

APPENDIX C

Rapport de modélisation de Tetra Tech EBA

Modélisation du comportement et du devenir de déversements de pétrole en mer pour le terminal maritime proposé Canaport Énergie Est



PRÉSENTÉ À :
Stantec

NOVEMBRE 2015
DIFFUSÉ POUR UTILISATION
FICHER : V13203200

Cette page a été intentionnellement laissée vide.

RÉSUMÉ

Tetra Tech EBA Inc. (Tetra Tech EBA) a été retenue par Stantec Consulting Ltd. (Stantec), au nom d'Oléoduc Énergie Est ltée (Énergie Est), pour réaliser des simulations de déversements de pétrole en mer en appui au projet Oléoduc Énergie Est (le « projet »). Le projet comportera le transport par voie maritime de divers types de pétrole brut. Pour cette étude, on a choisi trois types de pétrole représentatifs : un pétrole brut léger d'origine canadienne du gisement de Bakken (BAK), un mélange de pétrole brut synthétique moyen fourni par Husky (HSB) et le Western Canadian Select (WCS), un bitume lourd dilué. Le pétrole brut sera chargé dans les navires-citernes au terminal maritime Canaport Énergie Est, près de Saint John, au Nouveau-Brunswick. On prévoit que le terminal maritime sera utilisé par des navires-citernes des classes Aframax, Suezmax et TGTB (très gros transporteurs de brut).

Le présent rapport rend compte d'une étude sur le devenir et le comportement de pétrole brut dans le cas peu probable d'un déversement accidentel dans la baie de Fundy de types de pétrole légers (BAK) à lourds (WCS). L'étude a été réalisée en appui à l'évaluation des risques pour l'environnement et la santé humaine (ERESH), afin de quantifier les risques qui pourraient surgir dans le cas d'accidents ou défaillances au terminal maritime proposé ou en lien avec des navires-citernes transportant du pétrole livré à Saint John par le pipeline d'Énergie Est.

La fréquence attendue d'accidents et défaillances susceptibles d'entraîner un déversement de pétrole brut a été évaluée par la firme DNV-GL pour le terminal maritime ainsi que pour la route de navigation empruntée par les navires-citernes qui quittent le terminal. Tetra Tech EBA a effectué des simulations de déversement en des points choisis, et ce, en utilisant simultanément un modèle de circulation hydrodynamique tridimensionnel, un modèle de vagues et un modèle de déversements de pétrole. Les trois modèles représentent des outils d'étude de pointe. Le modèle de circulation, H3D, a été beaucoup utilisé dans des zones côtières et est largement validé. Le modèle de déversement de pétrole SPILLCALC intègre tous les processus pertinents qui affectent le comportement et le devenir d'un déversement de pétrole et inclut quelques nouvelles informations quantitatives sur la dégradation spécifique du bitume dilué. Le modèle de vagues SWAN est un modèle qui constitue la norme dans l'industrie.

On a mis en œuvre une modélisation stochastique en exécutant plus de 10 000 simulations à divers endroits, avec de grosses et de petites quantités déversées, dans le cas de divers types de navire-citerne et de pétrole. Les simulations ont été effectuées durant une année civile complète, afin de prendre en compte les effets des marées, des vents et du forçage des eaux du large de l'océan Atlantique. Les résultats ont été répartis dans cinq catégories distinctes appelées scénarios :

- Accidents de transport maritime
 - Petits déversements
 - Grands déversements
- Accidents et défaillances au terminal maritime
 - Défaillance de jetée sur chevalets (grand déversement)
 - Défaillance de bras de chargement (petit déversement)
 - Tous accidents et défaillances confondus dans un terminal maritime

Dans le cas de chaque catégorie, les résultats des simulations ont été regroupés en fonction des critères suivants :

- saison froide (d'octobre à mars) ou saison chaude (d'avril à septembre);
- type de pétrole (c.-à-d. BAK/HSB/WCS).

Les principaux résultats de la modélisation stochastique ont été les suivants :

- La quantité de pétrole BAK perdue par évaporation se situait habituellement entre 50 % et 60 %. L'évaporation de pétrole HSB se situait entre 20 % et 30 %. L'évaporation de pétrole WCS se situait entre 15 % et 20 %.
- La quantité de pétrole entrant en contact avec le rivage était fortement, mais négativement, corrélée avec la proportion de pétrole évaporé. Le type de pétrole BAK s'évaporait plus rapidement et dans une plus grande mesure que les autres deux types de pétrole. Ce pétrole évaporé ne pouvait évidemment pas entrer en contact avec le rivage. Ce n'était pas le cas pour les types de pétrole HSB et WCS, dont une proportion importante restait sur l'eau (c.-à-d. qu'elle ne s'évaporait pas). Par conséquent, les types de pétrole HSB et WCS présentaient un potentiel plus élevé d'entrer en contact avec le rivage.
- Tous les scénarios (accidents de transport maritime et accidents et défaillances au terminal maritime) indiquent qu'en moyenne, une proportion légèrement plus grande de pétrole entre en contact avec le rivage au cours de la saison chaude qu'au cours de la saison froide.

Des cartes stochastiques ont été produites pour chaque scénario d'après la fréquence d'un incident sur ce site et pour ce type de navire. Les résultats de la modélisation ont été transmis à Stantec pour une analyse ultérieure en appui à l'évaluation des risques pour l'environnement et la santé humaine.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	I
1.0 INTRODUCTION	1
2.0 ZONE D'ÉTUDE	2
3.0 MODÈLE HYDRODYNAMIQUE (H3D)	5
3.1 Description du modèle 3HD.....	5
3.1.1 Grilles hydrodynamiques	7
3.1.1.1 Grille de grande zone à résolution de 5 km.....	9
3.1.1.2 Grille à résolution de 1 km pour la baie de Fundy.....	9
3.1.2 Marées	9
3.1.3 Vent.....	9
3.1.4 Météorologie	10
3.1.5 Apports fluviaux	13
3.1.6 Mélange vertical et horizontal.....	13
3.1.7 Conditions initiales et limites.....	14
3.2 Validation des modèles.....	14
3.2.1 Validation de la marée	14
3.2.2 Autres validations	17
4.0 MODÈLE DE VAGUE : SWAN	19
4.1 SWAN – Description	19
4.2 Configuration du modèle : Grande zone à grille de résolution 5 km	19
4.3 Configuration du modèle : Baie de Fundy à grille de résolution 1 km.....	19
5.0 MODÈLE DE DÉVERSEMENT DE PÉTROLE – SPILLCALC	20
5.1 Aperçu.....	20
5.2 Intrants et forçage des données	21
5.2.1 Propriétés des nappettes.....	21
5.2.2 Passage du pétrole à l'eau	21
5.2.3 Calcul des vitesses des nappettes	22
5.2.3.1 Transmission des données sur la vitesse à SPILLCALC – Mode stochastique.....	23
5.2.3.2 Transmission des données sur la vitesse à SPILLCALC – Mode déterministique ..	24
5.2.4 Calcul des nouvelles positions des nappettes.....	24
5.2.5 Transfert du pétrole au littoral.....	24
5.2.6 Propriétés de certains produits pétroliers	25
5.2.7 Processus de dégradation naturelle dans SPILLCALC.....	27
5.2.7.1 Évaporation.....	27
5.2.7.2 Dispersion verticale et remontée à la surface	29
5.2.7.3 Immersion du pétrole	30
5.2.7.4 Étalement à faible échelle	30
5.2.7.5 Interaction pétrole-sédiments	31

5.2.7.6	Émulsification.....	31
5.2.7.7	Dissolution	31
5.2.7.8	Dégradation microbiologique.....	33
5.3	Validation du modèle	33
6.0	MODÈLE DE DISPERSION DANS L'AIR : DE SPILLCALC À CALPUFF.....	35
6.1	Modélisation diagnostique météorologique et éolienne	35
6.1.1	Grilles de modélisation et données météorologiques.....	35
6.1.2	Réglage des paramètres de CALMET.....	36
6.2	Modèle de dispersion atmosphérique (CALPUFF).....	36
6.2.1	Flux d'évaporation (sources locales).....	36
6.2.2	Réglage des paramètres de CALPUFF.....	36
7.0	TYPES DE SIMULATION	37
7.1	Simulations stochastiques	37
7.2	Simulations déterministiques.....	39
8.0	RÉSULTATS DE LA SIMULATION STOCHASTIQUE.....	40
8.1	Aperçu.....	40
8.2	Commentaires généraux	46
8.3	Accidents de transport maritime	48
8.3.1	Petits déversements	48
8.3.2	Grands déversements	50
8.4	Accidents et défaillances au terminal maritime	52
8.4.1	Défaillance de jetée sur chevalets.....	52
8.4.2	Défaillance de bras de chargement.....	54
8.4.3	Tous accidents et défaillances confondus dans un terminal maritime	56
8.5	Cartes stochastiques récapitulatives	58
9.0	CONCLUSION	59
10.0	LE MOT DE LA FIN	61
	RÉFÉRENCES	62

LISTE DES TABLEAUX DANS LE TEXTE

Tableau 3.1	: Constituants observés et modélisés de la marée	17
Tableau 5.1	: Composition en pseudo-composants des pétroles BAK, HSB et WCS	26
Tableau 5.2	: Propriétés des pseudo-composants des pétroles BAK, HSB et WCS d'origine	26
Tableau 5.3	: Propriétés d'évaporation des pétroles BAK, HSB et WCS	29
Tableau 5.4	: Propriétés de solubilité des pétroles BAK, HSB et WCS	32
Tableau 5.5	: Expérience de météorisation en laboratoire	33
Tableau 8.1	: Emplacements et incidents associés à la modélisation stochastique.....	43

Tableau 8.2: Scénarios de collision et échouage de pétroliers chargés partiellement ou totalement - petits déversements	48
Tableau 8.3: Scénarios de collision et échouage de pétroliers chargés partiellement ou totalement - grands déversements.....	50
Tableau 8.4: Défaillance de jetée sur chevalets dans un terminal maritime – grand déversement (1 786 m ³).....	52
Tableau 8.5: Défaillance de bras de chargement dans un terminal maritime – petit déversement (43 m ³)	54
Tableau 8.6: Terminal maritime - Tous incidents.....	56

LISTE DES FIGURES DANS LE TEXTE

Figure 2.1 : Zone d'étude.....	3
Figure 3.1 : Maillage de grille typique	6
Figure 3.2 : Domaines de modèle fins et grossiers.....	8
Figure 3.3 : Distribution théorique annuelle des vents enregistrés à l'aéroport de Saint John (EC 8104900).....	11
Figure 3.4 : Distribution théorique annuelle des vents excédant 20 nœuds enregistrés à l'aéroport de Saint John (Station EC 8104900).....	12
Figure 3.5 : Probabilité annuelle des directions de vent enregistrées à l'aéroport de Saint John (Station EC 8104900).....	12
Figure 3.6 : Comparaison du niveau d'eau à Yarmouth, modèle 5 km.....	15
Figure 3.7 : Comparaison du niveau d'eau à Saint John, modèle 5 km	15
Figure 3.8 : Comparaison du niveau d'eau à Saint John, modèle 1 km	16
Figure 3.9 : Comparaisons de la salinité et de la température à la bouée du bassin Jordan, modèle 1 km	18
Figure 5.1 : Principaux processus de dégradation naturelle dans SPILLCALC.....	28
Figure 5.2 : Validation du module d'évaporation.....	34
Figure 7.1 : Création d'une carte stochastique	38
Figure 8.1 : Emplacements des déversements en mode stochastique	41
Figure 8.2 : Pétrole dispersé.....	47

ANNEXES

Annexe A	Entente de service et conditions générales Tetra Tech
Annexe B	Description technique du modèle H3D
Annexe C	Cartes stochastiques

ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

BAK	Pétrole brut du gisement Bakken
HSB	Mélange de pétrole brut synthétique Husky
WCS	Pétrole Western Canadian Select

LIMITES DU RAPPORT

Le contenu du présent rapport est destiné à l'usage exclusif d'Oléoduc Énergie Est Itée (Énergie Est), de Stantec et de leurs agents. Tetra Tech EBA Inc. (Tetra Tech EBA) décline toute responsabilité quant à l'exactitude des données, de l'analyse ou des recommandations contenues ou mentionnées dans le rapport, lorsque celui-ci est utilisé ou invoqué par toute partie autre qu'Énergie Est ou Stantec, ou pour tout projet autre que l'aménagement proposé du site visé. Tout usage non autorisé du présent rapport aurait lieu aux seuls risques de l'utilisateur. L'usage du présent rapport est assujéti aux conditions énoncées dans l'entente de prestation de services de Tetra Tech EBA. Les conditions générales de Tetra Tech EBA sont énoncées dans l'annexe A du présent rapport.

1.0 INTRODUCTION

Tetra Tech EBA Inc. (Tetra Tech EBA) a été retenue par Stantec Consulting Ltd. (Stantec), au nom d'Oléoduc Énergie Est ltée (Énergie Est), pour réaliser des simulations de déversements de pétrole en mer en appui au projet Oléoduc Énergie Est (le « projet »). Le projet comportera le transport par voie maritime de divers types de pétrole brut. Pour cette étude, on a choisi trois types de pétrole représentatifs : un pétrole brut léger d'origine canadienne du gisement de Bakken (BAK), un mélange de pétrole brut synthétique moyen fourni par Husky (HSB) et le Western Canadian Select (WCS), un bitume lourd dilué. Le pétrole brut sera chargé dans les navires-citernes au terminal maritime Canaport Énergie Est, près de Saint John, au Nouveau-Brunswick. On prévoit que le terminal maritime sera utilisé par des navires-citernes des classes Aframax, Suezmax et TGTB (très gros transporteurs de brut).

Le présent rapport contient les résultats d'une étude de modélisation de déversements de pétrole brut qui a été réalisée dans le cadre de l'évaluation des risques pour l'environnement et la santé humaine associés au projet. La modélisation des déversements s'appuie sur une approche exhaustive. Les scénarios de déversement de pétrole brut sont fondés sur une évaluation des risques navigationnels qui a été réalisée par la firme DNV-GL (rapport n° 2014-9452014-9545 et annexe A de l'évaluation des risques écologiques). Les trajectoires du pétrole brut déversé ainsi que la dégradation et l'entrée en contact avec le rivage sont calculés à l'aide du cadre de modélisation décrit dans le présent document. Les résultats de la modélisation du transport de pétrole et du devenir des déversements forment la base de l'évaluation des risques écologiques et pour la santé humaine.

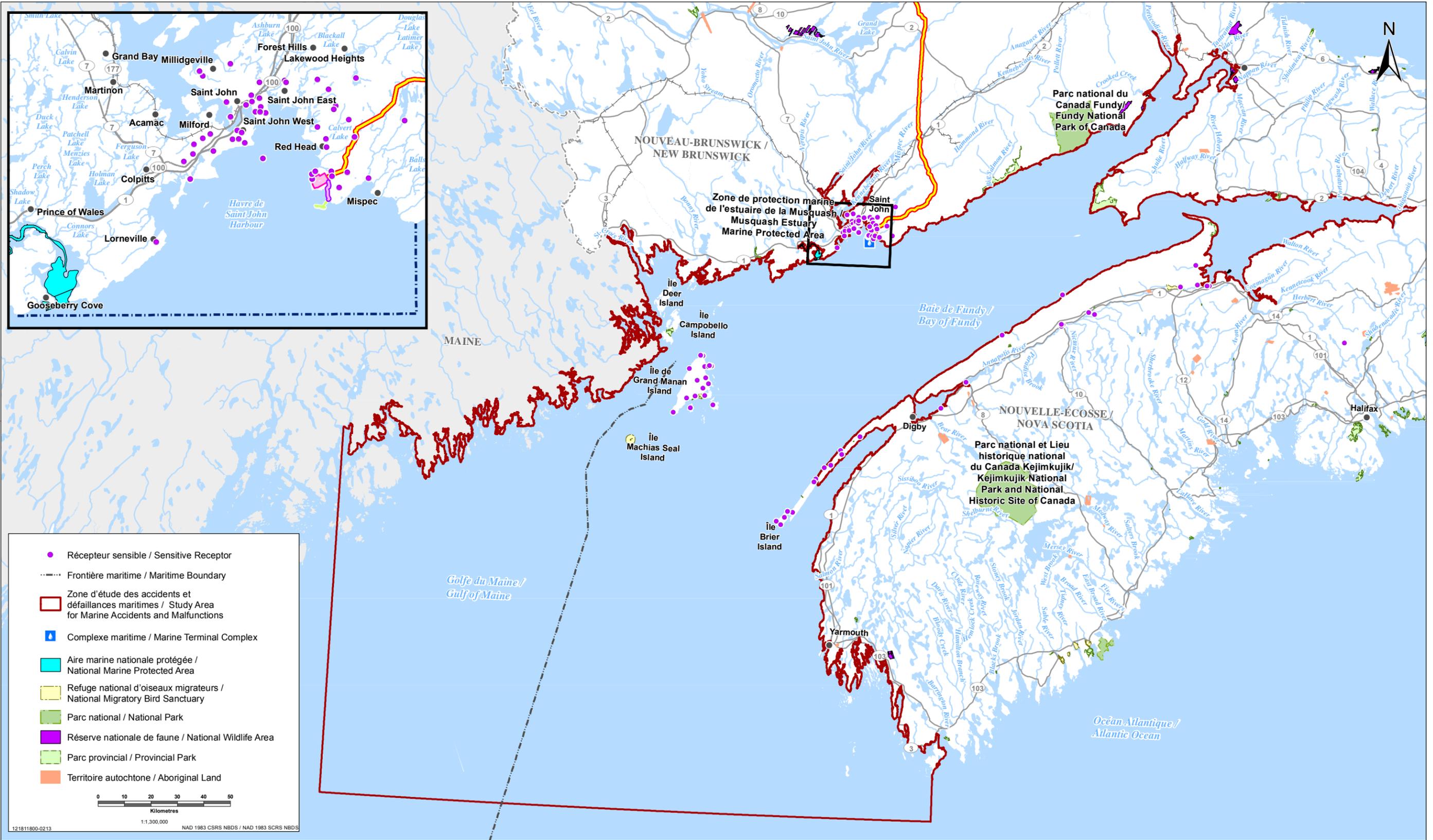
Les résultats de la modélisation réalisée par Tetra Tech EBA des déversements et de la dispersion dans l'atmosphère ont été transmis à Stantec pour le traitement et l'analyse statistiques finaux.

Le présent rapport est organisé comme suit :

- la section 2 décrit la zone d'étude;
- la section 3 décrit le modèle hydrodynamique qui a été utilisé pour les simulations (H3D);
- la section 4 décrit le modèle de vagues (SWAN);
- la section 5 décrit le modèle de déversements d'hydrocarbures (SPILLCALC);
- la section 6 décrit le modèle de dispersion dans l'atmosphère (CALPUFF);
- la section 7 donne un aperçu des simulations;
- la section 8 présente les résultats des simulations stochastiques;
- la section 9 résume les principales constatations.

2.0 ZONE D'ÉTUDE

La figure 2.1 montre la zone d'étude, qui inclut toute la baie de Fundy, y compris le bassin Minas, et s'étend jusque dans le golfe du Maine.



PROJET OLÉODUC ÉNERGIE EST / ENERGY EAST PIPELINE PROJECT

Récepteurs sensibles au sein de la zone d'étude des accidents et défaillances maritimes des risques écologiques et à la santé humaine / Sensitive Receptors within the Ecological and Human Health Risk Assessment Study Area for Marine Accidents and Malfunctions

Sources : Données sur le projet fournies par TransCanada Pipelines Limited. Frontière maritime tirée du Service hydrographique du Canada. Données de base fournies par les gouvernements du Canada et du Nouveau-Brunswick ainsi que par le gouvernement de l'État du Maine. / Sources: Project data provided by TransCanada Pipelines Limited. Maritime boundary from Canadian Hydrographic Service. Base data provided by the Governments of Canada and New Brunswick and the Government of the State of Maine.



PRÉPARÉ PAR / PREPARED BY
 Stantec
 PRÉPARÉ POUR / PREPARED FOR
 TransCanada
 FIGURE NO. / FIGURE NO.
2-1

Dernières modifications : 25/09/2015 par : mmommsauerfieg / Last Modified: 25/09/2015 By: mmommsauerfieg

3.0 MODÈLE HYDRODYNAMIQUE (H3D)

Dans le cas des courants de surface pour les simulations de déversement de pétrole, on a eu recours à des prévisions a posteriori en utilisant le modèle hydrodynamique tridimensionnel H3D. Ce modèle est dérivé du modèle GF8 (Stronach *et al.*, 1993), qui avait été élaboré pour Pêches et Océans Canada. Le modèle H3D forme la base de la pratique de services-conseils de Tetra Tech EBA et a été utilisé pour plusieurs études importantes réalisées le long des littoraux du Canada. Une vaste application d'une version opérationnelle de ce modèle à l'estuaire du Saint-Laurent est décrite dans Saucier et Chassée (2000).

Le modèle de circulation tridimensionnel H3D a été utilisé dans quatre grandes évaluations environnementales récentes.

- Il a notamment servi à une simulation concernant un réservoir existant et un réservoir proposé pour le projet d'énergie propre du site C de BC Hydro. La température, la couche de glace et les caractéristiques de sédimentation en lien avec le réservoir proposé ont été prédites en s'appuyant sur des validations de modèle concernant le réservoir Dinosaur. Deux rapports sont disponibles au Bureau des évaluations environnementales de la Colombie-Britannique. Ce projet a été approuvé et est actuellement en cours de réalisation.
- Le modèle H3D a été utilisé pour évaluer le devenir de déversements accidentels de carburant pour l'aviation transporté par des navires-citernes jusqu'à un terminal situé sur le fleuve Fraser, près de Vancouver (Colombie-Britannique). Le travail de modélisation faisait partie de la trousse d'information qui a été soumise au Bureau des évaluations environnementales de la Colombie-Britannique. Ce travail a été reconnu comme étant ce qui se fait de mieux à l'heure actuelle dans ce domaine. Le projet a été approuvé.
- Le modèle de circulation H3D a été utilisé pour réaliser une partie de la modélisation de déversements de pétrole qui a été effectuée dans le cadre des évaluations environnementales et techniques pour le projet d'oléoduc Northern Gateway d'Enbridge. Le travail de modélisation faisait partie de la trousse d'information qui a été soumise à l'Office national de l'énergie. Le projet a été approuvé sous réserve du respect de certaines conditions.
- Le modèle de circulation H3D et le modèle SPILLCALC ont été utilisés pour simuler d'hypothétiques déversements en mer, en appui au projet proposé Trans Mountain Expansion. Ce travail de modélisation et l'évaluation connexe des risques pour l'environnement et la santé humaine font actuellement l'objet d'un examen par l'Office national de l'énergie.

Les sections qui suivent décrivent le modèle de circulation tridimensionnel H3D ainsi que sa validation locale dans la baie de Fundy.

3.1 Description du modèle 3HD

H3D est un modèle numérique tridimensionnel à pas de temps qui calcule les trois composantes de la vitesse (u , v et w) de l'eau océanique dans une grille ordinaire à trois dimensions (x , y et z). La grille spatiale peut être vue comme un certain nombre de cellules computationnelles interconnectées qui représentent collectivement la masse d'eau. La figure 3.1 montre le schéma d'une grille ordinaire. Le modèle calcule également des champs scalaires, comme la température, la salinité de l'eau et divers contaminants introduits dans l'eau. Un modèle numérique à pas de temps est un modèle dans lequel la période visée (p. ex., la simulation des courants dans la baie de Fundy durant un an) est divisée en un certain nombre de courts laps de temps (p. ex., d'une durée de 30 secondes chacun). Le modèle tire avantage du fait que sur un bref laps de temps, appelé « pas de temps »,

les variations au niveau des courants, de la salinité et d'autres propriétés sont faibles et peuvent être calculées d'une manière simple qui convient au codage dans un modèle numérique. La durée du pas de temps est variable et dépend de la vitesse maximale présente dans le modèle au cours du pas de temps en question. Durant chaque pas de temps, les valeurs de vitesse, de température et de salinité sont calculées et mises à jour dans chaque cellule du modèle. Normalement, dans le cas de simulations de déversements, les données sont archivées (c.-à-d. enregistrées sur disque) toutes les 15 minutes au cours de la simulation, de manière à ce que la quantité de données générées pour le suivi subséquent des déversements demeure gérable.

Le choix de la taille de la grille dépend de l'échelle du phénomène d'intérêt, du domaine de la grille et des ressources de calcul disponibles. Dans le sens vertical, les cellules sont habituellement configurées de manière à ce qu'elles soient relativement minces près de la surface et s'épaississent à mesure que la profondeur augmente. La résolution verticale accrue près de la surface est nécessaire parce qu'une grande partie de la variabilité (p. ex., la stratification, le brassage d'eau ainsi que les apports de cours d'eau et du drainage des terres) est concentrée près de la surface. Les valeurs de vitesse de l'eau sont déterminées en trois dimensions sur les faces de chaque cellule. Les variables non vectorielles, comme la température ou la salinité, représentent un état moyen à l'intérieur de la cellule.

