

Évaluation scientifique de la contamination par les BPC des sédiments et du biote autour du lieu du nauffrage de la barge *Irving Whale*

Rapport de situation

Pêches et Océans Canada
Direction des Sciences
Région Laurentienne et Région des Maritimes

et

Environnement Canada
Direction de la protection de l'environnement
Région Atlantique

25 mars 1997



Pêches
et Océans

Sciences
Fisheries
and Oceans

Science



Environnement
Canada
Environment
Canada

PRÉFACE

Le présent document constitue un rapport de situation sur l'évaluation scientifique de la contamination par les BPC aux environs du site où la barge *Irving Whale* a coulé en septembre 1970, dans le sud du golfe du Saint-Laurent. Bien que l'épave ait été renflouée avec succès en juillet 1996, des BPC provenant de l'*Irving Whale* sont toujours présents dans les sédiments locaux malgré les opérations de décontamination effectuées immédiatement après la récupération de la barge. Ce rapport de situation présente une estimation de la quantité totale de BPC récupérés de la barge et au cours des opérations de décontamination qui ont suivi, et résume les données scientifiques recueillies jusqu'à maintenant sur la contamination par les BPC des sédiments et du biote aux environs du site de la barge avant et après son renflouage. À partir de cette information, une évaluation du devenir possible des BPC provenant de la barge et qui ont été perdus dans l'environnement est fournie, avec une discussion sur l'importance de la contamination par les BPC aux environs du site. Cette discussion est axée sur la fermeture locale de la pêche et sur la décision qui sera prise à savoir si une décontamination des sédiments au site est requise ou non.

L'interprétation scientifique des données recueillies jusqu'à maintenant et présentées dans ce document n'est que provisoire. Des informations additionnelles sont requises pour une évaluation complète de la contamination par les BPC aux environs du site du naufrage de l'*Irving Whale*. Des recommandations sont faites pour un échantillonnage additionnel au printemps 1997 de même que pour un programme de suivi à long terme afin de suivre l'évolution temporelle des concentrations de BPC dans les sédiments locaux et le biote.

ÉQUIPE DE TRAVAIL

Direction	R. Alexander (MPO – Maritimes) W.R. Ernst (MDE – Atlantique) J. Piuze (MPO – Laurentienne)	
Préparation et édition (MPO)	M. Gilbert (Laurentienne)	
Contributeurs (MPO)	J. Arsenault (Maritimes) J. Bunch (Administration centrale) W. Fairchild (Maritimes) B. Hargrave (Maritimes) G. Harding (Maritimes)	T.L. King (Maritimes) M. Lebeuf (Laurentienne) D. Lefaivre (Laurentienne) G. Walsh (Laurentienne) V. Zitko (Maritimes)
Contributeurs (MDE)	H. Hall (Atlantique) P. Hennigar (Atlantique)	R. Mroz (Atlantique)

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	i
ÉQUIPE DE TRAVAIL	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES ANNEXES	viii
RÉSUMÉ	ix
RÉSUMÉ ÉTENDU	x
1. INTRODUCTION	1
2. RÉCUPÉRATION DE L' <i>IRVING WHALE</i>	2
2.1 Sommaire des opérations de renflouage	2
2.2 Transport et nettoyage de la barge	3
2.2.1 Enlèvement de l'amiante	3
2.2.2 Dénoyage des salles des pompes et des machines et des citernes	3
2.2.3 Récupération du fluide contenant des BPC (Therminol)	4
2.2.4 Nettoyage des salles des pompes et des machines	4
2.2.5 Nettoyage du coqueron avant, du gaillard avant et du puits aux chaînes ...	5
2.2.6 Vidanges des citernes n ^{os} 1, 2 et 3	5
2.2.7 Vidange de la citerne n ^o 4 (sections bâbord et tribord)	5
2.2.8 Nettoyage des citernes	6
2.2.9 Enlèvement des conduites du système de chauffage des citernes	6
2.3 Décontamination au site après le renflouage	6
2.4 Quantité totale de BPC récupérés avec le renflouage	8
3. CONTAMINATION PAR LES BPC AUTOUR DU SITE DE L' <i>IRVING WHALE</i>	9
3.1 Sédiments	9
3.1.1 Pré-renflouage	9
3.1.2 Post-renflouage	10
3.1.2.1 Plan d'échantillonnage et analyses	10
3.1.2.2 Résultats	11
3.1.3 Charge totale en BPC des sédiments	14
3.2 Biote	16

3.2.1	Pré-renflouage	16
3.2.2	Post-renflouage	17
3.2.2.1	Plan d'échantillonnage et analyse	17
3.2.2.2	Résultats	18
3.2.3	Contamination des amphipodes par les BPC aux environs du site de l' <i>Irving Whale</i>	20
4.	DISCUSSION	21
4.1	Bilan net des BPC initialement présents dans la barge	21
4.2	Devenir possible des BPC manquants	23
4.3	Travaux de recherche en cours dans le golfe du Saint-Laurent	24
4.4	Contamination locale par les BPC et décontamination additionnelle potentielle	25
4.4.1	Bioaccumulation et toxicologie reliées à la contamination par les BPC dans les sédiments	25
4.4.2	Critères de qualité des sédiments et décontamination	26
4.4.3	Impacts potentiels de la contamination par les BPC dans les sédiments aux environs du site de l' <i>Irving Whale</i>	27
4.4.3.1	Impacts potentiels en l'absence de décontamination	28
4.4.3.2	Impacts potentiels avec une décontamination additionnelle	29
4.4.3.3	Conditions préalables à la décontamination	30
4.5	Importance de la contamination du crabe des neiges pour la fermeture locale de la pêche	30
5.	RECOMMANDATIONS POUR UN ÉCHANTILLONNAGE ADDITIONNEL ET UN PROGRAMME DE SUIVI	31
5.1	Échantillonnage additionnel au printemps 1997	31
5.1.1	Sédiments	31
5.1.2	Biote	32
5.2	Programme de suivi à long terme	33
5.2.1	Sédiments	34
5.2.2	Biote	34
6.	REMERCIEMENTS	35
7.	BIBLIOGRAPHIE	35
	ANNEXES	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Sommaire des déchets contaminés aux BPC récupérés avec le renflouage de l' <i>Irving Whale</i>	8
Tableau 2. Concentrations de BPC dans la glande digestive et le muscle d'échantillons de crabe des neiges récoltés en octobre 1996 autour du site de l' <i>Irving Whale</i> . . .	18
Tableau 3. Concentrations moyennes de BPC ($\pm$ écart-type) dans des échantillons regroupés d'amphipodes entiers récoltés aux environs du site de l' <i>Irving Whale</i> en 1995 et 1996, et dans des amphipodes et du gaspateau (appât) provenant d'un site de référence en 1996.	21
Tableau 4. Bilan net des BPC initialement présents dans le système de chauffage en circuit fermé de l' <i>Irving Whale</i>	22

LISTE DES FIGURES

- Figure 1. Localisation du site où la barge *Irving Whale* a coulé en septembre 1970, dans le sud-ouest du golfe du Saint-Laurent 1
- Figure 2. Variations spatiales de la concentration en BPC dans les sédiments de surface autour du site de l'*Irving Whale* avant son renflouage, à partir d'échantillons récoltés de mai à juillet 1996 9
- Figure 3. Variations spatiales de la concentration des BPC dans les sédiments autour du site de l'*Irving Whale* après son renflouage et les opérations de décontamination, à partir d'échantillons récoltés en août, octobre, et août et octobre combinés 12
- Figure 4. Variations de la concentrations des BPC dans les sédiments en fonction de la distance de l'*Irving Whale* avant et après son renflouage, à partir d'échantillons récoltés en 1996 13
- Figure 5. Variations de la concentration de BPC en fonction de la profondeur dans les carottes de sédiments récoltées autour du site de l'*Irving Whale* après son renflouage, en août (pré- et post-décontamination) de même qu'en octobre 1996 à l'intérieur et à l'extérieur des zones décontaminées 13
- Figure 6. Variations spatiales de l'épaisseur des sédiments autour du site de l'*Irving Whale*, à partir de mesures effectuées en octobre 1996 14
- Figure 7. Variations spatiales de l'inventaire des BPC dans les sédiments aux environs du site de l'*Irving Whale*, et charges totale et cumulative (parenthèses), surface et volume de sédiments pour chaque intervalle logarithmique décroissant de l'inventaire, à partir d'échantillons récoltés en octobre 1996 15
- Figure 8. Variations spatiales de l'inventaire des BPC dans les sédiments aux environs du site de l'*Irving Whale*, et charges totale et cumulative (parenthèses), surface et volume de sédiments pour chaque intervalle logarithmique décroissant de l'inventaire, à partir d'échantillons récoltés en octobre 1996 16
- Figure 9. Variations spatiales de la concentration de BPC dans la glande digestive de crabes de neiges prélevés aux environs du site de l'*Irving Whale* en octobre 1996 . 19
- Figure 10. Projection de divers mélanges commerciaux de BPC et d'échantillons de crabe de neiges prélevés aux environs du site de l'*Irving Whale* en octobre 1996, sur les deux premières composantes principales de la variabilité de leur composition pour 58 congénères de BPC 19

Figure 11. Localisation des stations où des carottes de sédiments ont été prélevées en novembre et décembre 1996 dans le golfe du Saint-Laurent, dans le cadre d'un projet de recherche sur les BPC dans les sédiments du golfe	24
Figure 12. Stations d'échantillonnage proposées pour l'évaluation de la contamination par les BPC dans les sédiments aux environs du site de l' <i>Irving Whale</i> au printemps 1997	32
Figure 13. Algorithme d'étalement des sédiment, à partir d'observations à l'Anse-à-Beaufils, Québec	50
Figure 14. Concentrations de BPC et épaisseur des sédiments prévues aux environs du site de l' <i>Irving Whale</i> pour le printemps de 1997, selon des cartes de distributions construites à partir de grilles de 10 × 10 m calculées sur la base d'échantillons de sédiments prélevés en août et octobre 1996	51

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Concentrations de BPC dans les échantillons de sédiments récoltés aux environs du site de l' <i>Irving Whale</i> avant son renflouage de mai à juillet 1996	39
Annexe 2. Concentrations de BPC dans les échantillons de sédiments superficiels récoltés aux environs de l' <i>Irving Whale</i> après son renflouage en août 1996	41
Annexe 3. Épaisseur de sédiment, contenu en eau, et concentrations de BPC dans les échantillons de sédiments récoltés aux environs du site de l' <i>Irving Whale</i> aux mois de septembre et octobre 1996	43
Annexe 4. Estimation de la charge totale en BPC dans les sédiments	47
Annexe 5. Prévision du transport des sédiments au site de l' <i>Irving Whale</i> pour 1997	49

RÉSUMÉ

Le 30 juillet 1996, près de 26 ans après son naufrage dans le sud du golfe du Saint-Laurent en septembre 1970, la barge *Irving Whale* a été renflouée avec succès. Le nettoyage de la barge et les premiers efforts de décontamination des sédiments au site après les opérations de renflouage ont permis de récupérer 1 966 kg de BPC (Aroclor 1242) sur les 7 520 kg qui se trouvaient initialement dans le système de chauffage de la cargaison de l'*Irving Whale*. L'analyse des BPC dans les échantillons de sédiments prélevés avant et après le renflouage de la barge, ainsi qu'en octobre 1996, ont révélé une hausse des concentrations après les opérations de renflouage. Cependant, cette hausse de la contamination par les BPC semble être localisée, soit à l'intérieur d'un rayon de 1 000 m autour de l'empreinte du bateau. On estime à 148-345 kg la quantité de BPC qui reste dans les sédiments aux environs immédiats du site de l'*Irving Whale*. La contamination locale du biote, plus précisément celle du crabe des neiges et des amphipodes, semble aussi avoir augmenté après la remontée de la barge, mais les crabes présentant des niveaux de contamination qui dépassent la norme canadienne pour la consommation sont confinés nettement à l'intérieur de la zone d'interdiction de la pêche autour du site de l'*Irving Whale*. Un total de 5 209 à 5 406 kg de BPC provenant de la barge ont été perdus dans l'environnement, et il est spéculé qu'une grande partie de cette perte pourrait s'être produite au moment du naufrage. Le devenir possible de ces BPC inclut leur accumulation dans les zones de déposition des sédiments du golfe du Saint-Laurent, principalement le chenal Laurentien, leur incorporation dans la chaîne alimentaire et possiblement leur infiltration dans le substrat rocheux sous-jacent. Cependant, une proportion significative des BPC manquants pourraient ne pas persister dans l'environnement marin du golfe en raison de pertes possibles dans l'atmosphère et de la biodégradation *in situ*. L'importance de la contamination locale des sédiments et du biote par les BPC est discutée à la lumière de l'information disponible, avec une emphase sur la fermeture locale de la pêche aux environs du site et sur une décontamination additionnelle possible des sédiments. Un échantillonnage additionnel est requis au printemps 1997 afin d'évaluer les changements dans la contamination des sédiments et du biote qui pourraient s'être produits au cours de l'hiver. De même, un programme de suivi est nécessaire pour déterminer l'évolution à long terme de la contamination par les BPC des sédiments et du biote aux environs du site de l'*Irving Whale*. Cette information fournirait une justification scientifique pour le maintien de la zone locale d'interdiction de la pêche jusqu'à ce que les concentrations de BPC dans les organismes diminuent et atteignent des valeurs acceptables.

RÉSUMÉ ÉTENDU

La barge *Irving Whale*, qui a fait naufrage le 7 septembre 1970 dans le sud du golfe du Saint-Laurent, a été renflouée avec succès le 30 juillet 1996. L'opération avait été retardée d'un an pour permettre de mieux évaluer la situation à la lumière de la présence de 7 520 kg de BPC dans le système de chauffage de la cargaison de la barge. L'*Irving Whale* a été installée sur la barge submersible *BOA 10* et emportée loin du site pour être nettoyée. La barge a d'abord été débarrassée de tous les organismes marins qui la recouvraient à Alberton (Île-du-Prince-Édouard), puis amenée à Halifax (Nouvelle-Écosse), où on l'a nettoyée pour la remettre dans un état acceptable. Ce nettoyage incluait l'enlèvement de l'amiante, le dénoyage et le nettoyage des salles des pompes et des machines, l'enlèvement des BPC et de la cargaison, et enfin le nettoyage des citernes. Les opérations de nettoyage de la barge ont permis de récupérer un total de 1 593 kg de BPC. Des opérations ont également été effectuées pour retirer du site des sédiments contaminés par les BPC et, combinés aux BPC présents dans les sacs de débris souillés enfouis aux Îles-de-la-Madeleine, ont permis de récupérer une quantité additionnelle de 373 kg de BPC. Ainsi, 5 554 kg des 7 520 kg de BPC initialement présents dans l'*Irving Whale* n'ont pu être récupérés, une partie desquels sont présents dans les sédiments aux environs du site du naufrage.

Des missions d'échantillonnage de sédiments ont été effectuées immédiatement après la récupération de l'*Irving Whale*, puis en octobre 1996, afin d'évaluer l'ampleur de la contamination des sédiments par les BPC après le renflouage et les risques environnementaux qui y sont associés. Les résultats montrent que les concentrations de BPC dans les sédiments locaux ont augmenté après la récupération de l'*Irving Whale*, et que les changements les plus importants se sont produits à l'est de l'empreinte de la barge, particulièrement à des distances variant de 10 à 100 m. Ce patron suggère qu'une certaine quantité de BPC pourrait avoir été libérée pendant les opérations de renflouage, probablement à une certaine hauteur au-dessus du fond marin, mais les premiers efforts de décontamination pourraient aussi avoir entraîné une dispersion des BPC, ce qui aurait contribué à l'augmentation locale de la contamination des sédiments. On estime à 148-345 kg la quantité totale de BPC dans les sédiments aux environs du site de l'*Irving Whale* après son renflouage.

La contamination locale du biote a également été examinée deux mois après le renflouage de l'*Irving Whale* afin d'évaluer la bioaccumulation consécutive des BPC, particulièrement chez le crabe des neiges et les amphipodes. Les concentrations de BPC dans la glande digestive et le muscle des crabes des neiges étaient plus élevées après le renflouage qu'en 1995, mais seuls quelques individus, prélevés nettement à l'intérieur de la zone d'interdiction à la pêche (moins de 2 km de la barge), dépassaient la norme canadienne de $2,0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de BPC dans les poissons et les produits de la pêche. Tous les échantillons de crabes prélevés plus loin du site de la barge, ainsi qu'à l'extérieur de la zone d'interdiction à la pêche, présentaient des concentrations inférieures à $1,0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Pour la plupart des échantillons, la contamination par les BPC provenait clairement de l'*Irving Whale*. La contamination locale des amphipodes par les BPC a augmenté d'un ordre de grandeur après le renflouage de la barge.

D'après la quantité de BPC récupérés avec le renflouage, et ceux qui demeurent dans les sédiments aux environs du site de la barge, on estime qu'un total de 5 209 à 5 406 kg de BPC provenant de l'*Irving Whale* ont été perdus dans l'environnement et leur récupération n'est pas possible. Certains indices laissent supposer que la plus grande partie des BPC aient été déversés au moment du naufrage ou peu de temps après. Le devenir possible de ces BPC inclut leur accumulation dans les zones de déposition des sédiments dans le golfe du Saint-Laurent, principalement le chenal Laurentien, leur bioaccumulation dans la chaîne alimentaire, et possiblement leur infiltration dans la roche-mère sous-jacente. De plus, une proportion non négligeable des BPC provenant de l'*Irving Whale* pourraient ne pas persister dans l'environnement marin du golfe du Saint-Laurent en raison de processus de dissolution et d'évaporation subséquente dans l'atmosphère, et de biodégradation *in situ*. Un projet de recherche est en cours à l'Institut Maurice-Lamontagne (MPO - Région Laurentienne) afin de déterminer s'il y a eu accumulation de BPC provenant de l'*Irving Whale* dans les sédiments du chenal Laurentien.

Les impacts potentiels de la contamination des sédiments par les BPC aux environs du site de l'*Irving Whale* sont difficiles à évaluer compte tenu de l'information disponible concernant la bioaccumulation et les effets toxiques des sédiments contaminés par les BPC sur les organismes marins. La plupart des directives pour la qualité des sédiments situent la concentration de BPC à environ $0,1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ pour la protection de la vie marine. L'application de cette concentration-seuil requerrait l'enlèvement d'une grande quantité de sédiments aux environs du site ($3\,000 \text{ m}^3$), dont 70 % permettraient de récupérer seulement 8 kg de BPC, soit 2 à 5 % de la quantité totale estimée dans les sédiments locaux.

En l'absence de décontamination additionnelle, on s'attend à ce que les impacts potentiels de la contamination locale des sédiments à l'intérieur de la zone d'interdiction à la pêche incluent : 1) des effets létaux aigus localisés sur les organismes sessiles vivant en étroite association avec les sédiments hautement contaminés; 2) des effets sous-létaux chroniques sur les organismes à l'intérieur d'une superficie plus large mais toujours localisée aux environs de l'empreinte de la barge, dont certains pourraient causer des problèmes de santé chez les organismes; et 3) la bioaccumulation des BPC dans la chaîne alimentaire, ce qui pourrait résulter en des concentrations dépassant les limites fixées pour la consommation humaine, particulièrement chez les crabes des neiges présents aux environs de l'empreinte de la barge. Cependant, les impacts toxicologiques de la contamination des sédiments par les BPC sur les organismes locaux ne devraient pas avoir de conséquences notables sur le maintien des populations pour les espèces affectées, incluant le crabe des neiges.

La décontamination efficace des zones fortement contaminées aux alentours de l'empreinte de la barge permettrait probablement d'éliminer le potentiel d'effets létaux aigus et d'effets sous-létaux chroniques qui pourraient nuire à la santé des organismes. Toutefois, la contamination du crabe des neiges aux environs du site demeurerait élevée durant une certaine période de temps après la décontamination locale des sédiments.

Si la décontamination des sédiments devait être effectuée, il serait alors nécessaire de recartographier complètement la distribution locale des BPC dans les sédiments aux environs du site

afin de délimiter clairement les zones à décontaminer, étant donné que des déplacements de sédiments et une dispersion des BPC pourraient s'être produits au cours de l'hiver 1996-97. De plus, des carottes devraient être prélevées dans le substrat rocheux sous-jacent à l'intérieur des zones à décontaminer afin de s'assurer que l'enlèvement des sédiments n'exposerait pas de BPC additionnels qui pourraient avoir infiltré le grès sous-jacent aux sédiments.

La contamination du crabe des neiges par les BPC aux environs du site du naufrage et leurs mouvements connus dans le sud du golfe du Saint-Laurent indiquent que, du moins pour le moment, la zone d'interdiction à la pêche est suffisamment étendue pour prévenir la capture et la commercialisation de crabes contaminés. Cependant, cette zone devrait rester fermée à la pêche au crabe jusqu'à ce que les concentrations de BPC diminuent et atteignent des niveaux acceptables indépendamment de la décontamination possible du site.

Un échantillonnage additionnel devrait être mené sur et aux environs du site au printemps 1997 afin d'évaluer la sécurité de la zone d'interdiction à la pêche et afin de fournir une évaluation du devenir possible des BPC encore présents dans les sédiments locaux, notamment leur dispersion du site et leur incorporation dans la chaîne alimentaire. À cet égard, des échantillons de crabe des neiges et d'amphipodes devraient être prélevés aux environs du site de la barge puis analysés afin de déterminer tout changement de la concentration de BPC dans leurs tissus et l'étendue spatiale de cette contamination. De même, la possibilité d'analyser des échantillons de plancton conservés dans le formol et archivés qui ont été prélevés à la fin des années 60 et au début des années 70 devrait être envisagée afin de déterminer si les concentrations élevées de BPC qui ont été mesurées chez ces organismes dans le golfe du Saint-Laurent à cette période pourraient provenir du naufrage de l'*Irving Whale*. Enfin, un programme de suivi à long terme axé sur les sédiments, le crabe des neiges et les amphipodes aux environs de l'empreinte de la barge devrait être développé afin de suivre les tendances temporelles de la contamination locale par les BPC provenant de l'*Irving Whale*. Ce programme se poursuivrait jusqu'à ce que les concentrations de BPC dans les tissus de crabes diminuent et atteignent des niveaux acceptables, après quoi la pêche locale pourrait être rouverte.

1. INTRODUCTION

La barge *Irving Whale* a coulé le 7 septembre 1970 dans le sud-ouest du golfe du Saint-Laurent (par 47° 22' 09" N et 63° 19' 46" O; Figure 1), à environ 60 km au nord-est de North Point (Île-du-Prince-Édouard) et 100 km à l'ouest des Îles-de-la-Madeleine (Québec). La barge contenait à l'origine 4 270 tonnes métriques (t) de mazout, ainsi que 5 375 l (7,5 t) de BPC (Aroclor 1242) et 1 344 l (2,3 t) de chlorobenzènes, utilisés dans le système de chauffage en circuit fermé de la cargaison.

