

**Revue de la documentation scientifique sur la toxicité et les critères de
qualité relatifs aux hydrocarbures pétroliers dans les sédiments**

Rapport Final

25 août 2015

Coordination et rédaction

Cette publication a été réalisée par l'Institut des Sciences de la mer de Rimouski, Université de Rimouski. Elle s'inscrit dans le plan d'action du MDDELCC face au déversement de pétrole dans la rivière Chaudière survenu le 6 juillet 2013, lors de l'accident ferroviaire de Lac-Mégantic.

Renseignements

Pour tout renseignement, vous pouvez communiquer avec le Centre d'information du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Téléphone : 418 521-3830
1 800 561-1616 (sans frais)

Télécopieur : 418 646-5974
Courriel : info@mddelcc.gouv.qc.ca
Internet : www.mddelcc.gouv.qc.ca

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

Centre d'expertise en analyse
environnementale du Québec
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418 643-1301

Ou

Visitez notre site Web :
<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/lac-megantic/chaudiere.htm>

Référence à citer

Allaire-Verville, M. 2015. Revue de la documentation scientifique sur la toxicité et les critères de qualité relatifs aux hydrocarbures pétroliers dans les sédiments. 30 pages et annexes
ISBN 978-2-550-73937-1

Dépôt légal – 2015
Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN 978-2-550-73937-1 (PDF)

Tous droits réservés pour tous les pays.

© Gouvernement du Québec – 2015

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Recherche et rédaction

Marjorie Allaire-Verville¹, M. Sc., auxiliaire de recherche

Révision

Émilien Pelletier¹, Ph. D., professeur

Gaëlle Triffault-Bouchet², Ph. D., écotoxicologue, chef de division

Mélanie Desrosiers², Ph. D., écotoxicologue

Louis Martel², M. Sc., biologiste, directeur

Lise Boudreau³, M. Sc., biologiste

François Cloutier⁴, M. Sc., biologiste

Pierre Michon⁵, M. Env., biologiste

David Berryman³, M. Sc., Biologiste

Révision linguistique et édition

Vicky Gagnon², agente de secrétariat

¹ Institut des Sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski

² Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec

³ Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement

⁴ Environnement Canada, Direction des activités de protection de l'environnement – région du Québec

⁵ Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, Direction de l'évaluation environnementale des projets hydriques et industriels

SOMMAIRE

1. Introduction.....	1
2. Méthodologie	3
3. Toxicité des hydrocarbures pétroliers dans les sédiments chez les organismes aquatiques	4
3.1 Hydrocarbures pétroliers	4
3.2 Hydrocarbures aromatiques polycycliques	6
4. Critères de qualité des sédiments	7
4.1 Critères pour les fractions aliphatiques et aromatiques	8
4.2 Critères spécifiques aux hydrocarbures aromatiques polycycliques	12
4.2.1 Approche du <i>Screening level concentration</i> (SLC).....	13
4.2.2 Approche de l' <i>Apparent effect threshold</i> (AET)	14
4.2.3 Approche du <i>National Status and Trends Program</i>	15
4.2.4 Approche du Conseil canadien des ministres de l'environnement	16
4.2.5 Approche du Québec	17
4.2.6 Approche de la partition à l'équilibre (EqP).....	20
5. Conclusion	23
Références.....	25
Annexe 1.....	31

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Statistiques sur la demande intérieure, les importations et les exportations de pétrole brut au Canada en 2014 (ONÉ, 2014)	1
Tableau 2 :	<i>Maximum permissible concentration</i> (MPC) and <i>Serious risk concentration</i> (SRC _{eco}) pour les fractions d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques (Verbruggen et collab, 2008)	11
Tableau 3 :	Valeurs de référence pour les fractions d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques (Battelle, 2007)	12
Tableau 4 :	Valeurs de référence effets chroniques et effets aigus (Atlantic RBCA, 2012).....	12
Tableau 5 :	<i>Screening Level Concentration</i> (SLC) pour les HAP dans les sédiments marins	13
Tableau 6 :	<i>Lowest Effect Level</i> (LEL) et <i>Severe Effect Level</i> (SEL) pour les HAP dans les sédiments utilisés par l'Ontario pour la gestion des sédiments (Persaud et collab., 1993)	14
Tableau 7 :	<i>Apparent Effect Thresold</i> (AET) pour les HAP et 1 dérivé alkylé pour 4 indicateurs biologiques (Barrick et collab., 1988)	15
Tableau 8 :	<i>Effect Range-Low</i> (ERL) et <i>Effect Range-Median</i> (ERM) pour 12 HAP et un dérivé alkylé pour des sédiments marins (Long et collab., 1995)	16
Tableau 9 :	Critères de qualité des sédiments utilisés au Québec en eau douce et en eau salée pour les HAP et 1 dérivé alkylé, ces critères ne sont pas normalisée pour le COT (EC et MDDEP, 2007)	19
Tableau 10 :	Concentrations d'effet dans les sédiments pour les HAP et leurs dérivés alkylés déterminées à partir de la partition à l'équilibre	22

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Structure moléculaire de base des principaux hydrocarbures pétroliers (Colombano et collab., 2008).	2
Figure 2 : Modèle de la partition à l'équilibre	8

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1 Calcul de la concentration seuil produisant un effet (CSE).....	17
Équation 2 Calcul de la concentration produisant un effet probable (CEP)	17
Équation 3 Calcul de la concentration d'effets rares (CER).....	18
Équation 4 Calcul de la concentration d'effets occasionnels (CEO).....	18
Équation 5 Calcul de la concentration d'effets fréquents (CEF)	18
Équation 6 Calcul de l'indice de risque global ou additif (IR_{add}) d'un mélange de HAP	21

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AET :	<i>Apparent effect threshold</i>
BEDS :	<i>Biological Effects Database for Sediments</i>
C_i :	Concentration d'un HAP spécifique mesurée dans les sédiments exprimée en mg par kg de carbone organique
CCME :	Conseil canadien des ministres de l'environnement
CE ₅₀ :	Concentration d'effet 50 %
CEF :	Concentration d'effets fréquents
CEO :	Concentration d'effets occasionnels
CEP :	Concentration produisant un effet probable
CER :	Concentration d'effets rares
Cl ₂₅ :	Concentration inhibitrice 25 %
CL ₅₀ :	Concentration létale 50 %
COT :	Carbone organique total
CSE :	Concentration seuil produisant un effet
EMAP :	<i>Environmental Monitoring and Assessment Program</i>
EqP :	Partition à l'équilibre
ERL :	<i>Effect range-low</i>
ERM :	<i>Effect range-median</i>
FAV :	<i>Final acute value</i>
FCV :	<i>Final chronic value</i>
HAP :	Hydrocarbure aromatique polycyclique
HPT :	Hydrocarbures pétroliers totaux
IR_{add} :	Indice de risque global ou additif

JWSL :	<i>Jacques Whitford Stantec Limited</i>
K _{oc} :	Coefficient de partage carbone organique/eau
K _{ow} :	Coefficient de partage octanol/eau
LEL :	<i>Lowest effect level</i>
LOEC :	<i>Lowest observed effect concentration</i>
MADEP :	<i>Massachusetts Department of Environmental Protection</i>
MDDELCC :	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MPC :	<i>Maximum permissible concentration</i>
NOAA :	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NOEC :	<i>No observed effect concentration</i>
ONÉ :	Office national de l'énergie du Canada
RIVM :	<i>National Institute for Public Health and the Environment</i> des Pays-Bas
SEL :	<i>Severe effect level</i>
SLC :	<i>Screening level concentration</i>
SRC _{eco} :	<i>Serious risk concentration</i>
SSLC :	<i>Species screening level concentration</i>
USEPA :	<i>Environmental Protection Agency</i> des États-Unis

1. Introduction

Le pétrole brut et les dérivés de son raffinage sont parmi les produits de consommation les plus en demande dans le monde. Selon les données de l'Office national de l'énergie (ONÉ) du Canada, la demande intérieure moyenne en pétrole brut au Canada en 2014 était de $190,9 \times 10^3 \text{ m}^3$ par jour (ONÉ, 2014). Le tableau 1 présente les données statistiques concernant la demande intérieure, les importations et les exportations de pétrole brut léger et lourd au Canada en 2014.

Tableau 1 : Statistiques sur la demande intérieure, les importations et les exportations de pétrole brut au Canada en 2014 (ONÉ, 2014)

	Moyenne ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{jour}$)		
	Pétrole léger	Pétrole lourd	Total
Demande intérieure	159,4	31,5	190,9
Importations	83,4	4,0	87,4
Exportations	122,7	318,0	440,7

Le Canada exporte en moyenne $440,7 \times 10^3 \text{ m}^3$ par jour de pétrole aux États-Unis et ailleurs dans le monde (ONÉ, 2014). Les pipelines sont le principal moyen de transport du pétrole mais une grande quantité de celui-ci voyage également par voies maritimes (ONÉ, 2014). Le transport de telles quantités de ce produit comporte des risques. En effet, même si les hydrocarbures pétroliers peuvent se retrouver dans l'environnement de façon naturelle par suintement à travers le sol, c'est le ruissellement dans les zones urbaines, les rejets industriels et les déversements accidentels qui sont des sources importantes de contamination des écosystèmes par les hydrocarbures (Jimenez-Tenorio et collab., 2008 ; Mueller et collab., 1999).