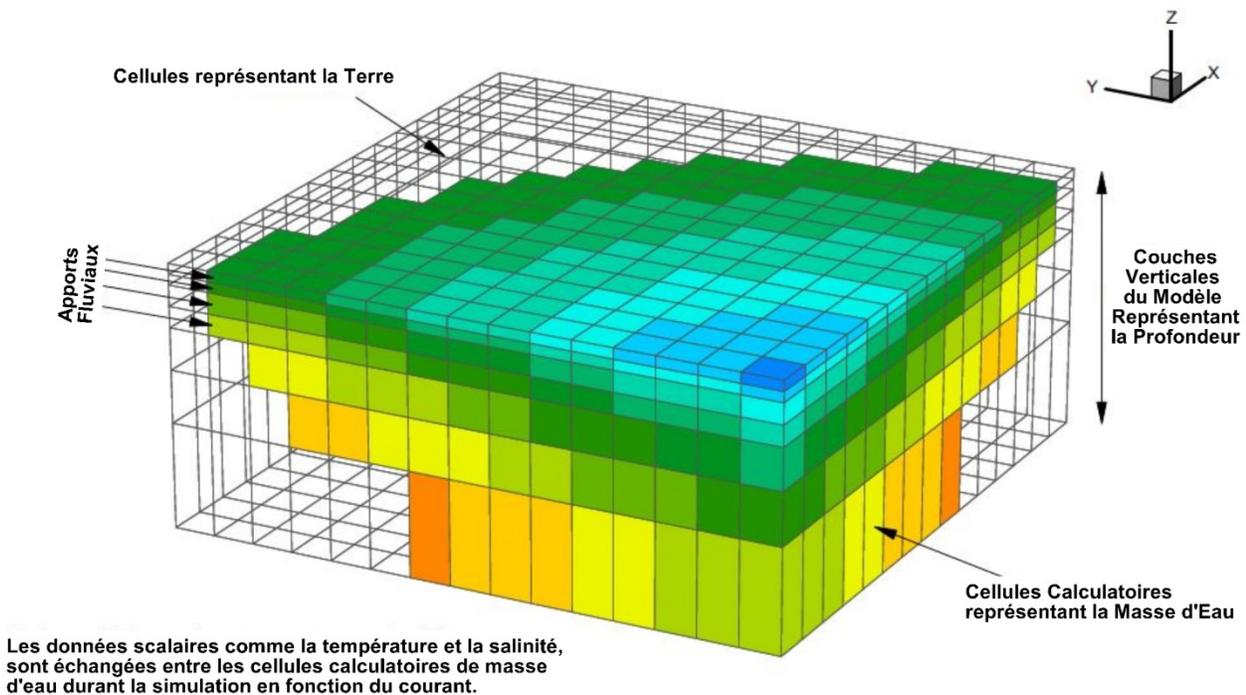


Figure 3.1 : Maillage de grille typique

Le modèle H3D est un modèle semi-implicite qui utilise le schéma numérique décrit dans Backhaus (1983) ainsi qu'une grille C décalée d'Arakawa (Arakawa et Lamb, 1977). Ce modèle n'utilise que deux niveaux de temps et calcule les modes interne et externe simultanément. Afin de permettre une meilleure simulation de caractéristiques comme les panaches fluviaux, conjointement avec des déplacements de marée importants, on laisse augmenter et diminuer le nombre de couches représentées dans le modèle lorsque le niveau de l'eau augmente et lorsqu'il diminue. De nouvelles couches sont activées successivement lorsque le niveau de l'eau augmente et on les laisse drainer (devenir inactives) à mesure que le niveau de l'eau diminue. Cette fonctionnalité permet de traduire les panaches fluviaux qui ont des dimensions verticales de 1 ou 2 mètres en présence d'amplitudes de marée de 5 mètres. Il a été prouvé que cette façon de procéder fonctionne bien pour des simulations du fleuve Fraser, en Colombie-Britannique, où il pénètre dans le détroit de Géorgie (Stronach *et al.*, 2006).

On trouvera une description technique du modèle H3D dans l'annexe B, qui comprend également des exemples de validations. Les sections qui suivent décrivent les données d'entrée et les caractéristiques des mises en œuvre du modèle H3D utilisées dans cette étude.

3.1.1 Grilles hydrodynamiques

Le modèle de déversements d'hydrocarbures SPILLCALC permet d'utiliser les données de plusieurs domaines de modèle hydrodynamique contigus ou qui se chevauchent, lorsqu'il est utilisé pour une simulation bidimensionnelle, comme la simulation de nappes d'hydrocarbures en surface. Une plus grande résolution horizontale permet de couvrir une superficie plus grande avec les mêmes ressources de calcul, mais elle réduit la capacité de traduire des processus hydrodynamiques à petite échelle. Lorsqu'il faut un niveau de détail hydrodynamique plus poussé, des grilles de modèle additionnelles offrant une résolution horizontale plus fine sont nichées dans le modèle plus grand et font correspondre le niveau d'eau, la vitesse de l'eau et les données hydrographiques aux limites, mais en calculant de manière indépendante les processus à l'intérieur d'une superficie plus petite. Cette méthode a été utilisée pour la simulation stochastique bidimensionnelle de déversements hypothétiques de pétrole dans la baie de Fundy et dans le golfe du Maine. Pour des simulations déterministes tridimensionnelles, dans lesquelles les modèles H3D et SPILLCALC sont couplés directement, on peut utiliser uniquement une seule grille hydrodynamique.

Deux mises en œuvre de H3D ont été utilisées pour la prédiction des courants, sur des grilles spatiales différentes. La figure 3.2 montre le domaine de chaque grille de modèle. Chaque grille de modèle est décrite principalement par sa résolution horizontale et sa couverture spatiale. Une grille de grande zone à résolution de 5 km comprenait le fleuve Saint-Laurent, le sud-ouest de Terre-Neuve, le cap Breton et le golfe du Maine, en direction sud jusqu'à Cape Cod. Un modèle plus fin, à résolution de 1 km, a été appliqué en particulier à la baie de Fundy et au golfe du Maine. Les grilles spatiales de ces modèles sont décrites ci-après.

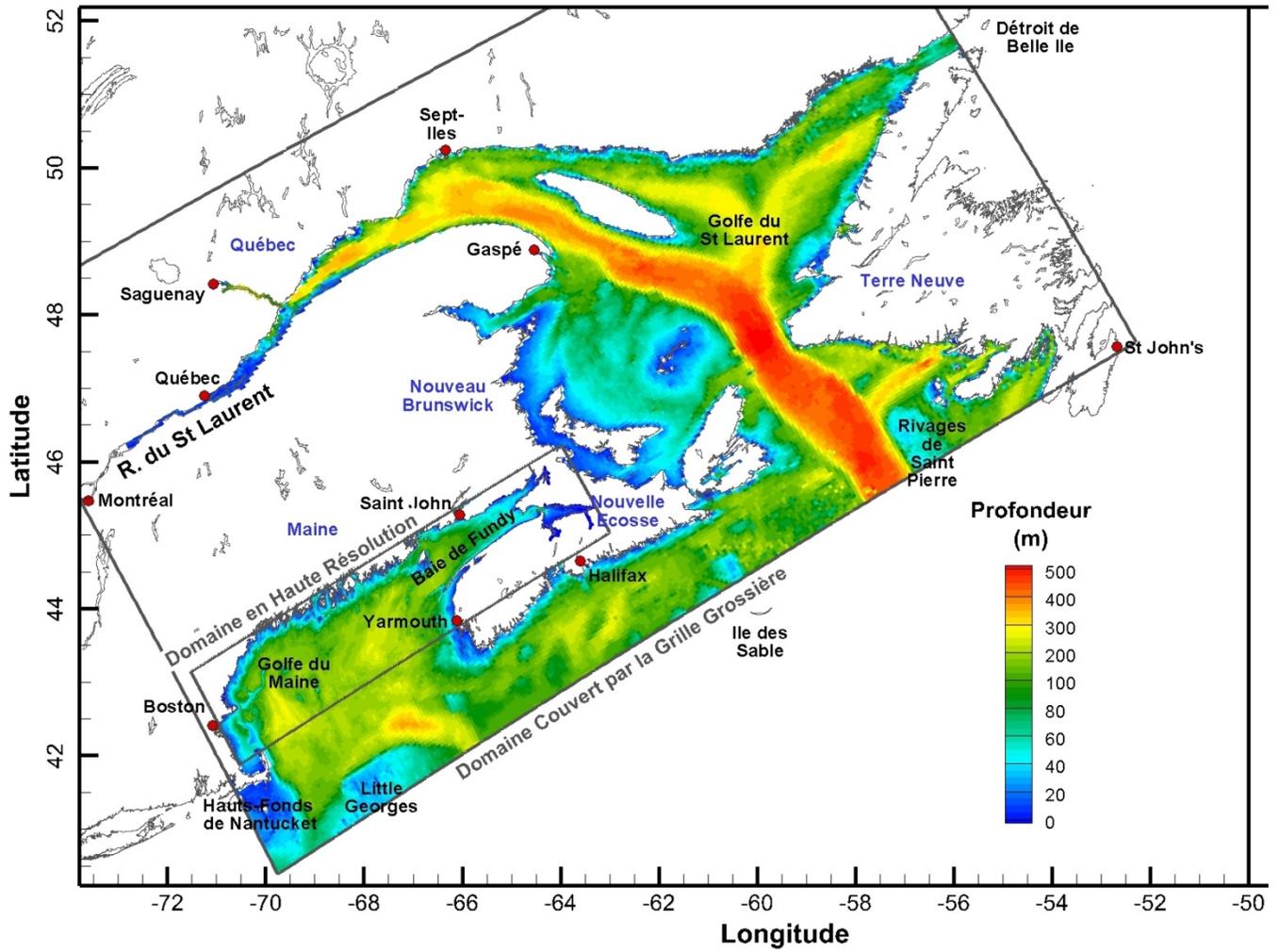


Figure 3.2 : Domaines de modèle fins et grossiers

3.1.1.1 Grille de grande zone à résolution de 5 km

Le domaine de ce modèle est un rectangle orienté du sud-ouest au nord-est. Il s'étend de Sept-Îles (Québec) à Boston (Massachusetts) sur sa limite occidentale, et de la côte nord-est de Terre-Neuve jusqu'à un point situé à plus de 100 km au large de la côte sud-est de la Nouvelle-Écosse sur sa limite orientale (figure 3.2). Sa résolution horizontale est de 5 km, et il est limité en eaux libres au détroit de Belle Isle et le long des bancs au sud et au sud-est. À ces frontières, le modèle se base sur des données hydrographiques et de marée, comme on le décrit ci-dessous. L'information tirée de ce modèle fournit les conditions aux frontières du domaine haute-résolution. Le modèle est validé en comparant les hauteurs de marée en un certain nombre d'emplacements et, de façon indirecte, par les validations des grilles plus haute-résolution, étant donné que les observations ne pouvaient pas être validées dans les grilles haute-résolution si les conditions aux frontières du domaine n'étaient pas également concordantes. Ce modèle a été utilisé pour simuler la période allant du 1^{er} janvier 2007 au 31 mars 2009, archivant les données sur les courants de surface utilisées dans le modèle de déversements de pétrole SPILLCALC, à intervalles de 60 minutes.

3.1.1.2 Grille à résolution de 1 km pour la baie de Fundy

Ce domaine du modèle a, lui aussi, la forme d'un rectangle, avec la même orientation de sud-ouest à nord-est. Il couvre toute la baie de Fundy et une partie du golfe du Maine. La seule limite océanique dans le cas de cette grille est l'ouverture du golfe du Maine, qui est nichée à l'intérieur du domaine de la grille de 5 km (figure 3.2).

Le modèle comprend également une représentation grossière de la baie Kennebecasis et du passage Long, près de Saint John (Nouveau-Brunswick). Ces deux plans d'eau intérieurs sont inclus afin d'évaluer le risque de déversements de pétrole dans ceux-ci, et parce que conjointement avec les chutes réversibles, à Saint John, ils peuvent représenter une partie importante de la dissipation de l'énergie marémotrice dans le système. Les données relatives aux courants de surface pour le modèle de déversements SPILLCALC ont été archivées à intervalles de 15 minutes.

3.1.2 Marées

Un des principaux facteurs à l'origine des courants dans la zone d'étude est constitué par les fluctuations du niveau de l'eau, qui sont dues principalement aux marées et qui sont dérivées des variations du niveau de l'eau aux limites ouvertes du modèle. Les fluctuations liées aux marées sont calculées à partir de composantes de marée obtenues de modèles de marées mondiaux (Schrama et Ray, 1994) et sont ensuite appliquées aux limites ouvertes du modèle régional de 5 km. La grille de 1 km du modèle pour la baie de Fundy tire son information sur les marées des parties pertinentes du modèle régional de 5 km.

3.1.3 Vent

Le forçage par les vents engendre des courants et est à l'origine de fluctuations du niveau de l'eau. La prise en compte du forçage par les vents est également importante parce que l'énergie éolienne a un effet notable sur le mélange vertical et, par conséquent, sur les répartitions scalaires de la salinité et des températures. Les tensions du vent qui s'exercent à la surface de l'eau sont tirées de la North American Regional Reanalysis (NARR), dont les données correspondantes, à intervalles de 3 heures, sont accessibles au public. Les données de la NARR sont fondées sur des observations et sont disponibles sous forme de données maillées convenant au travail de modélisation. Les données de la NARR ont été transformées en des séries chronologiques de vents au-dessus de l'eau en divers points, puis interpolées au niveau spatial dans le modèle H3D.

3.1.4 Météorologie

Un facteur important à prendre en compte dans la simulation hydrodynamique du site du projet est celui de la représentativité de la période de la simulation par rapport aux données climatiques historiques. Essentiellement, l'année de la simulation devrait correspondre le plus possible à une année « typique », de manière à ne pas biaiser la modélisation subséquente de la trajectoire des déversements. Lorsqu'il s'agit de choisir une année de simulation appropriée, il y a deux grands processus, l'un météorologique et l'autre, hydrodynamique, qui peuvent avoir une incidence sur les processus océanographiques présents dans la baie de Fundy :

- la dynamique des marées ;
- les vents.

La dynamique des marées est caractérisée par une variabilité intra-annuelle relativement mineure en ce qui a trait à la distribution de l'amplitude des marées. Par conséquent, dans le choix d'une année de simulation, l'incidence de cette variabilité peut être négligée sans danger. Le choix de l'année de simulation a donc été effectué d'après les tendances saisonnières des vents.

Les vitesses et les directions historiques des vents ont été analysées à l'aéroport de Saint John en utilisant des données, recueillies de 1996 à 2014 et concernant la distribution théorique annuelle de la vitesse et de la direction générale du vent. Cette analyse a été effectuée tant dans le cas des registres annuels complets, pour évaluer l'ensemble de l'année éolienne (figure 3.3), que dans le cas d'événements éoliens supérieurs à 20 nœuds, afin d'évaluer les cas de vents plus forts (figure 3.4). La figure 3.3 montre que 2008 est une approximation assez précise de la distribution théorique annuelle moyenne des vents, d'après la moyenne des courbes de probabilité annuelles de 1996 à 2014. Toutefois, la figure 3.4 montre que 2008 contient un nombre légèrement inférieur de cas de vents soufflant à une vitesse supérieure de 10 à 15 m/s à la vitesse moyenne. À l'inverse, 2008 contient un nombre légèrement supérieur de cas de vents soufflant à une vitesse supérieure de 15 m/s à la vitesse moyenne. D'après cette analyse, il a été déterminé que 2008 correspond aux conditions de vent « typiques » et qu'il s'agit d'un choix légèrement plus prudent, étant donné que cette année présente une asymétrie dans le sens de vents légèrement plus forts.

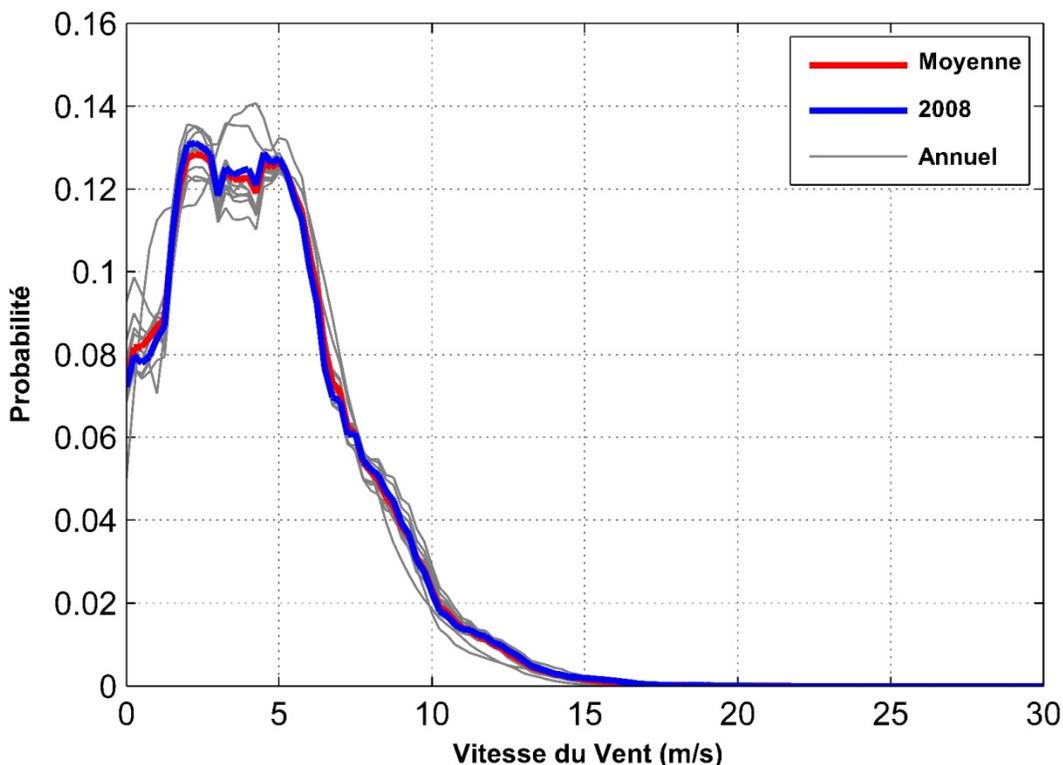


Figure 3.3 : Distribution théorique annuelle des vents enregistrés à l'aéroport de Saint John (EC 8104900)

Lorsqu'il s'agit de déterminer le degré de représentativité d'une année donnée, la direction du vent est aussi importante que la vitesse du vent, et peut-être même davantage, en ce qui a trait aux trajectoires de déversements de pétrole. La figure 3.5 montre un diagramme polaire de la direction du vent en unités de probabilité, pour chaque année dans le registre, et la moyenne pour l'ensemble de la période à laquelle se rapportent les données. Les deux rayons tracés correspondent respectivement à 5 % et 10 % de probabilité, et la résolution directionnelle est de 15 degrés. D'après ce tracé, on peut voir que l'année 2008 correspond assez bien à la direction moyenne du vent. Sur cette base, on a choisi 2008 comme année pour le modèle, étant donné qu'elle reproduit de la façon la plus proche possible les valeurs moyennes de vitesse et de direction du vent ainsi que la distribution des vitesses et des directions du vent durant l'année complète, comparativement à l'ensemble de la période pour laquelle on a enregistré les données.

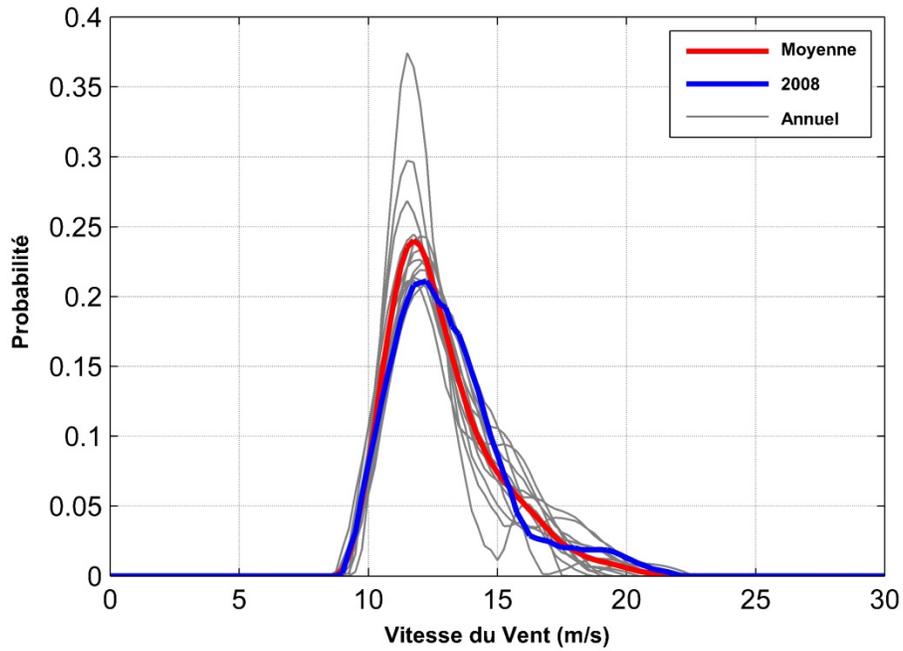


Figure 3.4 : Distribution théorique annuelle des vents excédant 20 nœuds enregistrés à l'aéroport de Saint John (Station EC 8104900)

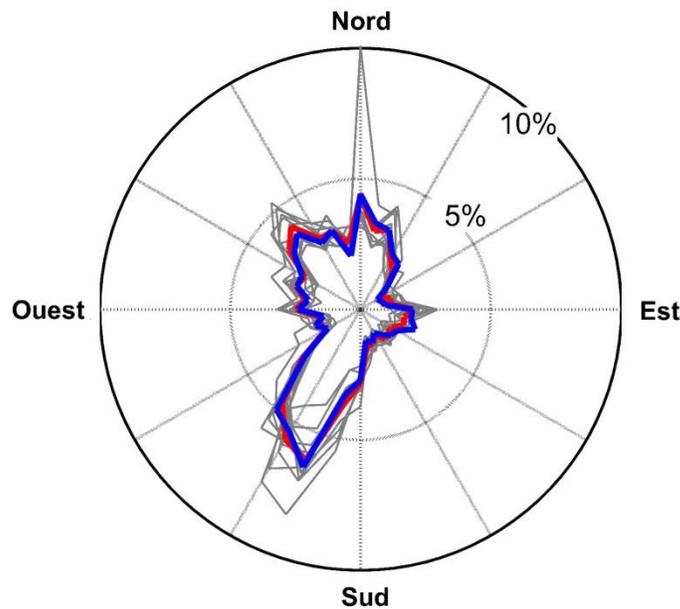


Figure 3.5 : Probabilité annuelle des directions de vent enregistrées à l'aéroport de Saint John (Station EC 8104900)

Outre le vent, il faut connaître d'autres données météorologiques pour calculer le flux thermique dans une masse d'eau et modéliser sa structure de température. Dans la plupart des applications, les données pour le calcul du flux thermique sur la surface de l'eau sont limitées. On peut établir des estimations raisonnables à partir de la vitesse du vent, de la température de l'air (mesurée par thermomètre sec et thermomètre mouillé) et de la couverture nuageuse ou de l'insolation. Ces données ont été obtenues de la bouée du bassin Jordan, située dans le golfe du Maine, au sud de la baie de Fundy, à l'exception des données sur la couverture nuageuse, qui ont été obtenues à partir d'une moyenne des données enregistrées aux stations météorologiques de Saint John et de Yarmouth. En été, l'apport de chaleur entraîne une plus grande stratification de la température de l'eau. En hiver, lorsque la stratification de la salinité est souvent minime, le refroidissement peut entraîner des instabilités statiques et un renversement dans la partie supérieure de la colonne d'eau. Afin de prendre en compte efficacement le refroidissement en hiver, le modèle H3D comprend un mécanisme de renversement convectif. Si, par exemple, une cellule de surface d'une colonne d'eau donnée se refroidit à un point tel qu'elle devient plus dense que la cellule qui se trouve au-dessous, le modèle H3D mélange verticalement l'eau dans ces deux cellules et propage ainsi le processus de refroidissement vers le bas. La capacité du modèle H3D de simuler aussi bien le réchauffement d'été et le refroidissement d'hiver a été vérifiée rigoureusement dans des simulations effectuées dans le cas de lacs d'eau douce, pour lesquels des données de température adéquates sont disponibles plus couramment (Zaremba *et al.*, 2005).

3.1.5 Apports fluviaux

Le modèle 5 km prend en compte les apports de 27 cours d'eau dans l'ensemble du domaine du modèle. Parmi ceux-ci, douze se trouvent dans le domaine du modèle 1 km. Ces apports renforcent la masse et la quantité de mouvement du plan d'eau. L'apport en eau de la rivière est représenté par un taux d'écoulement variant dans le temps. Les débits fluviaux entrants sont générés par les hydrographes mensuels du cours d'eau en question. Les débits calibrés de 2008 ont été utilisés à chaque fois qu'ils existaient, et des données ont été fournies par la Division des relevés hydrologiques du Canada pour ces stations, y compris pour la rivière Saint-Jean. L'hydrologie de la baie de Fundy a été estimée grâce aux travaux de Watson (1936). Les débits mensuels moyens de cinq rivières surveillées par le service géologique des États-Unis (USGS) ont été pris en compte pour qu'un volume suffisant d'eau douce entre dans le golfe du Maine.

3.1.6 Mélange vertical et horizontal

La modélisation des turbulences est importante pour déterminer la bonne répartition de la vitesse et des scalaires, comme la température et la salinité. Les coefficients de diffusion pour la quantité de mouvement et les scalaires à chaque cellule calculatoire dépendent du niveau de turbulence au point en question. Le modèle H3D repose sur une formule de turbulence dépendante du cisaillement dans l'horizontale (Smagorinsky, 1963), et d'une formule de turbulence dépendante du cisaillement et de la stratification dans la verticale pour la quantité de mouvement, une procédure nommée modèle de niveau 2 de Mellor-Yamada (Mellor et Yamada, 1982), une simplification de la couche limite du modèle de fermeture totale de la turbulence. Ces paramètres ont montré leur validité dans la simulation du cycle annuel de la salinité et de la température dans le détroit de Georgia (Stronach *et al.*, 2006), et ont permis de bien calibrer le modèle par rapport aux données observées.

3.1.7 Conditions initiales et limites

Le modèle est lancé avec des champs de salinité et de température qui proviennent de la bouée du bassin Jordan. La vitesse initiale est définie à zéro, et le niveau de l'eau au niveau moyen de la mer. Le modèle est lancé à partir de cet état initial sur un mode pronostique, la marée et le vent étant renforcés au fil d'une journée. En ce qui concerne la grille de 1 km de la baie de Fundy, le modèle a démarré le 1^{er} janvier 2007, mais on ne s'est servi que des données de 2008 dans la modélisation du déversement accidentel. Cette procédure permet d'atténuer, voire d'éliminer du système, les facteurs transitoires qui naissent de la mauvaise quantification de la température et de la salinité au départ.