En 1994, Transports Canada (MDT) a entrepris le projet de faire renflouer la barge avec sa cargaison sous la responsabilité de la Garde côtière canadienne (GCC) et de concert avec Environnement Canada (MDE). Ainsi, une évaluation environnementale du projet a été effectuée en conformité avec le Décret sur les lignes directrices visant le Processus d'évaluation et d'examen en matière d'environnement (DLDPÉEE). Après la découverte, en juin 1995, de la présence de biphényles polychlorés (BPC) et de chlorobenzènes (CB) dans le système de chauffage de la cargaison de la barge, une évaluation supplémentaire du projet de renflouage a été effectuée en vertu du DLDPÉEE, et les plans de récupération de la barge ont été maintenus. Toutefois, les préparatifs des opérations de récupération ont été suspendus en août 1995 suite à une injonction de la Cour fédérale du Canada sur le projet de renflouage de l'*Irving Whale*. Une évaluation

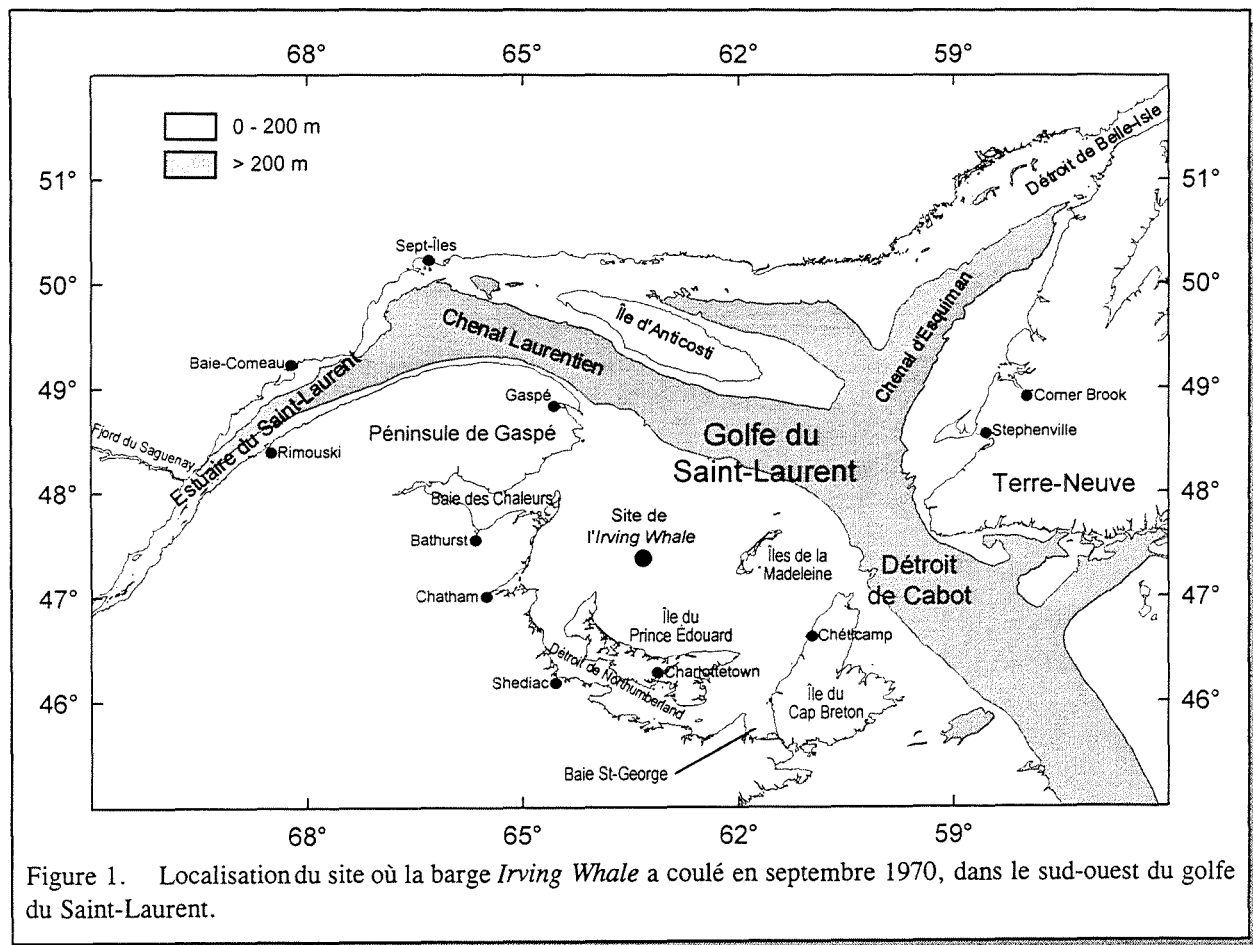


Figure 1. Localisation du site où la barge *Irving Whale* a coulé en septembre 1970, dans le sud-ouest du golfe du Saint-Laurent.

environnementale approfondie a par la suite été effectuée en vertu du DLDPEEE, et la décision de renflouer la barge avec sa cargaison de mazout et le fluide caloporteur (BPC et chlorobenzènes) qu'elle contenait a été prise au printemps de 1996. La barge a été renflouée avec succès le 30 juillet 1996, et a été transporté loin du site pour son nettoyage et l'élimination de sa cargaison.

L'objectif du présent document est de fournir un rapport scientifique sur l'état actuel de la contamination des sédiments et du biote par les BPC aux environs du site où l'*Irving Whale* a reposé pendant 26 ans, à partir de prélèvement d'échantillons de sédiments et de biote effectués avant et après le renflouage. En particulier, l'importance de la contamination par les BPC à cet endroit est examinée en regard de la fermeture locale de la pêche et de la prise de décision à venir concernant une décontamination additionnelle. Des recommandations sont formulées pour un échantillonnage additionnel au printemps de 1997, de même que pour l'établissement d'un programme de suivi à long terme visant à assurer la protection des pêcheries locales dans le sud du golfe du Saint-Laurent.

2. RÉCUPÉRATION DE L'IRVING WHALE

2.1 Sommaire des opérations de renflouage

Les préparatifs des opérations de renflouage de l'*Irving Whale* ont pris fin le 27 juillet 1996. À ce moment, tous les travaux de soudage des sabots et des griffes destinés à protéger la coque de la barge pendant la récupération étaient terminés. Un test de charge a été effectué avec succès sur la barge *BOA 9* et, le 28 juillet, la décision a été prise de commencer à poser les élingues arrière et avant en vue du renflouage de l'*Irving Whale*. Tôt le matin du 30 juillet, les élingues étaient en place. Les opérations de levage ont commencé vers 7 h 45 HNE, et, peu après 9 h, les extrémités des grues bâbord et tribord montées sur les parois des caissons à fret de l'*Irving Whale* étaient visibles au-dessus de la surface de l'eau.

Des pompes ont été installées à bord de l'*Irving Whale* afin de retirer l'eau de certains compartiments à matériel en vue de l'éventuel transfert de la barge sur la barge submersible *BOA 10*. Un échantillonnage et une analyse effectués pendant que l'*Irving Whale* était encore au fond ont permis de mesurer les concentrations de BPC dans la salle des pompes et la salle des machines et un gradient de concentrations en fonction de la profondeur a été détecté. On a ainsi pu déterminer les profondeurs de compartiments jusqu'auxquelles l'eau pourrait être pompée sans rejets accidentels de BPC. L'analyse des eaux rejetées provenant de ces compartiments s'est poursuivie pendant le pompage pour s'assurer qu'elles ne contenaient pas de quantités excessives de BPC.

L'examen du dessous de la coque de l'*Irving Whale* était assuré par un véhicule sous-marin télécommandé muni d'une caméra vidéo pendant la remontée de la barge. Aucun dommage majeur n'a été observé sur le dessous de la coque. Cependant, cet examen a été sommaire et ne constituait pas une inspection complète de la coque.

Après que la barge ait fait surface, des réparations temporaires ont été effectuées afin de colmater des fuites qui se produisaient par de petites ouvertures décelées dans l'arcaste arrière, à bâbord et à tribord. Les opérations de pompage ont repris par la suite, de sorte qu'en milieu de journée le 31 juillet, l'épave a été mise à flot et tirée sur le *BOA 10*. En fin d'après-midi, l'*Irving Whale* était sécurisée à bord de la barge submersible.

2.2 Transport et nettoyage de la barge

Le 1^{er} août, l'eau contaminée qui se trouvait dans la partie inférieure de la salle des machines et de la salle des pompes de l'*Irving Whale* a été transférée dans la barge *Basse Côte*, qui a ensuite été transportée jusqu'à Halifax par le remorqueur *Point Carol*. Le *BOA 10* a été remorqué jusqu'à Alberton, à l'Île-du-Prince-Édouard, où la coque de l'*Irving Whale* a été nettoyée de tous les organismes marins qui y étaient fixés. Les débris d'organismes détachés de la barge ont été mis dans des barils et transportés par le *BOA 10* jusqu'à Halifax, où il est arrivée le 7 août.

L'*Irving Whale* est arrivée au quai Scotia le 8 août 1996. Les opérations suivantes ont été effectuées pour nettoyer la barge jusqu'à ce qu'elle soit dans un état acceptable, surtout en ce qui concerne la contamination par les BPC :

- 1) enlèvement de l'amiante dans la salle des pompes et la salle des machines;
- 2) dénoyage des salles des pompes et des machines et des citernes;
- 3) récupération du fluide contenant des BPC (Therminol);
- 4) nettoyage des salles des pompes et des machines;
- 5) nettoyage du coquillon avant, du gaillard avant et du puits aux chaînes;
- 6) vidange des citernes n^{os} 1, 2 et 3;
- 7) vidange de la citerne n^o 4 (sections bâbord et tribord);
- 8) nettoyage des citernes; et
- 9) enlèvement des conduites du système de chauffage des citernes.

La société Atlantic Towing Ltd., chargée du nettoyage général de la barge, a confié en sous-traitance à SCC Environmental la gestion des BPC et de l'amiante et le traitement des eaux contaminées par des BPC.

2.2.1 Enlèvement de l'amiante

La première opération entreprise a été l'enlèvement de l'amiante qui se trouvait dans la salle des pompes et la salle des machines. Environ 124 barils d'amiante ont été récupérés et des analyses subséquentes ont révélé que ces résidus étaient fortement contaminés par des BPC ($> 2\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Les débris d'amiante ont été transportés au Centre de traitement des déchets spéciaux de l'Alberta (CTDSA), à Swan Lake, en vue de leur élimination.

2.2.2 Dénoyage des salles des pompes et des machines et des citernes

Au moment où l'*Irving Whale* est entré en cale sèche, une couche d'eau était toujours présente sous le mazout brut dans toutes les citernes ainsi que dans les salles des pompes et des machines, malgré le pompage de l'eau de ces compartiments au site du naufrage. Cette eau devait être

enlevée avant le pompage du mazout et le nettoyage des salles des pompes et des machines. L'eau qui se trouvait dans ces salles et dans la citerne n° 4 (sections bâbord et tribord) a été pompée et traitée à l'aide du système Microflo de SCC Environmental. Environ 1 176 500 l d'eau ont été traités avec ce système, ce qui a permis de les décontaminer jusqu'à des concentrations de BPC de moins de $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, et cette eau a ensuite été déversée dans le port de Halifax.

2.2.3 Récupération du fluide contenant des BPC (Therminol)

La canalisation bouclée, installée sur le pourtour supérieur de la barge, et les conduites d'échange de chaleur qui y étaient raccordées ont été coupées en sections de différentes longueurs et enlevées. Le fluide qui s'y trouvait encore a été minutieusement drainé et placé dans des barils. La canalisation bouclée s'est avérée perforée en plusieurs endroits et moins de 20 l de BPC ont été retirés de ces conduites. Tous les tuyaux ont été enveloppés dans du plastique et transportés au CTDSA en vue de leur élimination. Dans la salle des pompes, environ 10 l d'huile de BPC ont été récupérés du collecteur de tête et de certaines canalisations qui y étaient raccordées.

Avant de retirer la cargaison des citernes, on a tenté d'enlever l'huile de BPC qui restait dans les conduites d'échange de chaleur en créant un vide dans chaque canalisations des huit citernes. Un vide a été créé dans les canalisations des citernes n°s 1, 2 et 3, ce qui indiquait qu'elles étaient demeurées intactes même si des quantités négligeables de BPC ont été récupérées. Tous les fluides contenant des BPC ont été mis en baril et envoyés au CTDSA en vue de leur élimination. Seule de l'eau a été retirée de la citerne n° 4 (sections bâbord et tribord); on en a conclu que les canalisations d'échange de chaleur étaient endommagées et que l'huile de BPC qui s'y trouvaient était peut-être dans la cargaison. Une analyse ultérieure du contenu de cette citerne a permis de mesurer des concentrations moyennes de BPC atteignant $1\,200 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ aux points chauds, principalement dans la partie inférieure des citernes.

2.2.4 Nettoyage des salles des pompes et des machines

Un nettoyage sommaire des salles des pompes et des machines a d'abord été effectué en enlevant manuellement les sédiments et en raclant les débris qui se trouvaient sur les parois. Les salles ont ensuite été lavées complètement puis soumises à un nettoyage plus complet. Dans le but d'enlever complètement les résidus de BPC des cloisons et du fond de ces salles, plusieurs méthodes de nettoyage ont d'abord été testées sur de petites surfaces, notamment l'emploi d'un solvant commercial (Citri-clean), le lavage à l'eau à haute pression et le nettoyage au jet d'eau et de sable mélangés. Le prélèvement d'échantillons a permis de déterminer l'efficacité de chaque méthode, et le nettoyage au jet s'est avérée la méthode la plus efficace, réduisant la teneur en BPC à moins de $10 \mu\text{g}$ par 100 cm^2 . Une analyse effectuée après le nettoyage à l'aide de cette méthode a montré que les concentrations de BPC mesurées sur les surfaces traitées ne dépassaient pas ce seuil. Au total, 190 t de sédiments contaminés aux BPC et au mazout, de résidus d'amiante et de résidus de nettoyage au jet ont été retirés des salles des pompes et des machines, avec des concentrations de BPC variant de 1 000 à $2\,000 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Tous ces résidus ont été mis en baril et expédiés au CTDSA.

2.2.5 Nettoyage du coqueron avant, du gaillard avant et du puits aux chaînes

Les sédiments qui se trouvaient dans le coqueron avant et le gaillard avant ont été enlevés, mis en baril et transportés au CTDSA en vue d'être éliminés. Ces compartiments ont ensuite été nettoyés. L'analyse des surfaces a révélé des concentrations de BPC inférieures à $10 \mu\text{g}$ par 100 cm^2 .

L'ancre et la chaîne ont été retirées du puits aux chaînes, lavées au jet d'eau à haute pression, puis remis en place dans le puits. Comme dans le cas du coqueron avant et du gaillard avant, tous les sédiments ont été mis en baril et expédiés au CTDSA. Par la suite, ce compartiment a été lavé et testé pour s'assurer que les parois rencontraient le critère établi, soit $10 \mu\text{g}$ de BPC par 100 cm^2 .

2.2.6 Vidanges des citernes n^{os} 1, 2 et 3

La cargaison des citernes n^{os} 1 et 2 a été chauffée jusqu'à une température de 50 à 60 °C puis pompée dans l'*Irving Shark*. Le contenu de la citerne n^o 3 a été pompé à la température ambiante dans l'*Irving Shark* afin de prévenir le chauffage de la citerne n^o 4, qui aurait entraîné la redistribution des BPC hautement concentrés dans l'ensemble de cette citerne.

Le 12 septembre 1996, tout le mazout contenu dans les citernes n^{os} 1, 2 et 3 (sections bâbord et tribord) avait été retiré et transporté aux installations de Sprague, à Port Hawkesbury, en Nouvelle-Écosse. Le mazout y a été acheminé par l'*Irving Shark*, en deux voyages. Des analyses ultérieures d'échantillons ont révélé des concentrations de BPC inférieures à $1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ dans le mazout transporté lors du premier voyage et des concentrations variant de 2,1 à $2,4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ dans celui du deuxième voyage. Étant donné que le mazout avait une teneur en BPC inférieure à $5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, les lignes directrices provinciales permettaient de le traiter comme du mazout non contaminé aux installations de Sprague.

2.2.7 Vidange de la citerne n^o 4 (sections bâbord et tribord)

Le mazout contenu dans la partie supérieure de la citerne n^o 4 (sections bâbord et tribord) a été pompé à la température ambiante dans les citernes avant n^{os} 1 et 2, et des échantillons ont été prélevés à intervalles de 19 000 l afin de mesurer les concentrations de BPC. Après avoir constaté qu'une citerne donnée avait une teneur en BPC inférieure à $5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, le mazout qui s'y trouvait a été chauffé puis pompé dans l'*Irving Shark*. Afin de faciliter le pompage quand il y avait moins de mazout dans la citerne n^o 4 bâbord, de l'eau a été injectée au fond de celle-ci afin de faire monter le mazout. Au moment où les pompes ont commencé à prélever de l'eau plutôt que du mazout, toute l'eau a été drainée et envoyée à SCC Environmental en vue de son traitement par le système Microflo, puis le mazout s'est déposé au fond de la citerne. Cette méthode n'a pas été appliquée à la citerne n^o 4 tribord.

Le mazout ayant une teneur en BPC de 5 à $50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ a été transbordé dans six camions, qui servaient habituellement au transport de liqueur noire, puis acheminé aux installations de North Star Cement, à Cornerbrook (Terre-Neuve), qui exploite un four à ciment pouvant traiter des déchets qui contiennent des BPC à ces concentrations. Le ministère de l'Environnement de

Terre-Neuve avait donné à North Star Cement une autorisation écrite lui permettant de traiter ces déchets dans ses installations. Au total, on a transporté à Cornerbrook 140 800 l de mazout brut ayant une teneur en BPC de 5 à 50 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$.

Lorsque des concentrations élevées de BPC étaient trouvées, le produit contaminé était emmagasiné dans la citerne n° 1 tribord. Quand le mazout contenu dans le fond des citernes sur une hauteur d'au moins 15 cm ne pouvait plus être pompé à la température ambiante, on le transbordait directement dans des camions-citernes à l'aide de pompes à vide, en assumant qu'il avait une teneur en BPC supérieure à 50 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; il était ensuite transporté au CTDSA en vue d'être éliminé. Il est à noter qu'une partie du produit contaminé de la citerne n° 4 bâbord a pu s'échapper dans la salle des pompes, car on a détecté une fuite dans le réseau de canalisations entre ces deux compartiments. La fuite a été colmatée sur-le-champ, mais pas avant qu'une quantité indéterminée de mazout ait pu gagner la salle des pompes, d'où elle a été extraite pendant les travaux de nettoyage général.

Une fois que le mazout récupéré, présentant une teneur moyenne en BPC de 1 200 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, a été rassemblé dans la citerne n° 1 tribord, on l'a pompé dans des camions et transporté au CTDSA. Environ 1,1 t de mazout contaminé a été ainsi recueillie.

2.2.8 Nettoyage des citernes

De la vapeur a d'abord été injectée dans les citernes pour les réchauffer puis toutes les surfaces ont été lavées à l'aide d'un appareil Butterworth pour en détacher tous les résidus. Tous les liquides de lavage de la citerne n° 4 (sections bâbord et tribord) ont été recueillis dans la citerne n° 1 bâbord. Après la séparation de l'eau et du mazout, l'eau au fond de la citerne a été pompée puis transportée aux installations de SCC Environmental pour son traitement au moyen du système Microflo. Par la suite, l'émulsion eau-mazout résiduelle a été pompée dans deux réservoirs de rétention, où la séparation a été effectuée par l'ajout d'un désémulsifiant. L'eau résiduelle a été traitée par le système Microflo et le mazout a été transporté dans deux camions-citernes au CTDSA. Le mazout récupéré après le lavage des citernes n°s 2 et 3 et de la citerne n° 1 bâbord, qui n'ont jamais contenu de mazout contaminé aux BPC, a été pompé dans l'*Irving Shark* et l'émulsion eau-mazout a été traitée par le système Microflo de SCC Environmental.

2.2.9 Enlèvement des conduites du système de chauffage des citernes

Une fois le nettoyage des citernes terminé, on a enlevé et sectionné les canalisations d'échange de chaleur, qui ont ensuite été emballées et transportées au CTDSA. Ces canalisations ne contenaient pas de BPC libres.

2.3 Décontamination au site après le renflouage

L'évaluation approfondie de la récupération de l'*Irving Whale* (Gouvernement du Canada, 1996a) indiquait que les sédiments fortement contaminés aux BPC seraient enlevés immédiatement après le renflouage. Une évaluation des risques a été effectuée avant le renflouage de la barge afin d'établir une concentration-seuil de BPC qui serait considérée sécuritaire pour la

poursuite de la pêche locale au crabe des neiges (Cantox Inc., 1996). Cette évaluation a révélé qu'une concentration de BPC de $0,17 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ou moins ne menacerait pas les crabes des neiges et permettrait leur consommation. Toutefois, on a reconnu que ce seuil serait probablement irréaliste, du moins à court terme, compte tenu des contraintes opérationnelles et du manque de ressources appréhendés après les opérations de renflouage.

D'après des informations sur l'étendue spatiale de la contamination des sédiments par les BPC avant le renflouage, des zones prioritaires ont été déterminées pour l'enlèvement immédiat des sédiments. Ces zones étaient situées à la hauteur du centre de la barge du côté tribord ainsi qu'à bâbord arrière, et couvraient une superficie totale de 950 m^2 . Toutefois, l'analyse sur place d'échantillons additionnels de sédiments prélevés juste après le renflouage ont révélé un accroissement des concentrations de BPC à certains endroits, en particulier à bâbord arrière (voir la section 3.1.1). Ainsi, les priorités d'intervention ont été réorientées vers ces zones.

Les premières tentatives de décontamination des sédiments contaminés à l'aide du matériel fourni par l'entrepreneur ont été infructueuses. Les pompes à haut débit ($500 \text{ gal}\cdot\text{min}^{-1}$) utilisées dans un premier temps n'ont pas permis de récupérer les sédiments contaminés dans des conteneurs en acier (d'une capacité de 25 m^3) qui avaient été placés sur le fond. Pratiquement aucun sédiment n'a été récupéré dans cette opération qui a plutôt causé la remise en suspension des sédiments et la formation d'une nappe d'hydrocarbures à la surface. On a ensuite tenté de récupérer les sédiments à l'aide de pelles et de seaux, mais cela a permis de recueillir moins de $1 \text{ t}\cdot\text{jour}^{-1}$ de sédiments contaminés, sans compter qu'il s'est formé un panache de sédiments sous l'eau. La méthode qui s'est révélée efficace faisait appel à un appareil à succion par circulation d'air, qui a servi à transférer l'eau et les sédiments dans une grande barge d'une capacité de $10\,000 \text{ t}$. Toutefois, l'eau récupérée a dû être conservée pour la décontaminer étant donné que sa teneur en BPC après le pompage variait de 100 à $200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, ce qui dépassait le maximum de $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ prescrit pour l'élimination de déchets en mer. La méthode de succion par circulation d'air présentait un taux d'efficacité de seulement $2,8 \%$, avec 1 t de sédiments récupérés par 35 t d'eau.

Pendant les travaux de décontamination, les plongeurs ont découvert une zone d'environ 40 m^2 , à bâbord arrière, où des gouttelettes de BPC étaient présentes à la surface des sédiments. La majeure partie de cette zone a donc été décontaminée. Pour maintenir la capacité de stockage de l'eau dans la barge où les sédiments étaient transférés, seule la partie supérieure (de 8 à 10 cm d'épaisseur) de la couche de sédiments a été récupérée. L'analyse des échantillons de sédiments prélevés à ces endroits après les travaux de décontamination indiquait une faible réduction globale des concentrations de BPC.

Les opérations de décontamination ont dû être interrompues en raison des conditions météorologiques qui se détérioraient et de l'épuisement des engagements du contrat. Des échantillons ont été prélevés au hasard après la fin des travaux de décontamination et le départ du matériel de l'entrepreneur. À ce stade, la configuration spatiale du programme d'échantillonnage proposée avant les opérations de renflouage (Gouvernement du Canada, 1996b) a été appliquée, à savoir des transects qui s'étendaient sur une distance de 50 à 500 m à partir de l'empreinte de la

barge. Cet échantillonnage avait pour but de déterminer le degré de dispersion des BPC à partir de l'empreinte à la suite du renflouage et des travaux de décontamination. Cependant, les forts vents et la mer agitée ont empêché le prélèvement de certains échantillons. La plupart des échantillons de sédiments ont été recueillis au nord du lieu du naufrage, soit à une position qui ne se trouve pas sur la trajectoire des courants dominants. Les résultats des analyses de BPC sur ces échantillons sont traités à la section 3.1.2.2.

2.4 Quantité totale de BPC récupérés avec le renflouage

Le renflouage de l'*Irving Whale* et l'ensemble des travaux de nettoyage et de décontamination depuis le naufrage ont permis de récupérer 1 966 kg (26 %) des 7 520 kg de BPC que contenaient les canalisations d'échange de chaleur de la barge (Tableau 1). Un total de 1 593 kg de BPC ont été récupérés avec le nettoyage de la barge, y compris le raclage des surfaces pour enlever les débris d'organismes et les BPC présents dans ce qui reste de la cargaison, dans les salles des pompes et des machines, de même que dans les divers déchets solides et liquides récupérés. Les opérations de nettoyage, telles que l'enlèvement des sédiments du site après le renflouage de la barge (voir la section 2.2) et le nettoyage des plages des Îles-de-la-Madeleine après le naufrage en 1970, ont permis de récupérer une quantité additionnelle de 373 kg de BPC. Par conséquent, quelque 5 554 kg des 7 520 kg de BPC initialement présents dans l'*Irving Whale* n'ont pas été récupérés, dont certains sont présents dans les sédiments aux environs du site du naufrage (voir la section 3.1).

