

Risque relatif de contamination par région lors de déversements d'hydrocarbures dans le golfe du Saint-Laurent

Denis Lefavre, Simon St-Onge Drouin, Alain D'Astous et Simon Senneville

Direction régionale des Sciences
Pêches et Océans Canada
Institut Maurice-Lamontagne
C.P. 1000, 850, route de la Mer
Mont-Joli (Québec) G5H 3Z4

2020

Rapport technique canadien sur l'hydrographie et les sciences océaniques 330

Rapport technique canadien sur l'hydrographie et les sciences océaniques

Les rapports techniques contiennent des renseignements scientifiques et techniques qui constituent une contribution aux connaissances actuelles mais que l'on ne trouve pas normalement dans les revues scientifiques. Le sujet est généralement rattaché aux programmes et intérêts des secteurs des Océans et des Sciences de Pêches et Océans Canada.

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

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

Les établissements de l'ancien secteur des Sciences et Levés océaniques dans les régions et à l'administration centrale ont cessé de publier leurs diverses séries de rapports en décembre 1981. Vous trouverez dans l'index des publications du volume 38 du *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, la liste de ces publications ainsi que le dernier numéro paru dans chaque catégorie. La nouvelle série a commencé avec la publication du rapport numéro 1 en janvier 1982.

Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences

Technical reports contain scientific and technical information of a type that represents a contribution to existing knowledge but which is not normally found in the primary literature. The subject matter is generally related to programs and interests of the Oceans and Science sectors of Fisheries and Oceans Canada.

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

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

Regional and headquarters establishments of Ocean Science and Surveys ceased publication of their various report series as of December 1981. A complete listing of these publications and the last number issued under each title are published in the *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Volume 38: Index to Publications 1981. The current series began with Report Number 1 in January 1982.

Rapport technique canadien sur
l'hydrographie et les sciences océaniques 330

2020

Risque relatif de contamination par région lors de déversements d'hydrocarbures dans le
golfe du Saint-Laurent

Denis Lefaiivre¹, Simon St-Onge Drouin¹, Alain D'Astous¹ et Simon Senneville²

¹ Direction régionale des Sciences, Pêches et Océans Canada, Institut Maurice-Lamontagne, C.P. 1000,
850, route de la Mer, Mont-Joli, Québec G5H 3Z4

² Université du Québec à Rimouski

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2020.
Cat. No. Fs97-18/330F-PDF ISBN 978-0-660-33990-0 ISSN 1488-5484

On devra citer la publication comme suit :

Lefaiivre, D., St-Onge Drouin, S., D'Astous, A. et Senneville, S., 2020. Risque relatif de contamination par région lors de déversements d'hydrocarbures dans le golfe du Saint-Laurent. Rapp. tech. can. hydrogr. sci. océan. 330 : v + 12 p.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT.....	iv
PRÉFACE.....	v
CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ÉTUDE	1
MÉTHODOLOGIE.....	1
PATRON DE DÉVERSEMENT ET DÉRIVE DE SURFACE	1
LE MODÈLE OCÉANIQUE	2
CALCUL DE LA DÉRIVE D'HYDROCARBURES	2
TRAJECTOIRES	3
RÉSULTATS	4
PARTICULES EN PLEINE EAU APRÈS 8 JOURS.....	5
PARTICULES ÉCHOUÉES SUR UNE RIVE	6
ANALYSE ET DISCUSSION	8
CAS HISTORIQUES DE DÉVERSEMENT	9
FAITS SAILLANTS	11
REMERCIEMENTS.....	11
RÉFÉRENCES	12

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Exemple de courants de surface sur la grille du modèle océanique.	4
Figure 2. Nombre de particules par catégorie par année.	5
Figure 3. Variation spatiale de la concentration relative des particules en pleine eau après 8 jours.	6
Figure 4. Risque relatif par région.	8

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Moyenne annuelle du nombre de particules par catégorie.....	4
Tableau 2. Risque relatif par région.....	7
Tableau 3. Liste de cas de déversements	9

RÉSUMÉ

Lefavre, D., St-Onge Drouin, S., D'Astous, A., et Senneville, S. 2020. Risque relatif de contamination par région lors de déversements d'hydrocarbures dans le golfe du Saint-Laurent. Rapp. tech. can. hydrogr. sci. océan. 330 : v + 12 p.

Le risque potentiel en cas de déversement d'hydrocarbures n'est pas uniformément distribué pour toutes les côtes mais ce risque peut être évalué en modélisation. À l'aide de reproductions annuelles des conditions océanographiques de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, la trajectoire des particules représentant un déversement d'hydrocarbures sur l'ensemble du golfe a été calculée pour la période 2001-2010. Les particules ont été relâchées dans la couche de surface d'un modèle de circulation à trois dimensions, sur chaque cellule de la grille du modèle pendant la période libre de glace. Les particules ont dérivé sous l'action des courants et des vents pendant 8 jours. Les principales conclusions sont : a) En majorité, les particules (94%) sont encore dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent; b) Les côtes sont à risque puisque 41% des particules s'échouent; c) Toutes les côtes de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent sont à risque. Cependant, les îles du golfe sont plus exposées ainsi que les régions au sud et à l'est; d) La moitié des particules (52%) sont encore à l'eau; e) Il y a peu de variations dans l'analyse des résultats d'une année à l'autre. Maintenant que le risque pour chacune des régions est identifié, il sera possible de planifier le déploiement des navires pour récupérer un déversement d'hydrocarbures, mais également de concevoir des systèmes de protection pour les côtes présentant des vulnérabilités plus élevées.