Les conditions limites océaniques de la salinité et de la température provenaient du World Ocean Atlas (Locarnini *et al.*, 2010), lequel contient les climatologies mensuelles moyennes de la salinité et de la température dans la colonne d'eau. Ces données ont servi à forcer le modèle régional de 5 km, lequel a forcé à son tour la salinité et la température à la limite du modèle 1 km.

3.2 Validation des modèles

3.2.1 Validation de la marée

La comparaison des marées est une validation essentielle de n'importe quel modèle hydrodynamique. Une comparaison graphique des calibrations de marée à Yarmouth et Saint John sont présentées pour la grille régionale de résolution 5 km, et une comparaison graphique et des statistiques détaillées sont présentées pour la grille 1 km de la baie de Fundy. La comparaison de Yarmouth (figure 3.6) montre la validité du modèle près de la limite océanique du domaine, et la comparaison de Saint John (figure 3.7) représente le résultat au terminal maritime Canaport Énergie Est dans la baie de Fundy.

Le changement d'échelle de la figure 3.6 à la figure 3.7 se voit sur-le-champ. Il est nécessaire, car les marées à Saint John sont beaucoup plus importantes qu'à Yarmouth. L'amplification connue de Yarmouth à Saint John et le passage de petites marées à de grandes marées sont tous les deux bien représentés. Le modèle 5 km contrôle le comportement hydrodynamique à la limite de la grille 1 km de la baie de Fundy. La figure 3.8 compare les niveaux d'eau modélisés et observés dans le domaine haute résolution.

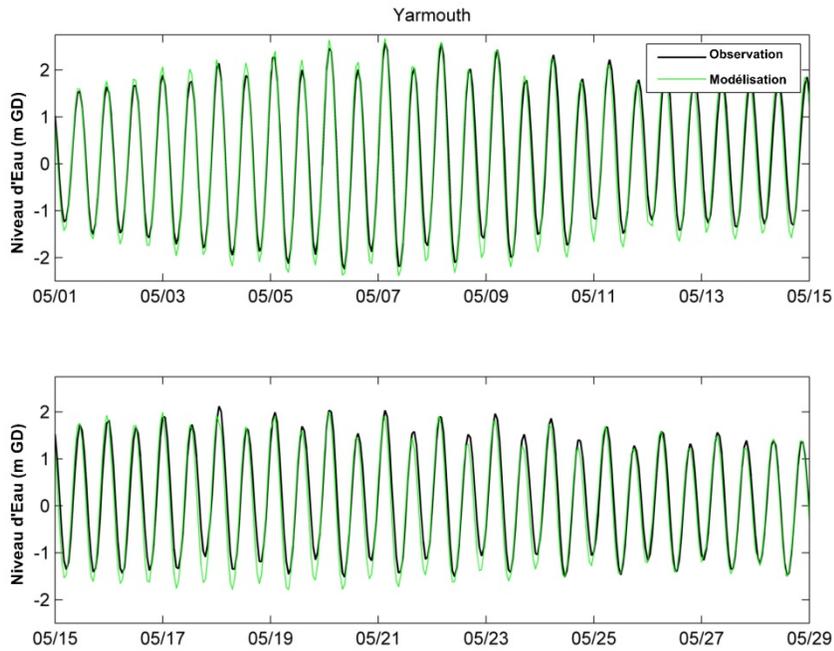


Figure 3.6 : Comparaison du niveau d'eau à Yarmouth, modèle 5 km

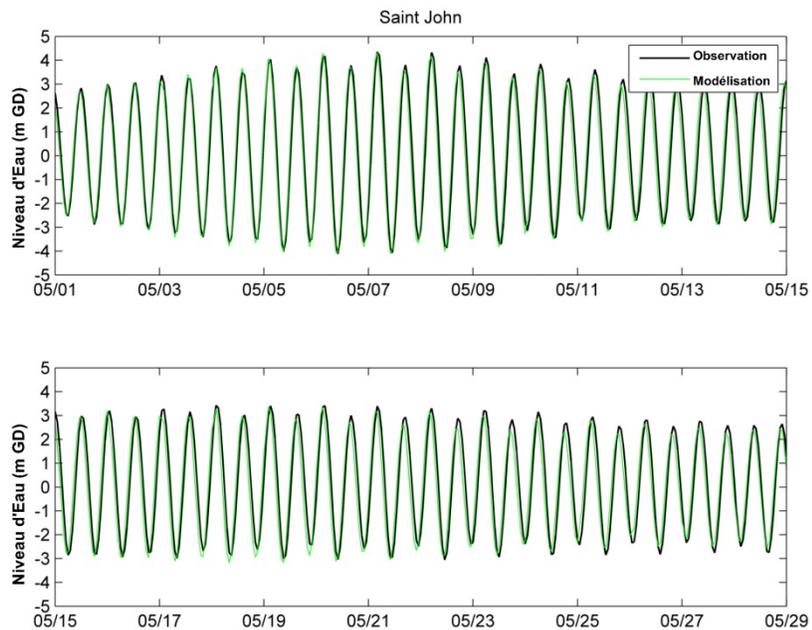


Figure 3.7 : Comparaison du niveau d'eau à Saint John, modèle 5 km

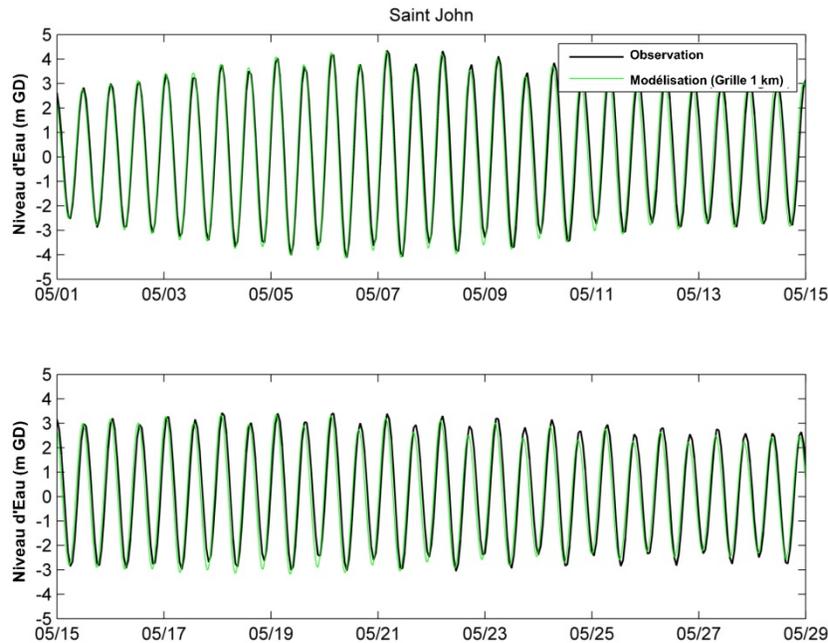


Figure 3.8 : Comparaison du niveau d'eau à Saint John, modèle 1 km

Les méthodes statistiques qui ont servi à mesurer le rendement du modèle sont l'analyse harmonique, l'écart type, et une équation complète de « compétence-modèle » (équation 3.1). L'écart type est présenté dans les mêmes unités que les données d'origine, et représente l'amplitude de toutes les erreurs sur toute la durée prévue. La compétence-modèle est le degré de concordance entre les données prévues et les données observées, une compétence de 100 % étant une concordance parfaite (Wilmott *et al.*, 1981).

$$compétence = 100 \times \left(1 - \frac{\sum |X_{Modèle} - X_{Données}|^2}{\sum (|X_{Modèle} - \bar{X}_{Données}| + |X_{Données} - \bar{X}_{Données}|)^2} \right)$$

Équation 3.1 : Compétence-modèle

La différence dans la VMQ entre la série temporelle modélisée et la série temporelle observée de Saint John est de 0,67 m, dans une marée dont l'amplitude varie de 6 à 8 m. La compétence-modèle est de 97,59. Les deux indicateurs montrent une bonne reproduction des niveaux de marée, la différence dans la VMQ étant inférieure à 10 % de l'amplitude de la marée. Les facteurs qui réduisent probablement la concordance entre les données prévues et les données observées sont l'absence de renseignements sur les ondes de tempêtes à la limite océanique du domaine, et de petites incertitudes dans la bathymétrie et les pertes par frottement.

L'analyse harmonique des séries temporelles observées et modélisées a été effectuée à l'aide de la boîte à outils T_TIDE de Matlab (Pawlowicz *et al.*, 2002) pendant une période d'enregistrement de 160 jours. La comparaison de l'amplitude et de la phase de marée des différents constituants à Saint John fournit plus de précisions sur le rendement du modèle.

Tableau 3.1 : Constituants observés et modélisés de la marée

Saint John		Observé			Modélisé			
Constituant	Période (h)	Amplitude (m)	Phase (°)	Amplitude (m)	Phase (°)	Erreur d'amplitude (m)	Erreur d'amplitude (%)	Erreur de phase (heures)
M2	12,42	2,91	97,92	3,05	80,99	0,13	4,6	0,58
S2	12	0,50	130,64	0,62	120,62	0,12	25,1	0,33
N2	12,66	0,51	55,77	0,64	55,44	0,13	25,5	0,01
K1	23,93	0,14	190,16	0,14	193,75	0,01	4,9	-0,24
O1	25,82	0,10	170,62	0,12	177,19	0,02	20,4	-0,47

Les amplitudes de marée concordent bien. Un décalage modéré (35 minutes) dans la phase M2 est probablement la source principale de la différence entre les deux séries temporelles.

3.2.2 Autres validations

La comparaison de la distribution verticale de la salinité et de la température montre que le modèle simule correctement la stratification à la bouée du bassin Jordan. Trois profondeurs ont été comparées, en modélisant une stratification de la salinité d'environ 1 USP, comparativement à la stratification observée de 1 à 2 USP. La température de surface a été correctement caractérisée par le modèle. Les températures initiales étaient quelque peu différentes de la climatologie du World Ocean Atlas, conduisant à une divergence de court terme entre le modèle et les observations. L'apparition et la décomposition de la stratification de la température sont correctement reproduites. La prise en compte des débits fluviaux moyens et des climatologies du World Ocean Atlas ne peut pas reproduire exactement la stratification de la salinité, mais la présence d'une densité verticale, plutôt que l'amplitude exacte, est essentielle pour l'hydrodynamique barocline.

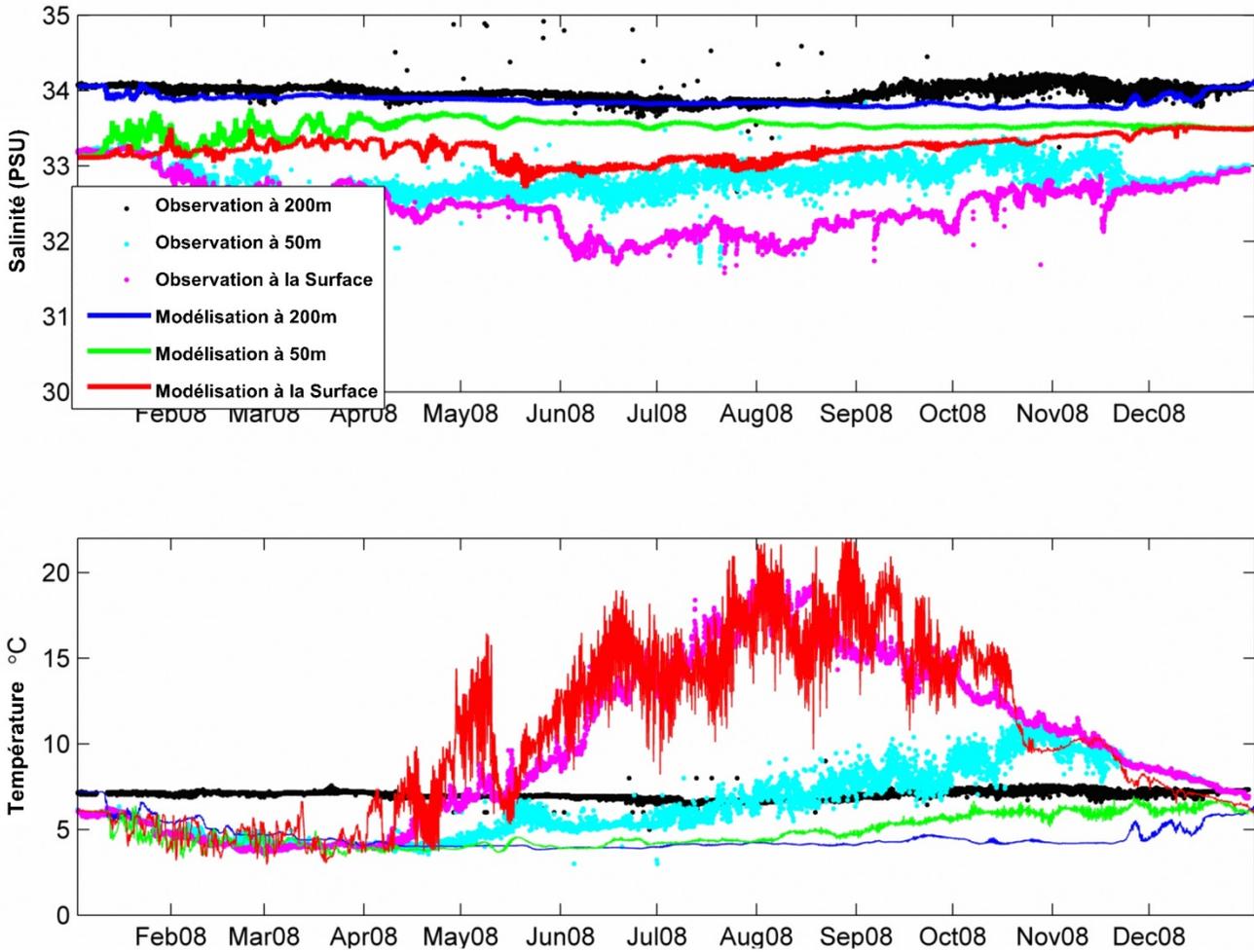


Figure 3.9 : Comparaisons de la salinité et de la température à la bouée du bassin Jordan, modèle 1 km

4.0 MODÈLE DE VAGUE : SWAN

Les vagues procurent de l'énergie aux processus de dispersion et d'émulsification, les deux étant importants à la dégradation naturelle des produits pétroliers déversés accidentellement. Les conditions de vagues au cours de la période de simulation ont été simulées à posteriori à l'aide de la version 40.72 de SWAN (Simulating Waves Nearshore, Booij, 2006). Pour assurer une cohérence avec les données hydrodynamiques, l'état de vagues a été simulé sur le même ensemble de grilles calculatoires. De plus amples précisions se trouvent ci-dessous.

4.1 SWAN – Description

SWAN est un modèle de vagues de troisième génération qui permet d'obtenir des estimations réalistes sur les paramètres de vagues dans les zones littorales, les lacs, les réservoirs et les estuaires, à partir d'un état précis des vents et de la bathymétrie. SWAN exploite un schéma en différences finies pour calculer des petites vagues créées aléatoirement par le vent. SWAN prend en compte dans ses calculs des processus physiques comme la propagation des vagues, la création des vagues par le vent, la création de crêtes d'écume, l'effet de la diminution de la profondeur sur les vagues, le déferlement des vagues, le frottement de fond, les obstacles sous-marins, la surélévation de la surface libre, et les interactions entre les vagues.

4.2 Configuration du modèle : Grande zone à grille de résolution 5 km

Cette application de SWAN s'est faite sur le même domaine de calcul et la même bathymétrie que le modèle hydrodynamique correspondant. Les intrants éoliens étaient également les mêmes que ceux qui ont servi au modèle de circulation H3D.

La dispersion et l'émulsification des produits pétroliers déversés accidentellement sont causées par des déferlantes à haute énergie nées localement, aux périodes ne dépassant généralement pas sept secondes. Les houles de longue période provenant du large de l'Atlantique ne contribuent pas beaucoup à ces processus. Par conséquent, les conditions à la limite de la vague au large de l'Atlantique ont été définies à zéro dans le modèle de résolution 5 km. Les conditions des vagues près de la frontière du domaine, c.-à-d. à l'intérieur des 50 km pour une condition éolienne donnée, sont sous-développées. Toutefois, à l'intérieur de la zone d'étude et à la limite du modèle de résolution 1 km, les vagues nées localement sont bien représentées.

Le modèle a été exécuté sur la période s'étalant du 30 décembre 2007 au 1^{er} novembre 2009. La hauteur significative des vagues et la période associée calculées pour chaque cellule du modèle a été archivée selon un pas de temps d'une heure.

4.3 Configuration du modèle : Baie de Fundy à grille de résolution 1 km

Cette application de SWAN s'est faite sur le même domaine de calcul et la même bathymétrie que le modèle hydrodynamique correspondant. Les intrants éoliens étaient également les mêmes que ceux qui ont servi au modèle de circulation H3D. Les conditions de limite des vagues le long de la frontière sud-est du domaine ont été prises du modèle SWAN de 5 km.

Le modèle a été exécuté sur la période s'étalant du 30 décembre 2007 au 1^{er} novembre 2009. La hauteur significative des vagues et la période associée calculées pour chaque cellule du modèle a été archivée selon un pas de temps d'une heure.

5.0 MODÈLE DE DÉVERSEMENT DE PÉTROLE – SPILLCALC

L'évolution et le comportement des produits pétroliers déversés accidentellement ont été simulés à l'aide du modèle de trajectoire et de dégradation naturelle SPILLCALC, un modèle propriétaire et numérique de déversement accidentel, développé par Tetra Tech EBA. Plusieurs modules de SPILLCALC, comme l'évaporation et l'interaction avec la glace, ont été étudiés dans des articles scientifiques évalués par des pairs. Ce modèle a déjà servi en appui au projet Enbridge Northern Gateway, au projet du développement d'un terminal pour carburant le long de la rivière Fraser en support de l'aéroport de Vancouver (en cours de construction), et au projet d'agrandissement du réseau d'oléoduc de Trans Mountain. La partie qui suit présente les fonctions de SPILLCALC

5.1 Aperçu

SPILLCALC est un modèle à pas de temps qui calcule le mouvement et la dégradation naturelle des hydrocarbures liquides déversés accidentellement dans un milieu aquatique. Les principales données environnementales dont se sert SPILLCALC concernent le vent, les vagues et les courants de surface. Les effets de la température de l'air et de l'eau sont également pris en compte, mais revêtent une importance moindre. Pour les simulations décrites ici, la modélisation de l'hydrodynamique et des vagues s'est faite sur des grilles de deux résolutions : une grille de grande surface de 5 km de résolution, et une grille couvrant la baie de Fundy d'une résolution de 1 km. Sur chacune de ces deux grilles ont été appliquées les deux modèles : hydrodynamique et de vagues, et les données issues de ces modèles ont servi aux simulations de SPILLCALC. SPILLCALC peut se servir de grilles différentes pour les données hydrodynamiques. Dans cette étude, une grille de 500 m de résolution a servi aux simulations stochastiques, et une grille de 1 km a servi aux simulations déterministiques.

SPILLCALC prend en compte les courants des modèles hydrodynamiques pour advecter les produits déversés accidentellement. Le pétrole déversé sur la surface de l'eau est représenté sous la forme d'un grand nombre de particules indépendantes en flottaison, appelées « nappettes ». Les nappettes ne sont pas censées avoir du poids individuellement, mais collectivement représentent le déversement. Chaque nappette renseigne beaucoup sur son aliquote du déversement, comme l'âge, la densité et la composition. L'ensemble des nappettes représente la zone recouverte par le déversement, et son évolution dans l'espace et dans le temps est la dispersion et la trajectoire prévues du déversement. Au total, chaque simulation stochastique a pris en compte 50 000 nappettes. SPILLCALC suit un pas de temps qui convient à la taille de la grille et aux vitesses de dérive.

Les principaux processus qui déterminent l'évolution des nappettes sont :

- l'advection, selon les courants de surface provenant du modèle de circulation H3D;
- l'entraînement vertical, selon les conditions de vagues issues du modèle de vagues SWAN;
- la tension du vent, à l'aide de données sur le vent issues de la NARR (réanalyse régionale nord-américaine); donc interpolées de plusieurs stations de la baie de Fundy et du golfe du Maine;
- la diffusion horizontale par les turbulences océaniques, simulée par la méthode de Monte Carlo comme une composante de vitesse aléatoire;
- la rétention littorale;
- la dégradation naturelle.

Ces composantes sont décrites en détail dans la section 5.2.

5.2 Intrants et forçage des données

5.2.1 Propriétés des nappettes

Les propriétés suivantes caractérisent chaque nappette :

- État : « non rejeté », « sur l'eau », « sur terre », « submergée », ou « en-dehors des frontières du domaine ».
- Position : latitude, longitude et profondeur.
- Âge : temps écoulé depuis le rejet.
- Volume : quantité de pétrole représentée par la nappette, telle qu'elle est modifiée par la dégradation.
- Fractions de pseudo-composantes : fractions volumiques de chaque catégorie de composition moléculaire.
- Densité (basé sur les fractions des pseudo-composantes et leurs densités respectives).
- Teneur en eau : rapport volumique de l'eau au pétrole par l'émulsification.
- Boules de goudron : formées ou non.

Pour chaque pas de temps, les nappettes sont déplacées selon les algorithmes précisés ci-dessous. Toutes les nappettes commencent la simulation au point de rejet dans l'état « non rejeté », et un volume initial de V/N , V étant le volume total de pétrole à rejeter et N le nombre de nappettes.

5.2.2 Passage du pétrole à l'eau

Entre le début et la fin du rejet, les nappettes sont introduites sans arrêt dans le lieu de rejet. Le nombre de nappettes rejetées à chaque pas de temps est calculé à partir des volumes des nappettes et du débit de rejet. Quand une nappette est rejetée, son état passe de « non rejeté » à « sur l'eau ». Les nappettes commencent à bouger au pas de temps qui suit immédiatement leur rejet.

Quand le pétrole se déverse en grandes quantités en un temps court, il s'étale rapidement sous l'effet de la gravité. Pour pouvoir établir une région où on peut installer les nappettes quand elles quittent le navire, on fait l'hypothèse que le pétrole rejeté s'étale sur-le-champ sur une épaisseur de deux centimètres. Pour représenter cet étalement, les nappettes sont lancées dans des positions affectées aléatoirement, dans une zone circulaire centrée sur le lieu de rejet.

Si la vitesse du courant est très faible, le diamètre initial du déversement peut être calculé en fonction du volume et de l'épaisseur du déversement,

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi t}}$$

où : D est le diamètre;

V est le volume du pétrole rejeté (m³);

t est l'épaisseur initiale de la nappe (m) (qu'on considère égale à 0,02 m, ou 2 cm).

Si le courant est fort, le déversement s'allonge sur une surface plus longue et plus étroite,

$$D = \frac{Q}{Ut}$$

où : Q est le débit du déversement de pétrole (m³/s);

U est la vitesse du courant de surface (m/s).

On prend pour diamètre D la plus petite valeur issue des deux méthodes. Les nappettes sont lancées dans des positions aléatoires dans un rayon égal à D/2 à partir du lieu de rejet. En raison des grands volumes qui caractérisent la plupart des déversements, le diamètre du lieu de déversement initial de chaque nappe est plafonné à la longueur de la cellule de la grille.

En raison de cet étalement, qui provoque un déplacement par rapport au lieu de rejet, il arrive que certaines nappettes atteignent la terre sur-le-champ, selon leur lieu de rejet. Au fur et à mesure que les nappettes sont lancées, celles qui risquent d'atteindre la terre sont arrêtées au littoral et désactivées, selon le processus décrit ci-dessous.

5.2.3 Calcul des vitesses des nappettes

Dans la modélisation stochastique du projet Énergie Est, la trajectoire du déversement est actualisée à chaque pas de temps, c.-à-d. toutes les 300 secondes. À chaque pas de temps, les positions des nappettes sont actualisées de la manière suivante. Chaque nappette « sur l'eau » se voit affecter une vitesse, la somme de trois composantes. La première composante de la vitesse d'une nappette est le résultat des courants à la surface de l'eau. En l'absence de vent et de diffusion, la vitesse de la nappette est celle du courant, c.-à-d. :

$$\vec{V}_{Pétrole, advection} = \vec{V}_{courant}$$

Aucune considération n'est donnée aux forces qui agissent en interne sur le déversement, comme l'étalement initial poussé par la gravité, puisque la zone spatiale dans laquelle ces forces internes sont importantes est assez petite par rapport à la zone que recouvre le déversement au fil de son évolution.

La deuxième composante est le résultat de la force qu'exerce le vent sur la surface du pétrole, souvent appelée « dérive ». Cette composante est exprimée en fraction de la vitesse éolienne, définie comme 1 % dans la présente étude, de la manière suivante :

$$\vec{V}_{Pétrole, forceduvent} = 0,01 \vec{V}_{vent}$$

Le modèle hydrodynamique calcule la moyenne des vitesses sur la couche supérieure de la colonne d'eau, 2,5 m dans le modèle de la baie de Fundy. Le facteur 1 % simule le fait que la vitesse de l'eau à la surface est beaucoup plus grande que la moyenne de la vitesse de l'eau sur les 2,5 m supérieurs de la colonne d'eau, comme le calcule le modèle hydrodynamique.

La composante finale est une vitesse aléatoire, représentant la diffusion ainsi :

$$\vec{V}_{Pétrole, diffusion}$$

Elle est uniformément répartie, et chacune des composantes U et V a une valeur de :

$$RAND \times \sqrt{6D/dt}$$

où D est le coefficient de diffusion turbulente indiqué dans l'intrant du modèle, dt est le pas de temps du modèle, et RAND le nombre aléatoire entre -1 et 1. Cette composante entraîne l'augmentation de la surface du produit déversé. En ne supposant qu'un étalement aléatoire, le rayon statistique de l'étalement augmente en fonction de la racine carrée du temps, de la manière suivante :

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum (x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2} \cong \sqrt{2Dt}$$

En pratique, le cisaillement dans le champ de vitesse verticale cause souvent un étalement plus important que la diffusion turbulente à elle seule.