Tableau 1. Sommaire des déchets contaminés aux BPC récupérés avec le renflouage de l'*Irving Whale*.

Opérations et types de déchets	Quantité	BPC (kg)
Nettoyage de la barge		
Mazout (BPC > 50 µg·g ⁻¹)	265 166 kg	282,1
Mazout (BPC 5 - 50 µg·g ⁻¹)	136 200 kg	1,2
Mazout (BPC < 5 µg·g ⁻¹)	3 056 901 l	5
Eau contaminée (BPC > 0.01 µg·g ⁻¹)	2 772 000 l	36,7
Sédiments (salles des pompes/machines, coqueron avant, etc.)	160 134 kg	827,4
Solvant de nettoyage des déchets	250 kg	35,3
Raclage des surfaces (organismes marins)	19 177 kg	328,4
Débris divers contaminés aux BPC	33 491 kg	76,8
Total:		1 592,9
Décontamination		
Enlèvement de sédiments (août 1996)	100 000 kg	220
Eau contaminée (BPC > 0.01 µg·g ⁻¹)	2 637 852 l	3,2
Débris souillés provenant des opérations de nettoyage suite au naufrage	150 000 sacs	150
Total:		373,2
Total recovered to date:		1 966,1

3. CONTAMINATION PAR LES BPC AUTOUR DU SITE DE L'IRVING WHALE

3.1 Sédiments

3.1.1 Pré-renflouage

L'analyse des échantillons de sédiments prélevés en 1994 et 1995 près de l'*Irving Whale* a montré qu'à proximité immédiate de la barge, les sédiments étaient contaminés par les BPC (Gilbert et Walsh, 1996). Les concentrations d'Aroclor 1242 dans les sédiments étaient plus élevées à une distance de 1 à 3 m de l'*Irving Whale*, avec un maximum de $890 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, puis diminuaient rapidement en fonction de la distance de la barge. Le patron de distribution spatiale des BPC dans les sédiments concordait avec l'orientation à la fois des courants à court terme et de l'écoulement résiduel à proximité de la barge (Gilbert et Walsh, 1996). À partir de ces observations, on a pu estimer à 37,5 kg la quantité totale de BPC provenant de l'*Irving Whale* qui s'est accumulée dans les sédiments autour de la barge (Gilbert et Walsh, 1996).

Ce chiffre sous-estime probablement la quantité réelle de BPC présente dans les sédiments autour de la barge avant son renflouage. L'estimation de 37,5 kg ne tenait pas compte de l'épaisseur des sédiments autour de la barge, malgré la présence très probable de BPC dans les sédiments plus profonds. De plus, d'autres échantillonnages pratiqués en 1996 avant le renflouage ont indiqué qu'il existait d'autres zones présentant de fortes concentrations de BPC à proximité de la barge (Annexe 1; Figure 2). Des concentrations variant de $100 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ à plus de $1\,000 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ont été mesurées dans les sédiments sur une superficie d'environ $1\,220 \text{ m}^2$ près des sections arrière et tribord de la barge, ce qui indique que la contamination des sédiments par les BPC avant le renflouage était plus élevée que ne l'avaient rapporté Gilbert et Walsh (1996). Selon cette nouvelle information, la quantité totale de BPC dans les sédiments autour de la barge avant son renflouage a pu atteindre 100 kg, mais il n'est pas possible d'en fournir une estimation précise.

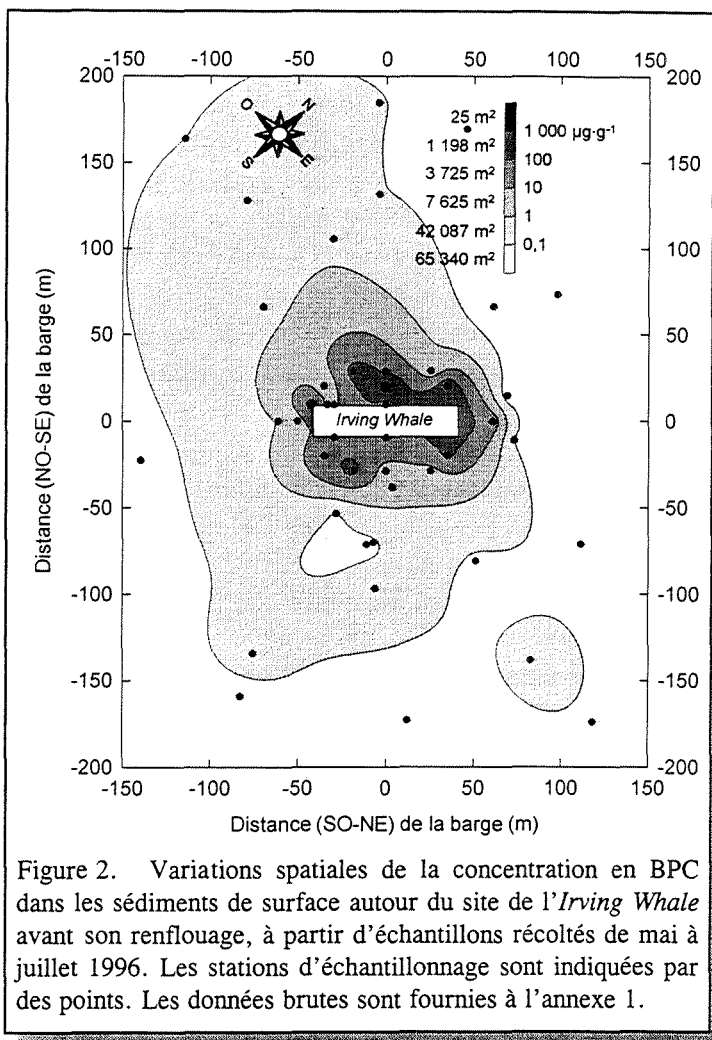


Figure 2. Variations spatiales de la concentration en BPC dans les sédiments de surface autour du site de l'*Irving Whale* avant son renflouage, à partir d'échantillons récoltés de mai à juillet 1996. Les stations d'échantillonnage sont indiquées par des points. Les données brutes sont fournies à l'annexe 1.

3.1.2 Post-renflouage

3.1.2.1 Plan d'échantillonnage et analyses

Après la récupération de l'*Irving Whale*, des échantillons de sédiments ont été prélevés en août et octobre 1996 aux environs du site du naufrage afin d'évaluer l'ampleur de la contamination par les BPC suite au renflouage, les risques environnementaux de cette contamination et la nécessité de décontaminer les sédiments. Pour les besoins de la décontamination, la campagne d'échantillonnage d'août a été axée principalement sur les secteurs tribord et bâbord arrière, étant donné le niveau élevé de contamination par les BPC de ces sédiments avant le renflouage (voir les sections 2.3 et 3.1.1). Toutefois, l'échantillonnage d'octobre a été plus important que celui d'août, la couverture du site s'étendant jusqu'à 250 m de la barge.

La première campagne d'échantillonnage des sédiments à proximité immédiate de l'empreinte de la barge a commencé 48 h après la fin des opérations de renflouage (1^{er} août). Des échantillons ont été prélevés par des plongeurs avant, pendant et après la décontamination. Le positionnement des stations a été effectué en mesurant leur distance et leur orientation par rapport à des marqueurs qui avaient été installés sur le fond avant le renflouage de l'*Irving Whale*. L'échantillonnage a été effectué en priorité jusqu'à 20 m de la partie arrière de l'empreinte de la barge, selon un quadrillage grossier, car c'est dans cette zone qu'on avait observé les concentrations de BPC les plus élevées avant le renflouage. On a aussi prélevé des échantillons de sédiments à l'intérieur de l'empreinte de la barge. Au total, 33 échantillons de sédiments de surface (couche supérieure de 2-3 cm) prélevés à l'aide d'une benne et 8 carottes de différentes profondeurs ont été récoltés entre le 1^{er} et le 7 août. Les échantillons ont été analysés dans le laboratoire emménagé sur la barge de renflouage *BOA 9* dans les 4 à 6 h suivant leur prélèvement, fournissant ainsi l'information nécessaire pour l'orientation immédiate des efforts de décontamination.

Après la décontamination, 15 échantillons de sédiments ont également été prélevés à des stations s'étendant jusqu'à environ 900 m de l'empreinte de la barge à l'aide d'une benne Shipek déployée à partir du navire *Sir William Alexander* de la GCC. Le positionnement des prélèvements a été effectué à l'aide du système GPS directionnel (D-GPS) du bâtiment.

La seconde campagne d'échantillonnage des sédiments a été menée du 30 septembre au 10 octobre, où 114 échantillons ont été prélevés par un submersible habité dirigé à partir du NCSM *Cormorant* du ministère de la Défense nationale (MDN). La grille d'échantillonnage a été conçue de façon à viser les zones qui n'avaient pas été échantillonnées en août, c'est-à-dire près de l'avant et à des distances plus grandes de l'empreinte de la barge. Le positionnement du submersible a été assuré par sonar (distance) et compas (orientation) depuis les marqueurs qui avaient été positionnés à l'aide du système D-GPS satellitaire du navire. Les échantillons étaient essentiellement prélevés avec des tubes d'aluminium à l'aide du bras articulé du submersible. Là encore, ces échantillons étaient prélevés dans la couche supérieure de 2-3 cm de sédiments.

Seul un nombre limité de carottes de sédiments ont été prélevées en août et octobre à l'aide de tubes en téflon (plongeurs) ou en acier inoxydable (submersible). Dans la plupart des cas, la

couche de sédiments qui couvrait le substrat plus dense sous-jacent était trop mince pour permettre le carottage, ou encore la compaction des particules était insuffisante pour que la matrice de sédiments reste intacte dans les tubes du carottier. À la plupart des stations, on a estimé la profondeur des sédiments en insérant une règle d'acier graduée (diamètre de 8 mm) jusqu'à la profondeur maximale de pénétration.

Des échantillons de sédiments ont également été prélevés aux stations d'échantillonnage du crabe des neiges pendant les deux dernières semaines d'octobre (voir la section 3.2.2.1). On a pour cela utilisé une benne Shipek jusqu'à une distance de 5 km de l'empreinte de la barge, à 15 des 20 stations d'échantillonnage de crabe. La plupart des échantillons ont été prélevés en réplicats, et on a aussi obtenu un échantillon de référence à un point situé à 55 km du lieu du naufrage. Tous les échantillons de sédiments prélevés pendant cette campagne ont été analysés par MDS Environmental Services Limited, à Halifax (N.-É.), à l'aide de méthodes comparables.

Les analyses en laboratoire de tous les échantillons de sédiments ont été effectuées avec des méthodes et des instruments semblables à ce qui avait été utilisé pour les échantillons recueillis avant les opérations de renflouage en 1995 et 1996. Les principales caractéristiques des méthodes d'analyse employées par tous les laboratoires qui ont participé à l'analyse des sédiments incluent une extraction sédiment-solvant, l'épuration sur colonne absorbante, la détection par chromatographie en phase gazeuse à capture d'électrons, et la mesure des concentrations d'Aroclor 1242 dans les sédiments sur la base du poids sec. On a quantifié les BPC des sédiments sous la forme d'Aroclor 1242 étant donné : 1) que la composition des congénères de BPC dans les sédiments autour de la position de l'*Irving Whale* était similaire à celle de l'Aroclor 1242; et 2) que les apports de BPC de sources autres que la barge étaient négligeables. Diverses mesures de contrôle de qualité (CQ) intra-laboratoire ont été prises pour assurer un niveau satisfaisant de qualité des données dans les analyses des sédiments : essais en blanc, échantillons en réplicats, échantillons de matrice enrichis, essais de récupération de substitut, et analyses avec du matériel de référence certifié pour chaque lot d'échantillons. Pendant les opérations de décontamination, on a relevé les limites de détection ($100 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) et omis les mesures de CQ concernant les échantillons enrichis de substitut et de matrice afin de composer avec les contraintes de temps et de matériel et les objectifs de qualité des données pour la phase de décontamination. Pour les phases pré- et post-renflouage, une mesure supplémentaire d'assurance de la qualité a été obtenue par l'analyse indépendante d'environ 10 % de tous les échantillons recueillis. Les résultats de l'échantillonnage ont été comparés à ceux d'échantillons fractionnés analysés par un laboratoire privé (Axys Analytical Services, Sidney, C.-B.) et par le laboratoire de la qualité de l'environnement d'Environnement Canada situé à Moncton (N.-B.).

3.1.2.2 Résultats

Les concentrations de BPC dans les échantillons de sédiments prélevés lors des deux campagnes d'échantillonnage effectuées après le renflouage sont fournies aux annexes 2 et 3, et les cartes de distribution correspondantes sont présentées à la figure 3. Les résultats montrent que les concentrations de BPC dans les sédiments aux environs du site de l'*Irving Whale* après son renflouage étaient beaucoup plus élevées qu'avant les opérations de levage (Figure 2). Les niveaux

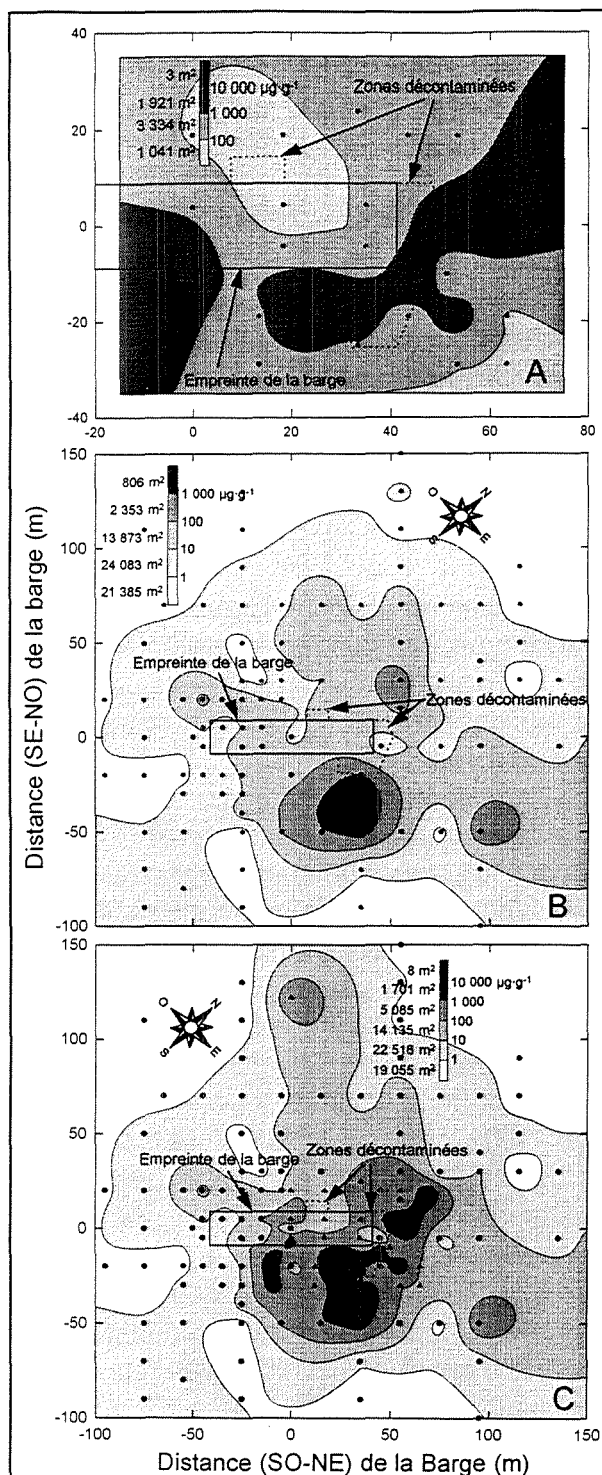


Figure 3. Variations spatiales de la concentration des BPC dans les sédiments autour du site de l'Irving Whale après son renflouage et les opérations de décontamination, à partir d'échantillons récoltés en août (a), octobre (b), et août (▲) et octobre (●) combinés (c). Les données brutes sont fournies aux annexes 2 et 3.

après le renflouage atteignaient $10\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ à deux endroits situés à proximité immédiate de l'empreinte de la barge (Figure 3), comparativement à $2\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ à seulement un endroit avant le levage (Figure 2). Dans la zone située à l'arrière de l'empreinte de la barge, les concentrations de BPC dans les sédiments dépassaient dans la plupart des cas $100\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ en août, après le renflouage de la barge, même après les opérations de décontamination (Figure 3). Cette augmentation localisée de la contamination des sédiments par les BPC après le renflouage pourrait avoir résulté : 1) d'une fuite de BPC présents dans la barge pendant les opérations de levage; et/ou 2) des premiers efforts de décontamination qui pourraient avoir causé la remise en suspension des BPC qui jusque-là auraient été enfouis sous des sédiments superficiels moins contaminés.

La régression des concentrations de BPC dans les sédiments en fonction de la distance de l'empreinte de la barge ont révélé une décroissance logarithmique avec la distance (Figure 4). La comparaison avec les données antérieures au renflouage révèle une différence significative dans la décroissance spatiale des concentrations de BPC avant et après la remontée de la barge. Toutefois, les différences entre les régressions pré- et post-renflouage n'étaient significatives que dans la direction est par rapport à l'empreinte de la barge lorsque les données sont subdivisées en composantes est et ouest. Le regroupement des résultats en intervalles logarithmiques de distance de la barge (0-10 m, 10-100 m, 100-1 000 m et 1 000-10 000 m; non présenté) indique qu'il y a peu de variations spatiales apparentes dans les concentrations de BPC tout près de la barge, les changements les plus importants étant observés entre 10 et 100 m. Là encore, la subdivision de ces regroupements en composantes est et ouest démontre que la décroissance la plus forte des concentrations de BPC

en fonction de la distance en direction est s'est produite dans l'intervalle de 10 à 100 m de l'empreinte de la barge. La comparaison de l'aire sous la courbe de régression pour les divers intervalles de distance en direction est a révélé que les concentrations moyennes de BPC ont augmenté d'un facteur 20 entre 10 et 100 m de la barge après son renflouage, et d'un facteur 11 entre 100 et 1 000 m. On n'a pas observé de changements notables des concentrations moyennes de BPC à des distances de 1 000 à 10 000 m après le renflouage. Ce patron spatio-temporel tend à supporter l'hypothèse que l'accroissement des concentrations de BPC aux environs du site étaient dues à une fuite provenant de la barge plutôt qu'aux premiers efforts de décontamination. De plus, la fuite de BPC se serait vraisemblablement produite à une cer-

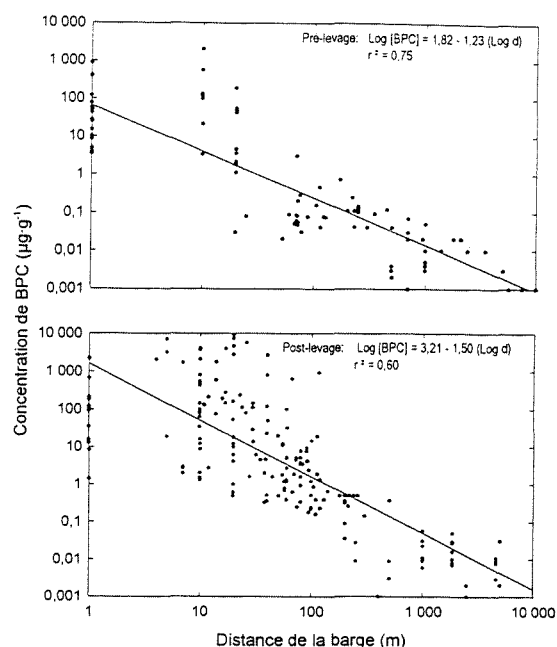


Figure 4. Variations des concentrations des BPC dans les sédiments en fonction de la distance de l'*Irving Whale* avant et après son renflouage, à partir d'échantillons récoltés en 1996.

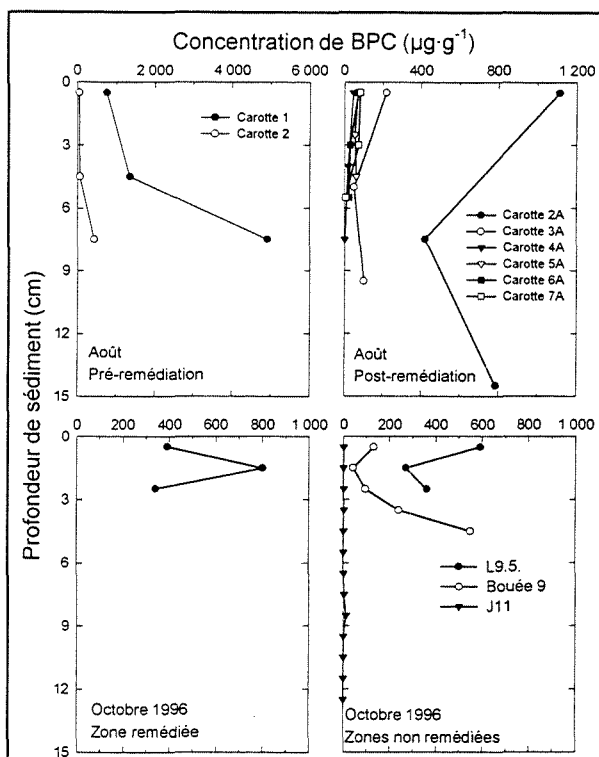


Figure 5. Variations de la concentration de BPC en fonction de la profondeur dans les carottes de sédiments récoltées autour du site de l'*Irving Whale* après son renflouage, en août (pré- et post-décontamination) de même qu'en octobre 1996 à l'intérieur et à l'extérieur des zones décontaminées. Les données brutes sont fournies aux annexes 2 et 3.

taine hauteur au-dessus du fond marin durant la remontée de la barge, étant donné que les changements les plus importants dans les concentrations de BPC par rapport aux mesures avant renflouage ont été observés à des distances de plus de 10 m de l'empreinte.

Les profils de distribution des BPC dans les sédiments ne présentaient pas de patrons réguliers des changements de concentration en fonction de la profondeur dans les sédiments après le renflouage (Figure 5). Avant la décontamination, les concentrations de BPC les plus élevées ont été mesurées dans les sédiments à plus grande profondeur, tandis que la plupart des carottes de sédiments contaminés prélevées en août et octobre après les opérations de décontamination ont révélé que les concentrations de BPC étaient les plus élevées dans les sédiments superficiels et profonds. Un seul échantillon,

prélevé en octobre dans une zone décontaminée, a montré une baisse de la concentration dans les sédiments superficiels.

Bien que la présence de concentrations élevées de BPC dans les sédiments superficiels et profonds puisse supposer des déversements récents et anciens, les données disponibles sont insuffisantes pour permettre de vérifier cette hypothèse. De plus, les sédiments meubles présents aux environs du site du naufrage étaient généralement très minces, avec une épaisseur moyenne de 5 ± 4 cm (Figure 6). Seules quelques petites zones, situées surtout près de l'empreinte de la barge, présentaient des épaisseurs de sédiments de plus de 8 cm. Cela pourrait suggérer qu'il y a eu réduction de la vitesse des courants et de la turbulence à proximité de la barge pendant les 26 ans qu'elle a passés sur le fond, ce qui pourrait avoir causé une augmentation du taux de sédimentation des particules en suspension dans cette zone.