Le pétrole contient principalement des hydrocarbures, c'est-à-dire des molécules composées uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Il s'agit d'alcane (ou paraffines), d'alcène (ou oléofines) et d'hydrocarbures aromatiques (Figure 1). Les alcanes sont des hydrocarbures saturés qui sont répartis en deux groupes : les alcanes non cycliques, qui correspondent aux alcanes linéaires ou ramifiés, et les alcanes cycliques ou cycloalcanes, également connus sous le nom de naphthènes (Figure 1). Les alcènes sont des hydrocarbures insaturés caractérisés par la présence d'au moins une double liaison covalente entre deux atomes de carbone (Figure 1). Les alcènes non cycliques n'ayant qu'une double liaison possèdent une formule brute de la forme

C_nH_{2n} où n est un entier naturel supérieur ou égal à 2. L'alcène le plus simple est l'éthylène. Ces deux groupes constituent les hydrocarbures non aromatiques, qui sont également désignés sous le terme hydrocarbures aliphatiques.

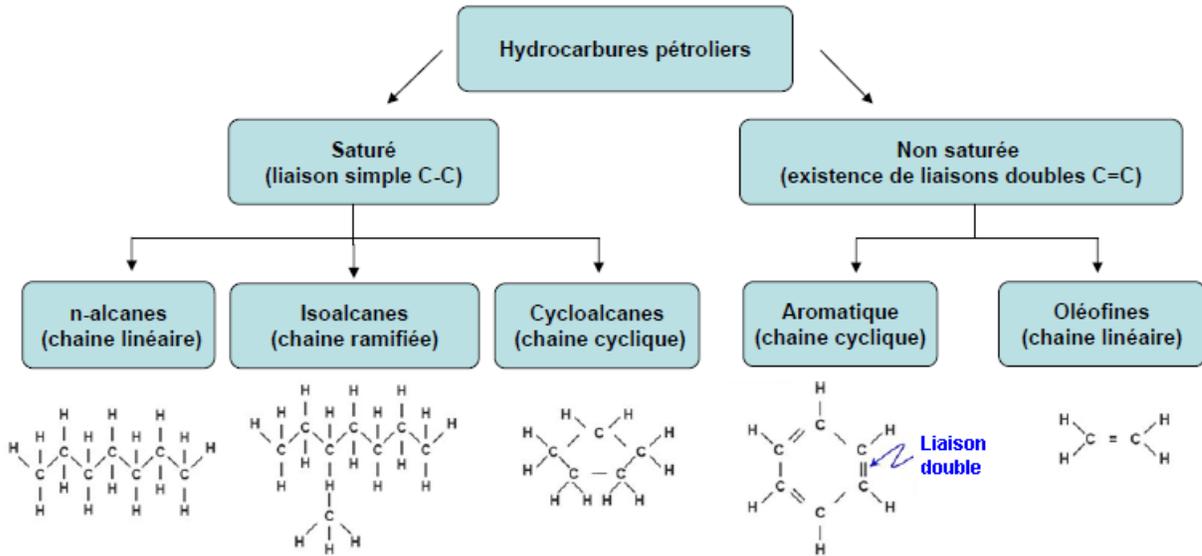


Figure 1 : Structure moléculaire de base des principaux hydrocarbures pétroliers (Colombano et collab., 2008).

Les hydrocarbures aromatiques sont des hydrocarbures insaturés constitués de un ou de plusieurs noyaux benzéniques. Il s'agit notamment des BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène, xylène) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). D'autres constituants mineurs sont également présents dans le pétrole comme des métaux et des composés contenant de l'azote, du soufre ou de l'oxygène.

Après un déversement dans un milieu aquatique, les résidus pétroliers les plus lourds vont tendre à s'accumuler dans les sédiments (Gong et collab., 2014). Il peut également y avoir un phénomène d'émulsion qui contribue à piéger les hydrocarbures dans les sédiments et sous les roches (Gong et collab., 2014). De plus, les variations du niveau d'eau peuvent également entraîner une contamination des sédiments et des berges. Ces phénomènes se sont produits dans la rivière Chaudière à la suite à la tragédie ferroviaire de Lac-Mégantic (MDDELCC, 2014). En l'absence de critères de qualité des sédiments pour les hydrocarbures pétroliers entre C_{10} - C_{50} ¹, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les

¹ Dans ce document, le terme hydrocarbures pétroliers entre C_{10} - C_{50} réfère aux hydrocarbures aliphatiques et aromatiques dosés par la méthode du CEAQ MA. 400 – HYD. 1. 1.

changements climatiques (MDDELCC) utilise actuellement des valeurs de référence provisoires pour évaluer la qualité des sédiments contaminés du lac Mégantic et de la rivière Chaudière pour la protection des organismes aquatiques benthiques et leurs prédateurs (MDDEFP, 2013). Ces valeurs doivent être validées pour assurer une protection adéquate des organismes. Le projet 3.1 du plan de gestion de la contamination résiduelle de la rivière Chaudière a pour but d'évaluer le risque écotoxicologique associé à la contamination des sédiments du lac Mégantic et de la rivière Chaudière (MDDELCC, 2014). Cette revue de littérature s'inscrit dans le cadre de ce projet. Elle collige des informations sur les hydrocarbures pétroliers dans les sédiments : les hydrocarbures pétroliers entre C₁₀-C₅₀, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et leurs dérivés alkylés. Les HAP alkylés possèdent un ou plusieurs groupements méthyle ou éthyle additionnels greffés à leur structure et sont retrouvés principalement dans les hydrocarbures pétroliers. Elle présente en premier lieu les informations disponibles sur la toxicité de ces substances présentes dans les sédiments pour les organismes aquatiques. En deuxième lieu, les critères de qualité des sédiments développés par d'autres juridictions selon plusieurs approches en incluant leurs fondements et leur application sont présentés.

2. Méthodologie

Trois sources d'information ont été utilisées pour la recherche de données sur la toxicité des hydrocarbures pétroliers dans les sédiments pour les organismes benthiques. Une première recherche a été effectuée dans la littérature scientifique à partir de la base de données Web of Science^{MC}. Les mots-clés «petroleum hydrocarbons», «crude oil», «polycyclic aromatic hydrocarbons», «alkylated polycyclic aromatic hydrocarbons», «sediment» et «toxicity» ont, entre autres, été utilisés. Cette recherche incluait ainsi tous les types de pétrole et leurs produits raffinés. Les données provenant d'essais de toxicité avec des sédiments, que ce soit des essais en laboratoire ou des études de terrain, ont été retenues. Concernant les HAP et leurs dérivés alkylés, seules les données de toxicité des sédiments contenant les composés pour lesquels il n'y a pas de critères au Québec ont été retenues et incluses dans la revue de littérature. La recherche d'information a ensuite été effectuée dans les documents fournis pour les études d'impacts sur l'environnement, réalisées au Québec, susceptibles de contenir des données provenant d'essais de toxicité avec des sédiments contaminés. Finalement, les principaux critères de qualité des sédiments utilisés au Canada et dans d'autres juridictions ont été colligés. Les données proviennent essentiellement de la littérature à diffusion restreinte, par exemple

des rapports faits par ou pour des organismes gouvernementaux. La revue de littérature n'inclut pas de rapports rédigés en d'autres langues que l'anglais et le français.

3. Toxicité des hydrocarbures pétroliers dans les sédiments chez les organismes aquatiques

3.1 Hydrocarbures pétroliers totaux

Les hydrocarbures pétroliers présents dans les sédiments peuvent affecter les organismes aquatiques à court, moyen et long termes. Par exemple, Grenier (2014) a montré dans sa revue de littérature que les impacts des déversements d'hydrocarbures pétroliers sur les macroinvertébrés benthiques d'eau douce, dans certains cas, se faisaient toujours sentir après plus d'un an dans certains cas. Autre exemple, en milieu marin, Harrel (1985) a montré dans un cas de déversement de 160 barils de pétrole au Texas qu'il n'y avait pas de rétablissement en termes de présence de taxons d'eau propre (*clean water taxon*) 26 mois après l'incident. De multiples travaux ont montré un rétablissement plus ou moins complet du macrobenthos après des périodes de quelques mois à plusieurs décennies comme montré ci-après.

Les tableaux A1 à A4 de l'annexe 1 présentent les données répertoriées dans la littérature sur la toxicité de différents types de produits pétroliers dans les sédiments envers des organismes d'eau douce et d'eau marine. Les tableaux A1 et A3 présentent les données répertoriées provenant d'études en laboratoire et les tableaux A2 et A4 présentent les données répertoriées provenant d'études de terrain.