Chaque vitesse de nappette est calculée comme la somme vectorielle de ses trois composantes, de la manière suivante :

$$\vec{V}_{Pétrole} = \vec{V}_{Pétrole: advection} + \vec{V}_{Pétrole: vent} + \vec{V}_{Pétrole: diffusion}$$

L'exactitude de l'opération sur ces trois termes a été vérifiée dans des cas simples, où le résultat pouvait être prévu de manière analytique : courants réguliers, vent régulier, et comparaisons avec la solution analytique de l'équation de diffusion pour un rejet instantané. Les méthodes décrites ci-dessus sont standard, et utilisées dans plusieurs modèles commerciaux de déversement pétrolier accidentel.

5.2.3.1 Transmission des données sur la vitesse à SPILLCALC – Mode stochastique

Dans le mode stochastique, les vitesses des courants de surface proviennent des résultats archivés du ou des modèles hydrodynamiques. Pour les besoins du présent projet, les résultats archivés de la grille 1 km de la baie de Fundy et de la grille 5 km de la grande zone étaient disponibles pour SPILLCALC, selon le besoin : les résultats du modèle de petite résolution ont été utilisés dans son domaine même, et ceux du modèle 5 km ont été utilisés ailleurs.

5.2.3.2 Transmission des données sur la vitesse à SPILLCALC – Mode déterministique

Dans le mode déterministique, les flux d'hydrocarbures dissolus sont échangés entre le modèle hydrodynamique 3-D et le modèle de déversement. Par conséquent, la grille doit être partagée entre le modèle hydrodynamique et le modèle de déversement. Ainsi, le modèle de déversement pétrolier SPILLCALC ne prend en compte que les vitesses du modèle de haute résolution, 1 km, de la baie de Fundy.

5.2.4 Calcul des nouvelles positions des nappes

Une nouvelle position potentielle est calculée pour chaque nappe sur l'eau, c'est-à-dire :

$$\vec{X}_{\text{nouveau}} = \vec{X}_{\text{ancien}} + \vec{V}_{\text{Pétrole}} dt$$

Le modèle vérifie ensuite si la nappe de pétrole doit traverser un segment littoral pour atteindre sa nouvelle position. Si c'est le cas, la nappe est laissée dans sa position d'avant, et son volume est partiellement ou intégralement transféré au littoral, selon la capacité de ce littoral à retenir le pétrole. Si elle ne doit pas atteindre ou traverser le littoral, la nappe est déplacée vers sa nouvelle position.

5.2.5 Transfert du pétrole au littoral

Dans SPILLCALC, le littoral est représenté sous forme de segments linéaires, chacun de ces segments pouvant retenir au plus un certain volume de pétrole. Ce volume maximal dépend de la viscosité du pétrole : si le pétrole qui touche terre a une viscosité inférieure à 2 000 cSt, le littoral en retient moins que si le pétrole a une viscosité supérieure à 2 000 cSt. En d'autres termes, la capacité de rétention maximale peut prendre deux valeurs, selon la viscosité du pétrole.

En outre, chaque segment de littoral peut retenir le pétrole jusqu'à un volume plafond, selon ses propriétés (p. ex., zone intertidale, type de substrat, degré d'exposition). À chaque fois que la nouvelle position d'une nappe la met en contact avec un segment de littoral, on vérifie si ce segment a atteint sa capacité maximale de rétention. Si c'est le cas, l'état et le volume de la nappe demeurent inchangés, et la nappe reste sur l'eau. Sinon, un certain volume de pétrole est transféré de la nappe au littoral.

Si la capacité restante du segment de littoral dépasse le volume de la nappe, le volume entier est transféré au littoral, et l'état de la nappe passe à « sur terre ». Sinon, la capacité restante du segment de littoral est remplie, le volume de la nappe baisse en conséquence, et son état reste « sur l'eau ». Une fois le pétrole « sur terre », il y est gardé pour le restant de la simulation, car le modèle de déversement ne permet pas à la marée et aux vagues de le ramener sur l'eau. Par ailleurs, le modèle ne calcule pas l'évaporation du pétrole une fois que celui-ci est entré en contact avec la terre, que ce soit par rétention au littoral ou par blocage dans les zones intertidales lors d'une marée descendante.

SPILLCALC utilise un ensemble de données sur le littoral qui est fourni par Stantec, ensemble fondé sur des données en provenance d'Environnement Canada pour le Nouveau-Brunswick et la Nouvelle-Écosse, et du NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) pour le Maine. La sensibilité du littoral au mazoutage est classée selon l'indice de sensibilité environnementale (ESI, Petersen *et al.*, 2002, Schmidt-Etkin *et al.*, 2007), de sorte que les habitats sont classés selon des aspects de leur richesse biologique, en plus de leur capacité à retenir le pétrole.

Un autre problème potentiel est l'étendue sur laquelle le pétrole peut entrer en contact avec le sable intertidal et les vasières, et nuire aux invertébrés benthiques et aux bio-films. En plus de la pénétration dans les plages et les sédiments de vasières par le contact avec le littoral et le processus de rétention décrits ci-dessus, SPILLCALC contient un algorithme qui simule le blocage du pétrole quand le niveau de l'eau tombe au-dessous du niveau de la plage ou du sable dans la cellule du modèle. Étant donné que la re-flottaison du pétrole, particulièrement le pétrole brut, est un phénomène qui n'est pas très bien compris, le modèle adopte une démarche prudente : l'algorithme suppose que tout le pétrole qui se trouve sur la surface de l'eau dans une cellule est transféré aux sédiments lors de la marée basse, une fois que la profondeur de l'eau tombe à moins de deux centimètres. Ramener le pétrole bloqué à l'état de flottaison à marée haute n'est pas inclus. Cette démarche prudente entraîne probablement une surestimation de la quantité de pétrole qui reste bloquée dans la zone intertidale.

5.2.6 Propriétés de certains produits pétroliers

En règle générale, une fois que le pétrole est rejeté dans le milieu marin, il commence à se dégrader naturellement, et après une longue période, à être submerger ou à couler. Les constituants légers du pétrole brut commencent à s'évaporer et à se dissoudre dans la colonne d'eau. Le reste flotte tant que sa densité est inférieure à la densité de l'eau dans laquelle il a été rejeté. L'action des vagues peut créer des émulsions eau-huile qui poussent le mélange vers une flottabilité neutre. L'adhésion aux sédiments benthiques (p. ex., plages, lits fluviaux), aux déchets organiques et aux matériaux coulants peut pousser le pétrole à s'enfoncer dans l'eau. Chaque produit pétrolier est différent des autres, et certains ont plus tendance que d'autres à la submersion.

La présente étude vise les pétroles de type BAK, HSB et WCS, comme représentants des pétroles bruts léger, moyen et lourd respectivement. Pour mieux aborder les propriétés du pétrole et son comportement dans le milieu marin, il est utile de décrire brièvement la composition chimique des produits qui sont transportés. La caractérisation du pétrole par les pseudo-composantes qui le constituent facilite le calcul des effets de la dégradation naturelle sur le pétrole dans le milieu marin, ainsi que l'analyse de la toxicité des diverses fractions qui pénètrent le milieu récepteur une fois le pétrole déversé accidentellement. Un produit comme le pétrole brut contient beaucoup de composants chimiques (p. ex., benzène, heptane, octane, etc.), tandis qu'un pseudo-composant est un groupe de ces composants chimiques qui a plus ou moins les mêmes propriétés (p. ex., aromatiques au nombre d'atomes de carbone entre 6 et 10). Le Standard pancanadien relatif aux hydrocarbures pétroliers (CCME, 2008) décrit une méthode qui caractérise les hydrocarbures selon leur toxicité à l'aide de quatre fractions : F1 à F4. Chaque fraction (ou pseudo-composant) représente une plage d'atomes de carbone dans la molécule. À titre d'exemple, F1 représente la plage C6 à C10. Les sous-catégories d'aromatiques et d'aliphatiques sont également abordées dans le standard pancanadien.

Au vu de ces considérations, Stantec a élaboré une description des pseudo-composants qui a une meilleure résolution (plus petites plages de nombre d'atomes de carbone dans chaque fraction). Au total, 17 pseudo-composants ont été définis, allant du benzène à l'asphaltène. Les pseudo-composants lourds, comme le F4, les résines et les asphaltènes, représentent une fraction importante de la masse pétrolière totale, mais leur solubilité est limitée, leurs points d'ébullition sont très élevés, et ils ne sont par conséquent pas facilement évaporables, en plus de n'être généralement pas importants sur le plan toxicologique. Toutefois, ils représentent une part importante de la composition molaire du pétrole, ce qui influe sur les taux d'évaporation et de dissolution des fractions légères, par la loi de Raoult. Les fractions lourdes figurent aussi de manière proéminente dans la formation des boules de goudron, ce qui les rend importantes dans les simulations globales.

La section ci-dessous présente la composition de chaque type de pétrole représentatif, selon l'analyse des échantillons obtenus auprès des expéditeurs potentiels par Énergie Est. Ces compositions ont servi aux simulations de modélisation décrites dans le présent rapport.

Le tableau 5.1 montre la composition des pseudo-composants du pétrole brut Bakken, du pétrole semi-synthétique Husky et du pétrole Western Canadian Select. Le tableau 5.2 présente certaines propriétés du pétrole, comme la densité et la viscosité.

Tableau 5.1 : Composition en pseudo-composants des pétroles BAK, HSB et WCS

Pseudo-composants	Concentration (mg/kg)		
	BAK	HSB	WCS
Volatils	75 600	31 000	58 800
Benzène	1 000	180	1 100
TEX	9 100	2 940	3 760
Aromatiques > C8-C10	12 000	3 000	3 000
Aromatiques > C10-C12	25 000	20 000	7 700
Aromatiques > C12-C16	41 000	54 000	14 000
Aromatiques > C16-C21	40 000	97 000	27 000
Aromatiques > C21-C34	50 000	140 000	69 000
Aliphatiques C6-C8	200 000	28 000	23 000
Aliphatiques > C8-C10	87 000	14 000	6 400
Aliphatiques > C10-C12	83 000	31 490	26 000
Aliphatiques > C12-C16	130 000	104 970	62 000
Aliphatiques > C16-C21	97 000	162 230	72 000
Aliphatiques > C21-C34	100 000	257 660	110 000
F4 (> C34-C50)	45 000	51 530	110 000
Résines	3 800	---	335 240
Asphaltènes	500	2 000	71 000

Tableau 5.2 : Propriétés des pseudo-composants des pétroles BAK, HSB et WCS d'origine

Propriétés	Unités	BAK	HSB	WCS
Densité absolue à 15 °C	kg/m ³	799	869,1	925,8
Densité relative mesurée à 15 °C	S.O.	0,7997	0,8699	0,9266
Gravité API à 15 °C	S.O.	45,4	31,2	21,2
Point d'éclair en vase clos	°C	< -35	< -35	< -35
Point d'écoulement	°C	< -65	-42	-33
Facteur d'équivalent gaz	m ³ gaz/m ³ liquide	S.O.	83	79,6
Viscosité à 0 °C	cSt	2,814	32,42	806
Viscosité à 5 °C	cSt	2,538	24,3	534,6
Viscosité à 15 °C	cSt	2,101	14,22	258,2
Viscosité à 25 °C	cSt	S.O.	8,935	139
Viscosité à 40 °C	cSt	S.O.	5,58	64,62

5.2.7 Processus de dégradation naturelle dans SPILLCALC

Cette section donne des détails sur les processus de dégradation naturelle simulés dans SPILLCALC. La figure 5.1 illustre les différents processus de météorisation.

5.2.7.1 Évaporation

Deux mécanismes permettent de définir le processus d'évaporation dans SPILLCALC. Pour commencer, il existe une approche assez standard, qui consiste à calculer le flux de masse en fonction de la vitesse du vent, de la pression d'équilibre du composant et de la concentration molaire du composant dans le produit global. Cette méthode est utilisée dans ADIOS2. Cependant, SPILLCALC est pourvu d'un mécanisme supplémentaire, qui tient compte de l'effet ralentissant de la diffusion moléculaire verticale à l'intérieur de la nappe de pétrole (Stronach et Hospital, 2014). C'est la diffusion moléculaire qui est responsable de l'acheminement des fractions plus légères de l'intérieur de la nappe d'hydrocarbure vers sa surface d'évaporation, afin de compenser la perte due à l'évaporation. En général, dans des nappes de pétrole d'une épaisseur de quelques millimètres et plus, le taux de diffusion moléculaire au travers de l'épaisseur de la nappe est plus lent que le taux d'évaporation à la surface. Par conséquent, le processus de diffusion interne est le mécanisme de contrôle.

Les deux processus interagissent dans SPILLCALC. L'évaporation s'opère originellement sans restriction, en utilisant les formules standards. Cependant, la concentration de composant qui s'évapore est limitée par la concentration délivrée par le processus de diffusion à la surface de la nappe d'hydrocarbures. Le plus lent de ces deux taux détermine le taux d'évaporation. Les coefficients de diffusion utilisés sont similaires à ceux indiqués par Afsahi et Kantzas (2006) pour la diffusion du pentane dans le bitume de Cold Lake, bien qu'ils aient été légèrement ajustés aux valeurs susceptibles de reproduire les résultats d'évaporation en laboratoire pour les trois types de pétrole. Veuillez consulter la section 5.3 pour plus de détails.

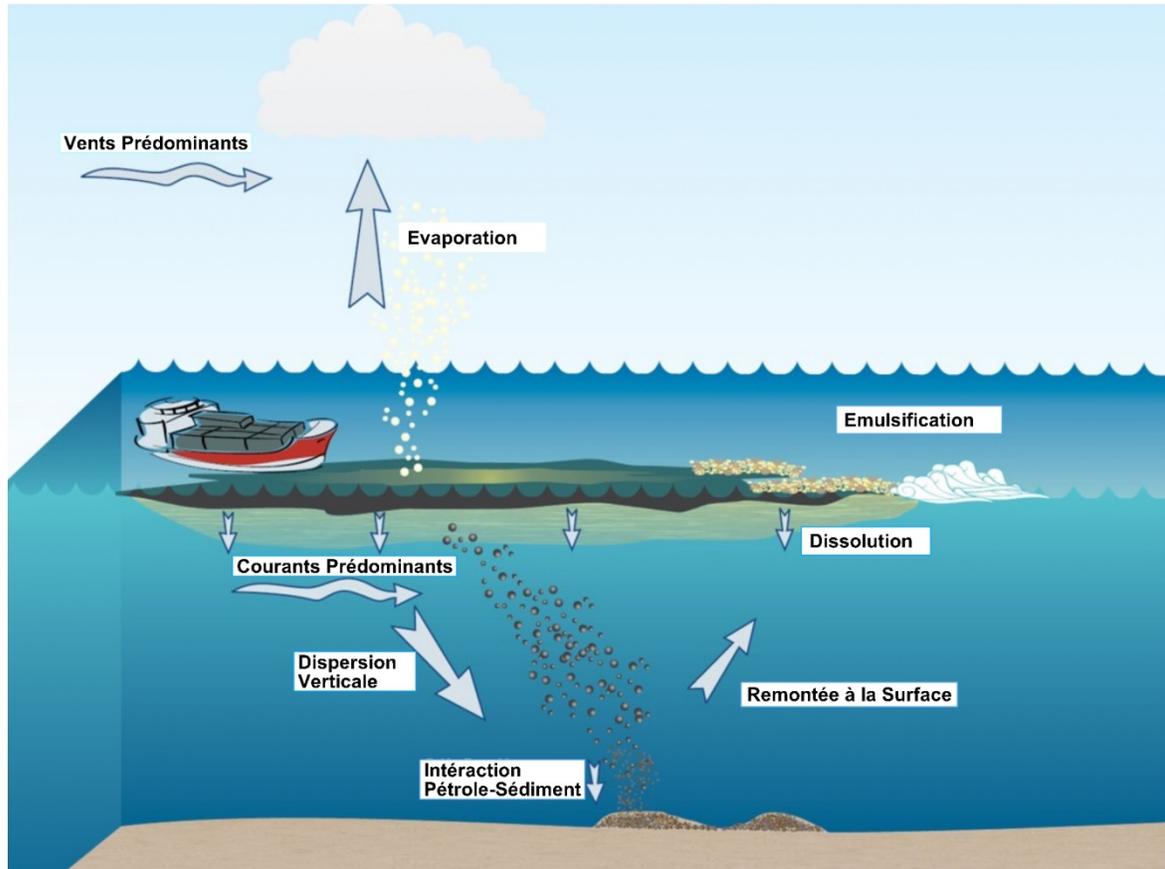


Figure 5.1 : Principaux processus de dégradation naturelle dans SPILLCALC

Le tableau 5.3 donne la pression d'équilibre de chaque pseudo-composant. La pression d'équilibre de substance pure du pseudo-composant a été calculée à partir de celle de chaque sous-composant pour les fractions légères et d'un substitut pour les fractions plus lourdes.

Tableau 5.3 : Propriétés d'évaporation des pétroles BAK, HSB et WCS

Pseudo-composants	Pression d'équilibre (P _L) (Pa)		
	BAK	HSB	WCS
Volatils	2,93E+05	2,49E+05	1,47E+05
Benzène	1,27E+04	1,27E+04	1,27E+04
TEX	1,98E+03	2,04E+03	2,56E+03
Aromatiques > C8-C10	6,40E+02	6,40E+02	6,40E+02
Aromatiques > C10-C12	6,40E+01	6,40E+01	6,40E+01
Aromatiques > C12-C16	4,90E+00	4,90E+00	4,90E+00
Aromatiques > C16-C21	1,10E-01	1,10E-01	1,10E-01
Aromatiques > C21-C34	4,50E-05	4,50E-05	4,50E-05
Aliphatiques C6-C8	6,40E+03	6,40E+03	6,40E+03
Aliphatiques > C8-C10	6,40E+02	6,40E+02	6,40E+02
Aliphatiques > C10-C12	6,40E+01	6,40E+01	6,40E+01
Aliphatiques > C12-C16	4,90E+00	4,90E+00	4,90E+00
Aliphatiques > C16-C21	1,10E-01	1,10E-01	1,10E-01
Aliphatiques > C21-C34	7,00E-05	7,00E-05	7,00E-05
F4 (> C34-C50)	1,00E-10	1,00E-10	1,00E-10
Résines	1,00E-10	1,00E-10	1,00E-10
Asphaltènes	1,00E-10	1,00E-10	1,00E-10

5.2.7.2 Dispersion verticale et remontée à la surface

Le déferlement des vagues a pour effet de mélanger de fines gouttelettes de pétrole à la colonne d'eau. En fonction de l'agitation naturelle de l'eau, et de la taille et de la densité des gouttelettes, le pétrole dispersé reste généralement en suspension dans la colonne d'eau et ne remonte pas à la surface tant que le mécanisme de dispersion, c'est-à-dire le déferlement des vagues en surface, continue. Lorsque le vent tombe et que les vagues se calment, le pétrole dispersé remonte généralement à la surface. Le processus de dispersion verticale a été intégré à SPILLCALC à l'aide d'équations mises au point par Delvigne et Sweeney (1988). Ces équations servent également à calculer la dispersion dans le modèle NOAA ADIOS2. Le processus de remontée à la surface a été mis en œuvre dans SPILLCALC à l'aide d'équations élaborées par Tkalic et Chan (2002). Alors que la plupart des modèles de déversement s'appuient sur la vitesse du vent et la houle pour l'estimation des vagues, SPILLCALC recourt au modèle de vagues SWAN, fiable et largement reconnu, pour générer le champ de vagues. L'énergie des vagues obtenue avec SWAN est beaucoup plus réaliste pour calculer la dispersion verticale.

Le processus de dispersion dépend de la vitesse du vent, de la hauteur de vague, du pourcentage de vagues qui déferlent et de la taille des gouttelettes. Comme le suggère ADIOS2, la taille des gouttelettes a été fixée à 70 microns, ce qui représente le critère pour une gouttelette de rester à l'intérieur de la colonne d'eau avec une turbulence naturelle. Les gouttelettes de taille supérieure à 70 microns remontent à la surface plus rapidement que le produit en surface ne se déplace.

La dispersion est fixée à zéro pour les vents qui soufflent à moins de 10 m/s, afin de tenir compte de l'absence de déferlement des vagues avec des vents faibles. Pour accentuer le réalisme de la simulation, SPILLCALC comprend un processus d'ascension des bulles en continu. Dans des conditions de vents puissants et de forte houle, le mécanisme d'immersion prédomine, alors qu'en périodes de vents et de houle faibles, c'est le mécanisme d'ascension des bulles qui l'emporte (Tkalich et Chan, 2002).

Dans SPILLCALC, les positions horizontale et verticale de tous les fragments de pétrole dispersés sont actualisées à chaque pas de temps. Il est admis que le pétrole se disperse de manière uniforme dans une couche d'eau de 2 m d'épaisseur et se déplace en fonction des courants de surface fournis par H3D. Étant donné que la nappe de pétrole se déplace en fonction des courants de surface, de la diffusion et d'une certaine dérive, les deux couches de pétrole (c'est-à-dire le liquide en surface et dispersé) ne se déplacent pas ensemble, mais sont séparées dans l'espace, surtout pendant les périodes de vents forts. Le pétrole qui a été dispersé, puis qui remonte, peut subir une évaporation dès qu'il atteint la surface. Étant donné que des vents forts ne soufflent pas en permanence, il s'avère que le pétrole qui a été dispersé dans la colonne d'eau commence généralement à remonter dès que les vents se calment, et que le taux d'évaporation suit généralement le taux de remontée. Le pétrole dispersé dans la colonne d'eau connaît uniquement un état transitoire avant l'évaporation, qui constitue l'étape finale.

5.2.7.3 Immersion du pétrole

La densité de chaque napette, ou fragment de pétrole, est mise à jour à chaque pas de temps, en utilisant la concentration et la densité de chaque pseudo-composant. Lorsque la densité d'un fragment de pétrole devient supérieure à celle de l'eau environnante, le fragment coule jusqu'à ce qu'il atteigne une profondeur d'équilibre. Le fragment immergé se déplace en fonction des courants, de la turbulence et de la densité de l'eau environnante.

5.2.7.4 Étalement à faible échelle

Outre la diffusion verticale à l'intérieur de la nappe d'hydrocarbures, l'aire recouverte par celle-ci joue un rôle important dans le module d'évaporation. Une expérience d'étalement, entreprise en 2011 sur le site de la WCMRC (Western Canada Marine Response Corporation), à Burnaby (Colombie-Britannique) a montré que l'étalement latéral de la nappe est limité et qu'une certaine épaisseur minimale a été constatée. Cette épaisseur minimale est de 0,4 mm. Par conséquent, une zone « effective » réduite a été utilisée dans le processus d'évaporation, en fonction du volume de pétrole présent dans une cellule de calcul et de l'épaisseur minimale qu'elle peut atteindre. Le rapport entre la zone effective et la zone totale de cellule est compris entre 0 et 1. Au début de la simulation, la zone effective est très proche de la zone de cellule, car la nappe d'hydrocarbures est généralement plus épaisse. Au fil du temps, la zone effective devient plus petite, ce qui s'explique par le morcellement progressif de la nappe, et ce qui entraîne la réduction du taux d'évaporation.

5.2.7.5 Interaction pétrole-sédiments

Le comportement d'une nappe d'hydrocarbures dépend également du processus de formation d'un agrégat d'origine minérale et pétrolière. Cette formation nécessite une quantité d'énergie importante, généralement fournie par le déferlement des vagues, une concentration de sédiments en suspension suffisante et la présence d'hydrocarbures.

Les études scientifiques indiquent que les concentrations de sédiments en suspension dans la baie de Fundy sont bien inférieures à celles requises pour former un agrégat d'origine minérale et pétrolière stable. Fader (2005) a décrit les profils de concentration de sédiments à plusieurs endroits dans la baie de Fundy. Des échantillons ont été prélevés pendant le mois de novembre le long d'un transect entre Grand Manan et Digby Neck. D'autres transects ont été alors tracés en travers de la baie de Fundy jusqu'à l'entrée du bassin de Minas. La concentration des sédiments en suspension dans la couche de surface, c'est-à-dire à moins de 10 m de profondeur, est inférieure à 15 mg/L, la moyenne se situant autour de 5 mg/L.

Environnement Canada (2013) a étudié l'interaction entre le pétrole et les sédiments en suspension en se basant sur des valeurs de 10,000 mg/L maximum. Les expériences en laboratoire menées par Khelifa (2003, 2005) révèlent que la formation d'un agrégat d'origine minérale requiert des taux de sédiments en suspension de 200 à 250 mg/L. En raison de ces chiffres et des concentrations de sédiments observées dans la baie de Fundy, la formation d'un agrégat d'origine minérale n'a pas été retenue dans le cadre de cette étude.

5.2.7.6 Émulsification

L'émulsification est le processus au cours duquel le pétrole et l'eau se mêlent pour former une émulsion, généralement sous l'action des vagues qui mélangent les deux liquides. Du point de vue qualitatif, l'émulsification peut être considérée comme le contraire du processus de dispersion verticale. Pendant l'émulsification, le pétrole absorbe des gouttelettes d'eau pour former une émulsion, alors qu'avec la dispersion verticale, les gouttelettes de pétrole sont entraînées vers le bas et mélangées dans la colonne d'eau.

La formation d'émulsions peut changer radicalement les propriétés et les caractéristiques du pétrole. Suivant l'état de l'émulsion (stable, moyennement stable ou instable), le volume du pétrole émulsifié peut être constitué jusqu'à 80 % d'eau, ce qui multiplie d'autant le volume de la nappe d'hydrocarbures (Xie *et al.*, 2007).

