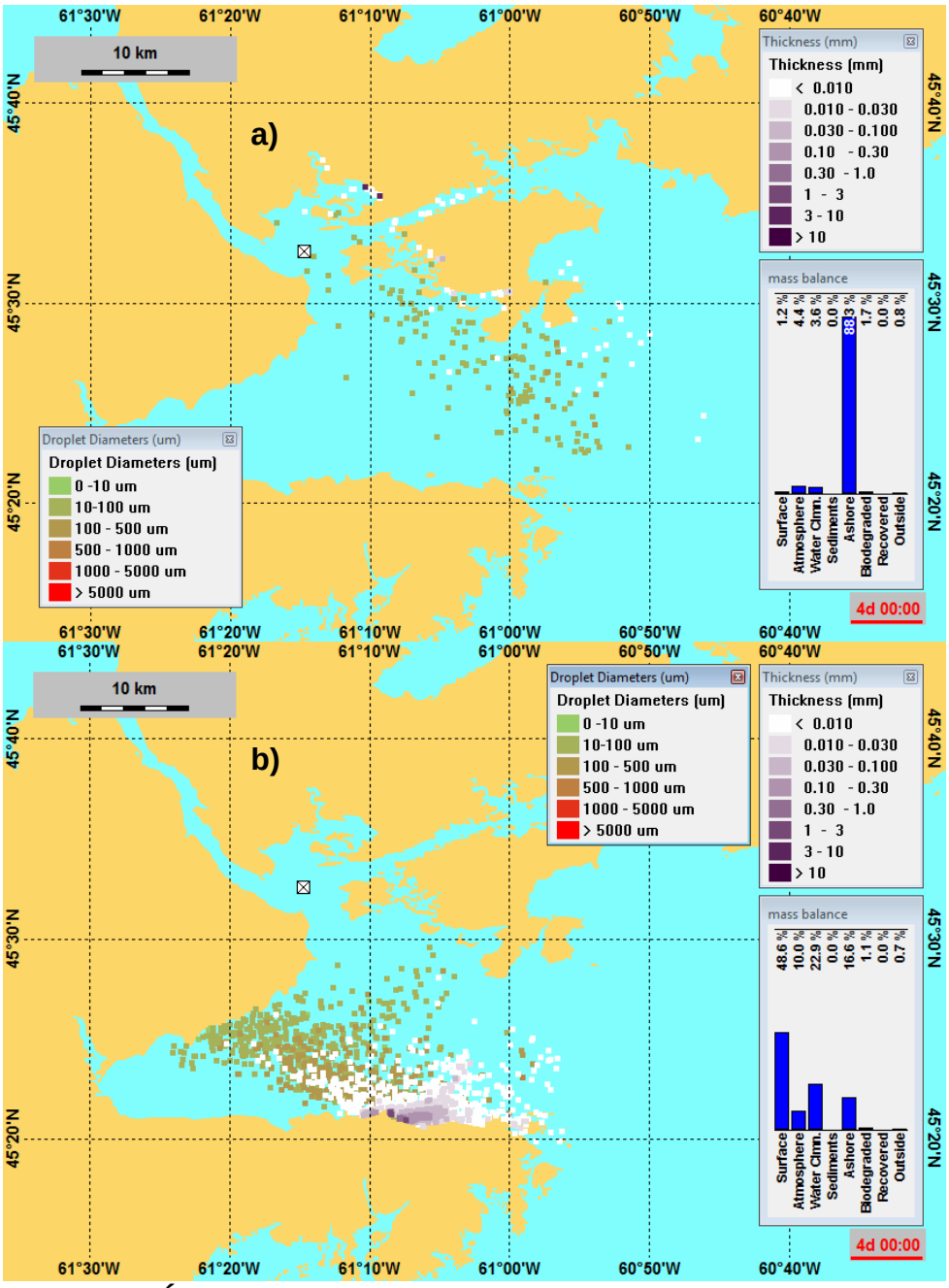

Figure 25. Étendue de la couverture pétrolière des simulations stochastiques a) numéro 15, et b) numéro 27