En eau douce, des études ont mis en évidence les effets des hydrocarbures pétroliers sur les invertébrés benthiques. Lors d'une étude en laboratoire avec *Chironomus dilutus*, Mroz (2011) a obtenu une CL₅₀ de 298 mg/kg, une CI₂₅ pour la croissance de 200 mg/kg et une CI₂₅ pour la biomasse de 89 mg/kg suite à une exposition à du fioul n°2. Dans cette même étude, *Hyallela azteca* a été exposé à du fioul n°2 et du fioul n°6. L'auteure a obtenu des CL₅₀ de 278 et 608 mg/kg, des CI₂₅ pour la croissance de moins de 400 et de moins de 50 mg/kg et des CI₂₅ pour la biomasse de 133 et moins de 50 mg/kg avec le fioul n°2 et le fioul n°6 respectivement. Lors de l'exposition de *Hexagenia bilineata* à du pétrole brut, de la mortalité a été observée à partir de 500 mg/kg (Ort et collab., 1995). Verbruggen et collaborateurs (2008) ont obtenu des CL₅₀ comprises entre 310 et 3 300 mg/kg lorsqu'ils ont exposé *Chironomus riparius*, *Hyallela azteca*

et *Ephoron virgo* à deux types de produits pétroliers. Des concentrations de produits pétroliers de 840 et 860 mg/kg ont perturbé la composition de la communauté de macroinvertébrés benthiques (Pettigrove et Hoffmann, 2005; Anson et collab., 2008). Ces perturbations incluent la diminution du nombre d'espèces et de l'abondance de certaines espèces. Des sédiments prélevés à l'aval de rejets d'effluents provenant d'un champ pétrolifère contenant des concentrations d'hydrocarbures de 12,6 à 20,7 mg/kg ont montré une diminution de la diversité et une altération de la structure de la communauté de macroinvertébrés benthiques comparativement aux échantillons prélevés à l'amont du rejet (Woodward et Riley, 1983). Des sédiments prélevés à différents endroits dans le fleuve Saint-Laurent contenant des concentrations d'hydrocarbures aliphatiques entre C_{10} et C_{50} de moins de 14 à 17 000 mg/kg ont induit de la mortalité chez *Chironomus riparius* et *Hyallolela azteca* (Desrosiers et collab., 2010 et Desrosiers et collab., résultats non publiés; Tableau A2). À l'inverse, des sédiments issus de cette étude et contenant des concentrations d'hydrocarbures aliphatique entre C_{10} et C_{50} de moins de 14 à 660 mg/kg et de moins de 14 à 1 400 mg/kg n'ont pas induit de mortalité chez *C. riparius* et *H. azteca* respectivement. Cependant, il est important de mentionner que, dans cette étude, il est difficile de faire un lien direct entre les concentrations en hydrocarbures et les réponses des essais de toxicité étant donné que les sédiments contenaient également d'autres contaminants, non reliés à la présence de pétrole dans les sédiments.

En eau marine, des concentrations de 43,7 mg/kg d'essence distillée grade A (DMA gasoil) et de 2682 mg/kg d'huile hydraulique à haute viscosité grade 46 (HV46) ont inhibé 50 % de la luminescence chez la bactérie *Vibrio fischeri* (Brils et collab., 2002). Une concentration en carburant diesel de 148 mg/kg a fait diminuer le contenu en chlorophylle du périphyton d'environ 4 fois par rapport au témoin après trois jours d'exposition (Nayar et collab., 2004). Dans une étude réalisée en laboratoire, une concentration de 500 mg/kg de deux types de pétrole brut a causé une diminution du nombre de survivants chez la progéniture et une réduction du taux de croissance de *Corophium volutator* (Scarlett et collab., 2007). Chez ce même organisme, des concentrations de 100 mg/kg d'essence distillée (DMA gasoil) et 9 138 mg/kg d'huile hydraulique (HV46) ont causé 50 % de mortalité (Brils et collab., 2002). Des concentrations allant de 112 à 1 988 mg/kg de ces deux types de produits pétroliers ont causé de la mortalité et l'inhibition du ré-enfouissement d'*Echinocardium cortatum* (Brils et collab., 2002). Dans leur étude de terrain, Lu et Wu (2006) ont contaminé des sédiments ne contenant pas d'organismes avec 5000 mg/kg d'huile diesel et les ont placés dans des plateaux. Puis, ces

plateaux ont été installés par-dessus les sédiments du site à l'étude. Ils ont observé une inhibition de la colonisation des sédiments par la faune macrobenthique en termes d'abondance et de nombre d'espèces dans les sédiments contaminés par rapport aux témoins. Par exemple, sept mois après le début de l'expérience, l'abondance était d'environ 700 organismes par plateau témoin et d'environ 400 organismes par plateau contaminé et le nombre d'espèces étaient d'environ 70 par plateaux témoin et d'environ 50 par plateau contaminé. Il faut noter que les effets se sont dissipés avec le temps et qu'onze mois après le début de l'expérience, l'abondance et le nombre d'espèces étaient similaires dans les plateaux témoins et les plateaux contaminés.

3.2 Hydrocarbures aromatiques polycycliques

Un certain nombre d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)) sont présents dans le pétrole et ses produits de raffinage. Ils ont été détectés à maintes reprises dans des échantillons de sédiments (Nikolaou et collab., 2009). Dans le cadre de l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec, douze HAP (acénaphthène, acénaphthylène, anthracène, benzo(a)anthracène, benzo(a)pyrène, chrysène, dibenzo(a,h)anthracène, fluoranthène, fluorène, naphthalène, phénanthrène et pyrène) et un dérivé alkylé (2-méthyl-naphthalène) sont mesurés dans cette matrice et font l'objet d'un critère de qualité (voir section 4.2.5). Étant donné que l'objectif de cette revue de littérature est de colliger des informations nouvelles sur la toxicité des hydrocarbures pétroliers dans les sédiments en vue de la validation de critères pour les hydrocarbures C₁₀-C₅₀, la toxicité des HAP faisant l'objet d'un critère de qualité des sédiments n'a pas été revue dans le cadre de ce rapport. La recherche a plutôt porté sur des HAP et des dérivés alkylés qui ne font pas l'objet d'un critère au Québec.

Les tableaux A5 et A6 de l'annexe 1 présentent les données répertoriées dans la littérature sur la toxicité des HAP et de leurs dérivés alkylés dans les sédiments envers des organismes aquatiques. Toutes les données proviennent d'études réalisées en laboratoire.

En eau douce, Verrhiest et collaborateurs (2001) ont testé la toxicité du benzo(k)fluoranthène sur deux invertébrés. *Chironomus riparius* et *Hyallela azteca* ont présenté des CL₅₀ de plus de 300 mg/kg de sédiments secs. Dans cette étude, il est mentionné que cette concentration est rarement retrouvée dans l'environnement. Également en eau douce, mais chez les poissons, Le Bihanic et collaborateurs (2014 a et b) ont montré que des mélanges de HAP extraits de deux types de pétrole causent des anomalies du développement (augmentation du nombre

d'embryons à moitié éclos, augmentation du nombre de larves anormales et diminution du taux d'éclosion) chez les larves de la truite arc-en-ciel, *Oncorhynchus mykiss* à des concentrations de 0,5 et 3 mg de HAP totaux/kg. Dans ces deux types de pétrole, l'*Arabian light* et l'*Erika heavy*, les HAP alkylés représentaient environ 60 et 40 % des HAP totaux respectivement (Le Bihanic et collab., 2014b). Chez les embryons du poisson-zèbre *Danio rerio*, de la mortalité et des anomalies du développement commencent à être observées à des concentrations de HAP totaux comprises entre 15 et 27 mg/kg (Raimondo et collab., 2014).

En eau marine, Vicquelin et collaborateurs (2011) ont observé des effets du 7,12 diméthylbenz(a)anthracène sur les embryons du poisson médaka japonais, *Oryzias latipes*, à partir de 88 mg/kg (augmentation du taux de mortalité des embryons, diminution du pourcentage d'éclosion, augmentation du temps d'éclosion, augmentation des anomalies chez les larves, augmentation des dommages à l'ADN et diminution de la longueur des corps). Le méthylpyrène a également causé une diminution du taux d'éclosion, une augmentation du temps d'éclosion et une augmentation du pourcentage de larves anormales à une concentration de 0,202 mg/kg chez les embryons de cette espèce (Barjhoux et collab., 2014). Le Bihanic et ses collaborateurs (2014b) ont montré qu'un mélange de HAP extraits du pétrole *Arabian light oil* et contenant de 57 à 66 % de dérivées alkylés cause des anomalies physiologiques et une diminution de la longueur totale chez les larves d'*Oryzias latipes* à une concentration de 0,499 mg/kg.

4. Critères de qualité des sédiments

Actuellement, au Québec, il n'existe pas de critères de qualité des sédiments pour les hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀. Cependant, il existe des critères spécifiques pour plusieurs HAP. Les différentes approches utilisées dans d'autres juridictions pour définir des critères de qualité pour les sédiments pour les fractions aliphatiques et aromatiques, de même que les approches utilisées pour définir ces données pour un HAP spécifiquement, sont décrites dans les sections suivantes.

4.1 Critères pour les fractions aliphatiques et aromatiques

Les valeurs de référence provisoires utilisées par le MDDELCC pour l'évaluation de la qualité des sédiments du lac Mégantique et de la rivière Chaudière sont les suivantes (MDDEFP, 2013) :

- une valeur de référence pour les effets chroniques de 164 mg/kg;
- une valeur de référence pour les effets aigus de 832 mg/kg.

Ces valeurs ont été calculées par la firme *Jacques Whitford Stantec Limited (JWSL)* (Atlantic RBCA, 2012) et elles incluent les fractions aliphatiques comprises entre C_7 et C_{34} et les fractions aromatiques comprises entre C_6 et C_{34} . Les valeurs de toxicité calculées pour les diverses fractions déterminées selon la longueur des chaînes de carbone sont présentées au tableau 4.