Les formules utilisées par SPILLCALC pour l'absorption de l'eau et la stabilité de l'émulsion sont respectivement celles de Mackay *et al.* (1980), et de Mackay et Zagorsky (1982). L'effet de l'émulsification sur le processus d'évaporation est important. Plus la teneur en eau et l'épaisseur de la nappe augmentent, plus l'évaporation est inhibée. SPILLCALC suit la méthode mise au point par Ross et Buist (1995), qui part de l'hypothèse selon laquelle l'évaporation est inversement proportionnelle à la teneur en eau du pétrole émulsifié.

5.2.7.7 Dissolution

Certaines fractions d'hydrocarbures plus légers sont solubles dans l'eau. Ils vont se dissoudre dans la colonne d'eau sous-jacente. La solubilité des pseudo-composants de chaque produit pétrolier étudié est présentée au tableau 5.4. La capacité de dissolution dépend de la solubilité du composant pur, de la fraction molaire de l'hydrocarbure et du coefficient de transfert de masse. Le taux de dissolution est calculé en fonction de l'équation publiée par MacKay et Leinonen (1977) et utilise leur valeur pour le coefficient de transfert de masse : $2,36 \times 10^{-6}$ m/s.

Tout comme le processus d'évaporation, ce flux est appliqué sous forme de perte à la nappe d'hydrocarbures. En mode stochastique, le pétrole dissous ne fait pas l'objet de suivi lorsqu'il sort de la nappe. Il est intégré au champ dissolution dans le bilan de masse, puis il est considéré comme sorti du système. En mode déterministe, les flux dissous à la surface sont transférés du modèle de déversement pétrolier au modèle de circulation 3D (H3D). Le flux provenant de la nappe d'hydrocarbures pénètre dans la couche supérieure de H3D et subit les mêmes processus d'advection et de diffusion qui s'appliquent à tous les autres scalaires, comme la température et la salinité. Cette méthode permet au mode déterministe d'évaluer le devenir et les conséquences possibles du pétrole dissous dans la colonne d'eau. Il faut noter qu'en mode stochastique, le modèle ne conserve pas la trace de la concentration dans la colonne d'eau. SPILLCALC accepte par principe que la concentration de fond est égale à zéro, ce qui peut entraîner, dans des zones enclavées, un taux de transfert de masse un peu plus élevé.

Le tableau 5.4 récapitule les propriétés de solubilité de chaque pseudo-composant. La solubilité de substance pure de chaque pseudo-composant est calculée d'après la méthode de DiToro *et al.* (2007).

Tableau 5.4 : Propriétés de solubilité des pétroles BAK, HSB et WCS

Pseudo-composants	Solubilité (C _L) (mol/m ³)		
	BAK	HSB	WCS
Volatils	2,42E+00	2,24E+00	2,36E+00
Benzène	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01
TEX	1,65E+00	1,69E+00	2,13E+00
Aromatiques > C8-C10	3,90E-01	3,90E-01	3,90E-01
Aromatiques > C10-C12	2,35E-01	2,35E-01	2,35E-01
Aromatiques > C12-C16	1,10E-01	1,10E-01	1,10E-01
Aromatiques > C16-C21	3,10E-02	3,10E-02	3,10E-02
Aromatiques > C21-C34	3,17E-03	3,17E-03	3,17E-03
Aliphatiques C6-C8	1,42E-01	1,42E-01	1,42E-01
Aliphatiques > C8-C10	1,45E-02	1,45E-02	1,45E-02
Aliphatiques > C10-C12	1,48E-03	1,48E-03	1,48E-03
Aliphatiques > C12-C16	5,51E-05	5,51E-05	5,51E-05
Aliphatiques > C16-C21	2,70E-07	2,70E-07	2,70E-07
Aliphatiques > C21-C34	6,31E-12	6,31E-12	6,31E-12
F4 (> C34-C50)	5,25E-15	5,25E-15	5,25E-15
Résines	9,55E-08	9,55E-08	9,55E-08
Asphaltènes	3,24E-16	3,24E-16	3,24E-16

5.2.7.8 Dégradation microbiologique

Une quantité considérable de pétrole se propageant dans les systèmes marins est éliminée sous l'action de dégradation des hydrocarbures par des communautés microbiennes, en particulier les bactéries dites hydrocarburoclastes (HCB). La bactérie marine *Alcanivorax borkumensis*, qui fait partie de cette famille de microorganismes HCB susceptibles de dégrader les alcanes, prolifère naturellement et prospère dans l'eau de mer polluée par le pétrole brut, lorsque le milieu est enrichi en azote et en phosphore. Elles sont actuellement considérées comme les principaux organismes de dégradation des hydrocarbures au monde.

La biodégradabilité des composants pétroliers diminue généralement dans l'ordre suivant : n-alcanes, alcanes à chaîne ramifiée, alcènes ramifiés, composés aromatiques n-alkyles à faible masse moléculaire, composés mono-aromatiques, alcanes cycliques, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et asphaltènes.

La densité de la population bactérienne le long du trajet des pétroliers est incertaine. Étant donné que la population bactérienne d'origine est rarement bien connue, la plupart des modèles disposant d'un module de biodégradation recourent à un processus de dégradation bactérienne du premier ordre selon lequel le taux de pétrole biodégradé est proportionnel à la masse initiale et à un coefficient de dégradation empirique (c.-à-d. $m = m_0 e^{-kt}$). Ce coefficient a été choisi comme étant du même ordre de grandeur que les constantes du taux de dégradation du premier ordre provenant des études de terrain (Niu *et al.*, 2011). La valeur sélectionnée est 10^{-7} s^{-1} .

5.3 Validation du modèle

Une étude en laboratoire a été entreprise par Maxxam Analytics dans le but d'observer le taux de dégradation des trois produits pétroliers. Il faut noter que seule l'évaporation dans une hotte a été évaluée comme processus de dégradation. Le pétrole a été placé dans un récipient de 22,5 cm de diamètre à une température ambiante de 21 °C. La vitesse d'écoulement de l'air de la hotte s'échelonnait de 1,02 m/s à 1,22 m/s (ou de 200 à 240 pi/min). Le tableau 5.5 récapitule les conditions initiales.

Tableau 5.5 : Expérience de météorisation en laboratoire

Type de pétrole	Volume dans le récipient (l)	Épaisseur de pétrole (cm)
BAK	0,62 l	1,56 cm
HSB	0,78 l	1,97 cm
WCS	0,74 l	1,85 cm

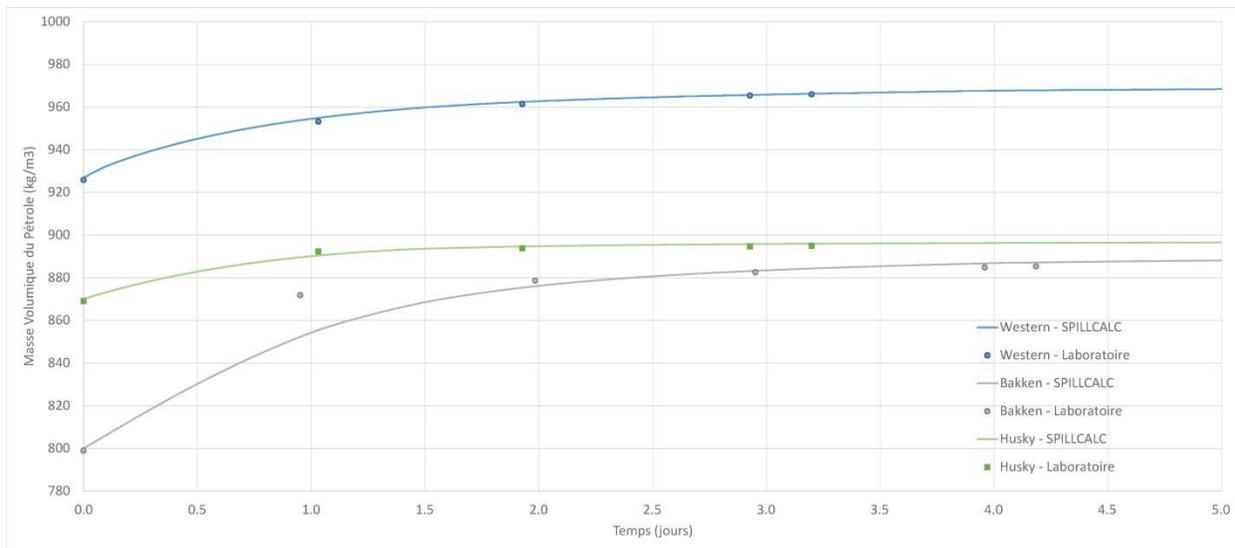


Figure 5.2 : Validation du module d'évaporation

Comme il est indiqué dans la description du module d'évaporation (section 5.2), l'approche d'évaporation standard qui s'appuie sur le transfert de masse peut être limitée par la diffusion des hydrocarbures dans la couche de pétrole, lorsque celle-ci devient suffisamment épaisse. Cela s'est produit dans cette expérience en laboratoire. La densité a été mesurée sur une période de quatre jours. Les prévisions a posteriori de ces expériences avec SPILLCALC ont permis d'étalonner le modèle pour chaque type de pétrole. La capacité du modèle à reproduire de manière adéquate la densité du pétrole permet de valider le principal processus de dégradation (en l'occurrence l'évaporation) et les changements de densité du pétrole brut résultants. La figure 5.2 montre que les densités modélisées (les courbes) et observées (les points) correspondent.

6.0 MODÈLE DE DISPERSION DANS L'AIR : DE SPILLCALC À CALPUFF

L'évaporation représente jusqu'à 25 % du devenir du pétrole WCS (bitume dilué) déversé, jusqu'à 30 % du pétrole HSB et jusqu'à 60 % du pétrole BAK. Selon la modélisation de SPILLCALC, une grande partie de l'évaporation se produit les deux premiers jours. Ainsi, dans le cas d'un déversement majeur, plusieurs milliers de tonnes d'hydrocarbures volatils pourraient être relâchés dans l'atmosphère. Ces composants volatils contiennent des substances très toxiques, c'est pourquoi leur répartition dans le temps et l'espace est importante à comprendre, tant pour l'environnement que pour la santé humaine. Les risques pour la santé humaine concernent à la fois l'équipage du pétrolier et les premiers intervenants, mais également les personnes qui habitent ou travaillent à proximité des rivages concernés. Étant donné que la source de pollution couvre une large zone et qu'elle se déplace, l'évaporation des hydrocarbures est assez complexe à prévoir. Elle est étudiée avec CALPUFF, un modèle numérique de dispersion dans l'air.

CALPUFF est un outil de modélisation gaussien sophistiqué de dispersion atmosphérique non stationnaire, à plusieurs niveaux et à paramètres multiples, qui peut simuler les effets de conditions météorologiques variables dans le temps et l'espace sur le déplacement des polluants. Ce modèle est recommandé par plusieurs instances gouvernementales, dont le ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique et l'USEPA (United States Environmental Protection Agency) pour le transport à grande distance et pour le transport à courte distance dans des conditions météorologiques instables et complexes caractéristiques des côtes et des topographies compliquées. CALPUFF diffère de la plupart des autres modèles de dispersion atmosphérique dans la mesure où il permet de modéliser plusieurs sources locales variables dans le temps et l'espace.

Le système de modélisation est principalement composé de CALMET (un modèle météorologique diagnostique à trois dimensions), de CALPUFF (un modèle de dispersion de la qualité atmosphérique) et d'un module de post-traitement. Outre ces composants, beaucoup d'autres traitements sont utilisés pour préparer les données géophysiques (utilisation des terrains et topographie) et météorologiques (données relatives à l'air au niveau du sol et en altitude, aux précipitations et aux bouées).

6.1 Modélisation diagnostique météorologique et éolienne

Le module éolien de CALMET est doté d'algorithmes de calcul des influences cinématiques de la topographie, des écoulements le long des pentes et du blocage du terrain qui modifient les vents à l'échelle du domaine à la résolution de la grille météorologique. En mode déterministe, les vents de surface qui jouent un rôle dans l'évaporation des hydrocarbures sont modélisés à l'aide de grilles météorologiques de portée spatiale et de résolution variables suivant la taille du domaine, la complexité de la topographie et la disponibilité des données météorologiques de surface.

6.1.1 Grilles de modélisation et données météorologiques

Le domaine de modélisation de CALMET était de 420 km x 420 km avec une grille de résolution de 2 km, centrée à 44,2911°, -66,4469°. Les hauteurs des faces de cellules verticales par défaut de CALMET ont été utilisées (0 m, 20 m, 40 m, 80 m, 160 m, 320 m, 640 m, 1 200 m, 2 000 m, 3 000 m, 4 000 m).

Parmi les données météorologiques fournies en entrée à CALMET mis à jour sur une fréquence d'une heure figuraient des observations provenant de 21 stations de surface au Nouveau-Brunswick, en Nouvelle-Écosse et dans le Maine, de sept bouées NDBC et NERACOOS, et de mesures deux fois par jour de données d'air de couches supérieures par des stations situées en Nouvelle-Écosse et dans le Maine. Toutes les données ont été soumises à des procédures de contrôle et d'assurance de la qualité, et les méthodes de substitution des données

manquantes ont été précisées dans le document « *Guidelines for Air Quality Dispersion Modelling in British Columbia* » (MoE, 2008).

6.1.2 Réglage des paramètres de CALMET

Les paramètres de modélisation de CALMET ont été définis conformément au document « *Guidelines for Air Quality Dispersion Modelling in British Columbia* » (MoE, 2008). En cas de nécessité ou sur suggestion, les paramètres par défaut ont été utilisés. Lorsque l'avis d'un expert était conseillé, les possibilités ont été évaluées pour trouver le meilleur champ de vent dans la couche limite de surface. Parmi ces paramètres figure TERRAD, le rayon d'influence des caractéristiques topographiques, ainsi que R1, R2, R3 et R_{MAX}, qui déterminent la pondération des données météorologiques en surface par rapport aux observations des couches d'altitudes. D'autres suggestions relatives aux paramètres du modèle, notamment aux paramètres au-dessus des zones aquatiques, ont été obtenues par référence aux descriptions exhaustives rédigées par les développeurs de CALPUFF dans « *Generic Guidance and Optimum Model Settings for the CALPUFF Modeling System for Inclusion into the 'Approved Methods for the Modeling and Assessments of Air Pollutants in NSW, Australia'* » (TRC, 2011).

6.2 Modèle de dispersion atmosphérique (CALPUFF)

6.2.1 Flux d'évaporation (sources locales)

CALPUFF permet de modéliser des sources locales qui varient dans le temps et l'espace grâce au fichier externe des sources locales flottantes. Le fichier externe sert à étudier les effets des sources locales flottantes, comme les feux de forêts, mais il contient des paramètres modifiables permettant de simuler plus précisément une source non flottante, comme un gisement d'hydrocarbure qui s'évapore. Chaque fichier peut contenir 200 sources locales distinctes, dont l'étendue est déterminée par quatre paires de coordonnées (X,Y), avec des taux d'émission (en g/s) définis pour chaque espèce (pseudo-composant) et par pas de temps (une heure).

Le flux d'évaporation moyen (taux d'émission) de chacun des 17 pseudo-composants a été déterminé par le modèle de déversement pétrolier SPILLCALC selon des intervalles d'une heure, puis consigné dans un fichier en sortie. Le taux d'évaporation pour chaque polygone source est supposé homogène sur toute la surface de la cellule (1 km²).

6.2.2 Réglage des paramètres de CALPUFF

Les paramètres de modélisation de CALPUFF ont été définis conformément au tableau 9.7 du document « *Guidelines for Air Quality Dispersion Modelling in British Columbia* » (MoE, 2008). En cas de nécessité ou sur suggestion, les paramètres par défaut ont été utilisés.

7.0 TYPES DE SIMULATION

7.1 Simulations stochastiques

À la base, une simulation stochastique consiste en une série de simulations de déversement distinctes pour lesquelles peuvent varier le lieu de déversement, le volume, le type d'hydrocarbure, l'heure et le jour de début. Les données qui en résultent peuvent être analysées pour obtenir des statistiques sur l'étendue prévisible d'un déversement, la probabilité qu'un déversement puisse atteindre une zone donnée, et l'étendue du littoral susceptible d'être polluée. L'objectif d'une simulation stochastique est de reproduire tout un éventail de conditions environnementales sans parti pris pour un ensemble particulier de conditions.

Les résultats d'une simulation stochastique sont souvent présentés sous la forme d'une carte. La figure 7.1 illustre globalement comment se construit une carte stochastique. En premier lieu, il faut comprendre qu'une carte stochastique ne représente pas l'étendue d'un seul déversement, mais plutôt l'étendue maximale pour tous les déversements simulés possibles. La zone orange dans la figure 7.1 représente la partie couverte par le déversement au bout de 6 heures, de 24 heures et de 10 jours. La ligne bleue correspond à la combinaison de tous les emplacements de la nappe d'hydrocarbures sur la période de 30 jours. Il s'agit de l'enveloppe maximale couverte par la nappe sur une période de 30 jours de suivi. Autrement dit, chaque point à l'intérieur de l'enveloppe a été touché par le pétrole ou une trace d'hydrocarbure au moins une fois au cours des 30 jours.

La combinaison des enveloppes de plusieurs simulations, c'est-à-dire de plusieurs lignes bleues, permet d'obtenir une carte stochastique, illustrée sous forme d'une ligne rouge dans le cadre inférieur de la figure 7.1. Le contour de la carte stochastique, en rouge, s'appuie sur l'ensemble de toutes les simulations (environ 75) effectuées au cours des mois de juillet, août et septembre.

La méthode d'évaluation des risques en fonction de la zone a été utilisée pour cette modélisation stochastique. Sur la base de l'analyse de fréquence des incidents entreprise par la firme DNV-GL, un certain nombre d'emplacements ont été sélectionnés dans la baie de Fundy, associé avec une probabilité d'incident et le déversement d'hydrocarbures qui pourrait en résulter.

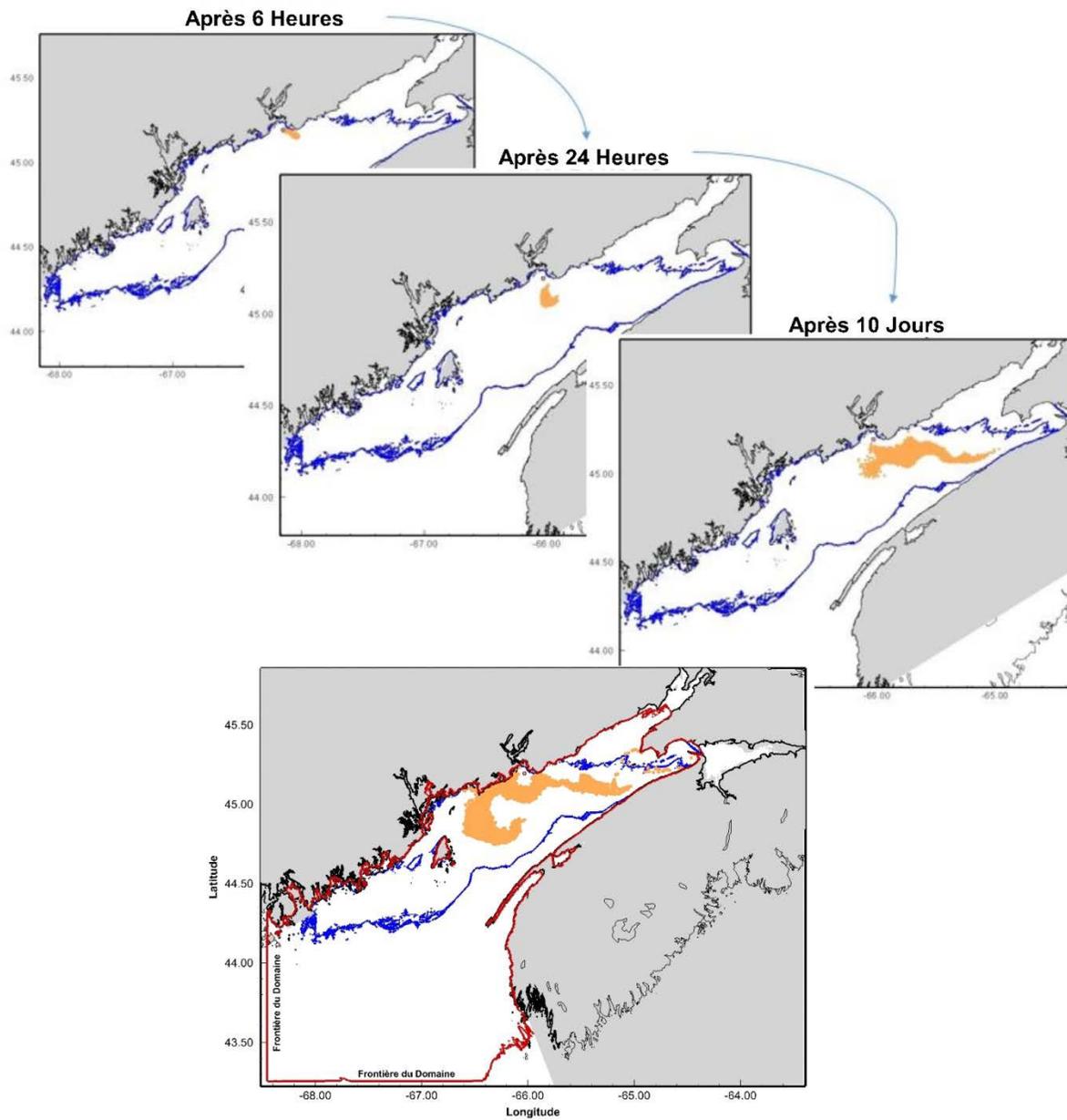


Figure 7.1 : Création d'une carte stochastique

7.2 Simulations déterministiques

Les simulations déterministes ont été sélectionnées en fonction des résultats des simulations stochastiques. En général, les simulations stochastiques représentent le contour d'un grand nombre de déversements qui pourraient se produire de manière indépendante, selon un éventail de conditions environnementales potentielles. Il est ensuite possible de sélectionner et de réexécuter des scénarios individuels en mode déterministe pour mieux appréhender les aspects particuliers d'un déversement. En particulier, la modélisation déterministe 3D peut être utilisée pour mieux comprendre la répartition des hydrocarbures dissous et des gouttelettes de pétrole dans la colonne d'eau, ainsi que le comportement et le devenir des fractions évaporées. Les flux de surface provenant du modèle de déversement sont transférés à la couche de surface du modèle de circulation 3D. La simulation en 3D intégrale constitue un prolongement des simulations spécifiques : différents modules, tels que la dissolution, sont simulés selon des scénarios intégrant la 3D. Ainsi, le devenir des pseudo-composants fait l'objet d'un suivi sur toute la colonne d'eau couvrant le domaine de modélisation. Le principal objectif de ces simulations est de fournir des renseignements sur la toxicité potentielle d'un déversement dans la colonne d'eau. De manière similaire, le devenir des hydrocarbures évaporés est transféré au modèle de dispersion atmosphérique, afin de pouvoir évaluer les répercussions potentielles sur la santé.

Les résultats de la modélisation déterministe seront présentés sous forme de supplément au début de 2016.

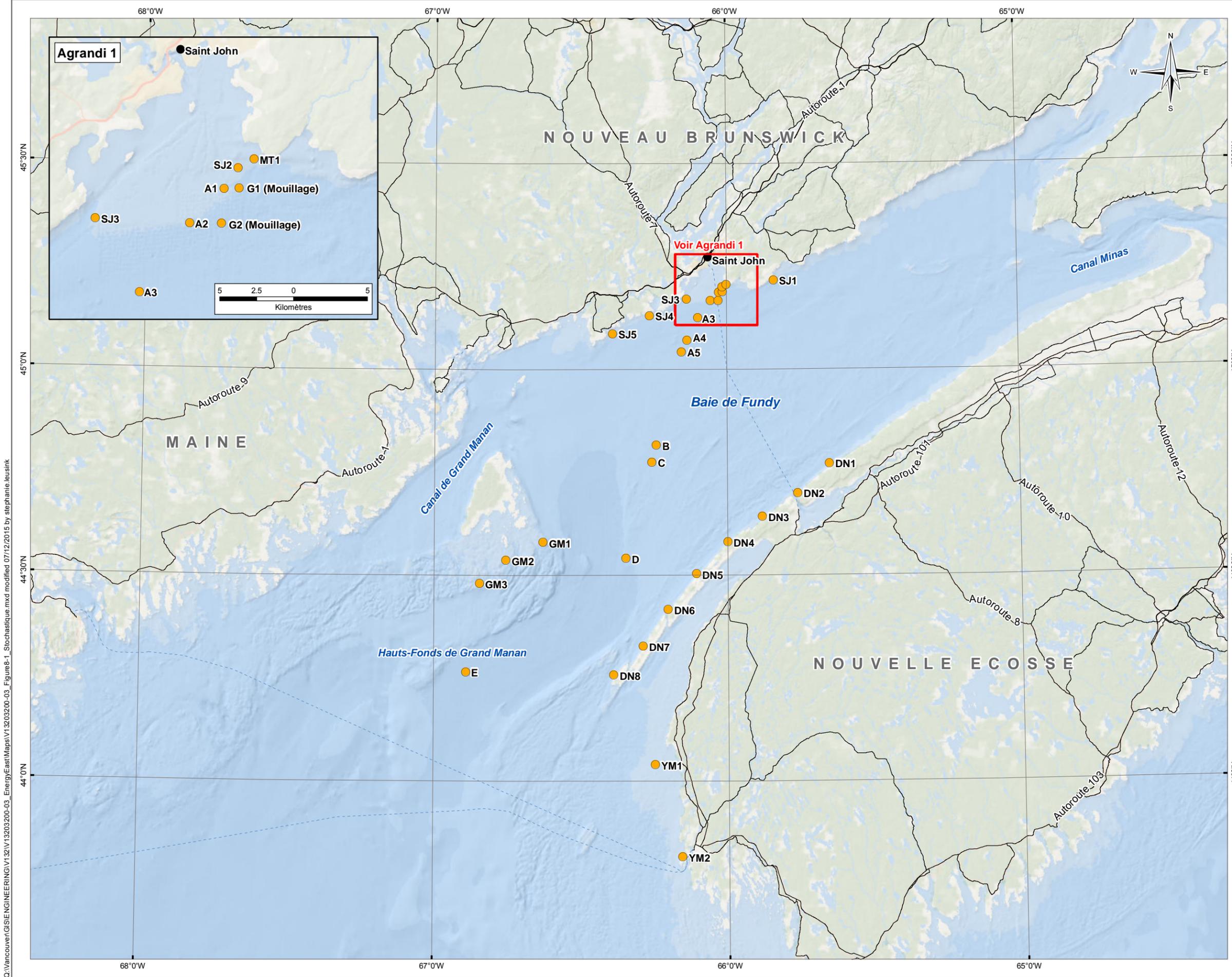
8.0 RÉSULTATS DE LA SIMULATION STOCHASTIQUE

8.1 Aperçu

La modélisation stochastique a été effectuée dans le cadre d'une évaluation des risques en fonction de la zone. Sur la base de l'analyse fréquentielle d'incident et de déversement à résolution spatiale entreprise par DNV-GL, de possibles lieux de déversement représentatifs ont été sélectionnés dans la baie de Fundy. Au total, 32 emplacements ont été retenus, représentant chacun une zone de risque quantifié, généralement attribuable au croisement de couloirs de navigation ou à la présence de hauts-fonds à proximité de la route maritime. À chaque endroit, 303 simulations ont été entreprises en tout, ce qui représente plus de 10 000 simulations au total. Les 303 simulations de chaque emplacement ont été choisies de manière impartiale afin de représenter les saisons, les types d'hydrocarbures et les tailles de navires. Les volumes de déversement ont été déterminés par type de pétrolier, suivant l'analyse entreprise par DNV-GL.