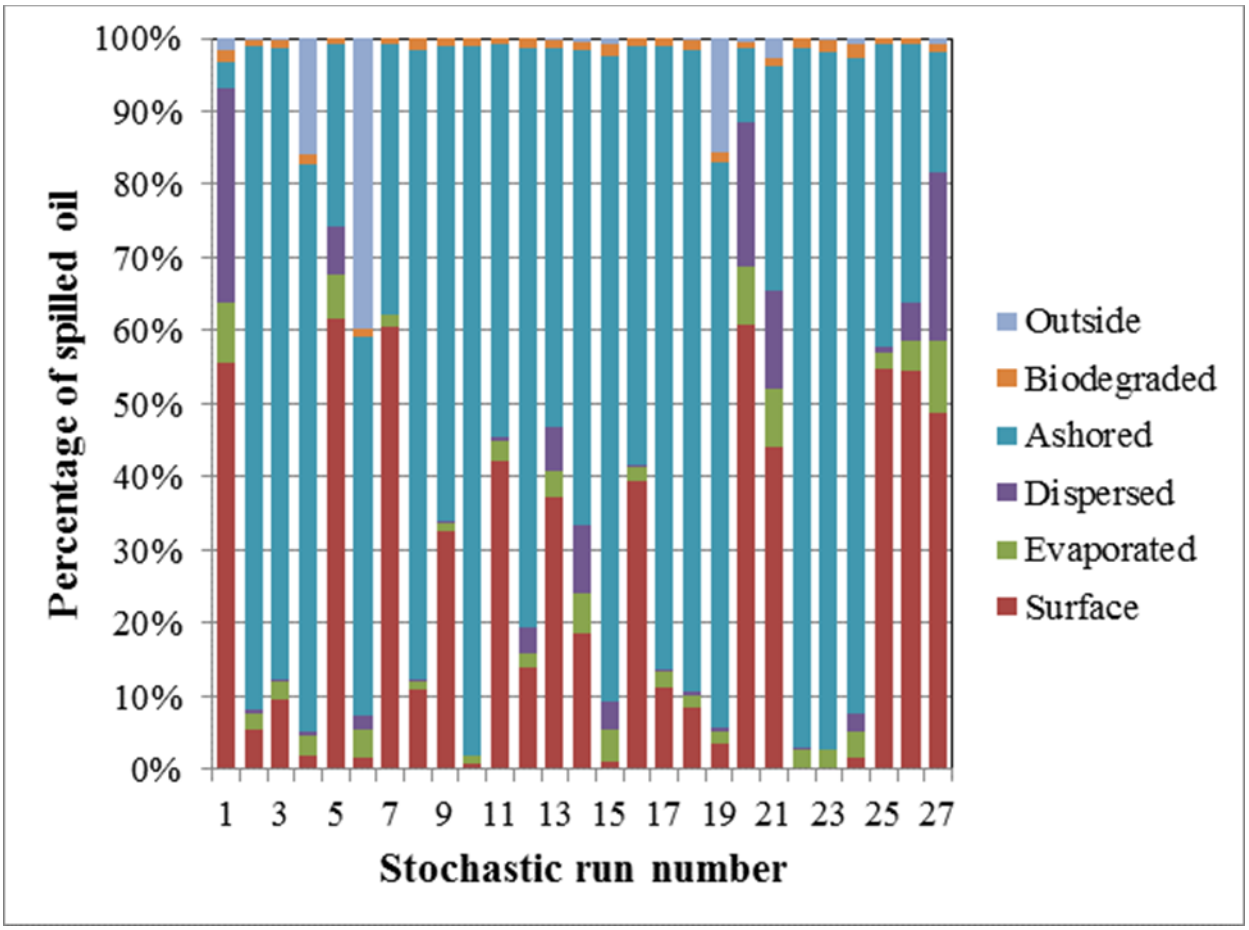

Figure 26. Bilans massiques à la fin de chaque simulation de quatre jours

Enfin, les trajectoires individuelles des 20 simulations ont été combinées pour produire une carte de probabilité de contamination montrant la probabilité d'un mazoutage en surface et sur le littoral (Figure 27 et Figure 28). Presque toutes les zones et tous les rivages du domaine de modélisation seraient probablement contaminés par le pétrole. Le risque le plus élevé concerne la zone centrale du domaine de modélisation (la côte sud de l'île Madame). La Figure 27 indique également que les zones situées au-delà de la limite est du domaine de modélisation seraient également contaminées en surface; toutefois, pour obtenir des renseignements détaillés sur la situation au-delà du domaine actuel, des données supplémentaires sont nécessaires.