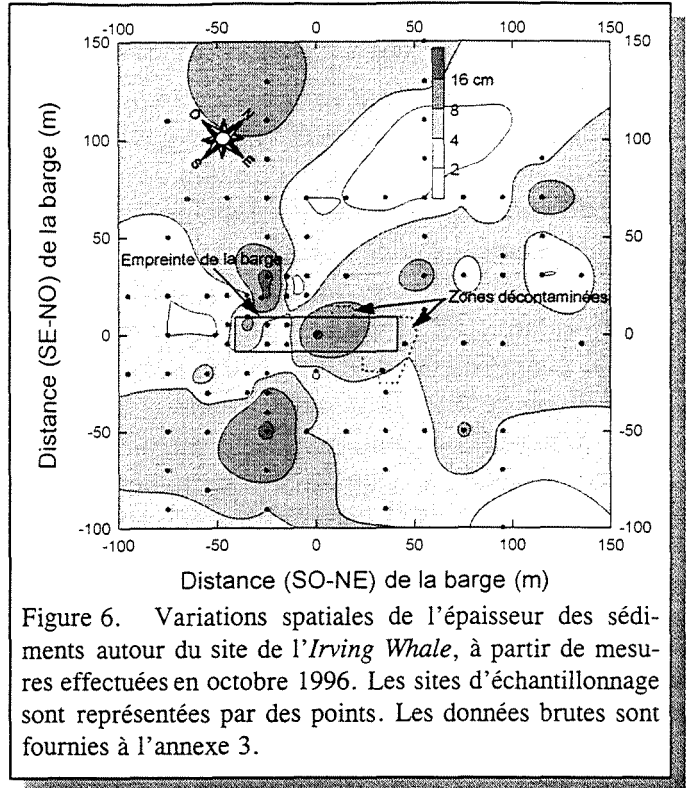


Figure 6. Variations spatiales de l'épaisseur des sédiments autour du site de l'*Irving Whale*, à partir de mesures effectuées en octobre 1996. Les sites d'échantillonnage sont représentés par des points. Les données brutes sont fournies à l'annexe 3.

3.1.3 Charge totale en BPC des sédiments

Des estimations de la charge totale en BPC des sédiments aux environs de l'empreinte de l'*Irving Whale* ont été calculées à partir de l'analyse des échantillons recueillis en août et octobre 1996. Un premier calcul a été effectué en utilisant seulement les résultats des échantillons prélevés en octobre 1996 pour fournir une estimation de la charge totale de BPC. Les résultats obtenus à partir des échantillons prélevés en août 1996 n'ont pas été utilisés dans ce calcul en raison de déplacements probables des sédiments qui pourraient avoir affecté la distribution des BPC entre ces deux périodes. La combinaison des données des deux campagnes d'échantillonnage pourrait résulter en la possibilité que certains BPC soient comptés deux fois. Toutefois, un second calcul a été effectué à l'aide des résultats des échantillonnages d'août et octobre afin d'obtenir une estimation qui correspondrait au pire scénario de contamination des sédiments par les BPC aux environs de l'empreinte de la barge.

Dans un premier temps, des cartes de distribution des concentrations de BPC ainsi que de l'épaisseur et de la porosité des sédiments ont été modélisées sur une superficie de 62 500 m² (250 m × 250 m) aux environs de l'empreinte de la barge par une méthode d'interpolation (krigeage). Ces cartes de distribution ont ensuite servi au calcul d'une carte de distribution représentant la quantité de BPC présente par unité de surface dans les sédiments. Une estimation de la charge totale en BPC (kg) a ensuite été calculée à partir de cette carte en faisant la somme

des quantités présentes à l'intérieur de chaque surface délimitée par un intervalle logarithmique donné de l'inventaire en BPC (voir des détails à l'annexe 4).

La charge estimée en BPC des sédiments aux environs du site de l'*Irving Whale*, d'après les échantillons prélevés en octobre 1996, est présentée à la figure 7 avec des estimations de la superficie et du volume des sédiments pour chaque intervalle logarithmique de l'inventaire de BPC par unité de surface. Ces résultats indiquent que les charges en BPC de plus de $0,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ se retrouvent à l'intérieur d'une zone de 355 m^2 située à l'est de l'empreinte de la barge. La quantité totale de BPC dans cette zone est d'environ 58 kg , contenus dans environ 10 m^3 de sédiments. On trouve des charges en BPC de plus de $0,01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ dans quatre zones (dont deux de petite taille), correspondant à une superficie totale de $2\,041 \text{ m}^2$, et contenant environ 110 kg de BPC enfouis dans 84 m^3 de sédiments. Ainsi, environ 74% des BPC présents dans la zone examinée autour de l'empreinte de la barge sont confinés à l'intérieur d'une superficie d'environ $2\,000 \text{ m}^2$. Le reste des BPC présents dans les sédiments aux environs du site de la barge sont répandus sur une superficie de plus de $60\,000 \text{ m}^2$ qui contient près de $2\,900 \text{ m}^3$ de matériau.

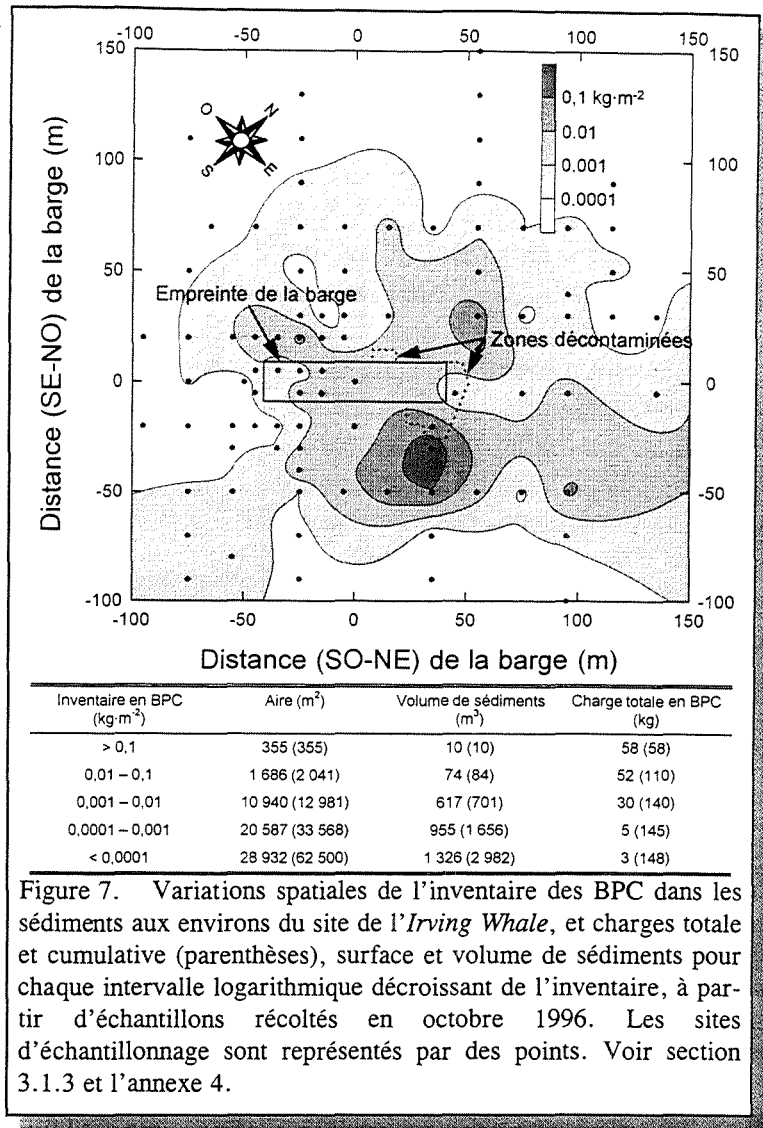


Figure 7. Variations spatiales de l'inventaire des BPC dans les sédiments aux environs du site de l'*Irving Whale*, et charges totale et cumulative (parenthèses), surface et volume de sédiments pour chaque intervalle logarithmique décroissant de l'inventaire, à partir d'échantillons récoltés en octobre 1996. Les sites d'échantillonnage sont représentés par des points. Voir section 3.1.3 et l'annexe 4.

Les résultats de la deuxième estimation de la charge totale en BPC des sédiments autour du lieu du naufrage sont présentés à la figure 8. La charge totale en BPC dans la région évaluée augmenterait de 148 à 345 kg , dont 88% (303 kg) serait confinés à l'intérieur d'une superficie de $5\,461 \text{ m}^2$ contenant 318 m^3 de sédiments. Plusieurs petites zones où les charges en BPC dépassent $0,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ se retrouvent autour de l'empreinte de la barge, et couvrent environ 858 m^2 avec une charge en BPC de 157 kg dans 44 m^3 de sédiments. Ces zones ne chevauchent pas beaucoup les zones décontaminées, ce qui indique que les efforts de décontamination menés en août 1996 ont réussi à éliminer des BPC du site (220 kg ; voir le tableau 1).

3.2 Biote

3.2.1 Pré-renflouage

Les organismes benthiques (crabe des neiges, crevette de sable, amphipodes) prélevés en 1995 à proximité de l'*Irving Whale* avant son renflouage étaient contaminés par des BPC provenant de la barge (Gilbert et Walsh, 1996). La plupart des organismes recueillis près de la barge présentaient des concentrations plus élevées que ceux qui se trouvaient dans des zones plus éloignées, et la composition des congénères de BPC présents chez certains des organismes prélevés étaient typiques de l'Aroclor 1242. La concentration d'Aroclor 1242 dans les glandes digestives d'un crabe des neiges (*Chionoecetes opilio*) capturé à environ 1 km de la barge atteignait $0,66 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ contre $0,10 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ à une distance de 4 km, mais l'Aroclor 1242 n'a pas été formellement identifié dans ce dernier échantillon (Gilbert et Walsh, 1996). En termes de BPC totaux, les concentrations dans les glandes digestives de crabes des neiges pré-

levés à 30 m à l'est et à 500 m au nord de la barge atteignaient $1,031 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ et $0,332 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ respectivement, contre $0,10 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ à un site témoin situé près de Chéticamp (N.-É.) Ce patron spatial de la contamination des crabes par les BPC autour de l'*Irving Whale* semblait correspondre aux déplacements connus des crabes des neiges (Dufour, 1988; Lefebvre et Brêthes, 1991). La contamination des crabes près de la barge avant le renflouage était comparable à celle des crabes de l'estuaire du Saint-Laurent (M. Lebeuf, MPO - Région Laurentienne, données inédites).

Des individus d'autres espèces, notamment les amphipodes (*Anonyx nugax*), les crevettes de sable (*Crangon* sp.) et les chabots, capturés à une distance de 0,5 à 1,5 km de la barge, étaient aussi contaminés par l'Aroclor 1242. En conclusion, la contamination locale du biote, liée à la présence des BPC provenant de l'*Irving Whale*, semblait limitée à l'intérieur d'un rayon de 2 km autour de la barge avant les opérations de renflouage (Gilbert et Walsh, 1996).

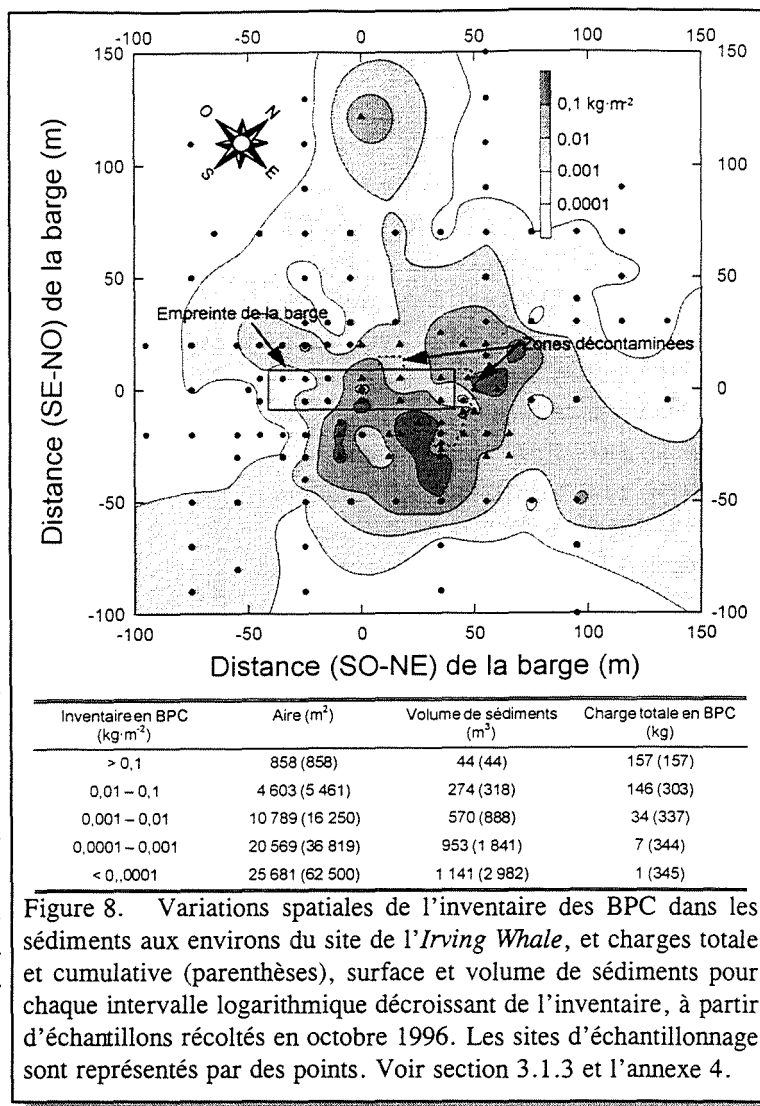


Figure 8. Variations spatiales de l'inventaire des BPC dans les sédiments aux environs du site de l'*Irving Whale*, et charges totale et cumulative (parenthèses), surface et volume de sédiments pour chaque intervalle logarithmique décroissant de l'inventaire, à partir d'échantillons récoltés en octobre 1996. Les sites d'échantillonnage sont représentés par des points. Voir section 3.1.3 et l'annexe 4.

3.2.2 *Post-renflouage*

En préparation au renflouage de l'*Irving Whale*, un autre échantillonnage du biote a été planifié, mettant notamment l'accent sur la glande digestive des crabes des neiges, pour les raisons suivantes :

- 1) les BPC s'accumulent principalement dans la glande digestive au contenu lipidique élevé des crabes;
- 2) on disposait d'informations antérieures sur la présence des BPC dans la glande digestive; et
- 3) l'industrie de la pêche du crabe des neiges présente une grande importance commerciale.

Après le renflouage de l'*Irving Whale*, l'échantillonnage a délibérément été retardé jusqu'en octobre 1996 pour permettre une certaine bioaccumulation chez les crabes de la zone située à proximité immédiate du site du naufrage de la barge. Cette stratégie permettrait de fournir un portrait plus représentatif des effets des opérations de renflouage sur la contamination du biote par les BPC. Bien que l'échantillonnage ait été axé sur la glande digestive des crabes des neiges, le muscle a également été examiné dans les cas où la glande digestive présentaient des concentrations élevées de BPC. Il avait été suggéré que les concentrations de BPC dans le muscle seraient vraisemblablement inférieures d'un ou de deux ordres de grandeur à celles de la glande digestive (Gilbert et Walsh, 1996). Des amphipodes capturés dans des casiers appâtés lors de l'échantillonnage du crabe des neiges ont également été analysés (voir la section 3.2.3).

3.2.2.1 *Plan d'échantillonnage et analyse*

En octobre 1996, des échantillons de crabes ont été prélevés à 20 stations situées aux environs du site de l'*Irving Whale*, incluant deux stations sur l'empreinte de la barge et une station de référence située à 30 milles marins (55 km) au nord. Les autres stations d'échantillonnage ont été choisies stratégiquement aux environs du site, et certaines d'entre elles avaient été échantillonnées avant les opérations de renflouage. Les crabes des neiges ont été capturés à chaque station à l'aide de deux casiers coniques de pêche commerciale, et une étiquette de pêche du MPO a été fixée à tous les casiers et aux bouées avant leur déploiement. La moitié des casiers ont été relevés deux jours après leur mise à l'eau, mais les autres seulement après 10 jours en raison du mauvais temps. Au moment de la levée des casiers, environ 40 crabes des neiges mâles dont la carapace avait une largeur de 85 à 135 mm étaient prélevés à chaque station, puis placés dans des bacs à poissons de plastique d'une capacité de 30 l, propres et étiquetés. Les crabes ont été gardés vivants jusqu'à leur dissection en laboratoire.

Les méthodes de dissection ont été les mêmes que celles utilisées en 1995 : pour chaque station, on a préparé plusieurs échantillons combinés de 5 mâles chacun, pour les glandes digestives et pour les tissus musculaires. Un seul échantillon combiné a été analysé pour chaque station, tandis que les autres ont été gardés en réserve. Il faut noter deux exceptions à cette stratégie. Pour l'empreinte de la barge, en plus d'un échantillon combiné de 5 animaux, on a prélevé les glandes digestives de 40 crabes qu'on a conservées séparément pour les analyser individuellement afin de mesurer la variabilité entre spécimens. Le même protocole d'échantillonnage a été appliqué à la station de référence située à 30 milles marins au nord.

Pour les analyses en laboratoire, on a mesuré tous les congénères de BPC présents dans l'Aroclor 1242, et d'autres couramment présents dans les mélanges d'Aroclor 1254 et 1260. En fonction de la disponibilité dans le commerce des divers congénères de BPC pouvant servir de standards, on a choisi 159 composés. Avec cette série de biphényles chlorés, seuls cinq constituants mineurs n'ont pas pu être identifiés chez les crabes des neiges (pour chacun des cinq, on estime à moins de 3 % la contribution à la quantité totale de BPC). De plus, un certain nombre de congénères de BPC n'ont pas été observés régulièrement à des concentrations supérieures aux limites de détection. L'inter-étalonnage a été effectué par un laboratoire privé (Axys Analytical Ltd., Sidney, C.-B.) et par le laboratoire d'Environnement Canada (P. Hennigar, MDE - Région Atlantique) pour les mêmes échantillons.

3.2.2.2 Résultats

Les résultats des analyses de BPC dans les échantillons de glande digestive et de muscle de crabes des neiges mâles (tels qu'exploités commercialement) sont présentés au tableau 2 et à la figure 9. Un seul parmi tous les échantillons combinés, celui qui provenait de l'empreinte de la barge, présentait des concentrations de BPC plus élevées que la norme canadienne pour la consommation ($2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) dans la glande digestive ($27,2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) et le muscle ($2,2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Toutefois, un deuxième échantillon combiné prélevé seulement à quelques mètres de distance présen-

Tableau 2. Concentrations de BPC dans la glande digestive et le muscle d'échantillons de crabe des neiges récoltés en octobre 1996 autour du site de l'*Irving Whale*.

Station d'échantillonnage ^a	Distance de l'empreinte de la barge (m)	Concentration de BPC ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)		Rapport (G.D. / M.)
		Glande digestive	Muscle	
0-N-1	0	2,5	0,56	4,46
0-N-2	0	27,2	2,2	12,36
0,54-N-1	1 000	0,31	0,034	9,12
0,54-O-1	1 000	0,25	0,03	8,33
0,54-E-1	1 000	2	0,035	57,14
0,54-S-1	1 000	0,29	0,015	19,33
1-N-1	1 852	2,1	0,044	47,73
1-W-1	1 852	0,43	0,013	33,08
1-S-1	1 852	3,3	0,1	33
1-E-1	1 852	0,47	0,022	21,36
2,5-S-1	4 630	0,25	0,021	11,9
2,5-E-1	4 630	0,16	0,002	80
30-N-1	55 560	0,2	0,008	25
0,14-SE-1	250	0,76	0,027	28,15
0,28-SE-1	500	0,55	0,014	39,29
0,54-SE-1	1 000	0,96	0,013	73,85
1-SE-1	1 852	0,46	0,006	76,67
1,4-SE-1	2 500	0,27	0,001	270
2,8-SE-1	5 000	0,55	0,004	137,5
5,4-SE-1	10 000	0,15	0,088	1,7

^a Les stations d'échantillonnage ont été codifiées comme suit : distance de l'empreinte de la barge (milles nautiques) – orientation par rapport à l'empreinte de la barge – numéro d'échantillon de laboratoire.

tait une concentration de $2,5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ dans la glande digestive, ce qui suggère que certains spécimens de la zone où on avait observé des BPC libres pourraient être beaucoup plus contaminés que les autres. L'analyse subséquente de 5 spécimens de la même station a donné des valeurs variant de $0,32$ à $1,1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ dans la glande digestive. La représentation graphique de la concentration de BPC dans la glande digestive des crabes des neiges en fonction de la distance de l'empreinte de la barge montre que seuls cinq échantillons combinés, incluant l'échantillon plus contaminé prélevé à l'intérieur de l'empreinte ($27,2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), dépassaient $1,0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; ils ont tous été prélevés à l'intérieur d'un rayon 2 000 m autour de l'empreinte de la barge (Figure 9).

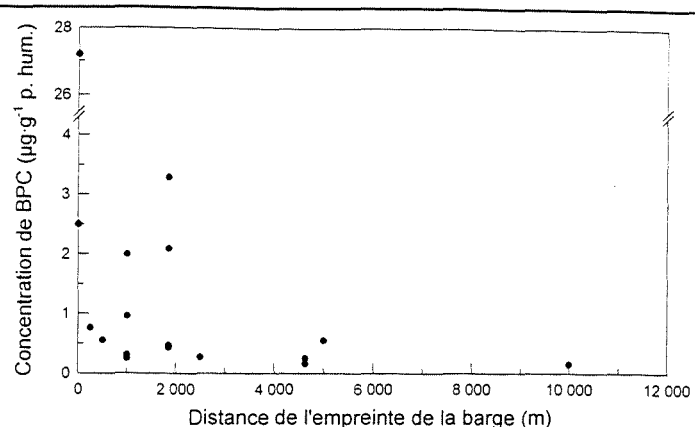


Figure 9. Variations spatiales de la concentration de BPC dans la glande digestive de crabes de neiges prélevés aux environs du site de l'*Irving Whale* en octobre 1996.

L'analyse des composantes principales (Zitko, 1994) a été utilisée pour déterminer l'origine des BPC présents dans les crabes des neiges aux environs du site de l'*Irving Whale*. Cette méthode statistique permet de projeter la variabilité entre les échantillons de crabes sur un plus petit nombre de dimensions représentant des combinaisons linéaires des variables d'origine, dans ce cas les concentrations des divers congénères de BPC. Pour la présente analyse, 58 congénères de BPC ont servi à comparer les échantillons de crabes des neiges avec le mélange de BPC présent dans la barge et les mélanges commerciaux de BPC, notamment l'Aroclor 1242 et les mélanges plus chlorés d'Aroclors 1254 et 1260, dont les profils des congénères de BPC sont ceux qui se retrouvent le plus couramment dans l'environnement.

La variabilité de la composition en pourcentage des 58 congénères de BPC entre les tissus de crabes, les préparations commerciales de BPC et le fluide caloporteur de la barge a été projetée sur les deux premières composantes principales, qui représentent respectivement 28 % et 21 % de la variabilité

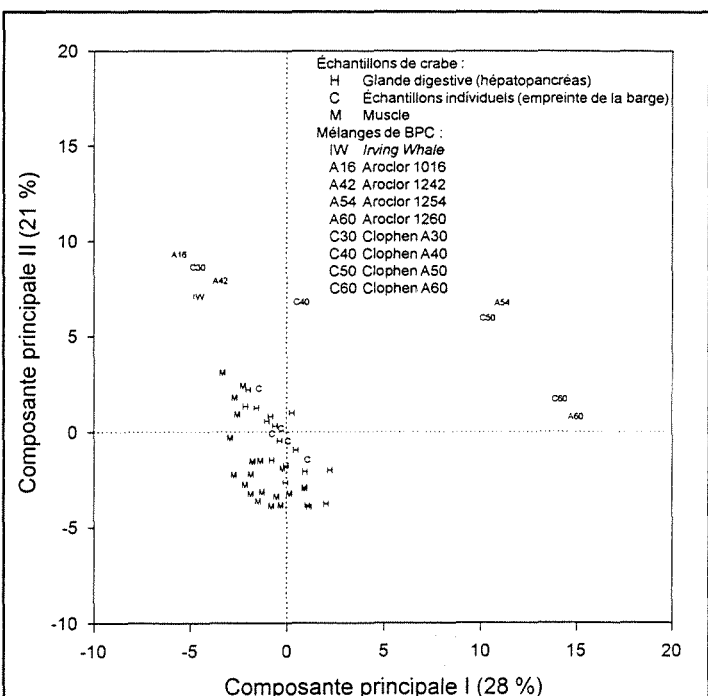


Figure 10. Projection de divers mélanges commerciaux de BPC et d'échantillons de crabe de neiges prélevés aux environs du site de l'*Irving Whale* en octobre 1996, sur les deux premières composantes principales de la variabilité de leur composition pour 58 congénères de BPC.

totale des données de départ (Figure 10). Dans un premier temps, on peut observer que la composition du fluide caloporteur de la barge est, comme prévu, semblable à celle de l'Aroclor 1242 (Schultz *et al.*, 1989). Dans un deuxième temps, la composition en congénères de BPC chez les crabes forme un nuage qui est plus près de l'Aroclor 1242 et du fluide caloporteur de la barge que des mélanges fortement chlorés d'Aroclors 1254 et 1260. La discrimination entre les crabes et le fluide caloporteur est faite sur la base de la deuxième composante principale, dont la variabilité est principalement formée des congénères faiblement chlorés, parmi lesquels certains ne persistent pas dans l'environnement. Ces résultats indiquent que la première source de BPC dans les échantillons de crabes est l'Aroclor 1242, ce qui confirme que la contamination locale des crabes des neiges par les BPC provient bien de l'*Irving Whale*.