Ces valeurs de référence devront être validées pour pouvoir être appliquées à d'autres contextes que celui d'urgence de la gestion de la contamination du lac Mégantique et de la rivière Chaudière, et, pour ce faire, comparées aux données proposées par d'autres juridictions. Ainsi, les paragraphes suivants présentent les approches adoptées par différentes équipes de recherche et différentes juridictions pour développer des valeurs de référence ou des critères de qualité des sédiments pour les fractions aliphatiques et aromatiques des hydrocarbures pétroliers, ainsi que les valeurs obtenues.

Di Toro et collaborateurs (Di Toro et collab., 1991; Di Toro et collab., 2000; Di Toro et Mcgrath, 2000) ont proposé un modèle de partition à l'équilibre pour développer des valeurs de toxicité de référence pour les composés narcotiques. La figure 2 représente schématiquement le modèle proposé.

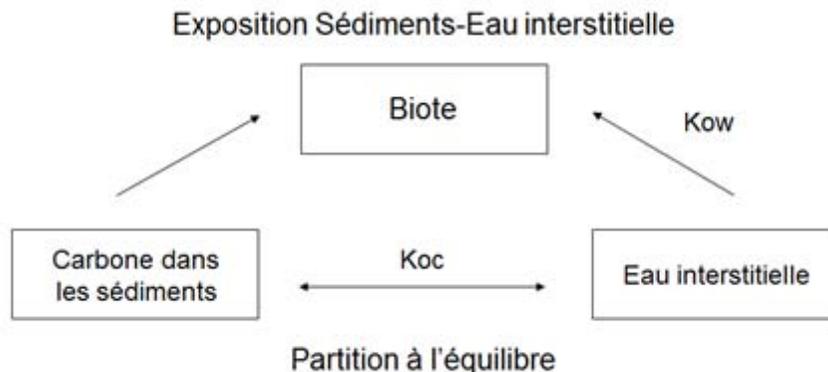


Figure 2 : Modèle de la partition à l'équilibre

Selon ce modèle, la toxicité d'un composé narcotique est causée par sa partition du carbone organique des sédiments à l'eau interstitielle, estimée à partir du coefficient de partage carbone organique/eau (K_{oc}), et de sa partition de l'eau interstitielle aux tissus de l'organisme, estimée à partir du coefficient de partage octanol/eau (K_{ow}) (Di Toro et collab., 2000). Dans cette approche, il est assumé que : 1) la partition est à l'équilibre, 2) la concentration dans chacune des phases (sédiments, eau interstitielle, tissus biologiques) peut être prédite en utilisant le coefficient de partage approprié (K_{oc} ou K_{ow}) et la concentration mesurée ou estimée dans les autres phases, 3) la concentration d'hydrocarbures dans les sédiments qui entraîne un niveau d'effets envers les organismes est la même pour toutes les voies d'exposition (que ce soit par l'eau interstitielle via la respiration ou par les sédiments via l'ingestion), 4) les concentrations d'effets dans les sédiments peuvent être estimées à partir du K_{oc} et des concentrations d'effets dans l'eau et 5) la valeur de référence déterminée à partir de la partition à l'équilibre est protectrice pour les organismes benthiques et les organismes de la colonne d'eau (Battelle, 2007). La valeur de référence dans les sédiments pour un contaminant donné peut être calculée en multipliant la valeur de référence pour l'eau de surface de ce même contaminant par son coefficient de partage entre l'eau interstitielle et le carbone organique (K_{oc}) (Di Torro et collab., 1991).

Ainsi, en se basant sur l'approche de la partition à l'équilibre, le *National Institute for Public Health and the Environment* (RIVM) des Pays-Bas, le *Massachusetts Department of Environmental Protection* (MADEP) et la firme *Jacques Whitford Stantec Limited* (JWSL) ont également déterminé des valeurs de référence pour différentes fractions aliphatiques et aromatiques d'hydrocarbures pétroliers (Verbruggen et collab., 2008; Battelle, 2007; Atlantic RBCA, 2012). Ainsi, les hydrocarbures sont divisés en fractions selon le nombre d'atomes de carbone de leur structure moléculaire. Par exemple, les hydrocarbures contenant de 16 à 21 atomes de carbone pourraient constituer la fraction $C_{16}-C_{21}$. Les fractions d'hydrocarbures sont considérées distinctement selon qu'elles appartiennent à l'une ou l'autre des 2 grandes catégories d'hydrocarbures : les fractions aliphatiques, qui regroupent les hydrocarbures linéaires, branchés et cycliques non aromatiques et, les fractions aromatiques.

Le RIVM (Verbruggen et collab., 2008) a déterminé deux types de valeurs de référence pour chacune des fractions d'hydrocarbures. La *maximum permissible concentration* (MPC)

correspond à la concentration ayant un effet nuisible pour 5 % des espèces et la *serious risk concentration* (SRC_{eco}) correspond à la concentration ayant des effets nuisibles pour 50 % des espèces. Pour ce faire, des données d'essais de toxicité sur des organismes d'eau douce et marins, avec des sédiments dopés avec 2 types d'hydrocarbures pétroliers, ont été utilisées. Les données en eau douce proviennent d'une étude néerlandaise citée par Verbruggen et collaborateurs (2008) et les données d'eau marine proviennent de l'étude de Brils (2002). Ces données de toxicité sont présentées dans les tableaux A1 et A3 de l'annexe 1. Le modèle de la partition à l'équilibre a été utilisé pour exprimer les données sur la base de la concentration interne de lipides. Par après, les concentrations qui pourraient potentiellement affecter 5 et 50 % des espèces (MPC et SRC_{eco}) ont été déterminées en établissant une distribution de sensibilité des espèces puis, les concentrations ont été transformées en mg/kg de sédiment sec, toujours à l'aide du modèle de partition à l'équilibre. Le tableau 2 présente les valeurs de référence pour les fractions d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques dans les sédiments, normalisées pour 1 % de carbone organique total (COT), déterminées par Verbruggen et collaborateurs (2008). Notons que les valeurs de références pour les fractions aliphatiques sont plus faibles que pour les fractions aromatiques et ce jusqu'à C₁₂.

Dans un rapport de Battelle (2007) pour le MADEP, la base de données ECOTOX (<http://cfpub.epa.gov/ecotox/>) a été utilisée pour déterminer une *final chronic value* (FCV) pour une gamme d'hydrocarbures. La FCV représente la moyenne des CL₅₀ divisé par un facteur de 15. L'application du facteur permet d'obtenir une valeur chronique qui est protectrice pour la plupart des espèces. La FCV est multipliée par le K_{oc} pour obtenir la valeur de référence en mg/kg de carbone organique. Le tableau 3 présente les valeurs de référence d'effets chroniques pour les fractions d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques déterminées par Battelle (2007). Les valeurs présentées sont normalisées pour 1 % de carbone organique total. Notons que les valeurs de référence pour les fractions aliphatiques sont plus élevées que pour les fractions aromatiques.

Tel que présenté dans le rapport du Atlantic RBCA (2012), la firme *Jacques Whitford Stantec Limited* (JWSL) a utilisé le modèle de Di Toro et McGrath (2000) pour calculer deux valeurs de référence pour chaque fraction d'hydrocarbures (tableau 4). La valeur d'effets aigus correspond au 5^{ième} percentile d'une distribution de sensibilité établie à partir d'une base de données. La valeur d'effets chroniques est obtenue en appliquant un facteur de division à la valeur d'effets

aigus. Ce facteur correspond à la moyenne géométrique des ratios entre les valeurs d'effets aigus et chronique établie à partir des données de toxicité disponibles pour 6 espèces et 20 composés narcotiques. Le tableau 4 présente les valeurs de référence pour les fractions d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques dans les sédiments, normalisées pour 1 % de carbone organique, déterminées par *Jacques Whitford Stantec Limited* (Atlantic RBCA, 2012). Les valeurs de référence obtenues pour les fractions aliphatiques sont plus élevées que pour les fractions aromatiques, telles qu'obtenues par Battelle (2007). De plus, les fractions aliphatiques plus lourdes que C₁₆ ne sont pas considérées comme suffisamment solubles pour causer de la toxicité.

Notons que les valeurs de référence définies par les 3 approches présentées dans cette section sont sensiblement différentes ce qui peut s'expliquer, en partie, par l'utilisation de terminologie et de base de données de toxicité différentes.