Le facteur de répercussion écologique a été utilisé pour représenter le risque pour les différentes zones (colonne d'eau, surface et rivage) et la superficie totale. La colonne d'eau est définie comme la surface de la section transversale horizontale de la répartition du panache dans la colonne d'eau. Les zones touchées présentant un risque supérieur à 5 % sont calculées. Les résultats montrent que la superficie totale touchée était de 1 123 km^2, la surface de la mer touchée était de 751 km^2, la superficie de la colonne d'eau touchée était de 864 km^2 et le littoral touché était de 34 km^2.

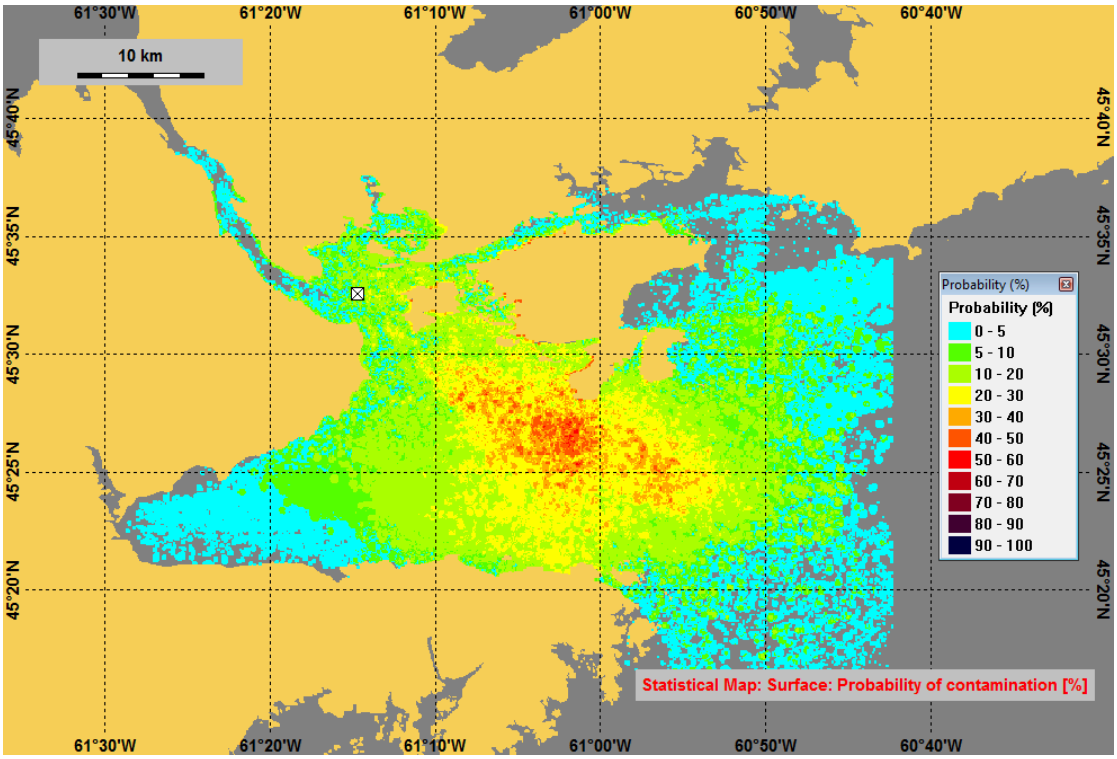

Figure 27. Probabilité de contamination de surface

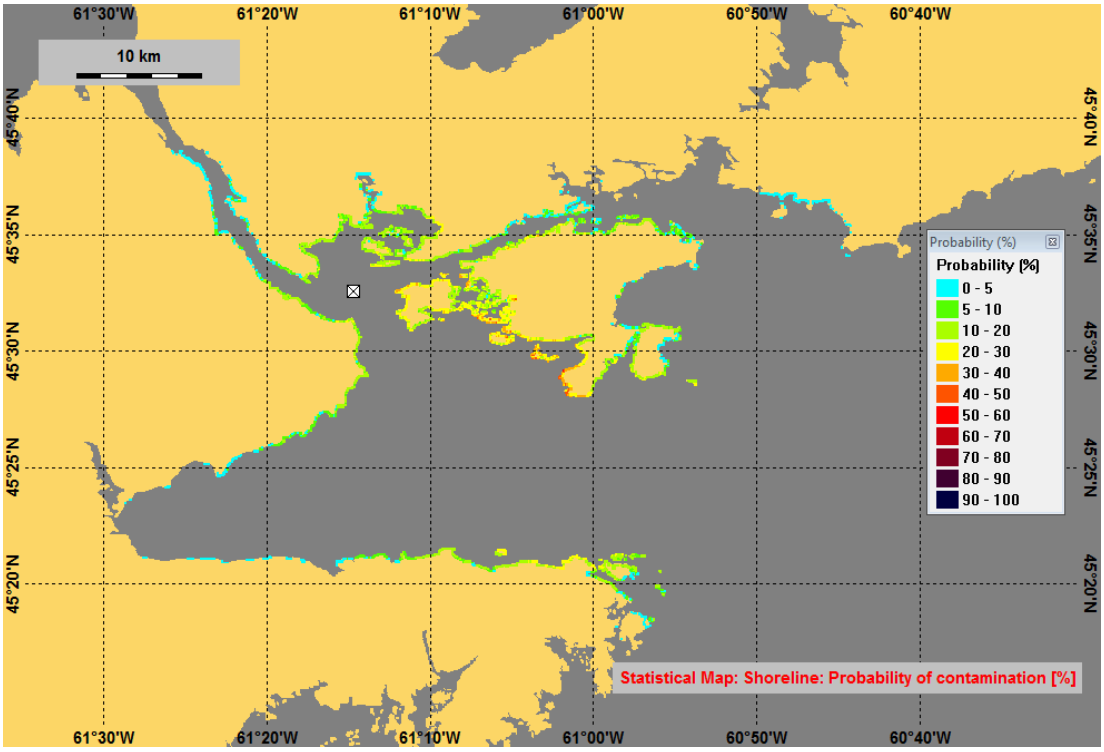

Figure 28. Probabilité de contamination du rivage

En supposant que les espèces préoccupantes dans la zone d'étude sont d'égale importance et que la toxicité des mélanges agents dispersants-hydrocarbures est à peu près égale ou inférieure à celle des hydrocarbures seuls (Fuller et al. 2004; Hemmer et al. 2010), les résultats laissent entendre que l'application d'agents dispersants serait bénéfique pour réduire la superficie totale touchée. Si la surface de la mer et le rivage (p. ex. les réserves écologiques, l'habitat des espèces en péril et les zones résidentielles humaines) étaient les principaux secteurs préoccupants, l'utilisation d'agents dispersants serait alors recommandée. Par contre, l'application d'agents dispersants ne serait pas recommandée en été si la zone de préoccupation était de la colonne d'eau (c.-à-d. pêches).

Il convient de noter que les résultats présentés ci-dessus sont fondés sur une période de simulation de 4 jours. Dans le cas de certaines simulations, en particulier celles dont le pourcentage d'hydrocarbures est plus élevé en dehors du domaine de modélisation, les hydrocarbures peuvent continuer à se déplacer vers d'autres zones et le bilan massique final peut être différent de celui indiqué ci-dessus. Il est nécessaire d'obtenir des données sur une zone étendue aux fins d'une étude future. De plus, une étude de l'efficacité de la dispersion chimique (p. ex. Corexit 9500) devrait être effectuée. Les effets saisonniers sur le transport et le devenir des hydrocarbures devraient également être pris en compte dans les travaux futurs.