3.2.3 Contamination des amphipodes par les BPC aux environs du site de l'*Irving Whale*

Pour capturer des amphipodes aux 20 stations d'échantillonnage des crabes, deux pièges à ménés ont été fixés à l'extérieur des casiers à crabes des neiges et placés à égale distance l'un de l'autre pour chaque casier. Les pièges à ménés ont été fixés avec de la ficelle blanche à une hauteur d'environ 4 pouces de l'anneau inférieur des casiers. L'appât utilisé se composait de morceaux hachés de gaspareau (*Alosa pseudoharengus*) placés dans un contenant de plastique de 6 oz, présentant des perforations d'environ 5 mm de diamètre sur les côtés, le fond et le dessus.

Dans l'ensemble, les pièges à ménés n'ont pas permis de capturer des amphipodes aux 20 stations d'échantillonnage. La plupart des pièges étaient vides après 2 à 10 jours de mouillage. Seuls quelques pièges ont capturé un ou deux amphipodes, ce qui ne constituait pas un échantillon suffisant pour les analyses chimiques.

Des amphipodes ont toutefois été capturés aux deux stations situées sur l'empreinte de l'*Irving Whale* et à la station de référence, à partir des sacs d'appâts contenant un mélange en décomposition de gaspareau et de maquereau (*Scomber scombrus*) qui avaient été placés dans les casiers à crabes. Les amphipodes ont été retirés manuellement des sacs d'appâts et placés dans des bocaux de 8 oz lavés au solvant. Des gants de latex propres étaient portés en tout temps durant la manipulation des amphipodes. Les bocaux contenant les amphipodes ont alors été placés et conservés dans un congélateur à -20 °C.

Les échantillons d'amphipodes étaient constitués d'un mélange de deux espèces dominantes (*Anonyx nugax* et *Orchomenella* spp.). Avant les analyses de BPC, les amphipodes ont été décongelés, triés par espèces puis placés dans des bocaux Quorpak de 4 oz lavés au solvant. Pendant l'opération de tri, les amphipodes ont été manipulés avec des gants de latex propres et des pinces et des filtres métalliques lavés au solvant. Pour chacune des deux stations situées sur l'empreinte de l'*Irving Whale* et pour la station de référence, on a préparé deux bocaux de 4 oz pour chaque espèce, qui ont été conservés à -20 °C. Les échantillons d'amphipodes triés ont alors été envoyés au laboratoire Axys Analytical Services Ltd., à Sidney (C.-B.), pour le dosage des BPC.

Les résultats montrent que la somme des congénères de BPC, tant dans les appâts de gaspareau que chez les amphipodes de la station de référence en 1996, était d'environ 50 % inférieure aux

valeurs rapportées pour les amphipodes recueillis en 1995 sur le site du naufrage (Tableau 3). Les concentrations ont augmenté de près d'un ordre de grandeur sur l'empreinte de la barge entre 1995 et 1996. Cette augmentation est due entièrement à l'Aroclor 1242, car les congénères 31 et 28, lesquels sont caractéristiques de ce mélange de BPC, représentaient environ 16-17 % du total des BPC chez les amphipodes prélevés sur le site du naufrage en 1995 et 1996. Par contre, chez les amphipodes de la station de référence et dans les échantillons de gaspateau, ces congénères ne représentent que 1,3-1,6 % du total des BPC.

Tableau 3. Concentrations moyennes de BPC ($\pm$ écart-type) dans des échantillons regroupés d'amphipodes entiers récoltés aux environs du site de l'*Irving Whale* en 1995 et 1996, et dans des amphipodes et du gaspateau (appât) provenant d'un site de référence en 1996..

	Gaspateau Estuaire de la Miramichi (Newcastle)	Site de référence	Amphipodes		
			Site de l' <i>Irving Whale</i>		
			Août 1995	Octobre 1996	
				Échant. 0-N-1	Échant. 0-N-2
Distance de la barge (m)	—	55560	0	0	0
Nombre d'échant. regroupés	—	4	3	3	4
BPC totaux ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)					
Poids humide	0,09 ($\pm 0,01$)	0,08 ($\pm 0,02$)	0,15 ($\pm 0,02$)	1,2 ($\pm 0,7$)	0,70 ($\pm 0,45$)
Poids de lipides	2,3 ($\pm 0,1$)	2,3 ($\pm 0,4$)	3,8 ($\pm 0,6$)	28,1 ($\pm 13,6$)	28,7 ($\pm 21,8$)
Congénères 31/28 (% p. hum.)	1,3 ($\pm 0,4$)	1,6 ($\pm 0,6$)	16,0 ($\pm 3,0$)	16,9 ($\pm 1,0$)	16,2 ($\pm 2,0$)

Le tableau 3 ne présente que les valeurs moyennes et les écarts-types, car la taille de l'échantillon était trop faible pour permettre des analyses statistiques plus approfondies. Toutefois, les différences dans les concentrations de BPC chez les amphipodes entre les stations de l'empreinte de la barge et la station de référence sont claires.

4. DISCUSSION

4.1 Bilan net des BPC initialement présents dans la barge

La quantité estimée de BPC provenant de l'*Irving Whale* qui ont été retrouvés jusqu'à maintenant est d'environ 2 114 à 2 311 kg de BPC, ce qui représente de 28 à 31 % de la charge initiale de BPC contenue dans le système de chauffage au moment où le navire a coulé (Tableau 4). Cette quantité comprend les BPC qui ont été récupérés à ce jour (1 966 kg; voir la section 2.4) et la quantité estimée qui se trouve toujours dans les sédiments autour du site de l'*Irving Whale* (148 - 345 kg; voir la section 3.1.3). Par conséquent, environ 5 209 à 5 406 kg de BPC

Tableau 4. Bilan net des BPC initialement présents dans le système de chauffage en circuit fermé de l'*Irving Whale*.

Source	BPC	
	Quantité (kg)	Charge initiale (%)
Nettoyage de la barge	1593	21,2
Opérations de décontamination	373	5
Quantité estimée dans les sédiments au site	148 - 345	2.0 - 4.6
BPC totaux retrouvés	2,114 - 2,311	28.1 - 30.7
BPC perdus dans l'environnement (irré récupérables)	5,209 - 5,406	69.3 - 71.9
Total:	7520	100

provenant de la barge (de 69 à 72 % de sa charge initiale) sont perdus dans l'environnement et ne peuvent être récupérés.

Quelques indications laissent croire qu'une proportion importante des BPC perdus par l'*Irving Whale* s'est échappée au moment du naufrage. Dans un premier temps, on a trouvé des BPC dans les sacs de débris souillés par le mazout qui ont été récupérés lors du nettoyage des plages des Îles-de-la-Madeleine suite au déversement initial, qui s'est produit au moment du naufrage. Dans un deuxième temps, les concentrations les plus élevées de BPC (sous forme d'Aroclor 1254) jamais rapportées pour le plancton ont été mesurées en 1972, dans le sud du golfe du Saint-Laurent (Ware et Addison, 1973; Harding *et al.*, sous presse), soit deux ans après le naufrage. On croit également que la perte de la majorité des BPC contenus à l'origine dans le système de chauffage durant les 26 années passées par l'*Irving Whale* au fond de la mer est improbable, compte tenu de la condition relativement bonne de la coque au moment du renflouage. Les seules exceptions sont les trous dans l'arcaste (voir la section 2.1), une fissure dans la coque sous la citerne n° 4 tribord, et la corrosion physique des canalisations bouclées externes. Celles-ci, qui font partie du système de chauffage, renfermaient quelque 15 % de la quantité totale de BPC présente dans la barge au moment du naufrage, lesquels pourraient s'être échappés à mesure que la corrosion des canalisations bouclées s'effectuait. Toutefois, cela ne peut expliquer la quantité totale de BPC disparus depuis le naufrage.

Il semble que l'*Irving Whale* a sombré par la partie arrière pendant qu'on la remorquait. Comme la longueur de la barge (82,3 m) dépassait la profondeur de l'eau au site (67 m), elle a pu être traînée sur le fond en position inclinée, sur une certaine distance, et pendant ce temps des BPC ont pu s'échapper par les sorties de ventilation situées à l'arrière du bâtiment. Cependant, l'hypothèse d'un important déversement des BPC de l'*Irving Whale* au moment du naufrage demeure spéculative, et des informations additionnelles sont requises afin d'examiner cette question (voir la section 5.1).

4.2 Devenir possible des BPC manquants

Les 5 209 à 5 406 kg de BPC provenant de l'*Irving Whale* et qui sont perdus dans l'environnement pourraient avoir été dispersés du site à travers plusieurs mécanismes. Compte tenu de l'affinité des BPC pour les particules en suspension riches en matières organiques, il est possible qu'une certaine quantité de BPC aient pu s'accumuler dans les zones de sédimentation du golfe du Saint-Laurent. La région la plus probable pour l'accumulation des BPC provenant de la barge est la partie du chenal Laurentien située au nord des Îles-de-la-Madeleine, puisque les courants de fond résiduels près de l'*Irving Whale* ont tendance à déplacer les particules vers cet endroit (Gilbert et Walsh, 1996). Quelques BPC ont pu également s'accumuler dans d'autres zones de sédimentation de la partie sud du golfe du Saint-Laurent, par exemple dans la zone située entre l'île du Cap-Breton et les Îles-de-la-Madeleine.

Un autre mécanisme par lequel les BPC provenant de l'*Irving Whale* auraient pu être dispersés dans l'environnement est leur incorporation dans la chaîne alimentaire. Cependant, il n'est pas possible d'estimer les quantités de BPC qui ont pu être transférées au biote ni la concentration maximale atteinte à divers niveaux trophiques au cours des 26 années qui ont suivi le naufrage. Bien qu'il y ait certains rapports de concentrations anormalement élevées de BPC dans le plancton de la partie sud du golfe en 1972 (Ware et Addison, 1973, Harding *et al.*, sous presse), on ne peut estimer à l'heure actuelle quelle est la contribution exacte des BPC de l'*Irving Whale* à cette contamination observée.

Un autre devenir possible des BPC provenant de l'*Irving Whale*, qui n'a pas encore été examinée à ce jour, émane de la nature du fond marin où la barge a coulé en 1970 et des caractéristiques physiques des BPC. Le site de l'*Irving Whale* est caractérisé par un fond sablonneux composé seulement d'une mince couche de sédiments (de 2 à 16 cm), sous laquelle le substrat rocheux semble être constitué de grès. Selon sa porosité et sa perméabilité, le grès peut présenter une capacité de stockage naturelle pour des fluides comme l'eau, le mazout et le gaz naturel. Du fait de leur densité relative élevée par rapport à l'eau de mer, quelques BPC auraient pu s'infiltrer dans le substrat rocheux et y être retenus, ce qui auraient empêché leur dispersion dans le reste du golfe. La répartition des BPC manquants entre les diverses voies de dispersion susmentionnées est toutefois inconnue, et ne peut être estimée à l'heure actuelle, compte tenu de l'état des connaissances.

De plus, une proportion non négligeable des BPC manquants pourrait ne pas persister dans l'environnement marin du golfe du Saint-Laurent en raison de processus de volatilisation et de biodégradation. D'une part, il a été démontré que l'Aroclor 1242 subissait une déchloration importante via une biodégradation *in situ* dans les sédiments, particulièrement lorsque présent à des concentrations élevées (Fish, 1996; Wright *et al.*, 1996). D'autre part, une étude récente en laboratoire sur la volatilisation des BPC à partir de sable quartzueux immergé a indiqué que les pertes d'Aroclor 1242 présent dans les sédiments, par voie de dissolution et d'évaporation subséquente, sont importantes (Chiarenzelli *et al.*, 1997). La majeure partie des BPC ainsi perdus dans l'atmosphère serait constituée de dichlorobiphényles et de trichlorobiphényles, lesquels représentent plus de 50 % du mélange d'Aroclor 1242. Le fait que les concentrations anormalement élevées de BPC dans le plancton du sud du golfe du Saint-Laurent au début des années 70

ont été corrélées avec les précipitations (Ware et Addison, 1973) tendrait à confirmer l'hypothèse d'une évaporation de BPC dans l'atmosphère suite au naufrage de l'*Irving Whale*. Cependant, on ne peut estimer la quantité de BPC libérés par l'*Irving Whale* qui ne devraient pas persister dans l'environnement marin en raison de processus de volatilisation et de biodégradation. Selon le temps écoulé depuis leur écoulement de l'*Irving Whale*, certains de ces BPC pourraient être encore présents à l'heure actuelle dans l'eau et les sédiments du golfe du Saint-Laurent.

4.3 Travaux de recherche en cours dans le golfe du Saint-Laurent

En 1996, l'Institut Maurice-Lamontagne (IML) du MPO - Région Laurentienne - a entrepris un projet de recherche sur la présence de BPC dans les sédiments du golfe du Saint-Laurent. Plusieurs carottes de sédiments ont été prélevées à diverses stations dans le golfe. La stratégie d'échantillonnage visait à compléter les informations disponibles sur les BPC dans les sédiments de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Ainsi, cinq carottes de sédiments furent prélevées avec succès dans le chenal Laurentien, le long d'un transect s'étendant de Sept-Îles au détroit de Cabot; et deux autres ont été prélevées dans le chenal d'Esquiman (Figure 11). Ces carottes font présentement l'objet d'analyses pour les BPC, les dibenzodioxines polychlorées (PCDD) et les dibenzofurannes polychlorés (PCDF).

Le premier objectif de ce projet est de fournir une évaluation approfondie de la quantité de BPC dans les sédiments du golfe, au moyen d'analyses de carottes de sédiments prélevées dans les chenaux Laurentien et d'Esquiman. Les sédiments du golfe du Saint-Laurent semblent constituer le principal réservoir de BPC dans l'estuaire et le golfe (Gilbert et Walsh, 1996). Cependant, cette conclusion est fondée sur un bilan estimatif des BPC qui a été établi à partir d'une quantité limitée de données. Pour déterminer la contribution relative des BPC issus de l'*Irving Whale* à la charge totale dans le système de l'estuaire et du golfe, il est essentiel d'obtenir des estimations plus fiables de la charge en BPC des sédiments dans le golfe du Saint-Laurent. Cette charge sera estimée à partir d'inventaires de BPC à des stations représentatives.

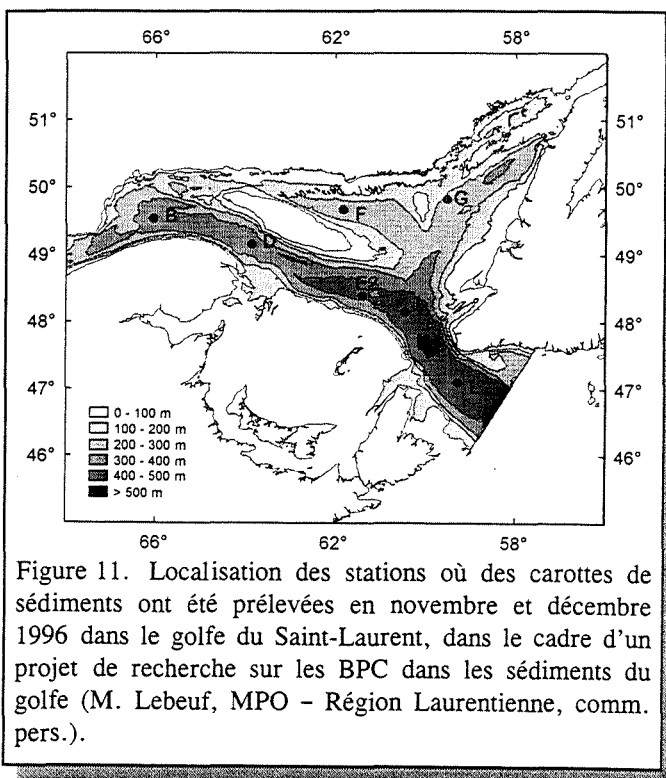


Figure 11. Localisation des stations où des carottes de sédiments ont été prélevées en novembre et décembre 1996 dans le golfe du Saint-Laurent, dans le cadre d'un projet de recherche sur les BPC dans les sédiments du golfe (M. Lebeuf, MPO - Région Laurentienne, comm. pers.).

Le deuxième objectif du projet est d'utiliser l'analyse en composantes principales (ACP) pour faire le lien entre le schéma de distribution observé des BPC dans les sédiments du golfe et les sources potentielles, y compris l'*Irving Whale*. Une proportion significative des 5 209 à

5 406 kg de BPC issus de la barge se sont peut-être accumulés dans les zones de sédimentation du golfe du Saint-Laurent. Tel que mentionné à la section 4.2, la région la plus probable pour l'accumulation de BPC provenant de la barge serait la partie du chenal Laurentien située au nord des Îles-de-la-Madeleine. Par conséquent, on aura recours à l'ACP pour faire la distinction entre les diverses sources qui ont contribué à l'accumulation de BPC dans les sédiments de cette zone du chenal Laurentien. La source atmosphérique sera caractérisée en fonction de la composition en congénères des BPC présents dans les sédiments provenant du chenal d'Esquiman, lui-même éloigné, tandis que les patrons de distribution des BPC dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent et la partie ouest du golfe serviront à caractériser les apports fluviaux de BPC. Enfin, le patrons de distribution des BPC dans les sédiments prélevés près de la barge, lequel est typique de l'Aroclor 1242, servira à caractériser la source provenant de l'*Irving Whale*. Une démarche semblable sera effectuée avec les PCDD et des PCDF, puisque ces substances sont également présentes à titre d'impuretés dans l'Aroclor 1242 et que leur composition en congénères dans les sédiments près du site de l'*Irving Whale* est très différente de celle de la source atmosphérique de PCDD et de PCDF, qui devrait être prédominante dans le golfe du Saint-Laurent.

Dans un troisième objectif, les sédiments des carottes prélevées dans le chenal Laurentien au nord des Îles-de-la-Madeleine seront datés afin de déterminer de façon rétrospective quelle a été, le cas échéant, la période de contribution maximale des BPC provenant de l'*Irving Whale* à la contamination des sédiments du golfe du Saint-Laurent.

4.4 Contamination locale par les BPC et décontamination additionnelle potentielle

4.4.1 Bioaccumulation et toxicologie reliées à la contamination par les BPC dans les sédiments

Les BPC présents dans les sédiments peuvent être incorporés dans la chaîne alimentaire locale de plusieurs façons. Bien que l'absorption de BPC par les organismes puisse se produire via la respiration et la diffusion dermale, l'alimentation semble être le principal mécanisme causant la contamination par les BPC des niveaux trophiques supérieur de la chaîne alimentaire (Jensen *et al.* 1982; Rubenstein *et al.*, 1984; Dexter et Field, 1989). Cependant, il existe plusieurs facteurs qui influencent la distribution et la biodisponibilité des BPC dans les sédiments contaminés de même que leur accumulation par les organismes aquatiques, incluant la nature, la granulométrie et le contenu organique des sédiments, le comportement et le régime alimentaire des organismes, ainsi que le contenu lipidique de leurs tissus. En conséquence, le facteur de bioaccumulation des sédiments au biote (rapport des concentrations dans les tissus aux sédiments; BSAF) peut varier de 1 à plusieurs ordres de grandeur selon l'espèce, le type de sédiment, et le temps d'exposition. Cette complexité limite notre potentiel à prévoir les concentrations de BBC qui seront atteintes dans les différents niveaux trophiques à partir des concentrations seules dans les sédiments.

Néanmoins, les études toxicologiques sur la contamination des sédiments par les BPC indiquent que les concentrations mesurées dans les sédiments au voisinage de l'empreinte de l'*Irving Whale* (voir la section 3.1) sont, en théorie, suffisamment élevées pour avoir localement des

effets létaux aigus ou sous-létaux sur le biote. Par exemple, Plesha *et al.* (1988) ont rapporté une mortalité significative chez l'amphipode fouisseur *Rhepoxynius abronius* et une inhabileté des individus qui survivent à s'enfouir dans des sédiments propres après des expositions de 10 jours à des sédiments enrichis de BPC (Aroclor 1254; 1,0 - 5,2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ p. sec). Dans une autre étude, le ver de sable *Nereis diversicolor* a subi une mortalité de 50 % lorsque exposé à des sédiments contenant un mélange d'Aroclor 1254 (15 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) sur une période de 62,5 jours (Poli-karpov *et al.*, 1983). Cependant, la plupart des études sur les impacts environnementaux de la contamination des sédiments par les BPC sont souvent compliquées par le fait que les sédiments contiennent également d'autres contaminants qui peuvent causer un biais dans les effets toxiques observés des BPC. Le potentiel toxique des sédiments autour de l'empreinte de l'*Irving Whale* pourrait également être constitué par les chlorobenzènes, les dioxines et les furannes, étant donné que ces contaminants étaient aussi présents en tant que constituant important du fluide caloporteur de la barge (chlorobenzènes) ou comme impuretés dans l'Aroclor 1242 (dioxines et furannes; Wakimoto *et al.*, 1988).

Des études plus récentes sur la toxicologie des BPC ont montré la concentration totale des BPC ne caractérise pas à elle seule le potentiel toxique de la contamination des sédiments par les BPC. La toxicité varie entre les différents congénères de BPC et peut donc être différente pour des sédiments ayant des concentrations totales de BPC similaires mais avec des compositions en congénères qui ne sont pas les mêmes. Les congénères de BPC de type non-ortho, soit les n^{os} 77, 126 et 169, sont considérés comme étant les BPC les plus toxiques avec des effets biologiques similaires à ceux qui ont été observés pour la 2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-p-dioxine (2,3,7,8-TCDD) (Ahlborg *et al.*, 1994). De ceux-ci, seul le congénère n^o 77 est présent en quantités mesurables dans l'Aroclor 1242 et représente 0,45 % de tous les BPC mesurés dans ce mélange commercial (Schultz *et al.*, 1989).

4.4.2 Critères de qualité des sédiments et décontamination

Les critères de qualité des sédiments basé sur les aspects bioaccumulatifs et toxicologiques des BPC ont été développés au cours des dernières années pour déterminer les concentrations de BPC dans les sédiments qui seraient sécuritaires pour les organismes aquatiques. Plusieurs approches peuvent être utilisées pour développer ces critères, incluant le partitionnement à l'équilibre, les seuils d'effets apparents, les critères de niveaux d'examen, et la triade de sédiments, toutes fournissant des valeurs similaires pour certains contaminants testés (Chapman *et al.*, 1987).

Environnement Canada a produit des normes intérimaires de qualité des sédiments, visant à être utilisées pour la protection des organismes marins (Environnement Canada, 1995). Ces normes fournissent une concentration-seuil d'effets pour les BPC totaux dans les sédiments marins (0,02 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), au-dessous de laquelle des effets négatifs sur les organismes benthiques seraient rarement observés. Un niveau d'effets probables pour les BPC totaux (0,2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) est également proposé. Les concentrations de BPC supérieures à ce niveau seraient associées à des effets négatifs fréquents sur le plan biologique, incluant des effets létaux aigus et sous-létaux chroniques.

Une évaluation de risques visant spécifiquement le site de l'*Irving Whale* (Cantox Inc., 1996) a également été effectuée et a proposé des concentrations de BPC dans les sédiments qui pourraient être jugées acceptables pour la santé des crabes des neiges et leur consommation par les humains. Ces concentrations de BPC varieraient de 0,02 à 0,17 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, selon les critères suivants : 1) des facteurs de bioaccumulation des BPC provenant des sédiments de 12 à 100 dans la glande digestive des crabes; et 2) des effets toxicologiques observés pour des concentrations supérieures à 2,0 à 2,5 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ dans les tissus.