Tableau 2 : Maximum permissible concentration (MPC) and Serious risk concentration (SRC_{eco}) pour les fractions d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques (Verbruggen et collab, 2008)

Substances	Fraction de carbone	Maximum permissible concentration (MPC)	Serious risk concentration (SRC _{eco})
Hydrocarbures pétroliers totaux		mg/kg de sédiments secs (1 % COT)	
Aliphatiques	C5-C6	0,083	1,8
	C7-C8	0,082	1,7
	C9-C10	0,075	1,6
	C11-C12	0,140	3,0
	C13-C16	1,500	32,0
	C17-C21	-	-
Aromatiques	C5-C7	0,200	4,4
	C8	0,230	4,9
	C9-C10	0,260	5,5
	C11-C12	0,300	6,3
	C13-C16	0,360	7,7
	C17-C21	0,470	10,0
	C22-C35	1,100	23,0

Tableau 3 : Valeurs de référence pour les fractions d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques (Battelle, 2007)

Substances	Fraction	Valeur de référence
Hydrocarbures pétroliers totaux		mg/kg de sédiments secs (1 %COT)
Aliphatiques	C5-C8	15,91
	C9-C12	27,22
	C13-C18	55,43
	C18-C36	98,83
Aromatiques	C6-C8	5,31
	C9-C12	2,28
	C13-C15	1,20
	C16-C24	0,40

Tableau 4 : Valeurs de référence effets chroniques et effets aigus (Atlantic RBCA, 2012)

Substances	Fraction de carbone	Effets chroniques	Effets aigus
Hydrocarbures pétroliers totaux		mg/kg de sédiments secs (1 %COT)	
Aliphatiques	C7-C8	9,8	50
	C9-C10	14	70
	C11-C12	18	94
	C13-C16	26	130
	C17-C21	-	-
	C22-C34	-	-
Aromatiques	C6-C8	<10	<50
	C9-C10	11,0	58
	C11-C12	13,0	64
	C13-C16	15,0	76
	C7-C21	20,0	100
	C22-C34	27,0	140
Somme		163,8	832

4.2 Critères spécifiques aux hydrocarbures aromatiques polycycliques

Plusieurs juridictions ont développé des critères de qualité des sédiments spécifiques pour quelques hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Cette section présente tout d'abord les approches utilisées par les juridictions autres que le MDDELCC ainsi que les valeurs qu'elles ont générées. Puis, elle présente l'approche et les critères utilisés au Québec. Finalement, elle présente l'approche de la partition à l'équilibre utilisée par l'*Environmental Protection Agency* des États-Unis (USEPA) pour des mélanges de HAP.

4.2.1 Approche du *Screening Level Concentration* (SLC)

Cette approche utilise des données de terrain reliant la concentration d'un contaminant dans des sédiments et la présence des taxons de la faune benthique pour calculer une valeur de référence, la *Screening Level Concentration* (SLC) (Neff et collab., 1986).

Tout d'abord, pour chaque espèce pour laquelle il y a des données, la distribution de fréquence de la présence de cette espèce est établie en fonction de la concentration d'un contaminant donné dans les sédiments. Le 90^{ième} centile de cette distribution correspond au *Species Screening Level Concentration* (SSLC) pour cette espèce. Les SSLC sont calculées ainsi pour chaque espèce. Ensuite, la distribution de fréquence de toutes les SSLC est établie en fonction de la concentration du contaminant. Le 5^{ième} centile de cette distribution correspond au *Screening Level Concentration* (SLC). La valeur SLC détermine donc, pour un composé donné, la concentration qui peut être tolérée par 95 % des organismes (Neff et collab., 1986). Le tableau 5 présente les SLC pour 10 HAP dans les sédiments marins secs (Neff et collab., 1987). Les valeurs présentées sont normalisées pour 1 % de carbone organique total dans les sédiments.

Tableau 5 : *Screening Level Concentration* (SLC) pour les HAP dans les sédiments marins (Neff et collab., 1987)

Substances	<i>Screening level concentration</i> (SLC) mg/kg de sédiments marins secs (1 % COT)
Acénaphthalène	0,0474
Anthracène	0,163
Benzo(a)anthracène	0,261
Benzo(a)pyrène	0,397
Chrysène	0,384
Fluoranthène	0,644
Fluorène	0,101
Naphtalène	0,414
Phénanthrène	0,368
Pyrène	0,665

Le ministère de l'environnement de l'Ontario a également utilisé cette méthode pour calculer le *Lowest Effect Level* (LEL), qui est l'équivalent de la SLC, en plus du *Severe Effect Level* (SEL) qui correspond au 95^{ième} centile de la distribution des SSLC (Persaud et collab., 1993). Le tableau 6 présente les valeurs de référence utilisées par le ministère de l'environnement de l'Ontario pour la gestion des sédiments (Persaud et collab., 1993). Les valeurs sont normalisées pour 1 % de carbone organique total dans les sédiments.

Tableau 6 : *Lowest Effect Level (LEL)* et *Severe Effect Level (SEL)* pour les HAP dans les sédiments utilisés par l'Ontario pour la gestion des sédiments (Persaud et collab., 1993)

Substances	<i>Lowest effect level (LEL)</i>	<i>Severe effect level (SEL)</i>
	mg/kg de sédiments secs (1 % de COT)	
Anthracène	0,22	3,70
Benzo(a)anthracène	0,32	14,80
Benzo(k)fluoranthène	0,24	13,40
Benzo(a)pyrène	0,37	14,40
Benzo(g,h,i)pérylène	0,17	3,20
Chrysène	0,34	4,60
Dibenzo(a,h)anthracène	0,06	1,30
Fluoranthène	0,75	10,20
Fluorène	0,19	1,60
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	0,20	3,20
Phénanthrène	0,56	9,50
Pyrène	0,49	8,50

4.2.2 Approche de l'*Apparent effect threshold (AET)*

L'approche de l'*Apparent Effect Threshold (AET)* a été développée dans le cadre de l'évaluation de la qualité des sédiments dans le détroit de Puget, situé dans l'état de Washington aux États-Unis. L'AET correspond à la concentration d'une substance dans les sédiments au-dessus de laquelle des effets biologiques statistiquement significatifs se produisent toujours (Swartz, 1999).

Dans cette approche, dite «triade», la première étape consiste à acquérir des données de terrains chimiques et biologiques appariées. La deuxième étape consiste à identifier les stations qui sont considérées comme non-impactées pour un indicateur biologique à l'aide de tests statistiques. La troisième étape consiste à identifier l'AET pour un indicateur biologique à l'aide des sites non-impactés. Pour ce faire, on identifie la plus haute concentration à laquelle des effets nuisibles n'ont pas été observés. La quatrième étape consiste à vérifier que des effets statistiquement significatifs ont bien lieu au-dessus de l'AET (Barrick et collab., 1988). Un AET peut être calculé pour chaque indicateur biologique choisi. Le tableau 7 présente les AET, pour 15 HAP et 1 dérivé alkylé et pour quatre indicateurs biologiques, développés à partir des données récoltées dans le détroit de Puget (Barrick et collab., 1988). Les valeurs sont normalisées pour 1 % de carbone organique.

Tableau 7 : *Apparent Effect Threshold (AET)* pour les HAP et 1 dérivé alkylé pour 4 indicateurs biologiques (Barrick et collab., 1988)

Substances	<i>Apparent effect threshold (AET)</i> mg/kg de sédiments secs (1 % COT)			
	Microtox	Amphipodes	Abondance de la faune benthique	Huitres
Hydrocarbures aromatiques polycycliques				
Acénaphène	>0,57	2,00	0,57	0,16
Acénaphthylène	>0,27	0,66	0,66	>0,27
Anthracène	>0,79	12,00	2,20	>0,79
Benzo(a)anthracène	>1,60	2,70	6,50	1,10
Benzofluoranthènes	>4,30	4,50	15,00	2,30
Benzo(a)pyrène	>1,40	2,10	>13,00	0,99
Benzo(g,h,i)pérylène	>0,67	0,78	>12,00	0,31
Chrysène	>2,00	4,60	8,50	1,10
Dibenzo(a,h)anthracène	0,33	0,47	0,89	1,20
Fluoranthène	>1,90	30,00	12,00	1,60
Fluorène	>0,71	3,60	0,79	0,23
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	>0,87	0,88	9,00	0,33
Naphtalène	>1,70	2,20	1,70	0,99
Phénanthrène	>1,60	6,90	4,80	1,20
Pyrène	>2,10	10,00	14,00	>2,10
Hydrocarbures aromatiques polycycliques alkylés				
2-méthylnaphtalène	-	>120	64	-

4.2.3 Approche du *National Status and Trends Program*

L'approche de la *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA-National Status and Trends Program)* repose sur la *Biological Effects Database for Sediments (BEDS)*, développée au départ par Long et Morgan (1990). Celle-ci est une base de données provenant d'études de terrain et de laboratoire, d'essais de toxicité avec des sédiments dopés, de modèles fondés sur la partition à l'équilibre et de critères adoptés par différentes juridictions. Il faut noter que les données de terrain pour lesquelles il y a un mélange de contaminants dans un même échantillon de sédiments sont incluses dans cette base de données. Cette approche permet de relier la concentration d'une substance dans les sédiments à l'observation d'un effet biologique. Les données pour chaque substance sont classées en ordre croissant. Le calcul des valeurs de référence se fait en utilisant les centiles.

Long et collaborateurs (1995) ont utilisé les données de la BEDS pour calculer deux valeurs de référence : l'*effect Range-Low (ERL)* qui correspond au 10^{ième} centile de la distribution des

données et l'Effect Range-Median (ERM) qui correspond au 50^{ième} centile. L'ERL représente la concentration au-dessus de laquelle les effets nuisibles commencent ou sont prédits chez les espèces sensibles. L'ERM représente la concentration au-dessus de laquelle des effets nuisibles sont fréquemment ou toujours rencontrés chez la majorité des espèces. Le tableau 8 présente les valeurs de références de Long et collaborateurs (1995) pour 12 HAP et 1 HAP alkylé. Ces valeurs ne sont pas corrigées en fonction du contenu en carbone organique des sédiments.