ABSTRACT

Lefavre, D., St-Onge Drouin, S., D'Astous, A., et Senneville, S. 2020. Risque relatif de contamination par région lors de déversements d'hydrocarbures dans le golfe du Saint-Laurent. Rapp. tech. can. hydrogr. sci. océan. 330 : v + 12 p.

The potential risk associated with hydrocarbon spill is not spatially uniform for all coastlines but can be quantified with modeling. Using annual hindcasts of the oceanographic conditions of the Estuary and Gulf of St. Lawrence, the trajectory of particles that mimic a Gulf-wide uniform hydrocarbon spill was computed for the period 2001-2010. The particles were released in the surface layer of a three-dimension circulation model on each grid cell of the model during the ice-free period. The particles drifted from the action of currents and winds for 8 days. The main conclusions are: a) Most of the particles (94%) are still in the Estuary and Gulf of St. Lawrence. b) The coastlines are at risk because 41% of the particles ground. c) All coastline of the Estuary and Gulf of St. Lawrence are at risk. However, the islands in the Gulf are more exposed as well as the regions to the south and to the east. d) Half of the particles (52%) are still in the water. e) The results are similar from one year to another. Now that the risk for all regions has been assessed, it will be possible to plan ship deployment to aid recovery of spilled hydrocarbons and to design protection schemes for coastlines with higher vulnerabilities.

PRÉFACE

Ce rapport est dédié aux personnes des ministères fédéraux d'Environnement et Changement climatique Canada, de Transports Canada et de Pêches et Océans Canada (Garde côtière canadienne et la Direction des Sciences) qui ont contribué à la préparation et au renflouage de la barge *Irving Whale*.

CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ÉTUDE

Cette étude est produite dans le cadre d'une initiative du gouvernement du Canada visant à mettre en place un système de sécurité de classe mondiale pour les navires-citernes (SSCMNC). Cette initiative est orientée autour de trois axes :

- 1- Prévention des déversements;
- 2- Préparation et intervention;
- 3- Responsabilité et indemnisation.

La présente étude se situe dans le second élément, en particulier au sein du sous-élément suivant : Capacité de réponse en gestion de risque et temps de réponse en cas d'incident. Les résultats seront utilisés pour la planification et comme outil de prise de décision dans le cadre des mesures de récupération des hydrocarbures après un déversement. De plus, Pêches et Océans Canada a également pour mandat d'identifier les milieux côtiers vulnérables en vue de protéger les espèces et habitats advenant un déversement d'hydrocarbures. Le but de cette étude est d'identifier les régions les plus susceptibles de recevoir des hydrocarbures déversés en vue de permettre de planifier le déploiement des navires pour récupérer un déversement d'hydrocarbures, mais également de concevoir des systèmes de protection pour les côtes présentant des vulnérabilités plus élevées dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent.

Un autre résultat de l'initiative du SSCMNC est une publication qui accompagne celle-ci, soit l'État des connaissances sur le devenir et le comportement des déversements pétroliers qui proviennent de navires dans la voie maritime du Saint-Laurent, de Montréal à l'île d'Anticosti (Ryan et al., 2019). Celle-ci décrit la bathymétrie, la circulation océanique, la salinité et la température de l'eau dans le fleuve et l'estuaire du Saint-Laurent en plus de fournir une partie du contexte au présent travail.

Enfin, ce travail sera utile pour la suite de l'initiative du SSCMNC qui se poursuit dans le cadre du Plan de protection des océans (PPO). Deux sous-volets du PPO pourraient bénéficier des résultats de cette étude, soient: 1- Caractérisation des écosystèmes côtiers et 2- Planification pour une intervention environnementale intégrée. Pour la caractérisation, six zones pilotes ont été identifiées au Canada. La direction des Sciences de Pêches et Océans Canada, région du Québec est responsable de la mise en place de cette initiative pour la rive nord de l'estuaire du Saint-Laurent entre l'embouchure du Saguenay et Pointe-des-Monts, la région 3 du présent travail. Pour la planification d'une intervention environnementale intégrée, la zone d'étude couvre l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent au Québec.

MÉTHODOLOGIE

PATRON DE DÉVERSEMENT ET DÉRIVE DE SURFACE

La première étape a été de choisir le patron de déversement. Intuitivement, les déversements d'hydrocarbures ont toutes les chances de se produire dans le chenal de navigation puisque c'est la voie

empruntée par les navires. D'autre part, l'expérience nous indique que les navires qui sont en difficulté sortent de la voie navigable pour tenter de rejoindre un port. Les déversements qui sont le résultat d'un échouage ou d'un incendie ont lieu souvent lorsque le navire se dirige vers la côte. En résumé, il n'y a pas de lieu privilégié pour les déversements. Afin d'éviter à avoir à justifier le choix d'un scénario par rapport à un autre et afin de produire des résultats indépendants des choix de scénario, il a été décidé d'effectuer des déversements sur l'ensemble du golfe. Toute différence de quantité d'hydrocarbures qui s'échoue sur une rive spécifique sera le résultat des forçages qui agissent sur les hydrocarbures en mer, sans dépendre du point de départ spécifique du déversement.

L'objet de l'étude est de calculer les trajectoires des hydrocarbures durant leur dérive en surface. La durée de chaque trajectoire a été fixée à 8 jours, basée sur deux facteurs. Premièrement, le pétrole brut s'émulsionne et pénètre dans la colonne d'eau après 8 jours. Deuxièmement, l'étude de King et al. (2014) montre qu'au cours de la même période de 8 jours, le bitume dilué subit un changement de densité et devient moins flottant avec une densité proche de celle de l'eau de mer et se mélange plus facilement dans la colonne d'eau. Il convient donc d'arrêter le calcul de la dérive de surface après 8 jours, car les hydrocarbures ne sont plus à la surface. Après cette période, il est nécessaire d'utiliser les résultats complets de la modélisation tridimensionnelle pour suivre le mélange des hydrocarbures dans la colonne d'eau en fonction de sa nature et des propriétés de l'océan (température, salinité, courants, mélange vertical). Cet aspect, qui inclut le devenir et le comportement des hydrocarbures, fera l'objet d'une étude distincte. Nous avons exclu de cette étude la période hivernale. Le comportement des hydrocarbures dans la glace de mer fera également partie d'une autre étude.