Environnement Canada a également établi, aux termes de la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement* (LCPE), une norme pour l'élimination sécuritaire en mer des sédiments contaminés par les BPC. Cette limite est de 0,1 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de BPC dans les sédiments, bien que la justification de cette concentration ne puisse être établie. Il est clair toutefois qu'elle ne visait pas la décontamination directe d'un site après un déversement.

D'autres pays ont établi des limites de concentration des BPC dans les sédiments, pour des activités comme l'élimination de matériaux de dragage et la décontamination, et celles-ci varient de la limite américaine de 0,2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (niveau 7 d'alerte à la contamination des sédiments du US Geological Survey) à la limite japonaise de 10 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (maximum permis pour l'enlèvement ou l'élimination de matériaux de dragage) (Macdonald *et al.*, 1992).

La convergence de ces différentes limites établies vers le seuil de 0,1 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de BPC dans les sédiments semble justifier la force de cette valeur comme niveau de protection. Cependant, la décision d'effectuer une décontamination à un site contaminé donné implique également d'autres considérations en plus de l'application des critères de qualité des sédiments. Étant donné que les niveaux-cibles sont principalement fondés sur la toxicité, laquelle peut affecter seulement de faibles portions d'une population ou d'un écosystème donné, d'autres impacts environnementaux découlant d'une décontamination complète peuvent être plus importants que ceux reliés à la contamination locale par les BPC (Dexter and Field, 1989). De plus, les caractéristiques d'un site en particulier où une décontamination des sédiments doit être effectuée doivent être appropriées pour l'utilisation de technique de nettoyage efficaces qui ne causeraient pas la remise en suspension et la dispersion additionnelle de sédiments contaminés.

Aux environs du site de l'*Irving Whale*, l'application d'un critère de 0,1 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ exigerait l'enlèvement d'importantes quantités de sédiments au voisinage de l'empreinte la barre, soit environ 3 000 m³ de sédiments répartis sur une superficie de 62 500 m². Plus de 70 % de ce volume total de sédiments ne contiendrait que 8 kg de BPC, ou 5,4 % de la quantité totale encore présente dans les sédiments près du site (voir la section 3.1.3), et moins de 0,2 % des BPC manquants par suite du nettoyage de la barge et des efforts de décontamination suivant les opérations de levage (voir la section 2.4).

4.4.3 Impacts potentiels de la contamination par les BPC dans les sédiments aux environs du site de l'Irving Whale

Les sections ci-dessous fournissent une évaluation préliminaire des impacts potentiels de l'actuelle contamination des sédiments par les BPC sur le biote, à partir de l'information dispo-

nible décrite dans les sections précédentes. Les impacts sont décrits selon deux scénarios différents, soit avec et sans décontamination des sédiments au site du naufrage. Des recommandations sont également effectuées pour un échantillonnage préalable à la décontamination, dans l'éventualité où une telle décision serait prise.

4.4.3.1 Impacts potentiels en l'absence de décontamination

Dans l'évaluation effectuée avant le renflouage sur les conséquences potentielles d'un déversement de BPC de l'*Irving Whale* sur l'environnement marin du golfe du Saint-Laurent (Gilbert et Walsh, 1996), les impacts sur le biote ont été examinés pour : 1) une fuite lente, intermittente ou continue, de BPC de la barge; et 2) d'importants déversements hypothétiques de 1 200 et de 7 250 kg se produisant dans les eaux de surface ou de fond. En supposant que quelque 350 kg de BPC demeurent dans les sédiments près du site (scénario de la pire éventualité; voir la section 3.1.3) et que les concentrations varient de < 1 à $10\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ sur une superficie de $62\,500\ \text{m}^2$, les impacts potentiels en l'absence de décontamination seraient intermédiaires entre les effets décrits dans le document susmentionné pour une fuite lente et pour un important déversement de 1 200 kg de BPC.

Des effets létaux aigus des BPC sur les organismes benthiques pourraient se produire à l'intérieur des zones de forte contamination par les BPC ($> 10\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Cependant, seuls les organismes relativement sessiles qui vivent en association étroite avec les sédiments de ces zones seraient affectés. Le crabe des neiges et les poissons de fond ne devraient pas être touchés par ces effets, étant donnée leur grande mobilité par rapport à la superficie des zones fortement contaminées.

En plus des effets létaux aigus, des effets sous-létaux chroniques des BPC sur le biote local sont susceptibles de se produire aux environs du site de l'*Irving Whale*. Ces effets seraient observés sur une superficie plus grande que celle délimitée pour les effets létaux aigus et leur importance dépendrait : 1) de la mesure dans laquelle les organismes sont exposés aux sédiments contaminés par les BPC; et 2) de la contamination par les BPC de leurs ressources alimentaires locales. Comme dans le cas des effets létaux, les espèces mobiles qui traversent rapidement la région affectée ne devraient pas subir d'effets négatifs, particulièrement les poissons de fond. Cependant, le crabe des neiges est moins mobile que les poissons, et ceux exposés aux sédiments contaminés près de l'empreinte de la barge pourraient présenter des réponses sous-létales aux BPC dont une induction de l'activité enzymatique, en l'occurrence les oxydase à fonctions multiples (OFM) qui sont impliquées dans le métabolisme des hormones stéroïdes. Toutefois, les effets sous-létaux ayant des conséquences sur la santé des organismes, par exemple des troubles de la reproduction et l'immunosuppression, demeureraient localisés près des sites les plus contaminés, étant donné que le degré d'exposition des crabes aux sédiments fortement contaminés diminuerait rapidement en fonction de la distance de l'empreinte de la barge.

Cependant, il est important de noter que, pour une espèce donnée, les effets létaux aigus et sous-létaux chroniques n'affecteraient qu'un petit nombre d'individus dans la population, étant donné les dimensions faibles de la zone contaminée à l'intérieur de l'habitat hauturier composé de fonds sablonneux dans le sud du golfe du Saint-Laurent. En conséquence, les impacts toxico-

logiques de la contamination locale par les BPC aux environs du site de l'*Irving Whale* ne devraient pas avoir de conséquences notables sur le maintien des populations pour aucune des espèces qui pourraient être affectées.

Néanmoins, la contamination locale des sédiments entraînera sans doute une bioaccumulation des BPC dans la chaîne alimentaire locale. En particulier, les concentrations de BPC dans les crabes de neiges près du site de l'*Irving Whale* devraient augmenter, notamment au voisinage immédiat de l'empreinte de la barge, où les concentrations chez certains crabes dépassent déjà la norme de $2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ fixée pour la consommation humaine (voir la section 3.2.2). Cependant, l'intensité et l'ampleur spatiale à long terme de la contamination du crabe des neiges par les BPC, de même que le temps requis pour atteindre un équilibre, ne peuvent être évalués à l'heure actuelle.

Le devenir à long terme des BPC présents dans les sédiments aux environs du site de l'*Irving Whale* serait réparti parmi les divers mécanismes qui ont été déterminées pour les BPC provenant de la barge qui sont perdus et irrécupérables, notamment leur accumulation dans les zones de sédimentation du golfe, leur incorporation dans la chaîne alimentaire et leur infiltration possible dans le substrat rocheux sous-jacent. De plus, une quantité appréciable des BPC présents dans les sédiments ne persisterait pas dans l'environnement marin du golfe, en raison de leur biodégradation et de leur évaporation probables dans l'atmosphère (voir la section 4.2).

4.4.3.2 Impacts potentiels avec une décontamination additionnelle

Les impacts potentiels des BPC encore présents dans les sédiments aux environs du site de l'*Irving Whale* après des efforts additionnels de décontamination dépendraient évidemment de la superficie nettoyée et du taux de succès de l'opération. Comme ces facteurs ne sont pas établis à l'heure actuelle, la discussion qui suit suppose la décontamination des sites les plus contaminés, soit l'enlèvement des sédiments ayant des charges de BPC supérieures à $0,01 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Cette approche optimiste permettrait l'enlèvement de la plupart des sédiments ayant des concentrations supérieures à $100 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (318 m^3) et la récupération de quelque 300 kg de BPC, soit 88 % de la quantité totale qui reste dans les sédiments près de l'empreinte de la barge (voir la section 3.1.3).

La décontamination des zones les plus contaminées éliminerait probablement la plupart des risques d'effets létaux aigus sur le benthos local, ainsi qu'une certaine partie du potentiel d'effets sous-létaux chroniques qui nuiraient à la santé des organismes vivant près de l'empreinte de la barge. Toutefois, ces conclusions sont fondées sur la prémisse que les activités de décontamination ne libéreraient pas de BPC additionnels qui auraient pu s'infiltrer dans le substrat rocheux sous-jacent (voir la section 4.2).

Malgré la réduction des effets toxiques, les ressources halieutiques aux environs du site de l'*Irving Whale*, notamment le crabe des neiges, continueraient d'accumuler des BPC dans leurs tissus, et les espèces ou individus déjà plus contaminés le resteraient probablement pour encore une certaine période après les travaux de décontamination.

4.4.3.3 Conditions préalables à la décontamination

Pour s'assurer que les activités de décontamination soient efficaces, deux conditions préalables devraient être respectées avant toute tentative d'enlèvement de sédiments au site. Dans un premier temps, la distribution spatiale des BPC dans les sédiments autour de l'empreinte de la barge devrait être réévaluée, notamment au voisinage immédiat du site. Des déplacements de sédiments ont pu se produire depuis le dernier échantillonnage d'octobre 1996, ce pourrait modifier de façon significative la répartition spatiale des BPC aux environs du site (voir l'annexe 5). De plus, les BPC présents à l'origine dans les sédiments ont pu s'infiltrer dans les sédiments subsuperficiels et dans le substrat rocheux sous-jacent, ce qui entraînerait une diminution des concentrations de BPC dans les sédiments de surface. Dans ce contexte, la seconde condition préalable à la décontamination serait de prélever des carottes dans le substrat rocheux, afin d'examiner cette possibilité et de déterminer si les activités de décontamination exposeraient des BPC qui pourraient à l'heure actuelle être enfouis sous les sédiments de surface. Ces conditions préalables à la décontamination sont décrites plus en détail dans les recommandations pour un échantillonnage additionnel au printemps 1997 (voir la section 5.1.1).

4.5 Importance de la contamination du crabe des neiges pour la fermeture locale de la pêche

Une zone de 5 × 5 milles marins (environ 9 × 9 km) centrée sur l'empreinte de l'*Irving Whale* a été fermée à toute pêche, y compris la pêche au crabe des neiges qui est une espèce relativement abondante et activement exploitée dans la région.

Tel que mentionné à la section 3.2.2, les crabes ayant des concentrations de BPC supérieures à la norme de 2 µg·g⁻¹ pour la consommation humaine sont nettement confinés à l'intérieur de la zone d'interdiction à la pêche (moins de 2 km de la barge). Comme les fortes concentrations de BPC dans les sédiments sont également localisées dans cette zone, l'occurrence de crabes contaminés à l'extérieur de la zone d'interdiction à la pêche ne pourrait se produire que si des individus se déplacent loin du site sur une distance d'au moins 4,5 km après avoir accumulé des BPC pendant une certaine période près de l'empreinte de la barge. Dans une étude des déplacements du crabe des neiges dans le sud du golfe du Saint-Laurent, on a observé que les crabes mâles autour des Îles-de-la-Madeleine se déplaçaient sur une distance de 14 km en moyenne durant une période de 1 à 2 ans, avec approximativement deux tiers des crabes parcourant moins de 15 km (Lefebvre et Brêthes, 1996). Cependant, il est important de noter que les crabes ayant une plus grande mobilité sont moins susceptibles de demeurer pour une longue période aux environs des zones fortement contaminées et d'accumuler des BPC que ceux avec des mouvements localisés. En conséquence, la probabilité de capturer des crabes contaminés à l'extérieur de la zone d'interdiction à la pêche est faible à l'heure actuelle, bien qu'on ne puisse écarter la possibilité que des crabes contaminés quittent éventuellement cette zone.

En plus de la mobilité, d'autres aspects biologiques tels que le comportement et l'alimentation peuvent influencer l'ampleur de la contamination du crabe des neiges par les BPC aux environs du site de l'*Irving Whale*. La présence de grandes quantités de BPC dans les sédiments (dépassant les niveaux-trace) et leurs impacts, le cas échéant, sur l'abondance locale du biote associé aux sédi-

ments peut induire des changements de comportement chez le crabes pour éviter les zones fortement contaminées et/ou se déplacer vers d'autres sites pour leur alimentation. De plus, des organismes marins se sont développés en grande abondance sur la coque de l'*Irving Whale* au cours des 26 années passées au fond du golfe et le renflouage de la barge a probablement retiré une partie de la ressource alimentaire locale pour les crabes et autres prédateurs. Étant donné que les débris d'organismes marins trouvés sur l'*Irving Whale* se sont avérés contaminés par les BPC (raclage des surfaces; Tableau 1), le renflouage de la barge pourrait également avoir retiré une partie du potentiel de bioaccumulation des BPC dans la chaîne alimentaire locale. Toutefois, le renflouage pourrait également avoir entraîné la dispersion des crabes contaminés aux environs de l'empreinte de la barge vers d'autres sites favorables pour leur alimentation.

À la lumière de l'information susmentionnée, il est difficile de déterminer si l'intensité et l'ampleur spatiale de la contamination locale du crabe des neiges par les BPC augmenteront ou non au cours des prochaines années. D'une part, des crabes contaminés autour de l'empreinte de la barge ont été capturés deux mois seulement après le renflouage de l'*Irving Whale*, un délai qui peut s'avérer insuffisant pour atteindre une concentration maximale de BPC dans leurs tissus. D'autre part, les crabes possèdent une certaine mobilité et la probabilité de capturer des crabes contaminés plus loin de l'empreinte de la barge pourrait augmenter avec le temps, particulièrement si la contamination locale des sédiments par les BPC demeure élevée. En conséquence, afin de prévenir la récolte et la commercialisation de crabes contaminés, les dimensions actuelles de la zone locale de fermeture à la pêche devraient être réévaluées à la lumière de l'échantillonnage additionnel qui sera effectué au printemps de 1997 (voir la section 5.1.2). Un programme de suivi à long terme des BPC dans le crabe des neiges dans la région sera également nécessaire afin d'examiner cette question dans les années subséquentes (voir la section 5.2.2).

5. RECOMMANDATIONS POUR UN ÉCHANTILLONNAGE ADDITIONNEL ET UN PROGRAMME DE SUIVI

5.1 Échantillonnage additionnel au printemps 1997

5.1.1 Sédiments

Tel qu'indiqué à la section 4.4.3.3, un programme d'échantillonnage approfondi des BPC dans les sédiments au voisinage immédiat de l'empreinte de l'*Irving Whale* devrait être effectué pour : 1) évaluer les changements potentiels dans la répartition spatiale des BPC dans les sédiments aux environs de l'empreinte de la barge depuis octobre 1996; et pour 2) délimiter les zones de forte contamination dans l'éventualité d'une décontamination additionnelle du site. La stratégie d'échantillonnage devrait être comparable à celle qui a été utilisée après le renflouage de la barge. Des échantillons de sédiments de surface devrait être prélevés à des stations distantes de 10 à 20 m l'une de l'autre, dans les environs immédiats de l'empreinte de la barge (Figure 12), et en particulier autour des zones où les concentrations de BPC étaient élevées ($> 100 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) en août et en octobre 1996 (Figure 3). Pour atteindre ce degré de précision spatiale, il faudra recourir à des plongeurs et/ou à un véhicule submersible. Plus loin des zones de

forte contamination et de l'empreinte de la barge, la maille de la grille d'échantillonnage pourrait être augmentée à 40 m (Figure 12) en utilisant une benne déployée à partir de la surface.

En plus des échantillons de sédiments de surface, des carottes de sédiments devraient être prélevées à certaines stations pour compléter celles qui ont été récoltées en 1996 (voir la section 3.1.2.1). Les informations ainsi recueillies, combinées aux mesures de l'épaisseur des sédiments à toutes les stations d'échantillonnage et la détermination de la porosité et de la teneur en carbone des sédiments, permettraient d'estimer la quantité totale de BPC encore présente dans les sédiments sur les lieux du naufrage au printemps de 1997. La comparaison de cette estimation avec celles découlant des échantillonnages effectués en août et en octobre 1996 (section 3.1.3) permettrait de quantifier tout changement dans la contamination des sédiments par les BPC qui aurait pu se produire au cours de l'hiver. Dans ce contexte, des carottes devraient être prélevées dans le substrat rocheux sous-jacent aux sédiments afin d'examiner la possibilité qu'une partie des BPC provenant de l'*Irving Whale* s'y soit infiltrée (voir la section 4.2).

Enfin, la concentration et le contenu organique des particules en suspension dans les eaux près du fond aux environs du site du naufrage devraient être déterminés afin d'évaluer le potentiel de dispersion des BPC loin du site. L'adsorption des BPC aux fines particules en suspension dans la colonne d'eau et leur transport ultérieur par les courants pourraient représenter une importante voie de dispersion des BPC vers d'autres secteurs du golfe du Saint-Laurent.

Les méthodes employées pour l'analyse des sédiments devraient être identiques à celles qui ont été utilisées pour traiter les échantillons prélevés en août et en octobre 1996 (voir les détails à la section 3.1.2.1).

5.1.2 Biote

Des échantillons d'organismes aux environs de l'empreinte de l'épave de même qu'à l'extérieur de la zone locale de fermeture à la pêche devraient également être prélevés afin d'évaluer la

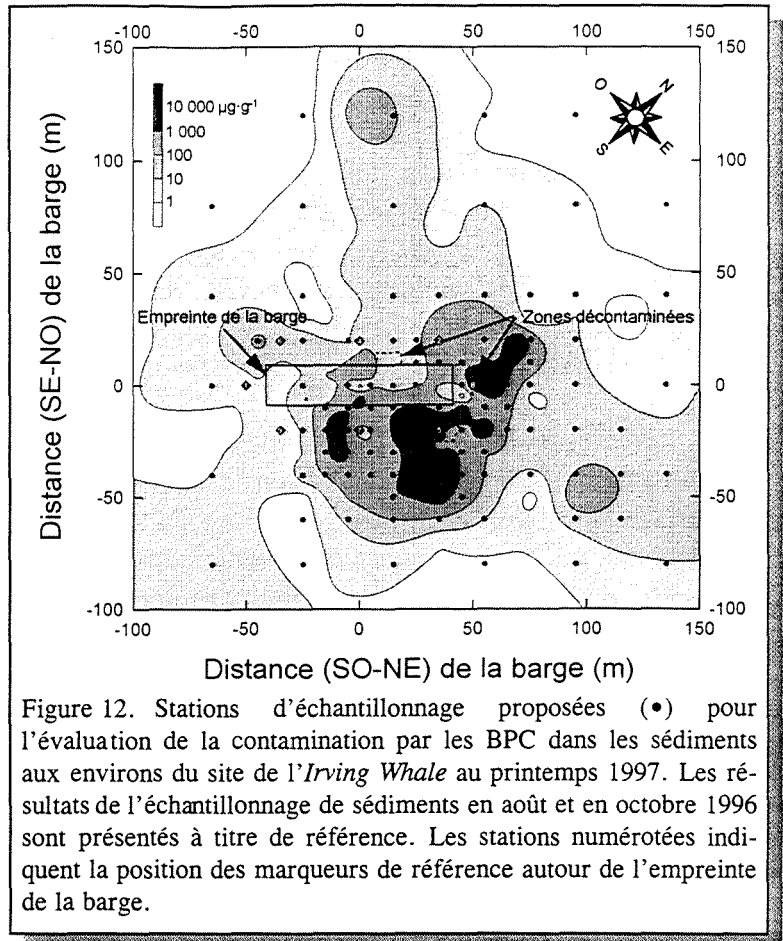


Figure 12. Stations d'échantillonnage proposées (•) pour l'évaluation de la contamination par les BPC dans les sédiments aux environs du site de l'*Irving Whale* au printemps 1997. Les résultats de l'échantillonnage de sédiments en août et en octobre 1996 sont présentés à titre de référence. Les stations numérotées indiquent la position des marqueurs de référence autour de l'empreinte de la barge.

contamination par les BPC des organismes vivant en étroite association avec les sédiments contaminés. Le programme d'échantillonnage du biote devrait porter principalement sur le crabe des neiges en raison de l'abondance et de la grande valeur commerciale de cette espèce et de l'interdiction à la pêche dans le secteur (voir la section 4.5). Comme dans le cas des sédiments, les protocoles d'échantillonnage et d'analyse du crabe des neiges devraient être identiques à ceux qui ont été utilisés en octobre 1996. Ainsi, des casiers à crabes devraient être déployés aux 20 stations où l'on a effectué les échantillonnages deux mois après le renflouage de l'*Irving Whale*, y compris à la station de référence située à 30 milles marins au nord du site du naufrage. Des femelles devraient également être prélevées en plus des mâles adultes afin de déterminer leur degré d'exposition aux BPC. Bien que les femelles ne fassent pas partie de la pêche commerciale au crabe, elles semblent être plus sédentaires que les mâles et peuvent donc être plus affectées que les mâles par la contamination locale élevée par les BPC aux environs de l'empreinte de la barge.

En plus du crabe des neiges, d'autres espèces représentant différents niveaux trophiques devraient aussi faire l'objet d'un échantillonnage afin d'évaluer l'incorporation des BPC dans la chaîne alimentaire locale. Dans ce contexte, des amphipodes et quelques espèces de poissons de fond devraient être prélevés et analysés pour les BPC. Les résultats de ces analyses pourraient être comparés à ceux obtenus avant et après le renflouage de l'*Irving Whale* (Gilbert et Walsh, 1996; voir les sections 3.2.1 et 3.2.3).

Pour examiner la possibilité de contamination de la chaîne alimentaire par les BPC dans la partie sud du golfe du Saint-Laurent après le naufrage de l'*Irving Whale*, des échantillons de plancton prélevés à la fin des années 1960 et au début des années 1970 devraient être analysés pour en mesurer la teneur en BPC. Une étude récente sur la comparaison des concentrations historiques et des concentrations récentes de contaminants organochlorés dans des larves de lamproies du bassin du Saint-Laurent montre que des échantillons conservés dans le formol peuvent être utilisés pour analyser les tendances historiques des concentrations de BPC (Renaud *et al.*, 1995). Par conséquent, des dosages des BPC effectués sur des échantillons archivés de plancton provenant du sud du golfe du Saint-Laurent permettraient d'examiner plus à fond les hypothèses selon lesquelles : 1) la plupart des BPC provenant de l'*Irving Whale* qui ne peuvent être récupérés pourraient avoir été déversés au moment du naufrage (voir la section 4.1); et 2) les fortes concentrations de BPC mesurées dans le plancton du sud du golfe au début des années 1970 (Ware et Addison, 1973; Harding *et al.*, sous presse) pourraient provenir de la barge (voir la section 4.2).

5.2 Programme de suivi à long terme

En plus de l'échantillonnage proposé pour le printemps de 1997, un programme de suivi à long terme devrait être mis en oeuvre afin de déterminer les tendances de la contamination des sédiments et du biote par les BPC aux environs de l'empreinte de l'*Irving Whale*. La détermination de ces tendances temporelles est particulièrement importante dans le cas du crabe des neiges en raison de la fermeture locale actuelle de la pêche pour cette espèce dans le secteur (voir la section 4.5). Un tel programme de suivi devrait se poursuivre jusqu'à ce que les niveaux de contamination diminuent suffisamment pour permettre la réouverture de la pêche.

5.2.1 *Sédiments*

Un suivi à long terme des concentrations de BPC dans les sédiments aux environs du site du naufrage est requis pour déterminer : 1) l'évolution de ce compartiment de l'écosystème en tant que source de contamination pour la chaîne alimentaire; et 2) l'efficacité à long terme d'éventuelles activités de décontamination, s'il y a lieu. Toutefois, les travaux d'échantillonnage nécessaires à l'atteinte de ces deux objectifs n'ont pas une aussi grande envergure que ceux du printemps de 1997 (voir la section 5.1.1). Seulement quelques sites non décontaminés et décontaminés devraient être échantillonnés pour documenter l'évolution dans le temps des concentrations dans les sédiments, et leur position dépendra des décisions prises concernant une décontamination additionnelle. Encore une fois, les protocoles d'analyse en laboratoire des échantillons de sédiments devront être identiques à ceux qui ont été suivis dans le cas des échantillons prélevés en août et en octobre 1996 afin de permettre la comparaison entre le programme de suivi et les échantillonnages effectués en 1996 et 1997. Les prélèvements devraient être effectués annuellement au cours des premières années du programme de suivi, selon les tendances observées dans la contamination du crabe des neiges et d'autres espèces par les BPC (voir ci-dessous).