7 CONCLUSIONS

Port Hawkesbury et le détroit de Canso jouissent d'un climat moyennement tempéré, avec des étés chauds et humides, mais de la neige et de la glace en hiver. La région entourant Port Hawkesbury et le détroit de Canso est peu urbanisée, à l'exception de quelques petites villes et zones industrielles. Les forces océanographiques près de Port Hawkesbury sont fortement affectées par la présence de la chaussée surélevée de Canso, qui bloque l'écoulement de l'eau dans le détroit. Un certain mélange de part et d'autre de la chaussée surélevée se produit, mais à des niveaux qui sont considérablement réduits par rapport à ce qui se produirait si la chaussée surélevée n'était pas présente. Au-delà du détroit de Canso, les eaux autour de la baie Chedabucto et au sud-est du Cap-Breton sont très exposées et connaissent une forte houle océanique ainsi que les vents et les vagues de l'océan Atlantique Nord.

La région de Port Hawkesbury, surnommée le superport du détroit de Canso, est un port maritime important qui a manutentionné en 2009 les deux tiers des marchandises en Nouvelle-Écosse. Le détroit de Canso est considéré comme l'un des ports les plus profonds de la côte est de l'Amérique du Nord et peut accueillir des navires trop gros pour accoster dans de nombreux autres ports. La raffinerie située à proximité de Point Tupper sert de terminal pour les superpétroliers (certains pétroliers atteignant 250 000 TPL) pouvant stocker les produits pétroliers, les mélanger et les transférer sur de plus petits navires. Entre 2005 à 2008, le superport de Canso a manutentionné plus de 30 millions de tonnes de marchandises annuellement. Sur les 31,6 millions de tonnes de marchandises qui ont transité par ce port en 2006, 21,6 millions de tonnes étaient du pétrole brut.

La modélisation du déversement d'hydrocarbures dans ADIOS2 a été effectuée pour cette zone en prenant pour référence un déversement d'une heure de 4 000 m^3 en hiver (mars) et en été (juillet). Après 5 jours, les produits raffinés s'évaporeraient à 80 % dans la chaleur de l'été. L'essence ne persisterait que 12 à 24 heures. Ces produits sont complètement altérés après 2,5 jours dans des conditions hivernales. Seul environ 1/5 du pétrole brut Arabian Light et de pétrole brut Hibernia Light s'évaporerait et se disperserait dans les 36 premières heures. La majeure partie devrait donc être récupérée. L'augmentation de la viscosité et de la densité des deux pétroles en hiver réduit les possibilités d'application d'agents dispersants. La majeure partie de l'IFO 180 resterait dans l'environnement et souillerait la côte, où un nettoyage approfondi serait nécessaire. Très peu de combustible de soute C se disperserait ou s'évaporerait en hiver ou en été, et après deux jours en hiver, il serait probablement légèrement submergé et non dispersible, de sorte que les procédures de nettoyage seraient limitées. Environ 1/5 du bitume dilué se disperserait ou s'évaporerait dans les 20 premières heures en hiver ou en été, avant que le déversement ne se stabilise. Seul le mélange Cold Lake a montré une dispersion détectable en hiver. La viscosité et la densité du bitume dilué augmentent dans les 12 à 15 heures, ce qui réduit les possibilités d'utilisation d'un agent dispersant. Ces produits exigent une intervention rapide et peuvent être légèrement submergés et non dispersables en hiver. En été, les options de nettoyage sont encore limitées à la récupération mécanique.

8 RÉFÉRENCES

Aamo, O.M., Reed, M., and Downing, K. Oil spill contingency and response (OSCAR) model system: Sensitivity studies. *In* Proceedings of the 1997 International Oil Spill Conference, April 7-10, 1997. Fort Lauderdale, Florida 1997. American Petroleum Institute. pp. 429-438.

Amante, C., and Eakins, B.W. 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, data sources and analysis. National Geophysical Data Center, Marine Geology and Geophysics Division NESDIS NGDC-24, Boulder, Colorado.

AMEC Earth and Environmental. 2008. Environmental Impact Statement (EIS) for the Proposed Melford International Terminal.

Bedford Institute of Oceanography. 2007. Hydrographic Database and Ocean Data Inventory Database. Available from http://www.mar.dfo-mpo.gc.ca/science/ocean/database/data_query_f.html.