LE MODÈLE OCÉANIQUE

Les courants de surface ont été calculés pour la période 2001-2010 en utilisant un modèle tridimensionnel de circulation océanique du golfe du Saint-Laurent (Saucier et al., 2003, 2009), ci-après appelé le modèle océanique. Le modèle océanique est entraîné par les débits d'eau douce observés du fleuve Saint-Laurent et d'autres affluents, les marées, la température et la salinité de l'eau aux détroits de Cabot et de Belle-Isle, et par les forçages atmosphériques (vents de surface, température de l'air, couverture nuageuse, précipitation et température du point de rosée sur une grille de 24 km) fournis par le modèle global environnemental multiéchelle (GEM) du Service météorologique du Canada, Environnement et Changement climatique Canada. Pour les besoins de cette étude, le modèle océanique a été exécuté en mode reproduction pour obtenir les valeurs de courant de surface. Une sortie typique des courants de surface est illustrée à la Figure 1. La reproduction comprend les valeurs horaires des courants, des niveaux d'eau, de la température et de la salinité en trois dimensions, sur une grille horizontale de 5 km avec des couches verticales de 5 à 20 mètres à partir desquelles le courant de surface est extrait.

CALCUL DE LA DÉRIVE D'HYDROCARBURES

Pour calculer l'advection d'hydrocarbures, des particules sont ajoutées à la couche de surface du modèle océanique. Les particules sont passives et transportées selon la technique de Runge-Kutta du 4^e

ordre (Kloeden et Platen, 1992) dans le champ de courants de surface, auquel est ajoutée la valeur de 3% de la vitesse du vent local et dans la même direction. Cette intensification des courants de surface est nécessaire car le forçage du vent est moyenné sur la première couche du modèle océanique qui a une épaisseur de 5 m. Le facteur de 3% représente l'influence du vent tout à la surface qui agit sur les hydrocarbures déversés. Il a été validé par des observations effectuées à l'aide d'une bouée de surface munie d'une voile aux profondeurs de 0,5 m (2,1% du vent) et de 1,5 m (0,5% du vent) (Gendron et al., 2018) et extrapolé à la surface conformément à la théorie (Ekman, 1905).

TRAJECTOIRES

En utilisant le calcul de la dérive décrit ci-dessus, les trajectoires sont calculées de la façon suivante. Une particule est relâchée à chaque point de la grille du modèle (grille de 5 km), à toutes les trois heures, pendant la période libre de glace, du premier avril au 31 décembre, de 2001 à 2010, soit 10 années, pour un total de 22.7 millions de particules par année. La position de chacune des particules est enregistrée à toutes les heures au cours des simulations. Le choix de l'intervalle de 3 heures a été fait pour gagner du temps de calcul car des tests de sensibilité ont démontré que la différence dans les résultats entre un relâchement aux 3 heures et un relâchement horaire n'était pas significatif. Une trajectoire individuelle donnée se termine soit après 8 jours de calcul, soit lorsque la particule s'échoue sur une plage, soit lorsqu'elle sort du golfe (hors de la zone de calcul du modèle) par le détroit de Cabot ou de Belle-Isle.

La trajectoire de chacune des particules est enregistrée aux heures et les particules sont comptabilisées sous trois catégories :

- 1) Particules en pleine eau.
- 2) Particules échouées sur une rive.
- 3) Particules sorties du golfe.

Lorsqu'une particule touche une côte, la trajectoire est interrompue et on enregistre sa position. Le nombre de particules échouées pour chaque cellule (5 km par 5 km) de côte est compté. La position des particules encore à l'eau après 8 jours est enregistrée et leur nombre par cellule est comptabilisé. Celles qui sortent du golfe sont simplement comptées.