5.2.2 *Biote*

Un programme de suivi à long terme du biote aux environs du site du naufrage devrait également être mis en place afin de surveiller les tendances temporelles de la contamination de la chaîne alimentaire par les BPC. Là encore, ce programme devrait porter principalement sur l'évolution spatio-temporelle des concentrations de BPC chez le crabe des neiges si l'on veut garantir la sécurité de la zone où la pêche est interdite pour cette espèce et déterminer pendant combien de temps l'interdiction doit être maintenue. Des crabes devraient être prélevés en plusieurs endroits le long d'un transect s'étendant de l'empreinte de la barge jusqu'à la limite de la zone d'interdiction à la pêche, ainsi qu'à la station de référence du programme d'échantillonnage de 1996 (et vraisemblablement aussi du programme de 1997). Comme dans le cas des sédiments, les prélèvements devraient être effectués chaque année, de préférence au début du printemps, pendant au moins les premières années du programme ou jusqu'à ce qu'on observe une baisse notable des concentrations de BPC chez les crabes. Par la suite, la fréquence des échantillonnages pourrait être réduite, mais il faudrait poursuivre le suivi jusqu'à ce que les concentrations de BPC chez les crabes diminuent et atteignent un niveau acceptable, auquel cas la pêche pourrait être autorisée de nouveau dans le secteur touché.

D'autres espèces devraient faire l'objet d'un suivi en plus du crabe des neiges, incluant les amphipodes et le poisson de fond. La stratégie d'échantillonnage pour ces organismes ne serait pas aussi importante que pour le crabe des neiges mais des échantillons devraient être prélevés régulièrement, au moins aux environs de l'empreinte de la barge ainsi qu'à un site de référence, pour dégager des tendances fiables de la contamination locale de la chaîne alimentaire par les BPC.

6. REMERCIEMENTS

L'éditeur et les contributeurs à la rédaction du présent rapport désirent remercier toutes les personnes qui ont participé aux travaux de décontamination ainsi qu'à l'échantillonnage et aux analyses en laboratoire des sédiments et du biote après le renflouage de l'*Irving Whale*, dont : M. Abi-Khattar, S. Dewis, J. Doull, J. Ginnish et G. Julien (MDE); J. Gallagher et M. Grebler (GCC); B. Kratz (Don Jon Marine); B. Borland, J.D. Irving et M. Kapila (SCC Environmental). Les officiers et les membres d'équipage du *NCSM Cormorant* (MDN) et du *M/V Opilio* (MPO) ont fourni conseils et assistance pendant l'échantillonnage des sédiments et du biote. Axy's Analytical Services Ltd. (Sidney, C.-B.) et MDS Environmental Services Ltd. (Halifax, N.-É.) ont dosé les BPC dans une partie des échantillons de sédiments et de biote. Nous remercions également les Drs. Victorin Mallet (Université de Moncton, N.-B.) et Émilien Pelletier (INRS - Océanologie, Rimouski, Qc), qui ont formulé des commentaires utiles sur une version préliminaire du présent rapport.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Albro, P.W., et C.E. Parker. 1979. Comparison of the compositions of Aroclor 1242 and Aroclor 1216. *J. Chromatogr.* 169: 161-166.
- Cantox Inc. 1996. Ecological risk assessment and development of site-specific PCB sediment remediation criteria for the protection of snow crab at the *Irving Whale* site. Rapport final, préparé pour Environnement Canada, juillet 1996, 33 p.
- Chapman, P.M., R.C. Barrick, J.M. Neff, et R.C. Swartz. 1987. Four independent approaches to developing sediment quality criteria yield similar values for model contaminants. *Environ. Toxicol. Chem.* 6: 723-725.
- Chiarenzelli, J.R., R.J. Scrudato, et M.L. Wunderlich. 1997. Volatile loss of PCB Aroclors from subaqueous sand. *Environ. Sci. Technol.* 31: 597-602.
- Dexter, R., et J. Field. 1989. A discussion of sediment target levels for the protection of aquatic organisms. *Oceans '89 - The global ocean*, Vol. 2, Ocean pollution, p. 452-456.
- Dufour, R. 1988. Overview of the distribution and movement of snow crab (*Chionoecetes opilio*) in Atlantic Canada, p. 75-82. In G.S. Jamieson and W.D. McKone (ed.) *Proceedings of the international workshop on snow crab biology*, December 8-10, 1987, Montréal, Québec. *Can. Manuscr. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2005.
- Environment Canada. 1995. Interim sediment quality guidelines. Environment Canada, Ottawa, Ontario. Manuscrit préliminaire.

- Fish, K.M. 1996. Influence of Aroclor 1242 concentration on polychlorinated biphenyl biotransformations in Hudson River test tube microcosms. *Appl. Environ. Microbiol.* 62: 3014-3016.
- Gilbert, M., et G. Walsh (éd.). 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.
- Gouvernement du Canada. 1996a. Évaluation approfondie du projet de récupération de l'*Irving Whale*, tenant compte de la présence de BPC. Pêches et Océans Canada et Environnement Canada, mars 1996, 100 p. + annexes.
- Gouvernement du Canada. 1996b. Sampling Plan, *Irving Whale* Recovery Project, May 1996.
- Harding, G.C., R.J. LeBlanc, W.P. Vass, R.F. Addison, B.T. Hargrave, S. Pearre Jr., A., Dupuis, et P.F. Brodie. 1996. Seasonal bioaccumulation of polychlorinated biphenyls (PCBs) in a marine pelagic food web in St. Georges Bay, southern Gulf of St. Lawrence. *Mar. Chem.* (sous presse).
- Jensen, A.L., S.A. Spigarelli, et M.M. Thommes. 1982. PCB uptake by five species of fish in Lake Michigan, Green Bay of Lake Michigan, and Cayuga Lake, New York. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 39: 700-709.
- Lefebvre, L., et J.-C.F. Brêthes, 1991. Orientation des déplacements de crabes des neiges mâles (*Chionoecetes opilio*) marqués dans le sud-ouest du golfe du Saint-Laurent. *J. Can. Sci. Halieut. Aquat.* 48: 1167-1175.
- Macdonald, D.D., S.L. Smith, M.P. Wong, et P. Mudrock. 1992. The development of Canadian marine environmental quality guidelines. Marine Environmental Quality Series No 1, Ecosystem Sciences and Evaluation Directorate, Eco-Health Branch, Ottawa, Ontario.
- Plesha, P.D., J.E. Stein, M.H. Schiewe, B.B. McCain, et U. Varanasi. 1988. Toxicity of marine sediments supplemented with mixtures of selected chlorinated and aromatic hydrocarbons to the infaunal amphipod *Rhepoxynius abronius*. *Mar. Environ. Res.* 25: 85-97.
- Polikarpov, G.G., P. Parsi, et S.W. Fowler. 1983. Chronic effects of a PCB (DP5) upon *Nereis diversicolor* in spiked Mediterranean sediments. *Rapp.P.-V. Réun. CIESM* 28: 167-168.
- Renaud, C.B., K.L.E. Kaiser, et M.E. Comba. 1995. Historical versus recent levels of organochlorine contaminants in lamprey larvae of the St. Lawrence River basin, Québec. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 52: 268-275.

- Rubenstein, N., W.T. Gilliam, et N.R. Gregory. 1984. Dietary accumulation of PCBs from a contaminated sediment source by a demersal fish (*Leiostomus xanthurus*). *Aquat. Toxicol.* 5: 331-342.
- Schulz, D.E., G. Petrick, et J.C. Duinker. 1989. Complete characterization of polychlorinated biphenyl congeners in commercial Aroclor and Clophen mixtures by multidimensional gas chromatography-electron capture detection. *Environ. Sci. Technol.* 23: 852-859.
- Ware, D.M., et R.F. Addison. 1973. PCB residues in plankton from the Gulf of St. Lawrence. *Nature* 246: 519-521.
- Wright, M.A., C.J. Knowles, J. Stratford, S.A. Jackman, et G.K. Robinson. 1996. The dechlorination and degradation of Aroclor 1242. *Internat. Biodeterior. Biodegrad.* 38:61-67.
- Zitko, V. 1994. Principal component analysis in the evaluation of environmental data. *Mar. Poll. Bull.* 28: 718-722.

ANNEXES

Annexe 1. Concentrations de BPC dans les échantillons de sédiments récoltés aux environs du site de l'*Irving Whale* avant son renflouage de mai à juillet 1996

Numéro d'échantillon	DATE	Latitude	Longitude	Distance de la barge (m)		Échantillonnage	BPC ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
				SO-NE	NO-SE		
96AT001247 96-1	24/05/96	47,3677	63,3266	30,61	-271,43	Benne Shipek	0,12
96AT001248 96-2	24/05/96	47,3677	63,3287	-82,53	-159,16	Benne Shipek	0,073
96AT001249 96-3	24/05/96	47,3682	63,3305	-139,62	-22,61	Benne Shipek	0,055/0,046
96AT001250 96-4	24/05/96	47,3679	63,3289	-75,51	-134,31	Benne Shipek	0,15
96AT001251 96-5a	24/05/96	47,3687	63,3288	-6,71	-69,98	Benne Shipek	0,083
96AT001252 96-6	24/05/96	47,369	63,329	3,76	-38,12	Benne Shipek	4,58
96AT001253 96-6a	24/05/96	47,3685	63,3286	-6,15	-96,73	Benne Shipek	0,28
96AT001636 SDL-1	12/06/96	47,3693	63,3298	-19,04	28,85	Sous-marin	200
96AT001637 SDL-2	12/06/96	47,3696	63,3288	61,15	0	Sous-marin	42
96AT001638 SDL-3	12/06/96	47,3694	63,3297	0	28,85	Sous-marin	54
96AT001639 SDL-4	12/06/96	47,3695	63,3294	25,51	28,85	Sous-marin	2,1/1,8
96AT001640 SDL-5	12/06/96	47,3688	63,33	-61,15	0	Sous-marin	1,1
96AT001641 SDL-6	12/06/96	47,3692	63,3289	25,51	-28,85	Sous-marin	4,9
96AT001642 SDL-7	12/06/96	47,369	63,3291	0	-28,85	Sous-marin	3,6
96AT001643 SDL-8	12/06/96	47,3689	63,3293	-19,04	-28,85	Sous-marin	190
96AT001644 96-23	12/06/96	47,3706	63,3306	45,68	169,23	Sous-marin	0,04
96AT001645 96-24	12/06/96	47,3697	63,3289	69,3	14,65	Sous-marin	0,03
96AT001646 96-25	12/06/96	47,37	63,3294	61,43	66,18	Sous-marin	0,02
96AT001647 96-26	12/06/96	47,3703	63,3292	98,1	73,15	Sous-marin	0,03
96AT001648 96-27	12/06/96	47,3696	63,3286	73,24	-11,11	Sous-marin	0,08
96AT001649 96-28	12/06/96	47,3694	63,3277	111,33	-71,03	Sous-marin	0,08
96AT001650 96-29	12/06/96	47,3603	63,3686	-2796,29	1396,07	Sous-marin	< 0,01
96AT001820 Contrôle	25/06/96	47,2165	63,5538	-23990,75	-3,77	Sous-marin	< 0,01
96AT001821 96-2b	25/06/96	47,3687	63,3288	-10,67	-71,26	Sous-marin	0,075
96AT001822 96-4b	25/06/96	47,3682	63,3277	12,41	-172,91	Sous-marin	0,041
96AT001823 96-6b	25/06/96	47,4525	63,3287	6585,34	6506,93	Sous-marin	0,11
96AT001824 96-7	25/06/96	47,369	63,3282	51,16	-80,7	Sous-marin	0,076
96AT001825 96-8	25/06/96	47,3688	63,3273	82,61	-138,35	Sous-marin	0,14/0,13
96AT001826 96-9b	25/06/96	47,3688	63,3267	118,25	-173,99	Sous-marin	0,092
96AT001827 96-11b	25/06/96	47,3687	63,3292	-28,49	-53,44	Sous-marin	0,086
96AT001828 96-16	25/06/96	47,3692	63,3307	-69,39	66,04	Sous-marin	0,44
96AT001829 96-17a	25/06/96	47,3695	63,3313	-78,84	127,87	Sous-marin	0,24
96AT001830 96-18	25/06/96	47,3695	63,332	-114,48	163,51	Sous-marin	0,1
96AT001831 96-20b	25/06/96	47,3697	63,3307	-30,1	105,33	Sous-marin	0,71
96AT001832 96-21	25/06/96	47,37	63,3307	-3,91	131,52	Sous-marin	0,11
96AT001833 96-22	25/06/96	47,3703	63,3312	-4,45	184,44	Sous-marin	0,11
96AT002056 S-1	30/06/96	47,3691	63,3293	0	-9,35	Plongeurs	55
96AT002057 S-2	30/06/96	47,3692	63,3295	0	9,35	Plongeurs	49
96AT002058 S-3	30/06/96	47,3691	63,3298	-29,25	9,35	Plongeurs	8,5
96AT002059 S-4	30/06/96	47,369	63,3299	-41,65	9,35	Plongeurs	400
96AT002061 S-6	30/06/96	47,3689	63,3296	-29,25	-9,35	Plongeurs	9,8
96AT002062 S-7	08/07/96	47,369	63,3298	-32,99	9,35	Plongeurs	4,0/3,6
Échantillon #3	25/07/96	47,3695	63,3293	-35	-20	Plongeurs	99

Numéro d'échantillon	DATE	Latitude	Longitude	Distance de la barge (m)		Échantillonnage	BPC ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
				SO-NE	NO-SE		
Échantillon #4	25/07/96	47,3695	63,3289	-50	0	Plongeurs	3,3
Échantillon #5	25/07/96	47,3693	63,3289	-35	20	Plongeurs	2,1
Échantillon #6	25/07/96	47,3691	63,3292	0	20	Plongeurs	2047
Échantillon #7	25/07/96	47,3688	63,3295	35	20	Plongeurs	560
Échantillon #8	25/07/96	47,3691	63,3299	35	-20	Plongeurs	120/130

Notes :

- Les cellules grises indiquent la méthode de positionnement des stations.
- Les distances sont données par rapport au centre de la barge
- / Réplicats.

Annexe 2. Concentrations de BPC dans les échantillons de sédiments superficiels récoltés aux environs de l'Irving Whale après son renflouage en août 1996

Numéro d'échantillon	DATE	Latitude	Longitude	Distance de la barge (m)		Échantillonnage	BPC ($\mu\text{g g}^{-1}$)
				SO-NE	NO-SE		
FP#1	01/08/96	47,3694	63,3291	32,62	-4,28	Plongeurs	93,5
FP#2	01/08/96	47,3694	63,3291	32,62	4,28	Plongeurs	181,6
CP-1	01/08/96	47,3692	63,3291	18,41	-18,85	Plongeurs	10 657
CP-2	01/08/96	47,3692	63,3289	33,41	-24,85	Plongeurs	192,2
CA-3	02/08/96	47,3695	63,3289	51,15	0	Plongeurs	4 086
CA-4	02/08/96	47,3694	63,3287	53,41	-18,85	Plongeurs	4 040
CP-5	02/08/96	47,3693	63,3288	43,41	-18,85	Plongeurs	433,8
CS-6	02/08/96	47,3694	63,3294	18,41	18,85	Plongeurs	62,6
CS-7	02/08/96	47,3696	63,3293	33,41	23,85	Plongeurs	280
CS-8	02/08/96	47,3696	63,3292	43,41	18,85	Plongeurs	130
CA-9	02/08/96	47,3696	63,3291	53,41	18,85	Plongeurs	147
FP#3	02/08/96	47,3692	63,3293	8,16	-4,28	Plongeurs	210
FP#4	02/08/96	47,3693	63,3294	8,16	4,28	Plongeurs	15,4
BAR-1	03/08/96	47,3693	63,3296	0	18,85	Plongeurs	79,4
Carotte 1	05/08/96	47,3693	63,3296	0	17	Plongeurs	753 (0-1)
							1 354 (4-5)
							4 907 (7-8)
Carotte 2	05/08/96	47,3693	63,3296	0	17	Plongeurs	44,3 (0-1)
							62,3 (4-5)
							443,0 (7-8)
4A	05/08/96	47,369	63,3302	53,41	-28,85	Plongeurs	113,6
5A	05/08/96	47,369	63,3303	63,41	-28,85	Plongeurs	144,6
CA-5	06/08/96	47,3696	63,3288	61,15	0	Plongeurs	4 700
CA-6	06/08/96	47,3695	63,3287	61,15	-10	Plongeurs	144
CA-7	06/08/96	47,3695	63,3286	63,41	-18,85	Plongeurs	80
CP-6	06/08/96	47,3692	63,3291	13,41	-18,85	Plongeurs	490
CA-8	06/08/96	47,3694	63,3285	63,41	-28,85	Plongeurs	14
CP-7	06/08/96	47,3691	63,329	13,41	-28,85	Plongeurs	162
CA-10	06/08/96	47,3694	63,3285	63,41	-28,85	Plongeurs	113
2A (Carotte)	07/08/96	47,3694	63,3288	51,15	-10	Plongeurs	1112,2 (0-1)
							420,4 (7-8)
							783,7 (14-15)
3A (Carotte)	07/08/96	47,3695	63,3286	63,41	-18,85	Plongeurs	217,9 (0-1)
							51,0 (4,5-5,5)
							99,9 (9-10)
4A (Carotte)	07/08/96	47,3693	63,3286	53,41	-28,85	Plongeurs	45,7 (0-1)
							20,2 (3,5-4,5)
							4,1 (7-8)
5A (Carotte)	07/08/96	47,3693	63,3286	53,41	-28,85	Plongeurs	69,1 (0-1)
							54,6 (2-3)
							62,1 (4-5)
6A (Carotte)	07/08/96	47,3691	63,329	13,41	-28,85	Plongeurs	70,8 (0-1)
							29,6 (2,5-3,5)
							24,6 (5-6)
7A (Carotte)	07/08/96	47,3692	63,3291	13,41	-18,85	Plongeurs	81,1 (0-1)
							73,7 (2,5-3,5)
							5,7 (5-6)
2B	07/08/96	47,3689	63,3292	-10	-28,85	Plongeurs	2 807

Numéro d'échantillon	DATE	Latitude	Longitude	Distance de la barge (m)		Échantillonnage	BPC ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
				SO-NE	NO-SE		
3B	07/08/96	47,369	63,3293	-10	-18,85	Plongeurs	3 703
4B	07/08/96	47,3689	63,3292	-10	-33,85	Plongeurs	3 262
5B	07/08/96	47,3692	63,3294	0	3,85	Plongeurs	674
6B	07/08/96	47,3692	63,3294	0	-3,85	Plongeurs	2 222
1D	07/08/96	47,3692	63,329	23,41	-15,85	Plongeurs	10 495
2D	07/08/96	47,3692	63,3289	33,41	-23,85	Plongeurs	1 776
3D	07/08/96	47,3695	63,3292	33,41	13,85	Plongeurs	2 085
4D	07/08/96	47,3694	63,3289	46,15	-10	Plongeurs	7 061
5D	07/08/96	47,3695	63,329	49,15	5	Plongeurs	1 712
Stn 1	07/08/96	47,3656	63,3303	-332,34	-238,49	Benne Shipek	0,01
Stn 2	07/08/96	47,3669	63,3303	-223,21	-129,36	Benne Shipek	0,066
Stn 3	07/08/96	47,3703	63,3236	395,1	-223,84	Benne Shipek	0,009
Stn 4	07/08/96	47,3733	63,3258	516,38	135,04	Benne Shipek	0,014
Stn 5	07/08/96	47,3728	63,3306	220,29	343,84	Benne Shipek	0,366
Stn 7	07/08/96	47,3703	63,3339	-154,34	325,6	Benne Shipek	0,142
Stn 8	07/08/96	47,3678	63,3325	-276,53	54,92	Benne Shipek	0,009
Stn 9	07/08/96	47,3675	63,3306	-194,41	-70,86	Benne Shipek	0,036
Stn 10	07/08/96	47,3683	63,3272	49,27	-183,58	Benne Shipek	0,089
Stn 11	07/08/96	47,37	63,3261	239,62	-112,02	Benne Shipek	0,028
Stn 15	07/08/96	47,37	63,3294	61,43	66,18	Benne Shipek	14,5
Stn 16	07/08/96	47,3703	63,3319	-50,4	221,65	Benne Shipek	0,356
Stn 19	07/08/96	47,37	63,3319	-72,22	199,82	Benne Shipek	0,32
Stn 20	07/08/96	47,3697	63,3289	69,3	14,65	Benne Shipek	5 688
Stn 21	07/08/96	47,37	63,3306	2,03	125,58	Benne Shipek	930

- Notes: – Les cellules grises indiquent la méthode de positionnement des stations.
- Les distances sont données par rapport au centre de la barge, selon des marqueurs de référence qui ont été déployés au fond avant le renflouage de la barge.
- Les nombres entre parenthèses réfèrent à la profondeur de la couche de sédiment qui a été analysée,

Annexe 3. Épaisseur de sédiment, contenu en eau, et concentrations de BPC dans les échantillons de sédiments récoltés aux environs du site de l'*Irving Whale* aux mois de septembre et octobre 1996

Numéro d'échantillon	Type *	DATE	Distance de la barge (m)		Épaisseur de sédiment (cm) **	Contenu en eau (%)	BPC ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
			SO-NE	NO-SE			
Buoy #5	Benne	30/09/96	33,41	-18,85	4	29,7	2 100
Buoy #5	Carotte	30/09/96	33,41	-18,85	0-1	35,3	390
					1-2	72,4	
					2-3	29,7	
L9.5	Benne	30/09/96	55	12,5	6	24	75
L9.5	Carotte	30/09/96	55	12,5	0-1	34,1	590
					1-2	23,2	
					2-3	21,4	
Buoy #1	Benne	01/10/96	-51,15	0	2	31,8	1,3
Buoy #7	Benne	01/10/96	0	-18,85	1-2	21,8	16
Buoy #7	Benne	01/10/96	0	-18,85	1-2	29,2	100
Buoy #9	Benne	01/10/96	-25	-20	3	29,2	2
Buoy #9	Benne	01/10/96	-27,8	18,85	18		85
Buoy #9	Benne	01/10/96	-25	-20	4	29,2	5,8
					0-1	27,6	
					1-2	31,5	
					2-3	48,6	130
					3-4	21,9	
Buoy #9	Carotte	01/10/96	-25	-20	4-5	23,7	
F11	Benne	01/10/96	-25	30	20	24,6	1
F4.5	Benne	01/10/96	-25	-40	15	25,4	29
F5	Benne	01/10/96	-25	-30	10	30,9	10
F7	Benne	01/10/96	-25	-5	3	30,4	120
E9	Benne	04/10/96	-35	5	10	29,6	1,4
F9	Benne	04/10/96	-25	5		21,9	13
F9 (DUP)	Benne	04/10/96	-25	5	2-3	35,5	8,4
G10	Benne	04/10/96	-15	20	2-3		27,6
G11	Benne	04/10/96	-15	30	2-3	20,8	0,49
G7	Benne	04/10/96	-15	-5	2-3	39,8	35
G9	Benne	04/10/96	-15	5	2-3	34,9	110
H10	Benne	04/10/96	-5	20	2-3	30,8	8,7
H11	Benne	04/10/96	-5	30	2-3	27,7	6,2
H12	Benne	04/10/96	-5	50	2-3	27,6	23
I8	Benne	04/10/96	0	0	18	24,4	6,1
I8 (DUP)	Benne	04/10/96	0	0	18	24,2	6,2
J11	Benne	04/10/96	15	30		21,1	53

Rapport statutaire sur la contamination par les BPC aux environs du site de l'Irving Whale