Buckley, D.E., Owens, E.H., Schafer, C.T., Vilks, G., Cranston, R.E., Rashid, M.A., Wagner, F.J.E., and Walker, D.A. 1974. Canso Strait and Chedabucto Bay: a multidisciplinary study of the impact of man on the marine environment. Geol. Surv. Can. **74-30**: 133-159.

Canada-Nova Scotia Strait of Canso Environment Committee. 1975. Water resources. Halifax, NS.

Canadian Hydrographic Services. 2007. Atlantic Coast and Bay of Fundy. Canadian Tide and Current Tables.

CBC News. 2015. SS Arrow cleanup removes 30,000 litres of oil from Chedabucto Bay wreck.

CBCL. 2015. Bear Head LNG Terminal Metocean Study, draft report 140672.00 prepared for Bear Head LNG.

Chen, C., Huang, H., Beardsley, R.C., Liu, H., Xu, Q., and Cowles, G. 2007. A finite volume numerical approach for coastal ocean circulation studies: comparisons with finite difference models. J Geophys Res **112**: C03018. doi:doi:10.1029/2006JC003485.

Climate-Data.org. 2018. Climate Port Hawkesbury. Available from https://en.climate-data.org/north-america/canada/nova-scotia/port-hawkesbury-762130/2018].

Cranston, R.E., Fitzgerald, R.A., and Winters, G.V. 1974. Geochemical data from the Strait of Canso and Chedabucto Bay, Nova Scotia. BIO Data Series **BI-D-74-3**: 56.

Crowley, R.W. 1970. Arrow. Potomac Research Inc. for Department of the Navy, Naval Ship Systems Command 0994-008-1010, Washington, DC.

Dupond, F., Hannah, C.G., Greenberg, D.A., Cherniawsky, J.Y., and Naimie, C.E. 2002. Modelling System for Tides for the Northwest Atlantic Coastal Ocean. Canadian Technical Report of Hydrograph and Ocean Sciences **221**(70).

Environment Canada. 2015. Climate. Available from http://climate.weather.gc.ca/2015].

Fothergill, N.O. 1955. Tidal changes in the Strait of Canso. *In* Report of tidal and current survey, Canadian Hydrographic Service. p. 9.

Fuller, C., Bonner, J., Page, C., Ernest, A., McDonald, T., and McDonald, S. 2004. Comparative toxicity of oil, dispersant, and oil plus dispersant to several marine species. Environmental Toxicology and Chemistry **23**(12): 2941-2949. Available from http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1897/03-548.1/pdf [accessed.

Gardner Pinfold. 2010. Economic impact study of independent marine ports in Atlantic Canada. Gardner Pinfold Consulting Economics, Halifax, NS.

Government of Nova Scotia. 2010. Selected Daily Stats. Available from https://www.novascotia.ca/finance/statistics/news.asp?id=75042018].

Government of Nova Scotia. 2019. Geographic Data Directory.

Gregory, D., Petrie, B., Jordan, F., and Langille, P. 1993. Oceanographic, geographic and hydrological parameters of Scotia-Fundy and southern Gulf of St. Lawrence inlets. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. **143**: 248.

Heath, R.A. 1973. Flushing of coastal embayments by changes in atmospheric conditions. Limnology and Oceanography **18**: 849-862.

Hemmer, M.J., Barron, M.G., and Greene, R.M. 2010. Comparative toxicity of Louisiana Sweet crude oil (LSC) and chemically dispersed LSC to two Gulf of Mexico aquatic test species. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.

Houston, G., Gaudreau, R., and Sinclair, M. 2013. A Review of Canada's Ship-source Oil Spill Preparedness and Response Regime: Setting the course for the future. Tanker Safety Panel Secretariat 978-1-100-54627-8, Ottawa, ON.

Invest Cape Breton. 2018. Transportation Infrastructure.

JWEL. 2004. Environmental Assessment for the Proposed Bear Head LNG Terminal, Bear Head, Nova Scotia. N.E. Inc.