À chaque endroit, un volume particulier de pétrole pouvait être rejeté par un pétrolier de classe Aframax, Suezmax et/ou TGTB. Cette quantité a été par la suite caractérisée comme plus grand et plus petit volume de déversement. Dans le cas des collisions, le plus grand déversement étudié pour l'évaluation du déversement stochastique est représenté par le volume de déversement P_{90} , c'est-à-dire un volume de déversement pour lequel 90 % des déversements seront inférieurs. Les volumes moindres de déversement dans les cas de collision ont été fondés sur le volume de déversement P_{50} . Dans le cas des échouements à moteurs éteints et moteurs allumés dans la zone du port de Saint John, et des échouements moteurs éteints le long de la voie de navigation, le volume de déversement étudié pour l'évaluation stochastique de déversement est représenté respectivement par P_{50} pour le plus grand et par P_{10} pour le plus petit. Comme l'indique le document DNV-GL (2015), le volume de déversement P_{90} a été considéré comme trop peu probable pour l'appliquer aux échouements moteurs éteints ou aux échouements moteurs allumés dans le port de Saint John.

Trois types d'hydrocarbures ont également été envisagés, comme indiqué précédemment : BAK, HSB et WCS. Un nombre d'incidents similaire a été simulé pour chaque élément de ce groupe de paramètres. Par exemple, le même nombre de simulations a été effectué pour le rejet de pétrole Bakken par un TGTB, un pétrolier Aframax ou un pétrolier Suezmax. Leur emplacement, les volumes de déversement associés, ainsi que le scénario représenté, sont décrits dans le tableau 8.1 et illustrés dans la figure 8.1.



LEGENDE

- Sites de Déversement
- Routes Principales
- Bateau
- Ville

NOTES
Données de fond pour la cartographie:
ESRI World Ocean Basemap

STATUS
DIFFUSE POUR UTILISATION

MODELISATION DE DEVERSEMENTS DE PETROLE EN MILIEU MARIN POUR LE TERMINAL MARITIME PROPOSE CANAPORT D'ENERGIE EST

Sites de Déversement pour la Modélisation Stochastique

PROJECTION NB Double Stéréographique	DATUM NAD83	CLIENT TransCanada In business to deliver
Echelle: 1:1,000,000		
NO. DE FICHIER V13203200-03_Figure8-1_Stochastique.mxd		
NO. DE PROJET V13203200-03	DÉSSINÉ PAR SL	VERIFIÉ PAR MEZ
OFFICE T EBA-VANC	APPROUVÉ PAR AH	REVISION 1
DATE 7 Decembre 2015		TETRA TECH EBA

Figure 8.1

Q:\Vancouver\GIS\ENGINEERING\132\13203200-03_EnergyEast\Maps\13203200-03_Figure8-1_Stochastique.mxd modified 07/12/2015 by stephanie.leusink

Tableau 8.1 : Emplacements et incidents associés à la modélisation stochastique

Nom du site	Longitude	Latitude	Scénario	Type de navire	Grands volumes de déversement (m ³)	Petits volumes de déversement (m ³)
Accidents de transport maritime au sein du port de Saint John						
A1	-66,0265	45,1882	Collision sur la voie de navigation	Aframax	P ₉₀ : 19 672	P ₅₀ : 9 836
				Suezmax	P ₉₀ : 30 435	P ₅₀ : 15 218
				TGTB	P ₉₀ : 37 639	P ₅₀ : 17 708
A2	-66,0563	45,16763	Collision sur la voie de navigation	Aframax	P ₉₀ : 19 672	P ₅₀ : 9 836
				Suezmax	P ₉₀ : 30 435	P ₅₀ : 15 218
				TGTB	-	-
A3	-66,0997	45,12582	Collision sur la voie de navigation	Aframax	P ₉₀ : 19 672	P ₅₀ : 9 836
				Suezmax	P ₉₀ : 30 435	P ₅₀ : 15 218
				TGTB	P ₉₀ : 37 639	P ₅₀ : 17 708
A4	-66,1363	45,07165	Collision sur la voie de navigation	Aframax	P ₉₀ : 19 672	P ₅₀ : 9 836
				Suezmax	P ₉₀ : 30 435	P ₅₀ : 15 218
				TGTB	P ₉₀ : 37 639	P ₅₀ : 17 708
A5	-66,1555	45,04332	Collision sur la voie de navigation	Aframax	P ₉₀ : 19 672	P ₅₀ : 9 836
				Suezmax	P ₉₀ : 30 435	P ₅₀ : 15 218
				TGTB	-	-
G1	-66,0135	45,18853	Collision à quai et en route vers l'aire de mouillage	Aframax	P ₉₀ : 9 836	P ₅₀ : 4 918
				Suezmax	P ₉₀ : 15 218	P ₅₀ : 7 609
				TGTB	P ₉₀ : 18 819	P ₅₀ : 8 854
G2	-66,0289	45,16728	Collision à quai et en route vers l'aire de mouillage	Aframax	P ₉₀ : 9 836	P ₅₀ : 4 918
				Suezmax	P ₉₀ : 15 218	P ₅₀ : 7 609
				TGTB	P ₉₀ : 18 819	P ₅₀ : 8 854
MT	-66,000647	45,206217	Collision à quai et en route vers l'aire de mouillage	Aframax	P ₉₀ : 9 836	P ₅₀ : 4 918
				Suezmax	P ₉₀ : 15 218	P ₅₀ : 7 609
				TGTB	P ₉₀ : 18 819	P ₅₀ : 8 854
SJ1	-65,8381	45,21644	Échouement moteurs allumés et moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
SJ2(a)	-66,0142	45,20083	Échouement moteurs allumés et moteurs éteints au mouillage	Aframax	P ₅₀ : 3 336	P ₁₀ : 1 247
				Suezmax	P ₅₀ : 4 660	P ₁₀ : 1 745
				TGTB	P ₅₀ : 7 723	P ₁₀ : 2 551
SJ2(b)	-66,0142	45,20083	Échouement moteurs allumés et moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
SJ3	-66,1375	45,17083	Échouement moteurs allumés et moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101

Tableau 8.1 : Emplacements et incidents associés à la modélisation stochastique

Nom du site	Longitude	Latitude	Scénario	Type de navire	Grands volumes de déversement (m ³)	Petits volumes de déversement (m ³)
SJ4	-66,2650	45,13083	Échouement moteurs allumés et moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
SJ5	-66,3919	45,08679	Échouement moteurs allumés et moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	-	-
Accidents de transport maritime hors du port de Saint John						
Accidents dans la voie de navigation						
B	-66,2425	44,81658	Collision sur la voie de navigation	Aframax	P ₉₀ : 19 672	P ₅₀ : 9 836
				Suezmax	P ₉₀ : 30 435	P ₅₀ : 15 218
				TGTB	-	-
C	-66 2581	44,77519	Collision sur la voie de navigation	Aframax	P ₉₀ : 19 672	P ₅₀ : 9 836
				Suezmax	P ₉₀ : 30 435	P ₅₀ : 15 218
				TGTB	-	-
D	-66,3475	44,54205	Collision sur la voie de navigation	Aframax	P ₉₀ : 19 672	P ₅₀ : 9 836
				Suezmax	P ₉₀ : 30 435	P ₅₀ : 15 218
				TGTB	P ₉₀ : 37 639	P ₅₀ : 17 708
E	-66,8911	44,26578	Collision sur la voie de navigation	Aframax	P ₉₀ : 19 672	P ₅₀ : 9 836
				Suezmax	P ₉₀ : 30 435	P ₅₀ : 15 218
				TGTB	P ₉₀ : 37 639	P ₅₀ : 17 708
Accidents à proximité de la péninsule de Digby						
DN1	-65,6516	44,77169	Échouements moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
DN2	-65,7600	44,70003	Échouements moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
DN3	-65,8814	44,64355	Échouements moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
DN4	-66,0000	44,58164	Échouements moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
DN5	-66,1073	44,50417	Échouements moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101

Tableau 8.1 : Emplacements et incidents associés à la modélisation stochastique

Nom du site	Longitude	Latitude	Scénario	Type de navire	Grands volumes de déversement (m ³)	Petits volumes de déversement (m ³)
DN6(a)	-66,2037	44,41798	Échouements moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
DN6(b)	-66,2037	44,41798	Échouements moteurs allumés dans la voie de navigation	Aframax	P ₉₀ : 18 315	P ₅₀ : 6 672
				Suezmax	P ₉₀ : 25 539	P ₅₀ : 9 320
				TGTB	P ₉₀ : 37 649	P ₅₀ : 15 445
DN7	-66,2892	44,32843	Échouements moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
DN8	-66,3895	44,25879	Échouements moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
Accidents à proximité de Grand Manan						
GM1	-66,6292	44,58083	Échouements moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
GM2	-66,7558	44,5375	Échouements moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
GM3	-66,8458	44,48083	Échouements moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
Accidents à proximité de Yarmouth						
YM1	-66,2496	44,04041	Échouements moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
YM2	-66,1575	43,81748	Échouements moteurs éteints dans la voie de navigation	Aframax	P ₅₀ : 6 672	P ₁₀ : 2 494
				Suezmax	P ₅₀ : 9 320	P ₁₀ : 3 490
				TGTB	P ₅₀ : 15 445	P ₁₀ : 5 101
Accidents et défaillances au terminal maritime						
MT	-66,000647	45,206217	Défaillance de bras de chargement/jetée sur chevalets	Sans objet	1 786 (défaillance de jetée sur chevalets)	43 (défaillance de bras de chargement)

8.2 Commentaires généraux

Les résultats de l'étude stochastique ont été répartis en cinq sections distinctes :

- Accidents de transport maritime :
 - Petits déversements
 - Grands déversements
- Accidents et défaillances au terminal maritime
 - Défaillance de jetée sur chevalets (grand déversement)
 - Défaillance du bras de chargement (petit déversement)
 - Tous accidents et défaillances confondus dans un terminal maritime

Pour chacune de ces sections, les résultats des simulations ont été classés selon les critères suivants :

- saison plus froide (d'octobre à mars) ou saison plus chaude (d'avril à septembre);
- type de pétrole (c.-à-d. BAK/HSB/WCS).

Le bilan de masse associé aux déversements dans chaque région géographique comporte les champs suivants :

- Sur la surface de l'eau
- En contact avec le littoral
- Évaporé
- Hors des limites du modèle (volume sorti du domaine de l'étude, c'est-à-dire hors du système)
- Biodégradé
- Coulé (pétrole devenu plus dense que l'environnement immédiat)
- Dissous

Le bilan de masse indique ce qu'est devenu le pétrole au terme de la période de suivi, c'est-à-dire 30 jours. À noter que le bilan de masse présente une moyenne des différents volumes déversés : par exemple, pour la catégorie Accidents de transport maritime - grands déversements, un grand déversement provenant d'un navire de classe TGTB n'est pas équivalent à un grand déversement provenant d'un navire de classe Aframax. Les moyennes ont été calculées sur la base des volumes afin que les déversements les plus importants aient un plus grand poids dans les tableaux suivants. À noter que les tableaux représentent une moyenne indépendante de la fréquence des incidents sur chaque site.

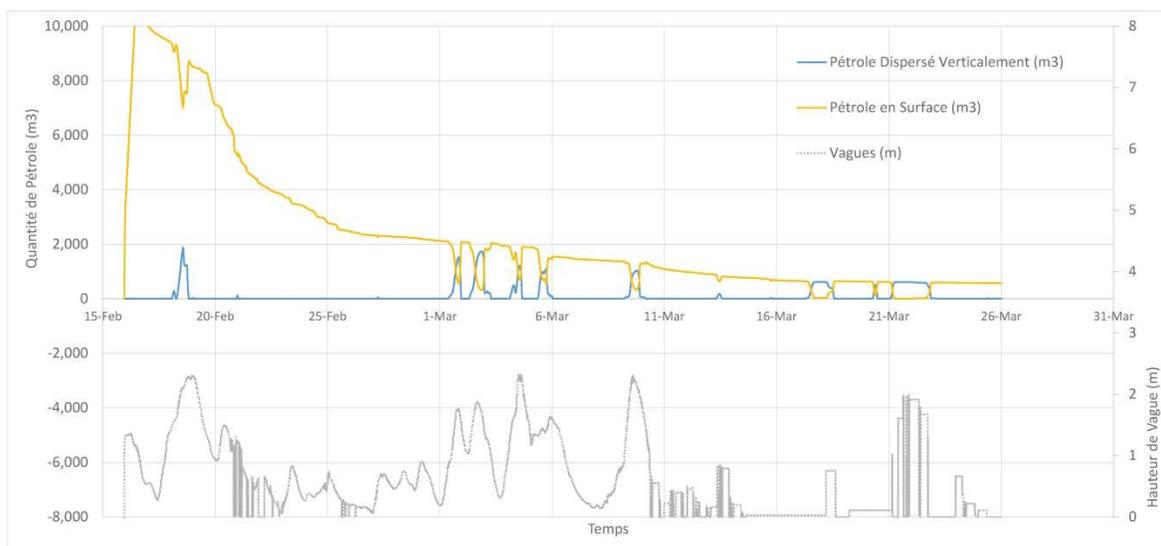


Figure 8.2 : Pétrole dispersé

Comme il est décrit dans la section sur les modules de dégradation, le pétrole peut être entraîné verticalement et se mélanger avec les couches supérieures d'eau en raison de phénomènes violents de vagues et de vents. Ces événements sont épisodiques et le pétrole remonte à la surface une fois le calme revenu. Figure 8.2 illustre ce processus. La courbe jaune représente le pétrole à la surface de l'eau et la ligne bleue représente le pétrole dispersé. La courbe en pointillés gris représente la hauteur des vagues. Ce schéma correspond à une simulation effectuée dans la région de Grand Manan. Comme on peut le constater, les pics bleus qui correspondent au pétrole dispersé sont fortement corrélés aux pics de hauteur des vagues.

De plus, la majorité des simulations réalisées au cours de l'étude stochastique montre des comportements similaires en ce qui concerne le bilan de masse. Pour éviter les répétitions et faciliter la lecture des sections qui suivent, ces points communs sont décrits ci-dessous.

- Le volume de pétrole qui est en contact avec le littoral est corrélé de manière importante, mais négative, à la proportion de pétrole qui est dégradée par évaporation. Le pétrole de type BAK s'évapore plus rapidement et en plus grande quantité que les autres types de pétrole. En toute logique, ce pétrole évaporé ne peut pas être retrouvé en contact avec le littoral. Ce qui n'est pas le cas pour les pétroles de type HSB et WCS pour lesquels une grande proportion du pétrole reste sur la surface de l'eau (c'est-à-dire, ne s'évapore pas). Ainsi, la probabilité que les pétroles de type HSB et WCS se retrouvent en contact avec le littoral est plus importante que pour d'autres types de pétrole de type BAK.
- Tous les scénarios montrent que, en moyenne, lors de la saison chaude, par rapport à la saison froide, une proportion un peu plus importante du pétrole se retrouve en contact avec le littoral.
- Selon le scénario, l'évaporation du pétrole de type BAK varie entre 24 % et 59 % du volume total. L'évaporation du pétrole de type HSB varie entre 18 % et 26 % du volume total. L'évaporation du pétrole de type WCS varie entre 10 % et 20 % du volume total.

- Dans la majorité des scénarios, après 30 jours, seule une petite proportion du pétrole reste à la surface de l'eau. Cette proportion varie entre 1 % et 9 % du volume initialement déversé.
- La proportion de pétrole qui quitte les limites du domaine d'étude est plus importante pendant la saison chaude que pendant la saison froide. Il faut cependant noter que le volume de pétrole qui quitte le modèle est extrêmement faible. En effet, dans la majorité des scénarios, seuls 1 à 3,5 % du pétrole sortent des limites du modèle.

8.3 Accidents de transport maritime

8.3.1 Petits déversements

Les scénarios d'accidents de transport maritime incluent les emplacements suivants : A1, A2, A3, A4, A5, B, C, D, E, G1, G2, MT, SJ1, SJ2(a), SJ2(b), SJ3, SJ4, SJ5, DN1, DN2, DN3, DN4, DN5, DN6(a), DN6(b), DN7, DN8, GM1, GM2, GM3, YM1, YM2. Les collisions et incidents d'échouage ont été inclus dans ce scénario. Comme il est indiqué à la section 8.0, 303 simulations ont été réalisées sur chaque site. La moitié d'entre elles correspondent à un scénario de grand déversement et l'autre moitié à un scénario de petit déversement. Ainsi, un total de 4 848 simulations indépendantes a été intégré à ce scénario. Le tableau 8.2 présente un résumé du bilan de masse du scénario Accidents de transport maritime - petits déversements.

Tableau 8.2: Scénarios de collision et échouage de pétroliers chargés partiellement ou totalement - petits déversements

Composant	Saison froide	Saison chaude	Toutes les saisons
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type BAK (en %)			
Sur la surface de l'eau	3,15	1,65	2,40
En contact avec le littoral	24,08	26,18	25,14
Évaporé	56,68	55,15	55,92
Hors des limites du modèle	0,20	1,13	0,67
Biodégradé	3,42	3,29	3,36
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	12,47	12,61	12,54
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type BAK			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	341	333	341
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	112	142	127
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	104	135	120
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	11	0	0
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type HSB (en %)			
Sur la surface de l'eau	5,31	2,87	4,09
En contact avec le littoral	51,91	52,60	52,26
Évaporé	26,15	24,36	25,26
Hors des limites du modèle	0,60	2,79	1,70
Biodégradé	6,24	6,40	6,32
Coulé	0,00	0,00	0,00

Tableau 8.2: Scénarios de collision et échouage de pétroliers chargés partiellement ou totalement - petits déversements

Composant	Saison froide	Saison chaude	Toutes les saisons
Dissous	9,80	10,99	10,40
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type HSB			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	299	359	359
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	108	143	126
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	101	136	119
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	2	0	0
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type WCS (en %)			
Sur la surface de l'eau	7,13	3,89	5,51
En contact avec le littoral	59,75	60,43	60,09
Évaporé	19,58	18,68	19,13
Hors des limites du modèle	0,73	3,47	2,10
Biodégradé	6,42	6,65	6,54
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	6,39	6,89	6,64
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type WCS			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	270	307	307
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	98	122	110
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	94	118	106
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	7	0	0
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Résumé du bilan de masse pour tous les types de pétrole (en %)			
Sur la surface de l'eau	5,20	2,80	4,00
En contact avec le littoral	45,25	46,40	45,82
Évaporé	34,14	32,73	33,44
Hors des limites du modèle	0,51	2,46	1,49
Biodégradé	5,36	5,45	5,41
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	9,55	10,16	9,86
Résumé des contacts avec le littoral (tous les types de pétrole)			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	341	359	359
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	106	136	121
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	99	128	114
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	2	0	0
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Emplacements de déversement : A1, A2, A3, A4, A5, B, C, D, E, G1, G2, MT, SJ1, SJ2(a), SJ2(b), SJ3, SJ4, SJ5, DN1, DN2, DN3, DN4, DN5, DN6(a), DN6(b), DN7, DN8, GM1, GM2, GM3, YM1, YM2			

8.3.2 Grands déversements

Les scénarios d'accidents de transport maritime incluent les emplacements suivants : A1, A2, A3, A4, A5, B, C, D, E, G1, G2, MT, SJ1, SJ2(a), SJ2(b), SJ3, SJ4, SJ5, DN1, DN2, DN3, DN4, DN5, DN6(a), DN6(b), DN7, DN8, GM1, GM2, GM3, YM1, YM2. Les collisions et incidents d'échouage ont été inclus dans ce scénario. Comme il est indiqué à la section 8.0, 303 simulations ont été réalisées sur chaque site. La moitié d'entre elles correspondent à un scénario de grand déversement et l'autre moitié à un scénario de petit déversement. Ainsi, un total de 4 848 simulations indépendantes a été intégré à ce scénario. Le tableau 8.3 présente un résumé du bilan de masse du scénario Accidents de transport maritime - grands déversements.

Tableau 8.3: Scénarios de collision et échouage de pétroliers chargés partiellement ou totalement - grands déversements

Composant	Saison froide	Saison chaude	Toutes les saisons
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type BAK (en %)			
Sur la surface de l'eau	4,09	2,28	3,19
En contact avec le littoral	23,93	25,79	24,86
Évaporé	58,99	57,17	58,08
Hors des limites du modèle	0,20	1,39	0,80
Biodégradé	3,85	3,84	3,85
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	8,95	9,53	9,24
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type BAK			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	427	417	427
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	133	176	155
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	123	166	145
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	3	0	0
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type HSB (en %)			
Sur la surface de l'eau	7,61	4,03	5,82
En contact avec le littoral	50,69	53,75	52,23
Évaporé	26,31	23,93	25,12
Hors des limites du modèle	0,37	2,59	1,48
Biodégradé	7,15	7,08	7,12
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	7,87	8,62	8,25
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type HSB			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	429	398	429
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	124	163	144
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	109	158	134
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	5	0.3	0.3
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours

Tableau 8.3: Scénarios de collision et échouage de pétroliers chargés partiellement ou totalement - grands déversements

Composant	Saison froide	Saison chaude	Toutes les saisons
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type WCS (en %)			
Sur la surface de l'eau	8,86	4,43	6,65
En contact avec le littoral	58,23	61,14	59,69
Évaporé	20,29	19,29	19,79
Hors des limites du modèle	0,67	3,22	1,95
Biodégradé	7,25	6,97	7,11
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	4,70	4,95	4,83
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type WCS			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	306	355	355
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	114	144	129
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	106	135	121
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	0.3	0	0
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Résumé du bilan de masse pour tous les types de pétrole (en %)			
Sur la surface de l'eau	6,85	3,58	5,22
En contact avec le littoral	44,29	46,90	45,61
Évaporé	35,20	33,46	34,33
Hors des limites du modèle	0,41	2,40	1,40
Biodégradé	6,08	5,96	6,02
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	7,17	7,70	7,44
Résumé des contacts avec le littoral (tous les types de pétrole)			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	429	417	429
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	124	161	143
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	114	152	133
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	0.3	0	0
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Emplacements de déversement : A1, A2, A3, A4, A5, B, C, D, E, G1, G2, MT, SJ1, SJ2(a), SJ2(b), SJ3, SJ4, SJ5, DN1, DN2, DN3, DN4, DN5, DN6(a), DN6(b), DN7, DN8, GM1, GM2, GM3, YM1, YM2			

8.4 Accidents et défaillances au terminal maritime

8.4.1 Défaillance de jetée sur chevalets

Le scénario de défaillances et d'accidents au terminal maritime se situe dans le terminal maritime nommé MT1. Le scénario de la défaillance d'une jetée sur chevalets qui représente un grand déversement, 1 786 m³, était le scénario analysé. Un total de 151 simulations indépendantes a été réalisé pour ce scénario. Le tableau 8.4 présente un résumé du bilan de masse du scénario Accidents et défaillances au terminal maritime - grands déversements.