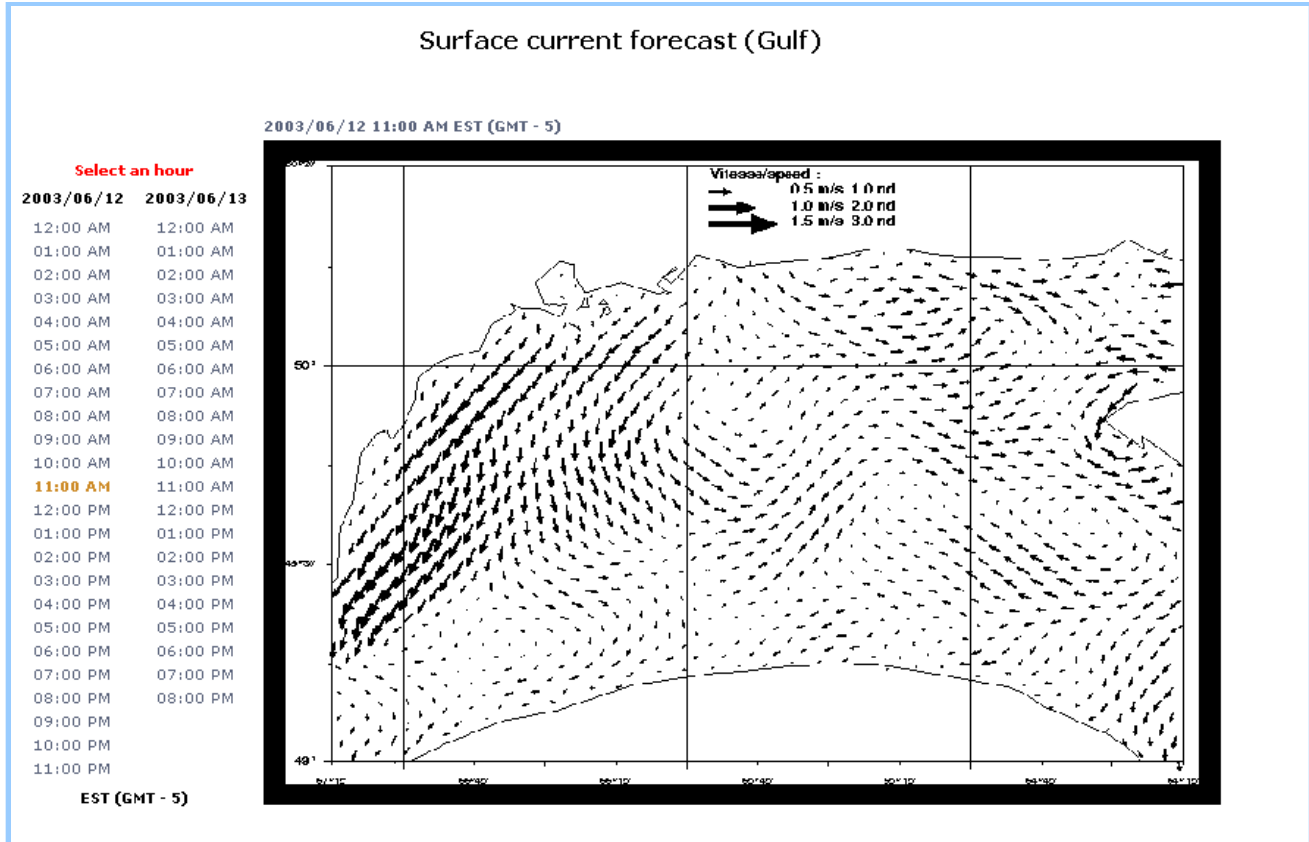


Figure 1. Exemple de courants de surface sur la grille du modèle océanique.

RÉSULTATS

Après 8 jours de dérive, pour les 10 années de simulation, les valeurs par catégorie sont affichées au Tableau 1 et la variation annuelle est illustrée à la figure 2. La déviation standard autour de la moyenne annuelle est affichée pour chacune des catégories. Ces valeurs sont petites et montrent qu'il y a peu de variation entre les années.

Tableau 1. Moyenne annuelle du nombre de particules par catégorie.

État des particules	Nombre de particules (Million)	Déviati on Standard (Million)	Proportion (%)
En pleine eau	11.90	0.15	52.4
Échouées sur une rive	9.40	0.20	41.4
Sorties du golfe	1.40	0.13	6.2
Total	22.70		

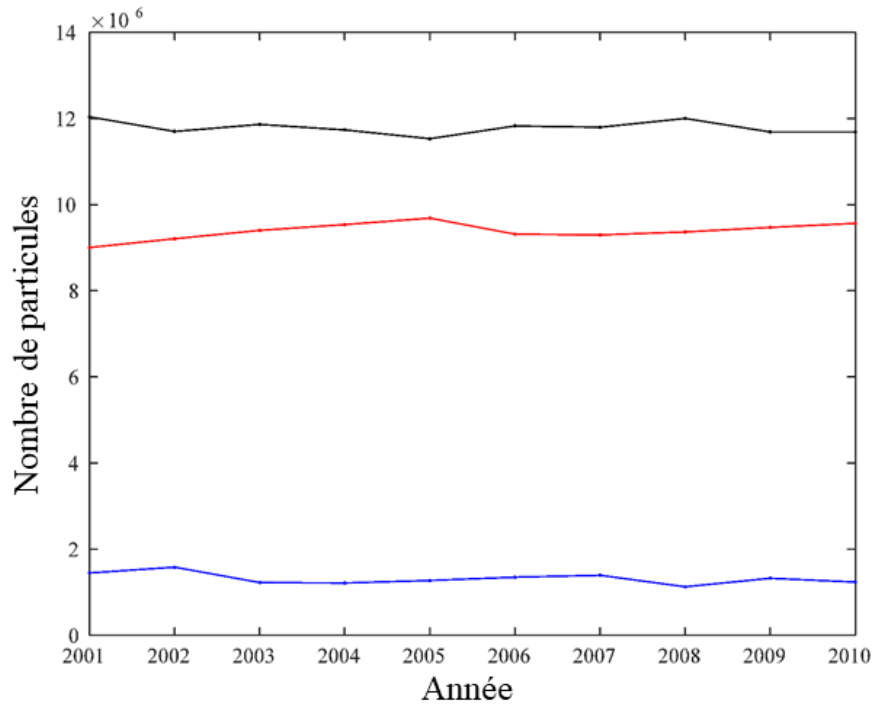


Figure 2. Nombre de particules par catégorie par année. Le nombre de particules encore en pleine eau est indiqué sur la courbe supérieure en noir, les particules échouées sur un rivage, sur la courbe centrale en rouge et les particules sorties du golfe, sur la courbe inférieure en bleu.

PARTICULES EN PLEINE EAU APRÈS 8 JOURS

La variation spatiale de la concentration des particules en pleine eau après 8 jours est présentée à la figure 3 en écart par rapport à la moyenne. Le nombre de particules de chacune des cellules est divisé par la valeur moyenne de toutes les cellules pour la période 2001-2010. L'échelle de couleur va de bleu (plus petit que la moyenne) à jaune (plus grand que la moyenne). Les valeurs supérieures à la moyenne apparaissent clairement pour les régions au sud et à l'est du golfe du Saint-Laurent.