Keizer, P., Ahern, T., Dale, J., and Vandermeulen, J. 1978. Residues of bunker C oil in Chedabucto Bay, Nova Scotia, 6 years after the *Arrow* spill. Journal of the Fisheries Board of Canada **35**(5): 528-535. Available from http://www.google.ca/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCoQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.nrcresearchpress.com%2Fdoi%2Fpdf%2F10.1139%2Ff78-097&ei=P8wVU9LNIYrH0wG564CwCA&usg=AFQjCNEYvBCA8X4Om6nqEhpreKVHQdXT5Q&bvm=bv.62286460,d.dmQ [accessed.

Lawrence, D.J. 1972. Oceanographic and Water Quality Parameters in the Strait of Canso 1968-1970. Bedford Institute of Oceanography, Data Series **BI-D-72 10**.

Lawrence, D.J., L.A., F., and R.H., L. 1973. Statistics of currents for navigation and dispersion in Canso Strait and Come by Chance Bay. Bedford Inst.of Oceanogr. Rept. **BI-73-6**.

Lee, K., Prince, R.C., Greer, C.W., Doe, K.G., Wilson, J.E.H., Cobanli, S.E., Wohlgeschaffen, G.D., Alroumi, D., King, T., and Tremblay, G.H. 2003. Composition and toxicity of residual Bunker C fuel oil in intertidal sediments after 30 years. Spill Science and Technology Bulletin **8**(2): 187-199. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S1353-2561(03)00014-8.

MacLaren Marex Inc. 1978. Report on cavern oil storage project preliminary impact study of brining operations for province of Nova Scotia. N.S.D.o. Development.

Maritime Museum of the Atlantic. 2018. Arrow - 1970. Available from https://novascotia.ca/museum/wrecks/wrecks/shipwrecks.asp?ID=4682018].

McCracken, F.D. 1979. Canso Marine Environment Workshop. Fisheries and Marine Service Technical Report **834**.

Messieh, S.N., and El-Sabh, M.I. 1988. Man-made environmental changes in the southern Gulf of St. Lawrence, and their possible impact on inshore fisheries. Natural and Man-Made Hazards: 499-523.

Neu, H.A. 1972. Extreme Wave Height Distribution along the Canadian Atlantic Coast. Ocean Industry: 45-49.

Office of the Auditor General of Canada. 2010. Chapter 1 Oil Spills from Ships. *In* Report of the Commissioner of the Environment and Sustainable Development to the House of Commons - Fall 2010. Office of the Auditor General of Canada, Ottawa, ON. pp. 1-37.

Owens, E.H. The cleaning of gravel beaches polluted by oil. *In* 13th International Coastal and Engineering Conference. Vancouver, BC, July 10-14, 1972 1972. American Society of Civil Engineers. pp. 2549-2556.

Parrott, D.R. 2010. Cruise Hart 2004010 Geophysical and Photographic Surveys in the Strait of Canso, NS, 27 April – 14 May 2004. *Edited by* G.S.o. Canada.

Parrott, D.R., Parsons, M.B., Kostylev, V., Shaw, J., and Tay, K.-L. 2005. Seafloor Character of Canso Strait, Nova Scotia-50 years after completion of the Canso Causeway. *In* Canadian Coastal Conference.

Pemberton, S.G. 1976. Deep Bioturbation By axius serratus in the Strait of Canso, NS. McMaster University.

Platt, T., Prakash, A., and Irwin, B. 1972. Phytoplankton nutrients and flushing of inlets on the coast of Nova Scotia. Naturaliste Canadien **99**: 253-261.

Prouse, N.J. 1994. Ranking harbours in the Maritime Provinces of Canada for Potential to contaminate American Lobster (Homarus americanus) with polycyclic aromatic hydrocarbons. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. **1960**.

Pub 145. 2014. Nova Scotia and the St. Lawrence, Seventeenth Edition. Sailing Directions (Enroute) National Geospatial Intelligence Agency.

Reed, M., Aamo, O.M., and Daling, P.S. OSCAR: a model system for quantitative analysis of oil spill response strategies. *In* Proceedings of the 18th Arctic and Marine Oilspill Program (AMOP) Technical Seminar. Edmonton, Alberta, June 14-16 1995. Environment Canada. pp. 815-835.