Tableau 8.4: Défaillance de jetée sur chevalets dans un terminal maritime – grand déversement (1 786 m³)

Composant	Saison froide	Saison chaude	Toutes les saisons
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type BAK (en %)			
Sur la surface de l'eau	1,35	2,14	1,75
En contact avec le littoral	30,14	29,03	29,59
Évaporé	50,86	49,05	49,96
Hors des limites du modèle	0,01	0,03	0,02
Biodégradé	2,53	3,01	2,77
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	15,12	16,73	15,93
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type BAK			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	163	233	233
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	94	152	123
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	90	150	120
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	25	62	25
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type HSB (en %)			
Sur la surface de l'eau	3,92	1,96	2,94
En contact avec le littoral	56,14	57,90	57,01
Évaporé	23,83	23,11	23,47
Hors des limites du modèle	0,00	0,60	0,30
Biodégradé	4,36	4,47	4,42
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	11,76	11,96	11,86
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type HSB			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	232	200	232
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	101	104	103
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	77	112	95
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	40	40	40
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours

Tableau 8.4: Défaillance de jetée sur chevalets dans un terminal maritime – grand déversement (1 786 m³)

Composant	Saison froide	Saison chaude	Toutes les saisons
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type WCS (en %)			
Sur la surface de l'eau	3,34	1,52	2,43
En contact avec le littoral	66,50	68,86	67,68
Évaporé	7,40	9,40	8,40
Hors des limites du modèle	17,83	16,62	17,23
Biodégradé	0,00	0,99	0,50
Coulé	4,61	4,30	4,45
Dissous	0,00	0,00	0,00
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type WCS			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	248	318	318
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	103	111	107
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	84	94	89
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	35	28	28
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Résumé du bilan de masse pour tous les types de pétrole (en %)			
Sur la surface de l'eau	2,87	1,87	2,37
En contact avec le littoral	50,93	51,93	51,44
Évaporé	30,84	29,59	30,22
Hors des limites du modèle	0,00	0,54	0,27
Biodégradé	3,83	3,93	3,88
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	11,53	12,14	11,84
Résumé des contacts avec le littoral (tous les types de pétrole)			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	248	318	318
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	99	122	111
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	85	114	100
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	25	28	25
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Emplacement de déversement : terminal maritime			

8.4.2 Défaillance de bras de chargement

Le scénario de défaillances et d'accidents dans un terminal maritime se situe dans le terminal maritime nommé MT1. Le scénario de la défaillance du bras de chargement qui représente un petit déversement, 43 m³, était le scénario analysé. Un total de 152 simulations indépendantes a été réalisé pour ce scénario. Le tableau 8.5 présente un résumé du bilan de masse du scénario Accidents et défaillances au terminal maritime - petits déversements.

Tableau 8.5: Défaillance de bras de chargement dans un terminal maritime – petit déversement (43 m³)

Composant	Saison froide	Saison chaude	Toutes les saisons
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type BAK (en %)			
Sur la surface de l'eau	3,77	0,37	2,07
En contact avec le littoral	22,00	35,91	28,96
Évaporé	27,81	23,60	25,71
Hors des limites du modèle	0,00	0,00	0,00
Biodégradé	2,91	1,58	2,25
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	43,51	38,53	41,02
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type BAK			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	78	85	85
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	38	34	36
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	36	27	32
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	4	9	4
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type HSB (en %)			
Sur la surface de l'eau	5,60	0,91	3,26
En contact avec le littoral	45,63	48,21	46,93
Évaporé	18,16	18,56	18,36
Hors des limites du modèle	0,14	0,51	0,33
Biodégradé	4,74	4,58	4,66
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	25,72	27,21	26,47
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type HSB			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	131	128	131
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	44	70	57
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	37	71	54
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	5	8	5
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours

Tableau 8.5: Défaillance de bras de chargement dans un terminal maritime – petit déversement (43 m³)

Composant	Saison froide	Saison chaude	Toutes les saisons
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type WCS (en %)			
Sur la surface de l'eau	4,53	4,86	4,70
En contact avec le littoral	62,14	62,21	62,18
Évaporé	11,44	9,72	10,58
Hors des limites du modèle	0,00	2,79	1,40
Biodégradé	4,51	4,63	4,57
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	17,37	15,79	16,58
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type WCS			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	98	114	114
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	40	55	48
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	42	50	46
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	2	5	2
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Résumé du bilan de masse pour tous les types de pétrole (en %)			
Sur la surface de l'eau	4,64	2,05	3,35
En contact avec le littoral	43,26	48,79	46,02
Évaporé	19,14	17,29	18,22
Hors des limites du modèle	0,05	1,10	0,58
Biodégradé	4,05	3,60	3,83
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	28,87	27,18	28,03
Résumé des contacts avec le littoral (tous les types de pétrole)			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	131	128	131
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	41	53	47
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	38	49	44
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	2	5	2
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Emplacement de déversement : terminal maritime			

8.4.3 Tous accidents et défaillances confondus dans un terminal maritime

Ce scénario associe les défaillances de jetée sur chevalets et de bras de chargement dans le terminal maritime MT1. La défaillance de jetée sur chevalets représente un grand déversement de 1 786 m³ et la défaillance de bras de chargement représente un petit déversement de 43 m³. Un total de 303 simulations indépendantes a été réalisé pour ce scénario. Le tableau 8.6 présente un résumé du bilan de masse du scénario Accidents et défaillances au terminal maritime - tous incidents confondus.

Tableau 8.6: Terminal maritime - Tous incidents

Composant	Saison froide	Saison chaude	Toutes les saisons
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type BAK (en %)			
Sur la surface de l'eau	2,56	1,26	1,90
En contact avec le littoral	26,07	32,48	29,27
Évaporé	39,34	36,33	37,84
Hors des limites du modèle	< 0,01	0,02	0,01
Biodégradé	2,72	2,30	2,51
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	29,32	27,63	28,48
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type BAK			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	163	233	233
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	66	93	80
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	63	89	76
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	4	9	4
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type HSB (en %)			
Sur la surface de l'eau	4,76	1,44	3,10
En contact avec le littoral	50,89	53,06	51,97
Évaporé	21,00	20,84	20,92
Hors des limites du modèle	0,07	0,56	0,32
Biodégradé	4,55	4,53	4,54
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	18,74	19,60	19,16
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type HSB			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	232	200	232
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	73	87	80
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	57	92	75
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	5	8	5
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours

Tableau 8.6: Terminal maritime - Tous incidents

Composant	Saison froide	Saison chaude	Toutes les saisons
Résumé du bilan de masse pour le pétrole de type WCS (en %)			
Sur la surface de l'eau	3,94	3,19	3,56
En contact avec le littoral	64,33	65,54	64,94
Évaporé	14,64	13,17	13,91
Hors des limites du modèle	0,00	1,89	0,95
Biodégradé	4,56	4,47	4,52
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	12,55	11,76	12,15
Résumé du contact avec le littoral pour le pétrole de type WCS			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	248	318	318
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	72	83	78
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	63	72	68
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	2	5	2
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Résumé du bilan de masse pour tous les types de pétrole (en %)			
Sur la surface de l'eau	3,75	1,96	2,86
En contact avec le littoral	47,10	50,35	48,72
Évaporé	24,99	23,45	24,22
Hors des limites du modèle	0,04	0,82	0,43
Biodégradé	3,94	3,77	3,86
Coulé	0,00	0,00	0,00
Dissous	20,20	19,64	19,92
Résumé des contacts avec le littoral (tous les types de pétrole)			
Longueur maximale du contact avec le littoral (km)	248	318	318
Longueur moyenne du contact avec le littoral (km)	70	88	79
Longueur médiane du contact avec le littoral (km)	61	84	73
Longueur minimale du contact avec le littoral (km)	2	5	2
Durée du premier contact (jours)	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours	Moins de 6 hours
Emplacement de déversement : terminal maritime			

8.5 Cartes stochastiques récapitulatives

Différentes cartes récapitulent les résultats de cette analyse stochastique. Ces cartes décrivent la fréquence pour le littoral et la surface de l'eau d'être affecté par un incident pétrolier. Les résultats de la modélisation réalisée par Tetra Tech EBA ont été fournis à Stantec dans le cadre de l'ERSHE. Ces cartes stochastiques résument la trajectoire et l'étendue de tous les déversements et ainsi la fréquence des incidents pétroliers sur un segment de littoral ou une certaine zone de la surface de l'eau.

D'autres cartes stochastiques ont été préparées selon la répartition suivante :

- Type de pétrole : BAK, HSB et WCS
- Volume déversé : petit et grand
- Saison : plus froide (automne et hiver) ou plus chaude (printemps et été).

L'association de ces paramètres permet d'obtenir 12 cartes stochastiques pour le scénario de l'accident de transport maritime et 12 cartes pour le scénario de la défaillance de la jetée sur chevalets ou du bras de chargement dans un terminal maritime. La carte 5.2 dans l'Annexe C est un exemple de regroupement des résultats de tous les sites (au sein du port de Saint John et en dehors du port de Saint John) qui ont subi un déversement de grand volume de pétrole brut Bakken pendant la saison plus chaude. Chaque carte présente, dans le panneau supérieur gauche, la fréquence de la présence de pétrole sur le littoral et à la surface de l'eau. L'unité de durée utilisée pour représenter la fréquence est un an. Une fréquence de $1,0 \times 10^{-4}$ par an pour un segment de littoral peut être expliquée ainsi : ce segment de littoral présente une probabilité de $1,0 \times 10^{-4}$ par an ou une fois tous les 10 000 ans de subir un contact avec du pétrole (d'un point de vue statistique).

De manière assez attendue, la fréquence des incidents pétroliers est plus importante dans la zone de Saint John, où le trafic maritime est plus intense et où le mouillage, la navigation et le chargement se déroulent dans la même zone.

La même méthode a été utilisée pour récapituler les résultats stochastiques correspondant au scénario de défaillance d'un bras de chargement dans un terminal maritime.

Ces cartes ont été préparées par Stantec à partir des données fournies par Tetra Tech EBA. Une étude de l'effet du pétrole sur l'écosystème est en cours dans le cadre du rapport Stantec : Évaluation des risques environnementaux et évaluation des risques pour la santé humaine. Les cartes stochastiques sont disponibles dans l'Annexe C.

9.0 CONCLUSION

Le présent rapport rend compte d'une étude sur le devenir et le comportement de pétrole brut allant du pétrole brut léger (BAK) au pétrole lourd (WCS) dans le cas peu probable d'un déversement accidentel de pétrole dans la baie de Fundy. Cette étude a été réalisée pour le compte du projet Énergie Est et entre dans le cadre d'une étude ERSHE. L'étude ERSHE évalue les risques écologiques et humains qui pourraient survenir dans le cas d'accidents ou défaillances dans le terminal maritime proposé ou qui impliquent des pétroliers navigant dans les eaux canadiennes.

La fréquence attendue d'accidents et défaillances susceptibles d'entraîner un déversement de pétrole brut a été évaluée par la firme DNV-GL pour le terminal maritime ainsi que pour la route de navigation empruntée par les navires-citernes qui quittent le terminal. Tetra Tech EBA a, selon la description du présent rapport, ensuite réalisé des simulations de déversement à des points de déversement sélectionnés. Pour ce faire, Tetra Tech EBA a combiné un modèle de circulation hydrodynamique à trois dimensions, un modèle de vagues et un modèle de déversement de pétrole. Les trois modèles représentent des outils d'enquête de pointe. Le modèle de circulation 3D a été beaucoup utilisé dans des zones côtières et est largement validé. Le modèle de déversement de pétrole SPILLCALC intègre tous les processus pertinents qui affectent le comportement et le devenir d'un déversement de pétrole et inclut quelques nouvelles informations quantitatives sur la dégradation spécifique du bitume dilué. Le modèle de vagues, SWAN est largement utilisé dans le monde entier.

La modélisation stochastique a été intégrée avec l'exécution d'environ 10 000 simulations dans divers sites, considérant de petits et de grands volumes de pétrole et pour divers types de pétroliers et types de pétrole. Les simulations ont été effectuées durant une année civile complète, afin de prendre en compte les effets des marées, des vents et du forçage des eaux du large de l'océan Atlantique. Les résultats ont été répartis en cinq sections distinctes :

- Accidents de transport maritime :
 - Petits déversements
 - Grands déversements
- Accidents et défaillances au terminal maritime
 - Défaillance de jetée sur chevalets (grand déversement)
 - Défaillance de bras de chargement (petit déversement)
 - Tous accidents et défaillances confondus dans un terminal maritime

Pour chacune de ces sections, les résultats des simulations ont été classés selon les critères suivants :

- saison plus froide (d'octobre à mars) ou saison plus chaude (d'avril à septembre);
- type de pétrole (c.-à-d. BAK/HSB/WCS).

Les principaux résultats de la modélisation stochastique ont été les suivants :

- L'évaporation du pétrole de type BAK se situe habituellement entre 50 % et 60 %. L'évaporation de pétrole HSB se situait entre 20 % et 30 %. L'évaporation de pétrole WCS se situait entre 15 % et 20 %.
- La quantité de pétrole entrant en contact avec le rivage était fortement, mais négativement, corrélée avec la proportion de pétrole dégradée par évaporation. Le type de pétrole BAK s'évaporait plus rapidement et dans une plus grande mesure que les autres deux types de pétrole. Ce pétrole évaporé ne pouvait évidemment pas entrer en contact avec le rivage. Ce n'était pas le cas pour les types de pétrole HSB et WCS, dont une proportion importante restait sur l'eau (c.-à-d. qu'elle ne s'évaporait pas). Par conséquent, les types de pétrole HSB et WCS présentaient un potentiel plus élevé d'entrer en contact avec le rivage.
- Tous les scénarios montrent que, en moyenne, lors de la saison plus chaude, par rapport à la saison froide, une proportion un peu plus importante du pétrole se retrouve en contact avec le littoral.

Des cartes stochastiques ont été produites pour chaque scénario d'après la fréquence d'un incident sur ce site et pour ce type de navire. Les résultats de la modélisation ont été transférés à Stantec pour étayer l'étude ERSHE.

10.0 LE MOT DE LA FIN

Nous pensons que ce rapport répond à vos exigences actuelles. Pour toute question ou commentaire, veuillez contacter les signataires ci-dessous.

Présenté respectueusement par,
Tetra Tech EBA Inc.

Préparé par :

Aurelien Hospital, M.Eng., M.Sc.
Scientifique en sciences marines
Ligne directe : 778-945-5747
aurelien.hospital@tetrattech.com

Daniel Potts, P.Eng., M.Eng.
Ingénieur hydrotechnique
Ligne directe : 604-685-0275
daniel.potts@tetrattech.com

Justin Rogers, M.Sc.
Océanographe
Ligne directe : 778-945-5854
justin.rogers@tetrattech.com

Jordan Matthieu, P.Eng., M.Eng.
Ingénieur hydrotechnique
Ligne directe : 604-685-0275
jordan.matthieu@tetrattech.com

Révisé par :

Jim Stronach, P.Eng., Ph.D.
Océanographe principal
Ligne directe : 778-945-5849
jim.stronachl@tetrattech.com

AH, JAS, JR, DP, JM/ah

RÉFÉRENCES

- Afsahi, B., Kantzas, A. 2006. Advances in Diffusivity Measurement of Solvents in Oil Sands. Paper 130. Proceedings of the Canadian International petroleum Conference. Calgary (Alberta), Canada.
- Arakawa, A., Lamb, V.R. 1977. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics* 17:173-263.
- Backhaus, J.O. 1983. A semi-implicit scheme for the shallow water equations for applications to shelf sea modelling. *Continental Shelf Research* 2:243-254.
- Booij, N., Haagsma, I.J., Holthuijsen, L., Kieftenburg, A., Ris, R., van der Westhuysen, A., Zijlema, M. 2006. SWAN User Manual, Cycle III. Version 40.51. Delft University of Technology, Pays-Bas. 111 p.
- [CCME] Conseil canadien des ministres de l'environnement. 2008. Canada-Wide Standard for Petroleum Hydrocarbons (PHC) in Soil: Scientific Rationale – Supporting Technical Document.
- [DNV GL] Det Norske Veritas (USA) Inc. 2015. TERMPOL Study Report: Element 3.15 Risk Assessment. Canaport Energy East Marine Terminal Risk Studies. Rapport n° 2014-9452014-9545, rév. 5. Document n° PP136750 1-8RSPA3. 28 août 2015.
- Delvigne, G.A.L., Sweeney, C.E. 1988. Natural Dispersion of Oil. *Oil and Chemical Pollution* 4:281-310.
- Di Toro, D.M., McGrath, J.A., Stubblefield, W.A. 2007. Predicting the toxicity of neat and weathered crude oil: toxic potential and the toxicity of saturated mixtures. *Environmental Toxicology and Chemistry* 26:24-36.
- Environnement Canada. 2013. Propriétés, composition, comportement des déversements en milieu marin, devenir et transport de deux produits de bitume dilué issus des sables bitumineux canadiens. Rapport technique du gouvernement fédéral. 93 p.
- Fader, G. 2005. Erosion, Suspended Sediment and Sediment Transport Bay of Fundy. Rapport de Atlantic Marine Geological Consulting Ltd.
- Khelifa, A., Hill, P.S., Lee, K. 2005. A Comprehensive Numerical Approach to Predict Oil-Mineral Aggregate (OMA) Formation Following Oil Spills in Aquatic Environment, p. 873-877. *In: Proceedings of the International Oil Spill Conference.*
- Khelifa, A., Hill, P.S., Stoffyn-Egli, P., Lee, K. 2003. Characteristics of Oil Droplets Stabilized by Mineral Particles: The Effect of Salinity, p. 963-970. *In: Proceedings of the International Oil Spill Conference.*
- Locarnini, R.A., Mishonov, A.V., Antonov, J.I., Boyer, T.P., Garcia, H.E., Baranova, O.K., Zweng, M.M., Johnson, D.R. 2010. World Ocean Atlas 2009. Volume 1: Temperature. Volume 2: Salinity. *In: Levitus, S. (éd.) NOAA Atlas NESDIS 68. Washington (D.C.) : U.S. Government Printing Office. 184 p.*
- [MECB] Ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique. 2008. Guidelines for Air Dispersion Modelling in British Columbia. Ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique, Environmental Protection Division, Environmental Quality Branch, Air Protection Section. Mars 2008.
- MacKay, D., Leinonen, P.J. 1977. Mathematical Model of the Behaviour of Oil Spills on Water with Natural and Chemical Dispersion. EPS-3-EC-77-19. Rapport présenté au Service de la protection de l'environnement, ministère des Pêches et de l'Environnement.
- Mackay, D., Zagorsky, W. 1982. Water-in-oil emulsions: a stability hypothesis, p. 61-74. *In: Proceedings of the Fifth Arctic Marine Oilspill Program Technical Seminar. Environnement Canada.*
- Mackay, D.I., Buist, I.A., Mascarenhas, R., Paterson, S. 1980. Oil spill processes and models. Manuscript Report, Vol. EE-8. Environnement Canada, Ottawa.
- Mellor, G.L., Yamada, T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics and Space Physics* 20:851-875.

- Niu, H., Li, Z., Lee, K., Kepkey, P. 2011. Modeling the Long Term Fate of Oil-Mineral-Aggregates (OMAs) in the Marine Environment and Assessment of their Potential Risks. Proceedings of the International Oil Spill Conference.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S. 2002. Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers and Geosciences*.
- Ross, R., Buist, I. 1995. Preliminary laboratory study to determine the effect of emulsification on oilspill evaporation, p. 61-74. *In: Proceedings of the Eighteenth Arctic Marine Oilspill Program Technical Seminar*. Environnement Canada, Edmonton (Alberta).
- Saucier, F.J., Chassé, J. 2000. Tidal Circulation and Buoyancy Effects in the St. Lawrence Estuary. *Atmosphere-Ocean* 38:505-556.
- Schrama, E.J.O., Ray, R. 1994. A Preliminary Tidal Analysis of Topex/Poseidon Altimetry. *Journal of Geophysical Research* 99:24799-24808.
- Smagorinsky, J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiment. *Monthly Weather Review* 91:99-164.
- Stronach, J., Zaremba, L., Neil, L., Wong, M., McLennan, N. 2006. Wave and Current Forecast System for the Mouth of the Fraser River. *In: Ninth International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*. Du 24 au 29 septembre 2006. Victoria (Colombie-Britannique).
- Stronach, J.A., Backhaus, J.O., Murty, T.S. 1993. An update on the numerical simulation of oceanographic processes in the waters between Vancouver Island and the mainland: the GF8 model. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 31:1-86.
- Stronach, J.A., Hospital, A. 2014. The Implementation of Molecular Diffusion to Simulate the Fate and Behaviour of a Diluted Bitumen Oil Spill and its Application to Stochastic Modelling, vol. 1, p. 353-373. *In: Proceedings of the Thirty-Seventh Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar on Environmental Contamination and Response*. Environnement Canada, Ottawa (Ontario).
- Tkalich, P., Chan, E.S. 2002. Vertical mixing of oil droplets by breaking waves. *Marine Pollution Bulletin* 44:1219-1229.
- TRC. 2011. Generic Guidance and Optimum Model Settings for the CALPUFF Modeling System for Inclusion into the 'Approved Methods for the Modeling and Assessments of Air Pollutants in NSW, Australia'. Préparé pour NSW Office of Environment and Heritage, Sydney (Australie) par Jennifer Barclay et Joe Scire, Atmospheric Studies Group, TRC Environmental Corporation. Mars 2011.
- [USGS] United States Geological Survey. 2015. National Water Information System. Accès : <http://waterdata.usgs.gov/nwis> [consulté en septembre 2015].
- Watson, E.E. 1936. Mixing and Residual Currents in Tidal Waters as Illustrated in the Bay of Fundy. *Journal of the Biological Board of Canada* 2(2).
- Wilmott, C.J., Ackleson, G.S., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J., Rowe, C.M. 1981. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. *Journal of Geophysical Research* 90:8995-9005.
- Xie, H., Yapa, P.D., Nakata, K. 2007. Modeling Emulsification after an Oil Spill in the Sea. *Journal of Marine Systems* 68:489-506.
- Zaremba, L., Wang, E., Stronach, J. 2005. The physical limnology of Okanagan Lake. *In: Water – Our Limiting Resource: Towards Sustainable Water Management in the Okanagan*. Proceedings of a conference held in Kelowna Feb 23-25, 2005. Association canadienne des ressources hydriques, division de la Colombie-Britannique. ISBN : 1-896513-28-X.

ANNEXE A

ENTENTE DE SERVICE ET CONDITIONS GÉNÉRALES TETRA TECH

Ce document n'est disponible qu'en anglais car c'est un contrat comportant des signatures.

GENERAL CONDITIONS

HYDROTECHNICAL

This report incorporates and is subject to these “General Conditions”.

1.1 USE OF REPORTS AND OWNERSHIP

This report pertains to a specific site, a specific development, and a specific scope of work. The report may include plans, drawings, profiles and other supporting documents that collectively constitute the report (the “Report”).

The Report is intended for the sole use of TETRA TECH’s Client (the “Client”) as specifically identified in the TETRA TECH Services Agreement or other Contract entered into with the Client (either of which is termed the “Services Agreement” herein). TETRA TECH does not accept any responsibility for the accuracy of any of the data, analyses, recommendations or other contents of the Report when it is used or relied upon by any party other than the Client, unless authorized in writing by TETRA TECH.

Any unauthorized use of the Report is at the sole risk of the user. TETRA TECH accepts no responsibility whatsoever for any loss or damage where such loss or damage is alleged to be or, is in fact, caused by the unauthorized use of the Report.

Where TETRA TECH has expressly authorized the use of the Report by a third party (an “Authorized Party”), consideration for such authorization is the Authorized Party’s acceptance of these General Conditions as well as any limitations on liability contained in the Services Agreement with the Client (all of which is collectively termed the “Limitations on Liability”). The Authorized Party should carefully review both these General Conditions and the Services Agreement prior to making any use of the Report. Any use made of the Report by an Authorized Party constitutes the Authorized Party’s express acceptance of, and agreement to, the Limitations on Liability.

The Report and any other form or type of data or documents generated by TETRA TECH during the performance of the work are TETRA TECH’s professional work product and shall remain the copyright property of TETRA TECH.

The Report is subject to copyright and shall not be reproduced either wholly or in part without the prior, written permission of TETRA TECH. Additional copies of the Report, if required, may be obtained upon request.

1.2 ALTERNATIVE REPORT FORMAT

Where TETRA TECH submits both electronic file and hard copy versions of the Report or any drawings or other project-related documents and deliverables (collectively termed TETRA TECH’s “Instruments of Professional Service”), only the signed and/or sealed versions shall be considered final. The original signed and/or sealed version archived by TETRA TECH shall be deemed to be the original. TETRA TECH will archive the original signed and/or sealed version for a maximum period of 10 years.

Both electronic file and hard copy versions of TETRA TECH’s Instruments of Professional Service shall not, under any circumstances, be altered by any party except TETRA TECH.

TETRA TECH’s Instruments of Professional Service will be used only and exactly as submitted by TETRA TECH.

Electronic files submitted by TETRA TECH have been prepared and submitted using specific software and hardware systems. TETRA TECH makes no representation about the compatibility of these files with the Client’s current or future software and hardware systems.

1.3 STANDARD OF CARE

Services performed by TETRA TECH for the Report have been conducted in accordance with the Services Agreement, in a manner consistent with the level of skill ordinarily exercised by members of the profession currently practicing under similar conditions in the jurisdiction in which the services are provided. Professional judgment has been applied in developing the conclusions and/or recommendations provided in this Report. No warranty or guarantee, express or implied, is made concerning the test results, comments, recommendations, or any other portion of the Report.

If any error or omission is detected by the Client or an Authorized Party, the error or omission must be immediately brought to the attention of TETRA TECH.

1.4 ENVIRONMENTAL AND REGULATORY ISSUES

Unless expressly agreed to in the Services Agreement, TETRA TECH was not retained to investigate, address or consider, and has not investigated, addressed or considered any environmental or regulatory issues associated with the project.

1.5 DISCLOSURE OF INFORMATION BY CLIENT

The Client acknowledges that it has fully cooperated with TETRA TECH with respect to the provision of all available information on the past, present, and proposed conditions on the site, including historical information respecting the use of the site. The Client further acknowledges that in order for TETRA TECH to properly provide the services contracted for in the Services Agreement, TETRA TECH has relied upon the Client with respect to both the full disclosure and accuracy of any such information.

1.6 INFORMATION PROVIDED TO TETRA TECH BY OTHERS

During the performance of the work and the preparation of this Report, TETRA TECH may have relied on information provided by persons other than the Client.

While TETRA TECH endeavours to verify the accuracy of such information, TETRA TECH accepts no responsibility for the accuracy or the reliability of such information even where inaccurate or unreliable information impacts any recommendations, design or other deliverables and causes the Client or an Authorized Party loss or damage.

1.7 GENERAL LIMITATIONS OF REPORT

This Report is based solely on the conditions present and the data available to TETRA TECH at the time the Report was prepared.

The Client, and any Authorized Party, acknowledges that the Report is based on limited data and that the conclusions, opinions, and recommendations contained in the Report are the result of the application of professional judgment to such limited data.