Tableau 8 : Effect Range-Low (ERL) et Effect Range-Median (ERM) pour 12 HAP et un dérivé alkylé pour des sédiments marins (Long et collab., 1995)

Substances	Sédiments marins mg/kg de sédiments secs	
	Effect range-low (ERL)	Effect range-median (ERM)
Hydrocarbures aromatiques polycycliques		
Acénaphène	0,016	0,500
Acénaphthylène	0,044	0,640
Anthracène	0,085	1,100
Benzo(a)anthracène	0,261	1,600
Benzo(a)pyrène	0,430	1,600
Chrysène	0,384	2,800
Dibenzo(a,h)anthracène	0,634	0,260
Fluoranthène	0,063	5,100
Fluorène	0,019	0,540
Naphtalène	0,160	2,100
Phénanthrène	0,240	1,500
Pyrène	0,665	2,600
Hydrocarbures aromatiques polycycliques alkylés		
2-méthylnaphtalène	0,070	0,670

4.2.4 Approche du Conseil canadien des ministres de l'environnement

Le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) a utilisé une version modifiée de l'approche du *National Status and Trends Program* (CCME, 1995) pour établir ses valeurs de référence. Des données ont été ajoutées à la BEDS, entre autres des données sans effet et les données sur les sédiments d'eau douce et marins ont été séparées. D'après le protocole du CCME, pour chaque substance, un minimum de 20 données avec effet et de 20 données sans effet est nécessaire pour le calcul d'une concentration seuil produisant un effet (CSE) et d'une concentration produisant un effet probable (CEP) (EC et MDDEP, 2007). Pour calculer ces valeurs, une distribution des données avec effet et une distribution des données sans effet sont

établies. Puis, des formules utilisant les centiles de ces distributions permettent de calculer les valeurs de référence. L'équation 1 permet de calculer la CSE et l'équation 2 permet de calculer la CEP. En deçà de la CSE, des effets nuisibles sont rarement observés. Entre la CSE et la CEP, des effets nuisibles sont occasionnellement observés. Au-dessus de la CEP, des effets nuisibles sont fréquemment rencontrés. Le tableau 9 présente les CSE et les CEP pour 12 HAP et 1 HAP alkylé pour l'eau douce et l'eau marine. Ces valeurs ne sont pas corrigées en fonction du contenu en carbone organique des sédiments.

Équation 1 Calcul de la concentration seuil produisant un effet (CSE)

$$CSE = \frac{E_{15} \times SE_{50}}{}$$

Où CSE (mg/kg de sédiments secs) est la concentration seuil produisant un effet, E_{15} est le 15^{ième} centile de la distribution des données avec effet et SE_{50} est le 50^{ième} centile de la distribution des données sans effet (EC et MDDEP, 2007).

Équation 2 Calcul de la concentration produisant un effet probable (CEP)

$$CEP = \frac{E_{50} \times SE_{85}}{}$$

Où CEP (mg/kg de sédiments secs) est la concentration produisant un effet probable, E_{50} est le 50^{ième} centile de la distribution des données avec effet et SE_{85} est le 85^{ième} centile de la distribution des données sans effet (EC et MDDEP, 2007).

4.2.5 Approche du Québec

Le Québec a adopté l'approche du CCME en plus d'y ajouter trois autres critères (EC et MDDEP, 2007). La concentration d'effets rares (CER), en deçà de laquelle aucun effet nuisible n'est attendu, est utilisée comme balise pour la prévention de la contamination des sédiments due à des rejets industriels. La concentration d'effets occasionnels (CEO), à partir de laquelle des effets nuisibles sont attendus chez plusieurs espèces benthiques, est utilisée pour la gestion des sédiments résultant des travaux de dragage des sédiments et de leur rejet en eau libre avec la concentration d'effets fréquents (CEF). La concentration d'effet fréquent, à partir de laquelle des effets nuisibles sont attendus pour la majorité des espèces benthiques, est utilisée avec la CEP pour la restauration des sites de sédiments contaminés. L'équation 3 permet de calculer la CER, l'équation 4 permet de calculer la CEO et l'équation 5 permet de calculer la CEF. Le tableau 9 présente les cinq valeurs de référence utilisées au Québec pour 12 HAP et 1 HAP alkylé (EC et

MDDEP, 2007). Ces valeurs ne sont pas corrigées en fonction du contenu en carbone organique des sédiments.

Équation 3 Calcul de la concentration d'effets rares (CER)

$$\text{CER} = \frac{E_{15} \times SE_{15}}{}$$

Où CER (mg/kg de sédiments secs) est la concentration d'effets rares, E_{15} est le 15^{ième} centile de la distribution des données avec effet et SE_{15} est le 15^{ième} centile de la distribution des données sans effet (EC et MDDEP, 2007).

Équation 4 Calcul de la concentration d'effets occasionnels (CEO)

$$\text{CEO} = \frac{E_{50} \times SE_{50}}{}$$

Où CEO (mg/kg de sédiments secs) est la concentration d'effets occasionnels, E_{50} est le 50^{ième} centile de la distribution des données avec effet et SE_{50} est le 50^{ième} centile de la distribution des données sans effet (EC et MDDEP, 2007).

Équation 5 Calcul de la concentration d'effets fréquents (CEF)

$$\text{CEF} = \frac{E_{85} \times SE_{85}}{}$$

Où CEF (mg/kg de sédiments secs) est la concentration d'effets fréquents, E_{85} est le 85^{ième} centile de la distribution des données avec effet et SE_{85} est le 85^{ième} centile de la distribution des données sans effet (EC et MDDEP, 2007).

Tableau 9 : Critères de qualité des sédiments utilisés au Québec en eau douce et en eau salée pour les HAP et 1 dérivé alkylé, ces critères ne sont pas normalisés pour le COT (EC et MDDEP, 2007)

Substances	Eau douce mg/kg de sédiments secs					Eau salée mg/kg de sédiments secs				
	CER	CSE	CEO	CEP	CEF	CER	CSE	CEO	CEP	CEF
Hydrocarbures aromatiques polycycliques										
Acénaphène	0,0037	0,0067	0,021	0,089	0,94	0,0037	0,0067	0,021	0,089	0,94
Acénaphthylène	0,0033	0,0059	0,03	0,13	0,34	0,0033	0,0059	0,031	0,13	0,34
Anthracène	0,016	0,047	0,11	0,24	1,1	0,016	0,047	0,11	0,24	1,1
Benzo(a)anthracène	0,014	0,032	0,12	0,39	0,76	0,027	0,075	0,28	0,69	1,9
Benzo(a)pyrène	0,011	0,032	0,15	0,78	3,2	0,034	0,089	0,23	0,76	1,7
Chrysène	0,026	0,057	0,24	0,86	1,6	0,037	0,11	0,3	0,85	2,2
Dibenzo(a,h)anthracène	0,0033	0,0062	0,043	0,14	0,2	0,0033	0,0062	0,043	0,14	0,2
Fluoranthène	0,047	0,11	0,45	2,4	4,9	0,027	0,11	0,5	1,5	4,2
Fluorène	0,01	0,021	0,061	0,14	1,2	0,01	0,021	0,061	0,14	1,2
Naphtalène	0,017	0,035	0,12	0,39	1,2	0,017	0,035	0,12	0,39	1,2
Phénanthrène	0,025	0,042	0,13	0,52	1,1	0,023	0,087	0,25	0,54	2,1
Pyrène	0,029	0,053	0,23	0,88	1,5	0,041	0,15	0,42	1,4	3,8
Hydrocarbures aromatiques polycycliques alkylés										
2-méthylnaphtalène	0,016	0,02	0,063	0,2	0,38	0,016	0,02	0,063	0,2	0,38

4.2.6 Approche de la partition à l'équilibre (EqP)

Les données de toxicité utilisées pour calculer les valeurs *final acute value* (FAV) et *final chronic value* (FCV) proviennent d'une recherche dans la littérature (Di Toro et collab., 2000). L'*Environmental Protection Agency* aux États-Unis (USEPA) a déterminé des valeurs de référence pour la protection des organismes de la colonne d'eau qui ont ensuite été dérivées pour la protection des organismes du sédiment à l'aide de l'approche de la partition à l'équilibre.

Pour la colonne d'eau, les FAV ont été définies à partir d'essai de toxicité aiguë dans l'eau, et correspondent au 5^{ième} centile de la distribution des CL_{50} divisé par deux (USEPA, 2015). Ce facteur de sécurité de 2 a été ajouté récemment (USEPA, 2015) dans le but d'obtenir des FAV plus protectrices et de prendre en compte le fait que les distributions ont été établies avec des données correspondant à un niveau d'effet élevé, 50 % de mortalité. Les FCV correspondent au 5^{ième} centile de la distribution des CE_{50} issues d'essais de toxicité chronique dans l'eau (USEPA, 2003). Les données issues d'essais de toxicité chronique n'étant disponibles que pour 6 HAP, le ratio entre la FAV et la FCV a été calculé pour ces 6 HAP et la moyenne géométrique de ces ratios a été appliquée aux autres HAP pour lesquels les données de toxicité chronique n'étaient pas disponibles.

L'approche de la partition à l'équilibre a été utilisée par l'USEPA pour dériver, à partir des FAV et des FCV pour la protection des organismes de la colonne d'eau, des valeurs de référence spécifiques aux sédiments pour des HAP et leurs dérivés alkylés (USEPA, 2003). Le tableau 10 présente les valeurs d'effets aigus (USEPA, 2015) et d'effets chroniques (USEPA, 2003) pour 34 HAP dont 16 dérivés alkylés. Les valeurs sont normalisées par kg de carbone organique contenu dans les sédiments.