Reed, M., Aamo, O.M., and Downing, K. Calibration and testing of IKU's oil spill contingency and response (OSCAR) model system. *In* Proceedings 19th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar. Calgary, Alberta 1996. Environment Canada. pp. 689-726.

Reed, M., Ekrol, N., Rye, H., and Turner, L. 1999. Oil spill contingency and response (OSCAR) analysis in support environmental impact assessment offshore Namibia. Spill Science and Technology Bulletin **5**(1): 29-38. doi:doi:10.1016/S1353-2561(98)00050-4.

Reed, M., Daling, P.S., Brakstad, O.G., Singsaas, I., Faksness, L.-G., Hetland, B., and Ekrol, N. OSCAR 2000: a multi-component 3-dimensional oil spill contingency and response model. *In* Proceedings of the 23rd AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response. Vancouver, British Columbia, June 14-16 2000. Environment Canada. pp. 663-680.

Reed, M., Daling, P., Lewis, A., Ditlevsen, M.K., Brors, B., Clark, J., and Aurand, D. 2004. Modelling of dispersant application to oil spills in shallow coastal waters.

Environmental Modelling and Software **19**(7-8): 681-690. Available from http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815203001920 [accessed.
Samuels, W.B., Amstutz, D.E., Bahadur, R., and Ziemniak, C. 2013. Development of a global oil spill modeling system. Earth Science Research **2**(2): 52-61.
SL Ross Environmental Research. 1999. Probability of Oil Spills from Tankers in Canadian Waters. SL Ross Environmental Research Ltd, Ottawa, ON.
SmartAtlantic. 2015. Halifax (Herring Cove) Buoy. Available from http://www.smartatlantic.ca/Halifax/buoy.php2015].
SNC-Lavalin. 2015. Bear Head LNG Section 4 Overview the Environment. https://www.novascotia.ca/nse/ea/bear-head-lng/section-4a.pdf.
Statistics Canada. 2011. Shipping in Canada. Statistics Canada, Ottawa, ON.
Stewart, P.L., and White, L. 2001. A review of contaminants on the Scotian Shelf and in adjacent coastal waters: 1970 to 1995. Fisheries and Oceans Canada 2351, Dartmouth, NS.
Strait of Canso Superport. 2018a. Statistics. Available from http://www.straitsuperport.com/port/statistics/.
Strait of Canso Superport. 2018b. Strait of Canso Superport Overview. Available from http://www.straitsuperport.com/uploads/documents/fact_sheet.pdf2018].
Strait of Canso Superport. 2018c. Strait of Canso Port. Available from http://www.straitsuperport.com/port/2018].
Swail, V.R., Cardone, V.J., and Cox, A.T. 2006. 50-year (1954 to 2005) wind and wave hindcast of the North Atlantic A Long Term North Atlantic Wave Hindcast. *Edited by* M.S.o. Canada.
Transportation Safety Board of Canada. 2014. Canadian Transportation Accident Investigation and Safety Board Act. *In* Transportation Safety Board Regulations. *Edited by* G.o. Canada, http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-2014-37/FullText.html.
Transportation Safety Board of Canada. 2018. TSB Accident Statistics. http://www.tsb.gc.ca/eng/stats/.
Vilks, G., Schafer, C.T., and Walker, D.A. 1975. The influence of a causeway on oceanography and Foraminifera in the Strait of Canso, Nova Scotia. Can. J. Earth Sci. **12**: 2086-2102.
WeatherSpark.com. 2016.
Webster, T., McGuigan, K., Crowell, N., Collins, K., and MacDonald, C. 2014. Acquisition and processing of topo-bathymetric lidar for Isle Madame in support of the World Class Tanker Safety Initiative. Applied Geomatics Research Group, NSCC Middleton, NS.
Wu, Y., Chaffey, J., Greenberg, D.A., Colbo, K., and Smith, P.C. 2011. Tidally-induced sediment transport patterns in the upper Bay of Fundy: a numerical study. Cont Shelf Res **31**(19-20): 2041-2053. doi:doi:10.1016/j.csr.2011.10.009.