Numéro d'échantillon	Type *	DATE	Distance de la barge (m)		Épaisseur de sédiment (cm) **	Contenu en eau (%)	BPC (µg·g ⁻¹)
			SO-NE	NO-SE			
J11	Carotte	04/10/96	15	30	0-1	30,4	< 0,5
					1-2	19,9	0,46
					2-3	20,0	1,2
					3-4	19,9	1,6
					4-5	19,2	1,1
					5-6	20,0	1,4
					6-7	20,0	1,5
					7-8	21,1	1,9
					8-9	19,2	12
					9-10	19,0	0,62
					10-11	19,0	0,54
					11-12	19,8	0,5
					12-13	21,0	1,0
B2	Benne	05/10/96	-75	-90	2,5	22,4	7,6
B2 (DUP)	Benne	05/10/96	-75	-90		24,4	9,4
B3	Benne	05/10/96	-75	-70	6	26,5	4,5
B4	Benne	05/10/96	-75	-50	8	26	1,2
C2.5	Benne	05/10/96	-55	-80	5	22	5,1
C4	Benne	05/10/96	-55	-50	6	30,1	1,6
F2	Benne	05/10/96	-25	-90	4	28,9	0,94
F3	Benne	05/10/96	-25	-70	10	22,5	0,39
F4	Benne	05/10/96	-25	-50	18	22,6	0,36
H4	Benne	06/10/96	-5	-50	4	42	120
J4	Benne	06/10/96	15	-50	4	36	810
K1	Benne	06/10/96	35	-110	6	21,7	1,2
K1 (DUP)	Benne	06/10/96	35	-110	6	20,4	0,24
K2	Benne	06/10/96	35	-90	2-3	24,7	0,34
K3	Benne	06/10/96	35	-70	2	43,6	1,3
K4	Benne	06/10/96	35	-50	2-3	28,9	2 700
K5	Benne	06/10/96	35	-30	2-3	19,9	9 100
K5 (DUP)	Benne	06/10/96	35	-30	2-3	21,4	7 400
L4	Benne	06/10/96	55	-50	2-3	19,8	50
M4	Benne	06/10/96	75	-50	8-10	22,5	0,5
B15	Benne	07/10/96	-75	110		20,5	0,16
BC13	Benne	07/10/96	-65	70		26,7	0,63
D13	Benne	07/10/96	-45	70		20,4	1,2
F12	Benne	07/10/96	-25	50	6	23,8	0,52
F13	Benne	07/10/96	-25	70	5	30,4	5
F14	Benne	07/10/96	-25	90		24,9	1,6
F15	Benne	07/10/96	-25	110	9	21,3	0,22
F16	Benne	07/10/96	-25	130	10	20,9	0,23
H13	Benne	07/10/96	-5	70	2	34,2	5,2
J13	Benne	07/10/96	15	70	2	35,9	100
K13	Benne	08/10/96	35	70	1	25,1	2,7
L11	Benne	08/10/96	55	30	10	37	240
L12	Benne	08/10/96	55	50	6	28,7	36
L13	Benne	08/10/96	55	70	2	25,9	32
L14	Benne	08/10/96	55	90		30,7	7,8
L14 (DUP)	Benne	08/10/96	55	90		31,8	3,5
L15	Benne	08/10/96	55	110	0-1	33	0,52

Rapport statutaire sur la contamination par les BPC aux environs du site de l'Irving Whale

Numéro d'échantillon	Type *	DATE	Distance de la barge (m)		Épaisseur de sédiment (cm) **	Contenu en eau (%)	BPC ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
			SO-NE	NO-SE			
L16	Benne	08/10/96	55	130	5	37,4	1,3
M11	Benne	08/10/96	75	30	2	34,5	2
M13	Benne	08/10/96	75	70	4	27,8	1,9
N11	Benne	08/10/96	95	30	6	27,8	12
N11 (DUP)	Benne	08/10/96	95	30	6	30,2	11
N13	Benne	08/10/96	95	70	2	24,1	5,1
P11	Benne	08/10/96	115	30	2	21	0,25
P12	Benne	08/10/96	115	50	3	23,6	3,5
P13	Benne	08/10/96	115	70	12	26,6	0,18
P14	Benne	08/10/96	115	90	3	32,5	0,39
Q11	Benne	08/10/96	135	30	2	25	2,4
R11	Benne	08/10/96	155	30	8	31,2	1,9
A10	Benne	09/10/96	-95	20	4	20,8	0,69
A6	Benne	09/10/96	-95	-20	3	26,4	0,8
B10	Benne	09/10/96	-75	20	2	28,4	4,7
B12	Benne	09/10/96	-75	50	3	26	1,8
B6	Benne	09/10/96	-75	-20	3	20,4	0,33
B8	Benne	09/10/96	-75	0	2	29	4,6
C10	Benne	09/10/96	-55	20	3	20,8	18
C5	Benne	09/10/96	-55	-30	3	20,7	1,6
C6	Benne	09/10/96	-55	-20	5	25,9	0,62
D10	Benne	09/10/96	-45	20	2	19,1	210
D6	Benne	09/10/96	15	30	2	25,4	2,7
D7	Benne	09/10/96	-45	-5	4	20,6	2
D7 (DUP)	Benne	09/10/96	-45	-5	4	21,6	2,7
D9	Benne	09/10/96	-45	5	3	32,6	19
E10	Benne	09/10/96	-35	20	3	32	34
E5	Benne	09/10/96	-35	-30	2	19,1	4,1
E6	Benne	09/10/96	-35	-20	3	27,2	1,5
J19	Benne	10/10/96	15	190	5	28,5	< 0,5
KL7	Benne	10/10/96	45	-5	4	28,2	2,9
L17	Benne	10/10/96	55	150	5	23,4	0,65
L17 (DUP)	Benne	10/10/96	55	150	5	23,5	< 0,5
L19	Benne	10/10/96	55	190	11	22,5	0,5
L21	Benne	10/10/96	55	230	8	28,4	< 0,5
L21 (DUP)	Benne	10/10/96	55	230	8	28,4	< 0,5
L22	Benne	10/10/96	55	230	0-2	28,5	< 0,5
L23	Benne	10/10/96	55	250	0-2	32	< 0,5
M7	Benne	10/10/96	75	-5	6	24,5	6,2
N1.5	Benne	10/10/96	95	-100	0-1	26	0,86
N11.5	Benne	10/10/96	95	40	6	24,3	1,2
N19	Benne	10/10/96	95	170	2	29,2	< 0,5
N3	Benne	10/10/96	95	-70	3	23,3	3,8
N4	Benne	10/10/96	95	-50	3	48	630
N7	Benne	10/10/96	95	-5	8	33,8	20
Q7	Benne	10/10/96	135	-5	5		4,2
Opilio 2a	Benne Shipek	Oct 96	707	-707			0,01

Numéro d'échantillon	Type *	DATE	Distance de la barge (m)		Épaisseur de sédiment (cm) **	Contenu en eau (%)	BPC ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
			SO-NE	NO-SE			
Opilio 2b	Benne Shipek	Oct 96	707	-707			0,01
Opilio 3a	Benne Shipek	Oct 96	-707	-707			0,011
Opilio 3b	Benne Shipek	Oct 96	-707	-707			0,006
Opilio 4a	Benne Shipek	Oct 96	-707	707			0,031
Opilio 4b	Benne Shipek	Oct 96	-707	707			0,023
Opilio 6a	Benne Shipek	Oct 96	-1 308	1 308			0,007
Opilio 6b	Benne Shipek	Oct 96	-1 308	1 308			0,03
Opilio 7a	Benne Shipek	Oct 96	-1 308	-1 308			0,008
Opilio 7b	Benne Shipek	Oct 96	-1 308	-1 308			0,005
Opilio 8a	Benne Shipek	Oct 96	1 308	-1 308			0,027
Opilio 8b	Benne Shipek	Oct 96	1 308	-1 308			0,016
Opilio 11a	Benne Shipek	Oct 96	3 274	-3 274			0,009
Opilio 11b	Benne Shipek	Oct 96	3 274	-3 274			0,003
Opilio 12a	Benne Shipek	Oct 96	-3 274	-3 274			0,008
Opilio 12b	Benne Shipek	Oct 96	-3 274	-3 274			0,001
Opilio 13a	Benne Shipek	Oct 96	38 891	38 891			0,002
Opilio 13b	Benne Shipek	Oct 96	38 891	38 891			0,002
Opilio 15a	Benne Shipek	Oct 96	0	-500			0,034
Opilio 15b	Benne Shipek	Oct 96	0	-500			0,01
Opilio 16a	Benne Shipek	Oct 96	0	-1 000			0,023
Opilio 16b	Benne Shipek	Oct 96	0	-1 000			0,057
Opilio 17a	Benne Shipek	Oct 96	0	-1 850			0,01
Opilio 17b	Benne Shipek	Oct 96	0	-1 850			0,008
Opilio 18a	Benne Shipek	Oct 96	0	-2 500			0,001
Opilio 18b	Benne Shipek	Oct 96	0	-2 500			0,002
Opilio 19a	Benne Shipek	Oct 96	0	5 000			0,002
Opilio 19b	Benne Shipek	Oct 96	0	5 000			0,003

* Les échantillons de types Benne et Carotte ont été récoltés à l'aide d'un sous-marin.

** Pour les carottes de sédiments, l'épaisseur de sédiments indique la profondeur de la couche de sédiments pour laquelle les concentrations de BPC ont été mesurées.

Annexe 4. Estimation de la charge totale en BPC dans les sédiments

Les paragraphes ci-dessous fournissent des détails sur l'estimation de la charge totale de BPC des sédiments aux alentours de l'empreinte de l'*Irving Whale* (voir la section 3.1.3).

Dans un premier temps, des cartes de distribution des concentrations de BPC, de l'épaisseur des sédiments et de leur porosité aux environs de l'empreinte de la barge ont été établies en construisant des quadrillages de 1×1 m à partir des données pertinentes par une méthode de krigage. Les grilles obtenues ont alors servi à calculer une estimation de la charge de BPC pour chaque intervalle logarithmique de l'inventaire de BPC par unité de surface. Pour ce faire, les grilles des concentrations des BPC, d'épaisseur des sédiments et de porosité ont été combinées, afin d'établir une seule grille de 250×250 m représentant la charge en BPC des sédiments par unité de surface à l'aide de la formule suivante :

$$L_{BPC} = \frac{[BPC] \cdot F_s}{1 - [BPC] \cdot F_s} \times \rho_{sed} \times (1 - \phi) \times Z \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$$

dérivée de : $[BPC] = \text{Concentration de BPC} = F_s \times \frac{L_{BPC}}{L_{BPC} + L_{sed}} \text{ (kg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$

où : $L_{sed} = \text{Charge en sédiments} = \rho_{sed} \times (1 - \phi) \times Z \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$

$$F_s = \text{Facteur de correction pour la salinité} = \frac{(1 - SC) + SC \cdot S}{1 - SC}$$

$$SC = \text{Contenu en sel des sédiments} = \%W \times \left(1 + \frac{S}{1 - S}\right)$$

$$\phi = \text{Porosité des sédiments} = \frac{SC \cdot \rho_{sed}}{SC \cdot \rho_{sed} + (1 - SC) \cdot \rho_{sw}}$$

$$\rho_{sed} = \text{Densité des sédiments} = 2\,650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$Z = \text{Épaisseur de sédiments (m)}$$

$$\%W = \text{Contenu en eau des sédiments}$$

$$S = \text{Salinité} = 0,035$$

$$\rho_{sw} = \text{Densité de l'eau de mer} = 1\,025\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Préalablement à ces calculs, les concentrations de BPC ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) et l'épaisseur des sédiments (cm) ont été converties en unités appropriées ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ et m respectivement). On a supposé que la densité des sédiments était équivalente à la densité de la silice. Les concentrations de BPC et la teneur en eau des sédiments ont été supposées constantes dans toute la colonne de sédiments, sauf dans les cas où on disposait de carottes, pour lesquelles on a calculé les moyennes des concentrations de BPC et de la teneur en eau pour l'ensemble de la colonne de sédiments.

Dans un deuxième temps, les charges de BPC ainsi obtenues dans chaque pixel de la grille de 250×250 m ont été intégrées pour chaque surface délimitée par un intervalle logarithmique de valeurs afin d'obtenir une estimation de la charge totale (kg) à l'intérieur de cette surface. Les résultats sont présentés aux figures 6 et 7, et sont discutés à la section 3.1.3.

Annexe 5. Préviation du transport des sédiments au site de l'*Irving Whale* pour 1997

Cette annexe résume l'information disponible sur le transport des sédiments dans le sud du golfe du Saint-Laurent.

En septembre 1996, un document a été produit par le Dr Georges Drapeau, sédimentologiste à l'INRS-Océanologie, Rimouski (Québec) sur l'application d'un modèle du transport des sédiments à un site de déblais de dragage à l'Anse-à-Beaufils (Gaspésie). Ce site semble très comparable à celui du naufrage de l'*Irving Whale* car les deux présentent des profondeurs semblables (60 à 65 m) et la même granulométrie des sédiments (G. Drapeau, INRS – Océanologie, comm. pers.). Toutefois, le site de l'Anse-à-Beaufils est protégé des vents de secteur ouest.

Les résultats du modèle montrent que le courant de fond à l'Anse-à-Beaufils doit être d'au moins $30 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ pour induire un transport des sédiments. Les données utilisées dans l'étude étaient un courant de marée de $20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ et un courant résiduel de $7 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Le courant induit par l'action des vagues a aussi été considéré bien que son rôle n'ait pas été significatif à 60 m de profondeur. Les courants étudiés ne semblaient pas assez forts pour induire un transport significatif sur le site. Toutefois, les déblais de dragage semblent bien s'étaler d'une année à l'autre. Les observations au sonar à balayage latéral montrent qu'un monticule typique de déblais mesure 40 m de diamètre et a une épaisseur maximale de 11 à 60 m selon le volume, en supposant une forme conique. Les différents monticules s'étalent avec le temps et, après quatre ans, leur hauteur et leur réflectivité sont devenues indistinctes. Cela semble indiquer un étalement de 40 m par an.

Un courantomètre a été mouillé près du fond sur le site de l'*Irving Whale* en juillet et août 1993. La vitesse maximale enregistrée était de $26 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, tandis que la composante tidale était de l'ordre de $20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Le submersible SDL1 a relevé un courant d'un noeud ($50 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$), du nord-est, en octobre 1996, pendant un échantillonnage des sédiments. Le seul facteur qui n'ait pas encore été considéré pour expliquer ces différences dans l'intensité des courants, mis à part les courants de marée, l'écoulement résiduel provenant de l'apport d'eau douce, les effets de la topographie et l'action des vagues, est le courant associé aux ondes de tempête. Les vents forts, et surtout les gradients de pression atmosphérique à l'échelle du Golfe, peuvent provoquer des différences du niveau de l'eau pouvant atteindre 2 m d'un littoral à l'autre. Ces différences induites par les tempêtes produisent des courants qui, combinés à d'autres facteurs, sont assez forts pour induire le transport des sédiments sur le fond, même à des profondeurs de 60 m. Ces courants sont comparables au site de l'Anse-à-Beaufils et au lieu du naufrage de l'*Irving Whale*. Étant donné que les ondes de tempête n'apparaissent qu'en présence de forts gradients de pression atmosphérique, elles sont plus susceptibles de se produire et d'induire le transport des sédiments entre octobre et avril, période où des dépressions atmosphériques traversent le Golfe. Cela expliquerait pourquoi on n'a pas enregistré de forts courants de fond pendant l'été 1993.

En résumé, en présence d'ondes de tempête, les courants de fond peuvent atteindre $50 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ sur le site de l'*Irving Whale*, ce qui peut induire le transport des sédiments. Avant son renflouage, l'*Irving Whale* constituait un obstacle pour ces courants, ce qui favorisait

l'accumulation des sédiments dans son sillage. Les sédiments auraient pu s'accumuler soit d'un côté, soit de l'autre de la barge, selon le sens du courant. Après le levage de la barge, cette accumulation de sédiments pourrait s'éroder au moins aussi vite que les déblais de dragage au site semi-protégé de l'Anse-à-Beaufils, et s'étaler de 40 m par an autour du monticule de départ. Les sédiments à granulométrie fine seraient transportés plus rapidement, possiblement à une vitesse de 36 m par mois (Gilbert et Walsh, 1996), mais la plus grande partie des sédiments contaminés seraient transportés plus lentement.

Les mesures des BPC présents dans les échantillons de sédiments prélevés autour de la position de l'*Irving Whale* après son renflouage ont servi à établir des cartes de la distribution des BPC dans les sédiments, comme le montre la figure 3. On a mesuré l'épaisseur des sédiments au moment de l'échantillonnage (voir la section 3.1.2).

Afin de prévoir l'épaisseur et la contamination des sédiments à l'été 1997, on a conçu un algorithme de leur étalement, comme le montre la figure 13. Cet algorithme reproduit l'étalement des sédiments sur 40 m qui a été observé à l'Anse-à-Beaufils, avec un rapport de 2 à 1 en faveur du secteur sud-est comparé aux trois autres secteurs, comme c'est le cas sur le site de la barge. L'espacement horizontal de la grille a été fixé à 10 m, intervalle désigné pour l'algorithme.

Dans un premier temps, on a interpolé les données sur l'épaisseur des sédiments à intervalles de 10 m par krigeage (Figure 14), et l'algorithme de l'étalement a été appliqué à la grille ainsi obtenue. Cette analyse s'appuie sur l'hypothèse selon laquelle le grès présent sous les sédiments superficiels est relativement uniforme, de sorte que l'épaisseur observée des sédiments représenterait la topographie réelle du fond.

L'épaisseur prévue des sédiments pour 1997, selon le modèle, apparaît à la figure 14. On peut constater qu'il y a aplanissement après un an seulement, mais que la plus grande partie du sable reste à proximité de l'empreinte de la barge. La figure 14 montre aussi les prévisions de contamination des sédiments par les BPC. Si l'épaisseur des sédiments semble devoir se modifier, on ne prévoit pas beaucoup de changements dans la distribution spatiale des BPC. Cela s'explique par le fait que les BPC se retrouvent surtout dans les zones où l'épaisseur des sédiments est faible, où ils se déplacent peu et peuvent être recouverts.

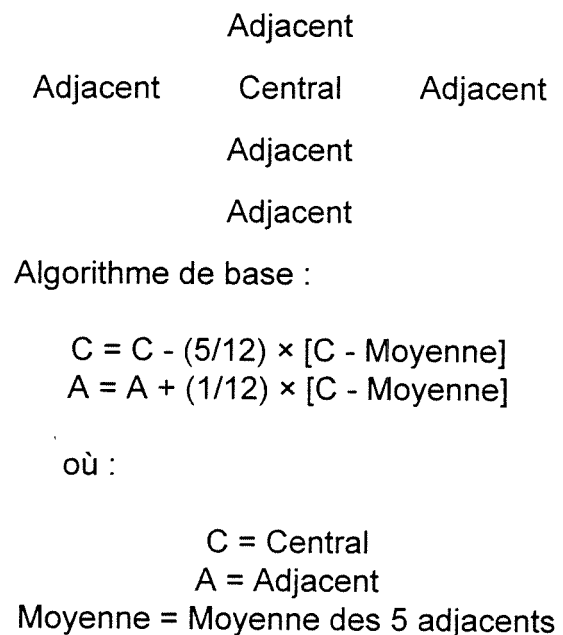
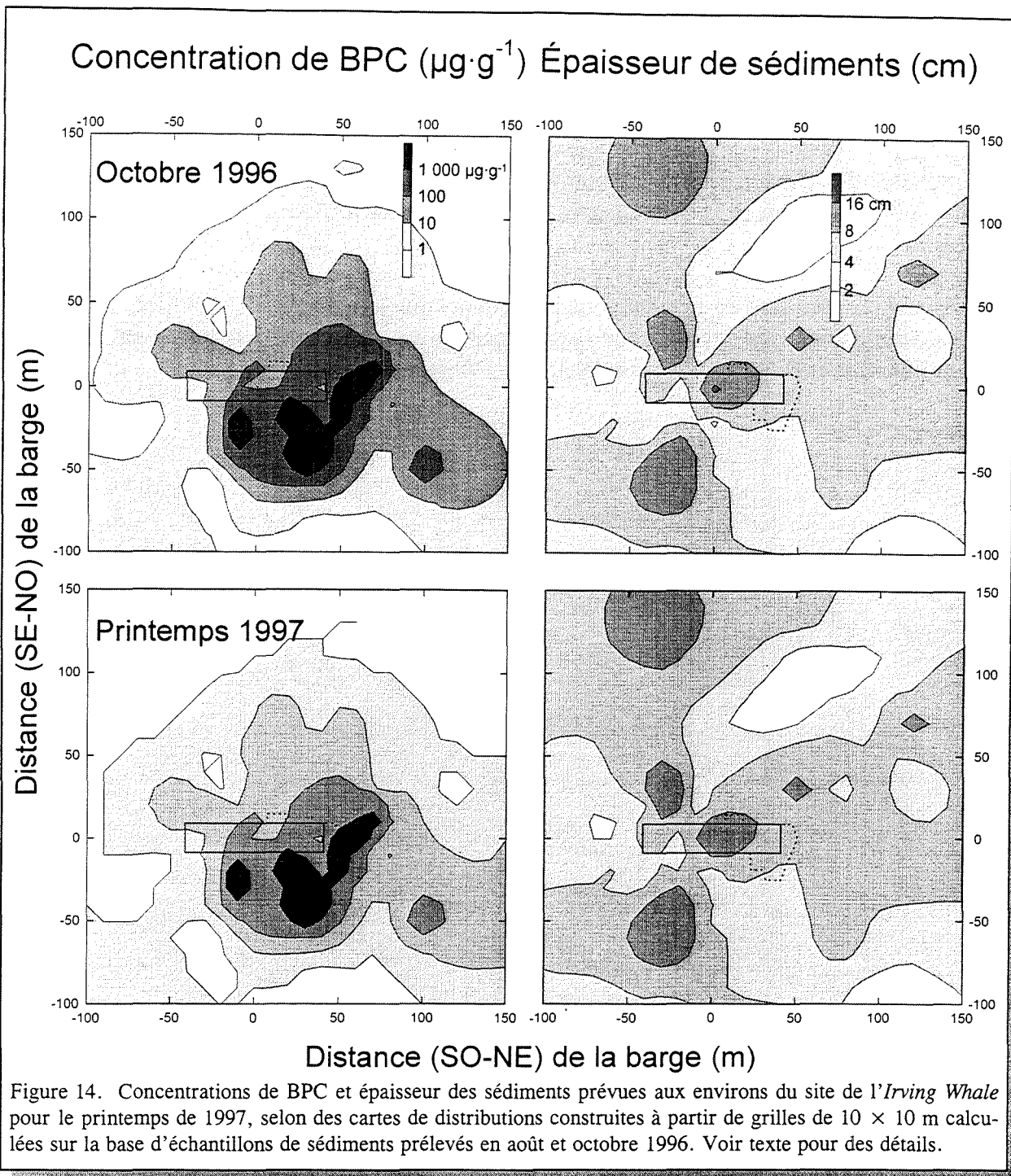


Figure 13. Algorithme d'étalement des sédiments, à partir d'observations à l'Anse-à-Beaufils, Québec.



La question de la régularité de la surface du grès sous-jacent reste entière, mais l'analyse devrait tout de même donner l'ordre de grandeur du déplacement. On prévoit que les sédiments resteront aux alentours de l'empreinte de la barge dans un rayon de 40 m ou moins par rapport aux observations de la distribution de 1996. Le deuxième niveau d'incertitude est le taux de lessivage de ce type de BPC dans des sédiments sableux. Les courants de fond qui balaient les

aspérités du fond marin peuvent induire un déplacement de l'eau par capillarité dans le sédiment et entraîner une petite proportion des BPC dans la colonne d'eau.

Ces incertitudes nécessitent une reprise de l'échantillonnage au printemps 1997. Si le taux de dispersion est élevé, il est possible que la concentration de BPC ait baissé de façon significative. Il serait bon d'effectuer par sondage un levé de la zone pour établir les courbes de niveau du fond à la profondeur de la surface du grès qui a été calculée à partir des données sur l'épaisseur des sédiments.

En résumé, la prévision de la contamination indique que le volume des sédiments à décontaminer ne devrait pas avoir augmenté de façon significative d'ici l'été 1997 par rapport à la situation qui existait en 1996 après le renflouage de l'*Irving Whale*.