The Report is not applicable to any other sites, nor should it be relied upon for types of development other than those to which it refers. Any variation from the site conditions present at or the development proposed as of the date of the Report requires a supplementary investigation and assessment.

It is incumbent upon the Client and any Authorized Party, to be knowledgeable of the level of risk that has been incorporated into

the project design, in consideration of the level of the hydrotechnical information that was reasonably acquired to facilitate completion of the design.

The Client acknowledges that TETRA TECH is neither qualified to, nor is it making, any recommendations with respect to the purchase, sale, investment or development of the property, the decisions on which are the sole responsibility of the Client.

1.8 JOB SITE SAFETY

TETRA TECH is only responsible for the activities of its employees on the job site and was not and will not be responsible for the supervision of any other persons whatsoever. The presence of TETRA TECH personnel on site shall not be construed in any way to relieve the Client or any other persons on site from their responsibility for job site safety.

ANNEXE B

DESCRIPTION TECHNIQUE DU MODÈLE H3D

ANNEXE B : DESCRIPTION TECHNIQUE DU MODÈLE H3D

1.0 INTRODUCTION

Le modèle H3D met en œuvre le modèle numérique élaboré par Backhaus (1983; 1985) qui a été appliqué à de nombreuses reprises sur le plateau continental européen, (Duwe *et al.*, 1983; Backhaus et Meir Reimer, 1983), dans les eaux arctiques (Kampf et Backhaus, 1999; Backhaus et Kampf, 1999) et dans les eaux estuariennes profondes, (Stronach *et al.*, 1993). H3D forme les bases du modèle mis au point par Saucier et ses collègues pour le golfe du Saint-Laurent (Saucier *et al.*, 2003), et il a également été appliqué au golfe du Mexique (Rego *et al.*, 2010). En Colombie-Britannique, le modèle H3D a été utilisé pour modéliser la structure de la distribution des températures du lac Okanagan (Stronach *et al.*, 2002), le transport de contaminants passifs dans le lac Okanagan, (Wang et Stronach, 2005), le transport des sédiments et l'érosion ou le dépôt dans le fleuve Fraser, la circulation et la propagation des ondes dans les barrages Seymour et Capilano et le mouvement salin du fleuve Fraser dans sa partie aval.

2.0 FONDEMENT THÉORIQUE

H3D est un modèle numérique tridimensionnel à pas de temps qui calcule les trois composantes de la vitesse (u , v , w) sur une grille normale en trois dimensions (x , y , z), ainsi que les champs scalaires tels que la température et les concentrations des contaminants. Le modèle utilise la grille C d'Arakawa (Arakawa et Lamb, 1977) dans l'espace et un schéma numérique semi-implicite à deux niveaux dans le domaine temporel. Le modèle H3D ressemble en plusieurs points au modèle océanique de Princeton (POM) (Blumberg et Mellor, 1987) en ce qui a trait aux équations qu'il résout, mais il se distingue dans la façon de mettre en œuvre les aspects du domaine temporel. Le modèle H3D recourt à un schéma semi-implicite, ce qui permet des pas de temps relativement grands, et il ne résout pas les modèles internes et externes séparément comme le modèle POM. En outre, il utilise un schéma de la turbulence beaucoup plus simple dans la verticale. Ces considérations combinées font que le modèle H3D permet de résoudre des problèmes complexes assez rapidement.

Les équations à résoudre sont les suivantes :

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (A1)$$

À la fin de chaque pas de temps, l'équation (A1) est utilisée pour déterminer par diagnostic la composante verticale de la vitesse (w) une fois que les deux composantes de vitesse (u et v) sont calculées par le modèle.

Quantité de mouvement en direction X :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\eta (\rho_w - \rho_0) g dz - f v \frac{\partial}{\partial x} A_H \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} A_H \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} A_V \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (A2)$$

Quantité de mouvement en direction Y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^\eta (\rho_w - \rho_o) g dz + f u - \frac{\partial}{\partial x} A_H \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} A_H \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} A_V \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (A3)$$

Niveau des eaux déterminé à partir de l'équation de continuité intégrée sur la verticale :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H}^\eta u dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H}^\eta v dz. \quad (A4)$$

L'action de la force du vent introduite par les conditions aux limites de contrainte du vent en surface :

$$\left(A_V \frac{\partial u}{\partial z}, A_V \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=\eta} = \frac{\rho_a}{\rho_w} C_{D, air} \vec{U}_{vent} \left| \vec{U}_{vent} \right|. \quad (A5)$$

L'action de la friction de fond introduite par les conditions aux limites de fond :

$$\left(A_V \frac{\partial u}{\partial z}, A_V \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=-H} = K_{fond} \vec{U}_{fond} \left| \vec{U}_{fond} \right|. \quad (A6)$$

Habituellement, le coefficient de friction de fond est réputé s'appliquer aux courants à une élévation d'un mètre au-dessus du fond. Le vecteur le plus au fond du modèle H3D se trouvera généralement à une élévation différente, c.-à-d. à mi-chemin de la cellule calculatoire la plus basse. H3D se fonde sur la « loi de la paroi » pour estimer la vitesse du flux à un mètre au-dessus du fond à partir de la vitesse modélisée près du fond.

L'évolution des scalaires, comme la salinité, la température ou les sédiments en suspension, est obtenue par l'équation du transport/de la diffusion de scalaire :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} N_H \frac{\partial S}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} N_H \frac{\partial S}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} N_V \frac{\partial S}{\partial z} = Q. \quad (A7)$$

Dans l'équation ci-dessus :

$u(x,y,z,t)$: composante de vitesse dans la direction x;

$v(x,y,z,t)$: composante de vitesse dans la direction y;

$w(x,y,z,t)$: composante de vitesse dans la direction z;

$S(x,y,z,t)$: concentration scalaire;

$Q(x,y,z,t)$: terme source pour chaque espèce scalaire;

f : paramètre de Coriolis, déterminé par la rotation terrestre et la latitude locale;

$A_H(\partial u / \partial x, \partial u / \partial y, \partial v / \partial x, \partial v / \partial y)$: viscosité tourbillonnaire horizontale;

$A_V(\partial u / \partial z, \partial v / \partial z, \partial \rho_{eau} / \partial z)$: viscosité tourbillonnaire verticale;

N_H : diffusivité turbulente horizontale;

$N_V(\partial u / \partial z, \partial v / \partial z, \partial \rho_{eau} / \partial z)$: diffusivité turbulente verticale;

$C_{D,air}$: coefficient de frottement au niveau de l'interface air-eau;

$C_{D,fond}$: coefficient de frottement au niveau de l'interface eau-fond;

ρ_a : densité de l'air;

$\rho_w(x,y,z,t)$: densité de l'eau;

ρ_o : densité de référence de l'eau;

$\eta(x,y,t)$: niveaux des eaux;

$H(x,y)$: profondeur d'eau locale.

Les équations ci-dessus sont formellement intégrées sur les petits volumes définis par la grille calculatoire et un ensemble de résultats d'équations algébriques, pour lesquels une méthodologie à pas de temps appropriée doit être établie. Backhaus (1983, 1985) présente une procédure semblable que l'on appelle méthode semi-implicite. La version à discrétisation spatiale de l'équation de continuité s'écrit comme suit :

$$\eta^{(1)} = \eta^{(0)} - \alpha \frac{\Delta t}{\Delta l} (\delta_x U^{(1)} + \delta_y V^{(1)}) - (1 - \alpha) \frac{\Delta t}{\Delta l} (\delta_x U^{(0)} + \delta_y V^{(0)}) \quad (A8)$$

où les exposants (0) et (1) se rapportent à l'heure actuelle et à l'heure avancée, δ_x et δ_y sont des opérateurs de différences spatiales, et U et V sont des vitesses intégrées verticalement. Le facteur α représente une pondération implicite qui doit être supérieure à 0,5 aux fins de stabilité numérique. $U^{(0)}$ et $V^{(0)}$ sont connus au début de chaque cycle calculatoire. $U^{(1)}$, de même que $V^{(1)}$, peuvent être exprimés par :

$$U^{(1)} = U^{(0)} - g \alpha \Delta t \eta_x^{(1)} - g (1 - \alpha) \Delta t \eta_x^{(0)} + \Delta t X^{(0)} \quad (A9)$$

où $X^{(0)}$ représente symboliquement tous les autres termes de l'équation de mouvement pour les composantes u - ou v -, qui sont évaluées au niveau temporel (0) : force de Coriolis, gradients de pression interne, termes non linéaires et contraintes hautes et basses,). Lorsque ces expressions sont intégrées dans l'équation de continuité (A4), après quelques manipulations, on obtient une équation elliptique pour $\delta_{i,k}$, le changement du niveau d'eau sur un pas de temps d'une cellule de la grille i,k (respectivement les directions y et x) :

$$\delta_{i,k} - (ce \delta_{i,k+1} + cw \delta_{i,k-1} + cn \delta_{i-1,k} + cs \delta_{i+1,k}) = Z_{i,k} \quad (A10)$$

où ce , cw , cn et cs sont des coefficients qui dépendent des profondeurs locales et du facteur de pondération (α), et où $Z_{i,k}$ représente la somme de la divergence obtenue par les vitesses au niveau temporel (0) plus une somme pondérée des niveaux d'eau adjacents au niveau temporel (0).

Une fois l'équation (A10) résolue pour $\delta_{i,k}$, le niveau d'eau peut être mis à jour :

$$\eta_{i,k}^{(1)} = \eta_{i,k}^{(0)} + \delta_{i,k} \quad (A11)$$

et l'équation (A9) peut être complétée.

À la fin de chaque pas de temps, la conservation du volume est utilisée pour calculer par diagnostic la vitesse verticale $w(j,i,k)$ à partir des deux composantes horizontales u et v .

2.1 Géométrie de grille verticale

Dans la verticale, les couches près de la surface sont relativement minces pour faciliter la résolution des dynamiques proches de la surface et s'épaississent à mesure que la profondeur augmente. De plus, le modèle est capable de prendre en compte des augmentations relativement grandes du niveau d'eau global à mesure que le niveau de l'eau monte et descend selon les débits variables entrants et sortants, en permettant la variation du nombre de couches supérieures à mesure que le niveau d'eau change. Autrement dit, à mesure que les niveaux d'eau montent dans une cellule en particulier, des couches successives au-dessus de la couche originale sont activées et s'intègrent à la maille calculatoire. De façon analogue, lorsque les niveaux descendent, les couches sont désactivées. Cette procédure s'est avérée très robuste et capable de s'adapter à toute résolution verticale raisonnable dans les eaux proches de la surface. En ce qui concerne la modélisation de minces panaches fluviaux dans des zones de grande amplitude de marée, l'approche selon le nombre variable de couches assure un meilleur contrôle quant à la résolution verticale que ne le fait la méthode de la coordonnée σ .

En plus des marées, le modèle peut saisir la réponse importante aux phénomènes dus au vent, en ce qui a trait aux courants amplifiés et au mélange vertical. On y arrive en appliquant la tension du vent sur chaque point de grille de surface à chaque pas de temps. Ensuite, le mélange vertical dans le modèle redistribue cette quantité de mouvement horizontal sur toute la colonne d'eau. De même, le flux de chaleur à travers la surface de l'eau est redistribué par la turbulence et les courants dans les simulations de température.

2.2 Fermeture de la turbulence

La modélisation de la turbulence est essentielle à la détermination de la distribution appropriée de la vitesse et des scalaires dans le modèle. Les coefficients de diffusion pour la quantité de mouvement (A_H et A_V) et les scalaires (N_H et N_V) à chaque cellule calculatoire sont dépendants du niveau de turbulence à ce point donné. Le modèle H3D utilise une formule de turbulence dépendante du cisaillement dans l'horizontale, (Smagorinsky, 1963). La forme de base est la suivante :

$$A_H = A_{H0} dx dy \sqrt{\left(\frac{du}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dy}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} \quad (A12)$$

Le paramètre A_{H0} est une variable d'ajustement sans dimension, et l'expérience démontre qu'elle se situe dans la plage entre 0,1 et 1,0 pour la majorité des plans d'eau tels que les rivières, les lacs et les estuaires.

Une formule qui dépend du cisaillement et de la stratification, le modèle de niveau 2, Mellor et Yamada (1982), est utilisée pour la diffusivité turbulente verticale. La théorie de base de la formule de viscosité verticale est inspirée d'un ouvrage de Mellor et Durbin de 1975. L'évaluation de l'échelle de longueur est basée sur une méthode présentée par Mellor et Yamada (1982).

Pour les scalaires, les diffusivités horizontale et verticale sont considérées similaires à leurs viscosités tourbillonnaires équivalentes, mais elles sont mises à l'échelle selon un rapport fixe tiré des valeurs de viscosité tourbillonnaire. Les différents rapports sont utilisés pour les diffusivités horizontale et verticale. Si les données sont disponibles pour l'étalonnage, ces rapports peuvent être corrigés en fonction des comparaisons entre les données modélisées et observées. Autrement, on utilise des valeurs standard basées sur des expériences effectuées sur des plans d'eau similaires déjà modélisés.

2.3 Transport de scalaire

L'équation de transport de scalaire établit un algorithme à correction de flux (Zalesak, 1979), dans lequel tous les flux sur les côtés de chaque cellule calculatoire sont d'abord calculés selon la méthode de deuxième ordre. Bien que cette méthode soit généralement plus précise que la méthode de premier ordre, les calculs de flux de deuxième ordre peuvent parfois mener à des oscillations haute fréquence non désirées dans la solution numérique. Pour déterminer si une telle situation est en train de se développer, le modèle examine chaque cellule pour voir si le flux de deuxième ordre calculé est susceptible d'entraîner l'apparition d'un minimum ou d'un maximum local. Devant un tel cas, tous les flux en direction ou en provenance de cette cellule sont remplacés par des flux de premier ordre et le calcul est terminé. Comme il est mentionné, la méthode n'applique pas fidèlement la démarche de Zalesak, mais elle est beaucoup plus rapide et fournit une excellente performance relativement à la propagation d'une distribution gaussienne au moyen d'une maille calculatoire. Elle ne propage pas des distributions moyennes (box-car) aussi bien que la démarche complète de Zalesak, mais elle produit des simulations réalistes des advections de scalaires dans les lacs, les rivières et les estuaires, ce qui est l'objectif du modèle. Comme il est présenté, ce schéma est un bon compromis entre la précision et le délai d'exécution, ce qui est primordial puisque dans de nombreuses situations qui comportent plus d'un scalaire, l'algorithme de transport-diffusion peut prendre jusqu'à plus de la moitié du délai d'exécution.

2.4 Flux de chaleur au niveau de l'interface air-eau

La contribution du flux de chaleur à l'évolution du champ de température de l'eau peut être représentée par le schéma suivant :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\Delta Q}{\rho * c_p * h}$$

où ΔQ est le flux de chaleur net par unité de surface contenu dans une couche particulière, ρ est la densité de l'eau, c_p est la capacité calorifique de l'eau et h est l'épaisseur de la couche.

Le flux de chaleur au niveau de l'interface air-eau intègre les termes suivants :

Q_{in} : rayonnement incident de courtes longueurs d'onde. Généralement, on n'obtient pas ce terme à partir d'observations directes et il est estimé selon l'observation des couvertures nuageuses et de l'opacité aux stations à proximité, un calcul théorique du rayonnement dans la couche supérieure de l'atmosphère basé sur la géométrie des points de Lagrange (Terre autour du soleil) et une correction empirique basée sur les mesures de rayonnement à l'aéroport de Vancouver et à l'Université de la Colombie-Britannique, respectivement pour la période de 1974 à 1977. Cette procédure s'est avérée efficace pour de nombreux plans d'eau, notamment le lac

Okanagan et les eaux au large de la côte nord de la Colombie-Britannique, en ce qui a trait à la capacité du modèle H3D de reproduire la répartition des températures observées dans l'espace et dans le temps. Les valeurs pour l'albédo qui sont fonction de la hauteur du soleil sont tirées de Kondratyev (1972).

$Q_{\text{rétro}}$ rayonnement net de grandes longueurs d'onde, calculé selon Gill (1982), impliquant la dépendance habituelle de la température à la puissance quatre, un facteur de 0,985 pour inclure le comportement de corps non noir de l'océan, un facteur qui dépend de la pression de vapeur pour prévoir les pertes découlant du rayonnement de retour de l'humidité dans l'air, et un facteur représentant la rétrodiffusion par les nuages.

Q_L et Q_H : flux de chaleur latente et sensible. Le flux de chaleur latente (Q_L) constitue la chaleur évacuée par le processus d'évaporation de l'eau. Le flux de chaleur sensible (Q_S) est provoqué par la différence de température air-eau et s'apparente à la conduction, mais il est favorisé par la turbulence dans l'air. Les flux de chaleur latente et sensible sont décrits comme suit :

$$Q_L = 1,32e^{-3} * L * \text{vitesse du vent} * (q_{\text{obs}} - q_{\text{sat}}) * \text{facteur_latent}$$

$$Q_S = 1,46e^{-3} * \rho_{\text{air}} * c_p * \text{vitesse du vent} * (T_{\text{air}} - T_{\text{eau}}) * \text{facteur_sensible}$$

où q_{obs} et q_{sat} sont les humidités spécifiques observées et saturées, T_{air} et T_{eau} sont les températures de l'air et de l'eau, L est la chaleur latente de l'évaporation de l'eau, et c_p est la capacité calorifique de l'eau. Les valeurs « *facteur_latent* » et « *facteur_sensible* » sont des facteurs scalaires introduits pour représenter les facteurs locaux, ils peuvent être corrigés, au besoin, pour arriver à un étalonnage supérieur du modèle. Généralement, la correction se limite au « *facteur_sensible* » qui est doublé lorsque la température de l'air est inférieure à celle de l'eau ou la température de surface de glace afin de tenir compte de la turbulence accrue dans une colonne d'air instable.

Absorption de la lumière dans la colonne d'eau. À mesure que la lumière traverse la colonne d'eau, elle est absorbée et l'énergie ainsi absorbée constitue une composante du bilan énergétique qui agit sur la température de l'eau. Le modèle H3D suppose que l'atténuation de la lumière est assujettie à une loi de décroissance exponentielle :

$$E(z) = E(z_0) * e^{-k*(z-z_0)}$$

Le modèle calcule l'énergie dans la partie supérieure et inférieure de chaque couche et la différence est appliquée à l'équation de chaleur générale de cette couche. Le coefficient d'atténuation (k) est lié à la profondeur d'après la profondeur de Secchi (D_s) comme suit :

$$k = \frac{2,1}{D_s}$$

La température est traitée comme tout autre scalaire dans la mesure où cela concerne l'advection et la diffusion. À l'heure actuelle, le flux de chaleur au niveau de l'interface air-sédiment n'est pas encore intégré au modèle H3D.

3.0 VALIDATION

Trois validations font l'objet des discussions ci-dessous.

3.1 Marée du Détroit de Georgia/de la pointe Atkinson : Propagation des ondes

La préoccupation majeure d'un modèle de circulation tel que le modèle H3D touche son efficacité à propager les ondes qui constituent les porteurs d'information à l'échelle du système. La figure A-1 illustre les résultats de la simulation des marées dans le détroit de Georgia et le détroit de Juan de Fuca, avec les élévations de marées prescrites à l'entrée du détroit Juan de Fuca et à la section nord de l'île Texada dans le détroit de Georgia. Les dynamiques complexes des passages du Nord, par exemple le passage Discovery et le passage Seymour, sont ainsi évitées, ce qui permet de tester les capacités de propagation des ondes du modèle H3D. La figure illustre le niveau d'eau modélisé à la pointe Atkinson en rouge et le niveau d'eau observé en noir. Outre une légère différence découlant de petits phénomènes d'ondes de tempêtes, la concordance est presque parfaite. Cette validation démontre que le choix du schéma de grille (grille Arakawa de type C) et l'approche de pas de temps semi-implicite ont produit un système capable de propager avec précision l'information à travers un plan d'eau.

3.2 Profils de température du Lac Okanagan

L'obtention d'une bonne reproduction de la structure des températures évoluant selon les saisons sur un lac indique que le flux de chaleur sur toute l'interface air-eau est paramétré avec précision et que les processus de transport-diffusion se produisant dans la colonne d'eau sont également aussi précisément reproduits par le modèle. La figure A-2 illustre une comparaison des profils des températures observées et calculées à l'extrémité nord du lac Okanagan près de Vernon, en avril, en août, en octobre et en décembre 1997. La concordance est excellente puisque le modèle a reproduit la transition à partir d'une condition bien brassée au printemps jusqu'au développement d'une forte thermocline durant l'été, la profondeur de la couche supérieure au cours de la période de refroidissement automnale et le retour aux conditions isothermes hivernales. Il y a de fortes chances que le modèle H3D réussisse à calculer des répartitions précises de températures dans les plans d'eau pourvu que les données météorologiques appropriées soient accessibles. Dans le cas de cette simulation, les données météorologiques ont été obtenues de l'aéroport de Penticton : vents, pivotés de façon à suivre le talweg de la vallée; couverture nuageuse, température de l'air et humidité relative.

3.3 Réponse de la thermistance : Lac Okanagan

Le Lac Okanagan fait l'objet d'importantes fluctuations dans la structure thermique verticale au cours de la période de stratification estivale. La figure A-3 illustre une série temporelle de température à un site du côté nord du pont William R. Bennett qui présente de grandes augmentations de température sur des périodes d'environ 60 heures ou 2,5 jours. La figure A-4 illustre la série temporelle modélisée de la température à trois profondeurs choisies, 51 m, 21 m et 9 m. L'occurrence et l'ampleur des variations de la température sont généralement prévues par le modèle, mais la reproduction n'est pas parfaite : l'occurrence et le moment des phénomènes de température sont assez bons, mais les crêtes modélisées semblent être réparties plus largement dans le temps. Le comportement simulé a révélé des différences importantes selon que les vents à l'aéroport de Kelowna, situé dans le versant de la vallée, étaient inclus ou non dans le modèle. En revanche, il est certain que le modèle H3D arrive à reproduire les seiches sur un lac, à condition d'utiliser la résolution spatiale appropriée. Cela est particulièrement évident lorsque les ondes internes cohérentes qui se propagent le long du lac sont examinées selon un profil en long, illustré en deux instantanés à partir d'une simulation modélisée d'un tel phénomène dans la figure A-5.

RÉFÉRENCES

- Arakawa, A., Lamb, V.R. 1977. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics* 17:173-263.
- Backhaus, J.O. 1983. A semi-implicit scheme for the shallow water equations for applications to shelf sea modelling. *Continental Shelf Research* 2:243-254.
- Backhaus, J.O. 1985. A three-dimensional model for the simulation of shelf-sea dynamics. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* 38:165-187.
- Backhaus, J.O., Kampf, J. 1999. Simulation of sub-mesoscale oceanic convection and ice-ocean interactions in the Greenland Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 46:1427-1455.
- Backhaus, J.O., Meir-Reimer, E. 1983. On seasonal circulation patterns in the North Sea, p. 63-84. In: Sundermann, J., Lenz, W. (éd.) North Sea Dynamics. Heidelberg (Allemagne) : Springer-Verlag.
- Blumberg, A.F., Mellor, G.L. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, p. 1-16. In: Heaps, N.S. (éd.) Three-Dimensional Coastal Ocean Models. American Geophysical Union, Washington (district de Columbia).
- Duwe, K.C., Hewer, R.R., Backhaus, J.O. 1983. Results of a semi-implicit two-step method for the simulation of markedly non-linear flow in coastal seas. *Continental Shelf Research* 2:255-274.
- Friehe, C.A., Schmitt, K.F. 1976. Parameterization of air-sea interface fluxes of sensible heat and moisture by the bulk aerodynamic formulas. *Journal of Physical Oceanography* 76:801-805.
- Kampf, J., Backhaus, J.O. 1999. Ice-ocean interactions during shallow convection under conditions of steady winds: three-dimensional numerical studies. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 46:1335-1355.
- Kondratyev, K.Y. 1972. Radiation Processes in the Atmosphere. N° 309. Organisation météorologique mondiale.
- Mellor, G.L., Durbin, P.A. 1975. The structure and dynamics of the ocean surface mixed layer. *Journal of Physical Oceanography* 5:718-728.
- Mellor, G.L., Yamada, T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics and Space Physics* 20:851-875.
- Nezhikhovskiy, R.A. 1964. Coefficients of roughness of bottom surface of slush-ice cover. *Soviet Hydrology: Selected Papers* 2:127-150.
- Rego, J.L., Meselhe, E., Stronach, J., Habib, E. Numerical Modeling of the Mississippi-Atchafalaya Rivers' Sediment Transport and Fate: Considerations for Diversion Scenarios. *Journal of Coastal Research* 26:212-229.
- Saucier, F.J., Roy, F., Gilbert, D., Pellerin, P., Ritchie, H. 2003. The formation of water masses and sea ice in the Gulf of St. Lawrence. *Journal of Geophysical Research* 108:(C8):3269-3289.
- Smagorinsky, J. 1963. General circulation experiments with primitive equations I. The basic experiment. *Monthly Weather Review* 91:91-164.
- Stronach, J.A., Backhaus, J.O., Murty, T.S. 1993. An update on the numerical simulation of oceanographic processes in the waters between Vancouver Island and the mainland: the G8 model. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 31:1-86.
- Stronach, J.A., Mulligan, R.P., Soderholm, H., Draho, R., Degen, D. 2002. Okanagan Lake Limnology: Helping to Improve Water Quality and Safety. *Innovation, Journal of the Association of Professional Engineers and Geoscientists of BC*. Novembre 2002.

- Wang, E., Stronach, J.A. 2005. Summerland Water Intake Feasibility Study, p. 256-269. *In: Water – Our Limiting Resource. Proceedings of a conference held in Kelowna Feb 23-25, 2005. Association canadienne des ressources hydriques, division de la Colombie-Britannique.*
- Zalesak, S.T. 1979. Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids. *Journal of Computational Physics* 31:335-362.