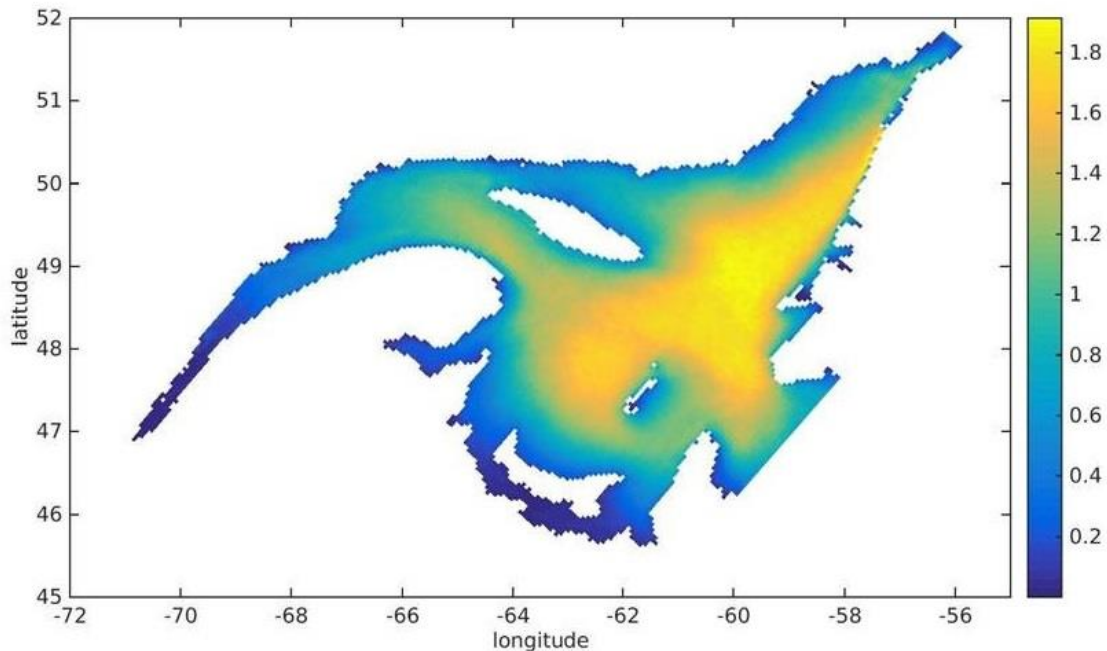


Figure 3. Variation spatiale de la concentration relative des particules en pleine eau après 8 jours.

PARTICULES ÉCHOUÉES SUR UNE RIVE

Les rives du golfe du Saint-Laurent ont été divisées en régions répertoriées dans le tableau 2. Le nombre total de particules échouées (en million) par région au cours de la période 2001-2010 est indiqué dans la colonne 4. Avec le nombre de cellules pour chacune des régions à la colonne 3, la densité moyenne de particules par région est calculée et affichée à la colonne 5, avec son écart type à la colonne 6, soit la variabilité interannuelle. Le risque relatif dans la colonne 7 est le rapport entre la densité moyenne de la région et la densité moyenne pour toutes les régions. Enfin, le rang du risque relatif pour chacune des régions est affiché en colonne 8. Pour les régions 20 et 21, le nombre de particules d'une cellule à la frontière a été partagé entre les deux.

Le risque relatif par région, pour la période 2001-2010, est présenté à la figure 4. Les lignes fines délimitent les régions du Tableau 2, en bleu pour les valeurs du risque relatif inférieures à un et en rouge pour les valeurs supérieures à un. Les valeurs ajoutées à la figure représentent le risque relatif pour la région identifiée en traits fins. Les valeurs supérieures à la moyenne apparaissent clairement pour les régions au sud et à l'est du golfe du Saint-Laurent. Par souci de clarté sur la figure, il y a des différences entre les valeurs du Tableau 2 et celles de la figure. La valeur pour la région 17 n'est pas affichée et c'est la valeur moyenne des régions 6 et 9, soit 0.71, qui apparaît sur la figure. Soulignons une sous-région qui n'apparaît pas à cette échelle. C'est le cas de l'île Brion, au nord de l'archipel des îles de la Madeleine. Elle se distingue par une valeur de 7,70 soit la valeur la plus élevée de toutes les côtes.

Tableau 2. Risque relatif par région.

Numéro de la région	Région	Nombre de cellules	Nombre de particules (Million)	Densité moyenne par cellule (Millier)	Déviati on standard (Millier)	Risque relatif	Rang
1	Québec au Saguenay	25	0.3	12.5	9.7	0.18	21
2	Québec à l'île Verte	25	0.5	18.9	10.1	0.28	20
3	Saguenay à Pointe-des-Monts	82	2	24.3	11.8	0.35	17
4	Pointe-des-Monts à Sept-Îles	53	2.4	45.5	17.9	0.66	13
5	L'île Verte à Rivière-au-Renard	117	8.2	70.3	24.1	1.02	8
6	Rivière-au-Renard à Percé	28	1.5	51.9	24.6	0.76	12
7	Campbelton à New Carlisle	19	0.4	22.5	10.9	0.33	18
8	Campbelton à Belledune	16	0.3	20.5	10.9	0.30	19
9	New Carlisle à Percé	28	1.2	44.5	19.2	0.65	14
10	Belledune à Miscou	54	3.1	57.5	29.4	0.84	10
11	Sept-Îles à Blanc Sablon	222	11.8	53	11.7	0.77	11
12	Île d'Anticosti, rive nord	53	4.5	84.4	37.7	1.23	6
13	Île d'Anticosti, rive sud	64	7.9	123.3	47.3	1.80	3
14	Terre-Neuve, rive ouest	228	24.5	107.5	32.9	1.57	4
15	Miscou au détroit de Canso	116	4	34.2	13.7	0.50	16
16	Île du Cap-Breton, rive ouest	48	5.9	123.4	54.8	1.80	2
17	Île du Cap-Breton, rive est	32	1.2	37.3	12.4	0.54	15
18	Île du Prince-Edouard, rive sud	59	3.5	60	32.4	0.87	9
19	Île du Prince-Edouard, rive nord	64	5.2	80.5	35.1	1.17	7
20	Îles de la Madeleine, rive nord-ouest	12.5	3.4	270.8	33.7	3.94	1
21	Îles de la Madeleine, rive sud-est	24.5	2.3	95.5	23.4	1.39	5
Moyenne			4.48	68.5	24.0		

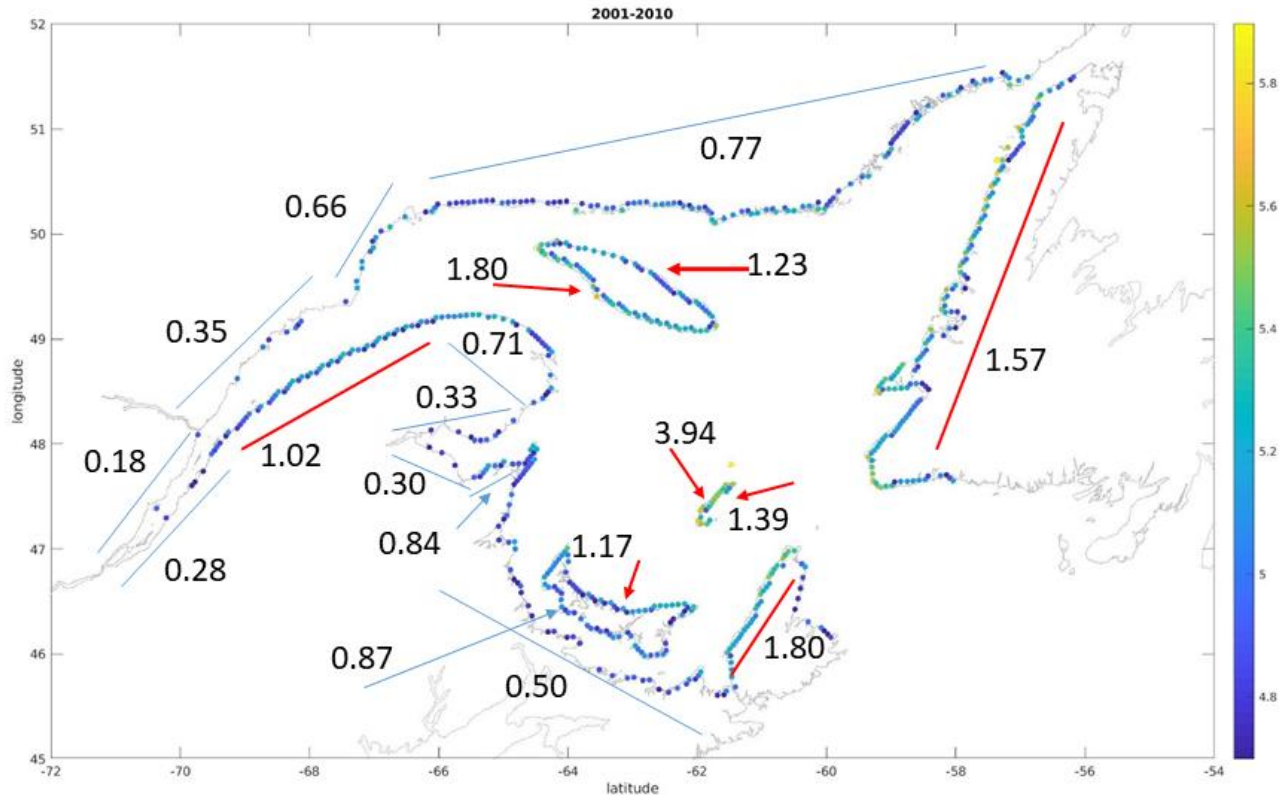


Figure 4. Risque relatif par région. L'échelle de couleur s'applique à la côte et fait référence au nombre total de particules échouées, sur une échelle logarithmique, en base 10. Les nombres inférieurs à 50 000 sont masqués pour conserver une échelle de couleur appropriée.

ANALYSE ET DISCUSSION

Les valeurs supérieures à la moyenne du risque relatif apparaissent clairement pour les régions au sud et à l'est du golfe du Saint-Laurent. Ce résultat est valable autant pour les particules en pleine eau que celles échouées sur une rive. C'est le résultat des deux principaux forçages, vents et flux d'eau douce, sur les courants de surface, les marées ayant un effet résiduel limité à l'échelle du golfe. Premièrement, les vents dominants sont d'ouest. Deuxièmement, les eaux douces du fleuve Saint-Laurent et des autres rivières suivent la rive sud de la pointe est de l'île d'Orléans jusqu'à l'embouchure du Saguenay, longent la péninsule gaspésienne, puis se dirigent vers le détroit de Cabot par les îles de la Madeleine. L'influence de ces forçages sur les courants de surface est clairement illustrée à la figure 3 avec les particules dans l'eau après 8 jours.

Pour qu'un déversement d'hydrocarbures touche une rive, il faut l'action du vent, sinon les courants suivent les lignes de bathymétrie constante. Les vents soufflent principalement de l'ouest, soit du

nord-ouest ou du sud-ouest. Cependant, les vents du nord-est ou du sud-est sont fréquents et souvent de forte intensité. Le résultat est que toutes les rives sont à risque d'être touchées par un déversement. Cependant, étant donné le patron illustré à la figure 3, où l'on voit un plus grand nombre de particules dans le sud et l'est du golfe du Saint-Laurent, on constate que ce sont les rives adjacentes qui courent le plus grand risque. Les côtes les plus à l'ouest sont celles les plus à risque : l'île d'Anticosti, la péninsule gaspésienne (rive nord), la rive ouest de Terre-Neuve, l'île du Cap-Breton (rive ouest), l'île du Prince-Édouard (rive nord). Enfin, les deux côtes des îles de la Madeleine présentent le risque le plus élevé. La déviation standard moyenne de la densité moyenne par cellule est relativement faible, soit 24 000, par rapport à la moyenne des densités qui est de 68 500. Le rapport entre la déviation standard et la densité moyenne par cellule (non affiché) est relativement constant (35.0%) avec des variations non significatives d'une région à l'autre sauf pour les régions 1 et 20. La région 1, de Québec au fjord du Saguenay sur la rive nord, est la région la moins à risque (0.18) de voir un déversement atteindre ses côtes mais avec la plus grande variabilité relative (77.6%). À l'autre extrême, la région 20, l'archipel des îles de la Madeleine côté nord-ouest, est le plus à risque (3.94) de voir un déversement atteindre ses côtes et avec la plus faible variabilité relative (12.4%).

CAS HISTORIQUES DE DÉVERSEMENT

Comment se compare l'évaluation des régions à risque du présent document avec un échantillon de cas historiques présentés au Tableau 3?

Tableau 3. Liste de cas de déversements

Navire	Date	Quantité déversée (1000 l)	Nature du produit	Position	Région touchée
<i>Irving Whale</i>	1970-09-07	4270	Bunker C, BPC	47° 22.15' N 63° 19.77' O	20, 19 et 16
<i>Czantoria</i>	1988-05-08	320	Pétrole Brut léger	46° 46.85' N 71° 12.48' O	1 et 2
<i>Rio Orinoco</i>	1990-10-16	200	Bunker C	49° 44.42' N 64° 13.52' O	13

Le déversement le plus important a eu lieu en 1970. La barge *Irving Whale* était remorquée de Halifax (Nouvelle-Écosse) pour se rendre à Bathurst (Nouveau-Brunswick). Elle transportait du Bunker C qui était gardé liquide par une canalisation chauffée remplie d'Aroclor 1242, un chlorobenzène (BPC). Elle a coulé à 60 km au nord de North Point (île du Prince-Édouard) et à 100 km à l'ouest des îles de la Madeleine. Les hydrocarbures déversés, le Bunker C et les BPC, ont touché principalement la rive ouest des îles de la Madeleine au moment du naufrage. Au cours des années qui ont suivi et jusqu'à son renflouement le 30 juillet 1996, de petites quantités d'hydrocarbures se sont échappées pour contaminer à

nouveau les îles de la Madeleine (région 20) mais aussi la rive nord de l'île du Prince-Édouard (région 19) et la rive ouest de l'île du Cap-Breton (région 16) (Gilbert et al., 1996, 1998; Riche, 2002). Ces trois régions correspondent aux côtes qui présentent les risques les plus élevés, soient les rangs 1, 2 et 7 respectivement.

Le second cas a eu lieu en 1988. Le navire Czantoria a raté son accostage au terminal pétrolier Ultramar de Lévis, maintenant connu sous le nom de raffinerie Jean-Gaulin. Deux caissons ont été déchirés et le pétrole brut léger s'est déversé. La consigne d'accoster à marée haute avait bien été respectée et les hydrocarbures n'ont pas remonté vers le pont de Québec. Ils se sont écoulés vers l'île d'Orléans. Les hydrocarbures ont été déversés en eau relativement profonde, soit dans plus de 10 mètres, le long du quai qui s'avance dans le fleuve. C'était une journée sans vent, ce qui fait que le produit déversé a suivi la ligne d'eau profonde et a longé la rive sans y toucher. Les courants induits par le débit d'eau douce et les marées l'ont poussé par le chenal au sud de l'île d'Orléans puis à travers les îles situées en aval. Au cours des deux jours qui ont suivi, les vents légers ont poussé les hydrocarbures vers l'île aux Ruaux et la rive nord de l'île aux Grues, puis à l'île aux Coudres. Durant la nuit du troisième jour, de forts vents du sud-ouest ont entraîné les hydrocarbures dans la colonne d'eau (Division de l'habitat du poisson, 1988). Après cet incident, le transport des hydrocarbures par pétrolier sans double coque a été interdit dans le fleuve Saint-Laurent. Ce cas a permis de valider deux de nos hypothèses. La première est qu'en l'absence de vents, des hydrocarbures déversés ne touchent pas la rive. Deuxièmement, ce sont les îles qui sont les plus exposées. Il suffit d'un vent léger pour qu'un déversement atteigne leurs rives. Finalement, on constate que les régions 1 et 2 ont été peu affectées par ce déversement, en accord avec notre évaluation avec un rang de 21 et de 20 respectivement, donc avec le plus faible risque.

Le troisième cas a eu lieu en 1990. Le navire Rio Orinoco a connu une panne de moteur alors qu'il traversait le golfe. Les vents d'ouest l'ont déporté vers l'île d'Anticosti. Il s'est échoué et sa coque s'est ouverte sous l'effet des vagues. Les hydrocarbures de Bunker C qui servaient de combustible pour le moteur se sont déversés. La cargaison d'asphalte ne s'est pas écoulée du navire en raison de sa grande viscosité. Il a fallu un an pour le renflouer en raison de l'éloignement et de la saison hivernale qui s'était installée. Des hydrocarbures se sont écoulés sur la rive de l'île pendant toute cette période. Dans ce cas-ci, ce ne sont pas les hydrocarbures qui ont été poussés par les vents, mais bien le navire lui-même qui, par la suite, s'est brisé sur la rive. Le résultat est le même, la rive sud de l'île d'Anticosti (région 13) est bien une région qui a un risque élevé de recevoir des hydrocarbures. Cette région occupe le 3^e rang du plus grand risque, *ex aequo* avec la rive ouest de l'île du Cap-Breton (région 16).

En conclusion, même s'il n'y a qu'un nombre limité de cas historiques, les déversements qui ont eu lieu ont confirmé que les côtes touchées sont les plus à risque parmi les régions identifiées dans cette analyse.

Maintenant que le risque pour chacune des régions est identifié, il sera possible de planifier le déploiement des navires pour récupérer un déversement d'hydrocarbures, mais également de concevoir des systèmes de protection pour les côtes présentant des vulnérabilités plus élevées.

FAITS SAILLANTS

- Après 8 jours de dérive, la majorité des particules (94%) étaient encore dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Seulement 6% sont sorties par un des deux détroits.
- Les côtes sont à risque puisque 41% des particules s'échouent en dedans de 8 jours.
- Toutes les régions de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent sont à risque lors d'un déversement d'hydrocarbures. Cependant, les îles du golfe (îles de la Madeleine, île d'Anticosti, île du Prince-Edouard et île du Cap-Breton) ainsi que les régions au sud (rive nord de la Gaspésie) et à l'est (rive ouest de Terre-Neuve) sont les plus exposées.
- La moitié des particules (52%) sont encore à l'eau après 8 jours de dérive. Les ressources marines dans la colonne d'eau et au fond sont à risque puisque les hydrocarbures sont entraînés dans la colonne d'eau avant de toucher une rive, avec un risque plus grand dans les régions au sud et à l'est du golfe du Saint-Laurent.
- Il y a peu de variations dans l'analyse des résultats d'une année à l'autre.

REMERCIEMENTS

Ce rapport a été financé en partie par le programme sur le Système de sécurité de classe mondiale pour les navires-citernes / World Class Tanker Safety System (SSCMNC/WCTSS) du gouvernement du Canada.

RÉFÉRENCES

- Ekman, V.W., 1905. On the influence of earth's rotation on ocean currents. *Arkiv. Matem., Astr. Fysik*, Stockholm 2(11): 1–52.
- Division de l'habitat du poisson, Pêches et Océans Canada, 1988. Déversement pétrolier au quai d'Ultramar - Une opération d'urgence. *EntreFilets*, Vol. 9, No 8, août 1988: 3-4.
- Environment and Climate Change Canada (<http://weather.gc.ca/> et <http://geo.weather.gc.ca/geomet-beta>)
- Gendron, L., Lefaivre, D. et Sainte-Marie, B., 2018. Local egg production and larval losses to advection contribute to explain interannual and long-term variability of American lobster *Homarus americanus* settlement intensity. *Can. J. Fish. Aquat.* 76 (3): 350-363.
- Gilbert, M. et Walsh, G. (éditeurs), 1996. Conséquences potentielles d'un déversement de BPC provenant de la barge *Irving Whale* sur le milieu marin du golfe du Saint-Laurent. *Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat.* 2113 : xiv + 62 p.
- Gilbert, M. Alexander, M.R., Arsenault, J., Ernst, W.R., Fairchild, W., Hennigar, P., Julien, G., King, T., Lebeuf, M. et Lefaivre, D., 1998. Contamination par les BPC des sédiments et du crabe des neiges (*Chionoecetes opilio*) aux environs du site du naufrage de la barge *Irving Whale* après son renflouage. *Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat.* 2204: x + 32 p.
- King, T.L., Robinson, B., Boufadel, M. et Lee, K., 2014. Flume Tank Studies to elucidate fate and behaviour of diluted bitumen spilled at sea. *Marine Pollution Bulletin* 83: 32-37.
- Kloeden, P.E., et Platen, E., 1992. Higher-order implicit strong numerical schemes for stochastic differential-equations. *J. Stat. Phys.* 66(1–2): 283–314.
- Riche, O., 2002. Étude de la génération des ondes inertielles en fonction des variations du vent sur le plateau madelinien. Thèse de M.Sc., ISMER, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Qué. : xviii + 109 p.
- Ryan, S.A., Wohlgeschaffen, G., Jahan, N., Niu, H., Ortmann, A.C., Brown, T.N., King, T.L., et Clyburne, J., 2019. State of Knowledge on Fate and Behaviour of Ship-Source Petroleum Product Spills: Volume 4, St. Lawrence Seaway, Montreal to Anticosti, Québec. *Can. Manuscr. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 3176: viii + 42 p.
- Saucier, F.J., Roy, F., Gilbert, D., Pellerin, P., and Ritchie, H., 2003. Modeling the formation and circulation processes of water masses and sea ice in the Gulf of St. Lawrence, *J. Geophys. Res. C* 108(C8) : 3269-3289.
- Saucier, F.J., Roy, F., Senneville, S., Smith, G., Lefaivre, D., Zakardjian, B. et Dumais, J.-F., 2009. Modélisation de la circulation dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en réponse aux variations du débit d'eau douce et des vents. *Rev. Sci. Eau* 22(2): 159–176.