Ces valeurs de référence sont utilisées par l'USEPA dans le cadre de son programme de gestion et d'évaluation environnementale (EMAP) (USEPA, 2003). Dans ce contexte, l'USEPA détermine un indice de risque global afin d'évaluer la toxicité d'un mélange de HAP. Ainsi, pour chaque HAP, la concentration mesurée dans les sédiments est divisée par sa valeur de référence, effets aigus ou chroniques, pour obtenir un indice de risque. Les indices de risque de chaque HAP présents dans le mélange sont sommés afin d'obtenir indice de risque global basé sur l'additivité des effets (IR_{add} : Équation 7). Cet indice est déterminé pour les effets aigus et chroniques séparément. Si l'indice de risque global est plus petit ou égal à 1, la concentration du mélange de HAP respecte la valeur de référence et le mélange est considéré acceptable pour les

organismes benthiques. Les effets potentiels seront jugés inacceptables si l'indice de risque global est supérieur à 1 (USEPA, 2003).

Équation 6 Calcul de l'indice de risque global ou additif (IR_{add}) d'un mélange de HAP

$$IR_{add} = \frac{C_i}{FAV_i \text{ ou } FCV_i}$$

Où IR_{add} représente l'indice de risque global ou additif, C_i représente la concentration d'un HAP mesurée dans les sédiments, FAV_i représente la valeur de référence aigue d'un HAP dans les sédiments (mg/kg de carbone organique) et FCV_i représente la valeur de référence chronique d'un HAP dans les sédiments (mg/kg de carbone organique) (USEPA 2003).

Notons qu'Arp et collaborateurs (2011) recommandent que les critères de qualité des sédiments pour les HAP soient basés sur la mesure dans l'eau interstitielle des 34 HAP de l'USEPA exprimée en indice de risque. En effet, cette mesure a montré 91 % de sensibilité et 76 % d'efficacité pour prédire la survie de *Leptocheirus plumulosus* et *Hyalloa azteca*. La mesure des 34 HAP dans l'eau interstitielle n'étant pas toujours faisable, ils ont testé des modèles afin d'estimer cette valeur. Les auteurs ont montré qu'il était possible d'estimer la concentration des 34 HAP dans l'eau interstitielle à partir de la concentration dissoute de pyrène. Cette méthode a montré une sensibilité de 94 % ainsi qu'une efficacité de 70 %.

Tableau 10 : Concentrations d'effet dans les sédiments pour les HAP et leurs dérivés alkylés déterminées à partir de la partition à l'équilibre

Substances	Concentration d'effets chroniques mg/kg de carbone organique USEPA (2003)	Concentration d'effets aigus mg/kg de carbone organique USEPA (2015)
Hydrocarbures aromatiques polycycliques		
Acénaphthène	491	1020
Acénaphthylène	452	940
Anthracène	594	1235
Benzo(a)anthracène	841	1750
Benzo(b)fluoranthène	979	2035
Benzo(k)fluoranthène	981	2040
Benzo(a)pyrène	965	2010
Benzo(e)pyrène	967	2010
Benzo(g,h,i)pérylène	1095	2270
Chrysène	844	1755
Dibenzo(a,h)anthracène	1123	2330
Fluoranthène	707	1470
Fluorène	538	1120
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	1115	2310
Naphtalène	385	800
Pérylène	967	2010
Phénanthrène	596	1240
Pyrène	697	1450
Hydrocarbures aromatiques polycycliques alkylés		
C1-benzanthracène/chrysènes	929	1935
C2-benzanthracène/chrysènes	1008	2100
C3-benzanthracène/chrysènes	1112	2310
C4-benzanthracène/chrysènes	1214	2515
C1-fluorène	611	1270
C2-fluorène	686	1425
C3-fluorène	769	1600
C1-naphtalène	444	925
C2-naphtalène	510	1060
C3-naphtalène	581	1210
C4-naphtalène	657	1365
C1-phénanthrènes/anthracènes	670	1395
C2-phénanthrènes/anthracènes	746	1550
C3-phénanthrènes/anthracènes	829	1725
C4-phénanthrènes/anthracènes	913	1895
C1-pyrène/fluoranthènes	770	1600

5. Conclusion

Le pétrole et ses dérivés contiennent plusieurs centaines de composés chimiques ce qui rend d'autant plus complexe l'établissement de critères de qualité pour ce type de mélanges, notamment du fait des interactions multiples de ces composés entre eux, avec les composantes physiques du milieu ainsi que les organismes. Ainsi, plusieurs facteurs, par exemple la granulométrie et le contenu en matière organique, peuvent venir influencer la toxicité des mélanges d'hydrocarbures dans les sédiments. Plusieurs approches ont été utilisées par différents groupes de travail pour déterminer des valeurs de référence ou des critères de qualité des sédiments pour les hydrocarbures pétroliers. Les valeurs présentées dans ce document sont obtenues soit en regroupant les hydrocarbures pétroliers en fractions aliphatiques et aromatiques, soit en déterminant des valeurs de référence spécifiques pour des HAP. Compte tenu des différentes modalités de regroupement des hydrocarbures pétroliers et des différences entre les bases de données de toxicité utilisées, les valeurs de référence obtenues sont sensiblement différentes. Néanmoins, les données de toxicité collectées dans le cadre de cette étude, bien que peu nombreuses, devraient contribuer à valider les valeurs seuils provisoires établies pour l'évaluation de la qualité des sédiments du lac Mégantic et de la rivière Chaudière pour les organismes benthiques, adoptés par le MDDELCC en 2013. Au vu des informations présentées dans ce document, il apparaît utile de:

- Évaluer la possibilité d'établir de nouveaux critères de qualité des sédiments en eau douce et en eau marine notamment pour les hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀ à partir des données présentées dans ce rapport et d'autres données à acquérir;
- Évaluer la possibilité d'utiliser les fractions d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques pour déterminer des valeurs de référence ou des critères de qualité des sédiments.

L'approche de l'USEPA (2003) permet d'obtenir des valeurs de référence pour 16 HAP alkylés en plus de certains HAP qui ne font pas l'objet d'un critère au Québec et elle utilise le calcul d'un indice de risque global afin d'évaluer la toxicité d'un mélange de HAP. C'est une approche qui pourrait faire l'objet d'une étude approfondie pour évaluer sa pertinence pour l'établissement de critère de qualité des sédiments en l'absence d'un nombre suffisant de données permettant le calcul d'un critère de qualité selon l'approche précédemment utilisée par le MDDEP et Environnement Canada (2007).

Finalement, cette étude a permis d'identifier plusieurs besoins d'acquisition de connaissance pour que le MDDELCC puisse éventuellement valider les valeurs de référence qui auront été définies. Ainsi, il est recommandé de :

- Mettre en place une veille scientifique pour augmenter la base de données sur la toxicité des hydrocarbures pétroliers dans les sédiments;
- Évaluer la possibilité de faire des essais de toxicité en laboratoire avec des sédiments contaminés avec différents types de produits pétroliers.

Références

- Anson, J., Pettigrove, V., Carew, M. E., & Hoffmann, A. (2008). High molecular weight petroleum hydrocarbons differentially affect freshwater benthic macroinvertebrate assemblages. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(5), 1077-1083.
- Arp, H. P., Azzolina, N. A., Cornelissen, G., & Hawthorne, S. B. (2011). Predicting pore water EPA-34 PAH concentrations and toxicity in pyrogenic-impacted sediments using pyrene content. *Environmental Science & Technology*, 45(12), 5139-5146.
- Atlantic RBCA (2012). Ecological screening protocol for petroleum impacted sites in Atlantic Canada. Scientific rationale to support the adoption/development of tier 1 ecological screening levels for soil, surface water, groundwater and sediment, Version 3, 44 pages.
- Barjhoux, I., Cachot, J., Gonzalez, P., Budzinski, H., Le Menach, K., Landi, L., Morin, B., & Baudrimont, M. (2014). Transcriptional responses and embryotoxic effects induced by pyrene and methylpyrene in Japanese medaka (*Oryzias latipes*) early life stages exposed to spiked sediments. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(24), 13 850-13 866.
- Barrick, R., Becker, S., Brown, L., Beller, H., & Pastorok, R. (1988). Sediment-quality-values refinement: 1988 update and evaluation of Puget Sound AET (Apparent Effects Threshold). Prepared for U.S. Environmental Protection Agency, Region 10-Office of Puget Sound, Seattle, 193 pages.
- Battelle (2007). Sediment toxicity of petroleum hydrocarbon fractions. Prepared for Massachusetts Department of Environmental Protection, Washington, 89 pages.
- Brils, J. M., Huwer, S. L., Kater, B. J., Schout, P. G., Harmsen, J., Delvigne, G. A., & Scholten, M. C. T. (2002). Oil effect in freshly spiked marine sediment on *Vibrio fischeri*, *Corophium volutator*, and *Echinocardium cordatum*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(10), 2242-2251.
- Colombano, S., V. Guerin, A. Saada, D. Hiez et H. Bomer (2008). Journée Technique d'information et de retour d'expérience de la gestion des sols pollués. Les Diagnostiques - Objectifs, enjeux & moyens. In Gouvernement de France. Ministère de l'écologie, du

développement durable et de l'énergie, [En ligne]. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/etude_de_cas_TAUW.pdf (Page consultée le 4 août 2015).

Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME) (1995). Protocole pour l'élaboration de recommandations pour la qualité des sédiments en vue de la protection de la vie aquatique. Préparé par Environnement Canada, Division des recommandations, Secrétariat technique du CCME, Groupe de travail sur les recommandations pour la qualité des eaux, Ottawa, 41 pages.

Desrosiers, M., Babut, M. P., Pelletier, M., Bélanger, C., Thibodeau, S., & Martel, L. (2010). Efficiency of sediment quality guidelines for predicting toxicity: the case of the St. Lawrence river. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 6(2), 225-239.

Di Toro, D. M., Zarba, C. S., Hansen, D. J., Berry, W. J., Swartz, R. C., Cowan, C. E., Pavlou S., Allen H., Thomas N.A., & Paquin, P. R. (1991). Technical basis for establishing sediment quality criteria for nonionic organic chemicals using equilibrium partitioning. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 10(12), 1541-1583.

Di Toro, D. M., McGrath, J. A., & Hansen, D. J. (2000). Technical basis for narcotic chemicals and polycyclic aromatic hydrocarbon criteria. I. Water and tissue. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19(8), 1951-1970.

DiToro, D.M., & McGrath, J.A. (2000). Technical basis for narcotic chemicals and polycyclic aromatic hydrocarbon criteria. II. Mixtures and sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry* 19(8), 1971-1982.

Environnement Canada (EC) et Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2007). Critères pour l'évaluation des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration. 39 pages.

Gong, Y., Zhao, X., Cai, Z., O'Reilly, S. E., Hao, X., & Zhao, D. (2014). A review of oil, dispersed oil and sediment interactions in the aquatic environment: influence on the fate, transport and remediation of oil spills. *Marine Pollution Bulletin*, 79(1-2), 16-33.

Grenier, M. (2014). Accident ferroviaire de Lac-Mégantic : Revue de la littérature portant sur l'impact des déversements d'hydrocarbures et des travaux de nettoyage sur les

communautés de macroinvertébrés benthiques. Rapport préparé pour le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) par CIMA+, 35 pages.

Harrel, R. C. (1985). Effects of a crude oil spill on water quality and macrobenthos of a southeast Texas stream. *Hydrobiologia*, 124(3), 223-228.

Jiménez-Tenorio, N., Salamanca, M. J., García-Luque, E., González de Canales, M. L., & DelValls, T. Á. (2008). Chronic bioassay in benthic fish for the assessment of the quality of sediments in different areas of the coast of Spain impacted by acute and chronic oil spills. *Environmental Toxicology*, 23(5), 634-642.

Le Bihanic, F., Morin, B., Cousin, X., Le Menach, K., Budzinski, H., & Cachot, J. (2014a). Developmental toxicity of PAH mixtures in fish early life stages. Part I: adverse effects in rainbow trout. *Environmental Science and Pollution Research international*, 21(24), 13 720-13 731.

Le Bihanic, F., Clerandeu, C., Le Menach, K., Morin, B., Budzinski, H., Cousin, X., & Cachot, J. (2014b). Developmental toxicity of PAH mixtures in fish early life stages. Part II: adverse effects in Japanese medaka. *Environmental Science and Pollution Research International*, 21(24), 13 732-13 743.

Long E.R., & Morgan, L.G. (1990). The potential for biological effects of sediments-sorbed contaminants tested in the National Status and Trends Program. Technical Memorandum NOS OMA 52, National Oceanic and Atmospheric Administration, Rockville, 175 pages et annexes.

Long, E. R., MacDonald, D.D., Smith, S. L., & Calder, F. D. (1995). Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 19(1), 81-97.

Lu, L., & Wu, R. S. S. (2006). A field experimental study on recolonization and succession of macrobenthic infauna in defaunated sediment contaminated with petroleum hydrocarbons. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68(3-4), 627-634.

- Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) (2013). Lignes directrices pour l'évaluation de qualité des sédiments du lac-Mégantic et de la rivière Chaudière, en lien avec l'accident ferroviaire du 6 juillet 2013. Gouvernement du Québec, 7 pages.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2014). Rapport du Comité expert sur la contamination résiduelle de la rivière Chaudière par les hydrocarbures pétroliers, Gouvernement du Québec, 62 pages.
- Mroz, R. (2011). Toxicity of Freshwater Sediment Spiked with Petroleum Hydrocarbons to *Hyalella azteca* and *Chironomus dilutus* – Final Report. Environnement Canada et Aquatox, 251 pages.
- Mueller, D. C., Bonner, J. S., McDonald, S. J., & Autenrieth, R. L. (1999). Acute toxicity of estuarine wetland sediments contaminated by petroleum. *Environmental Technology*, 20(8), 875-882.
- Nayar, S., Goh, B. P. L., & Chou, L. M. (2004). The impact of petroleum hydrocarbons (diesel) on periphyton in an impacted tropical estuary based on in situ microcosms. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 302(2), 213-232.
- Neff, J.M. (1986). Sediment quality criteria methodology validation : Calculation of screening level concentrations from field data. Final Report, Prepared for U.S. Environmental Protection Agency, Criteria and Standards Division, Washington DC, 60 pages et annexes.
- Neff, J.M., Ward, J.Q., & Gulbransen, T.C. (1987). Recalculation of screening level concentrations for nonpolar organic contaminants in marine sediments. Final Report, Prepared for U.S. Environmental Protection Agency, Criteria and Standards Division, Washington DC, 6 pages et annexes.
- Nikolaou, A., Kostopoulou, M., Lofrano, G., Meric, S., Petsas, A., & Vagi, M. (2009). Levels and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in marine sediments. *Trends in Analytical Chemistry*, 28(6), 653-664.

- Office national de l'énergie (ONÉ). Pétrole brut et produits pétroliers. In Office national de l'énergie, <http://www.neb-one.gc.ca/nrg/sttstc/crdlndptrlmpdct/index-fra.html> (page consultée le 10 novembre 2014).
- Ort, M. P., Finger, S. E., & Jones, J. R. (1995). Toxicity of crude oil to the mayfly, *Hexagenia bilineata* (Ephemeroptera: Ephemeridae). *Environmental Pollution*, 90(1), 105-110.
- Persaud, D. Jaagumagi, R., & Hayton, A. (1993). Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario. Ministry of Environment and Energy, 27 pages.
- Pettigrove, V., & Hoffmann, A. (2005). Effects of long-chain hydrocarbon-polluted sediment on freshwater macroinvertebrates. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 24(10), 2500-2508.
- Raimondo, S., Jackson, C. R., Krzykwa, J., Hemmer, B. L., Awkerman, J. A., & Barron, M. G. (2014). Developmental toxicity of Louisiana crude oil-spiked sediment to zebrafish. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 108, 265-272.
- Scarlett, A., Galloway, T. S., & Rowland, S. J. (2007). Chronic toxicity of unresolved complex mixtures (UCM) of hydrocarbons in marine sediments. *Journal of Soils and Sediments*, 7(4), 200-206.
- Swartz, R. C. (1999). Consensus sediment quality guidelines for polycyclic aromatic hydrocarbon mixtures. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 18(4), 780-787.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2003). Procedures for the derivation of equilibrium partitioning sediment benchmarks (ESBs) for the protection of benthic organisms: PAH mixtures. Office of Research and Development, Washington DC, 108 pages et annexes.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2015). Correction of Deepwater Horizon acute screening benchmarks for aquatic life. In USEPA, <http://www.epa.gov/bpspill/Acute-benchmark-error-explanation-02-18-15.pdf> (page consultée le 11 mars 2015).
- Verbruggen, E. M., Beek, M., Pijnenburg, J., & Traas, T. P. (2008). Ecotoxicological environmental risk limits for total petroleum hydrocarbons on the basis of internal lipid concentrations. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(12), 2436-2448.

Verrhiest, G., Clement, B., & Blake, G. (2001). Single and combined effects of sediment-associated PAHs on three species of freshwater macroinvertebrates. *Ecotoxicology*, 10(6), 363-372.

Vicquelin, L., Leray-Forget, J., Peluhet, L., LeMenach, K., Deflandre, B., Anschutz, P., Etcheber, H., Morin, B., Budzinski, H., & Cachot, J. (2011). A new spiked sediment assay using embryos of the Japanese medaka specifically designed for a reliable toxicity assessment of hydrophobic chemicals. *Aquatic Toxicology*, 105(3), 235-245.

Woodward, D. F., & Riley, R. G. (1983). Petroleum hydrocarbon concentrations in a salmonid stream contaminated by oil field discharge water and effects on macrobenthos. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 12(3), 327-334.

Annexe 1

Tableau A1 Toxicité des produits pétroliers dans les sédiments envers des organismes d'eau douce déterminée à partir d'études en laboratoire

Espèce	Substance	Durée de l'exposition à des sédiments	Gamme de concentrations testées	Effet observé	Valeur de toxicité	Référence
Invertébrés aquatiques						
Macroinvertébrés benthiques	Huile à moteur synthétique (Mobil 1 10W-40)	88 jours	<125-14 266 mg/kg (HPT)	Perturbation de la communauté de macroinvertébrés benthiques	à partir de 860 mg/kg	Pettigrove et Hoffmann (2005)
	Huile minérale (Mobil Super XHP 15W-40) et synthétique (Mobil 1 10W-30)	119 jours	59-17 090 mg /kg (HPT)	Perturbation de la communauté de macroinvertébrés benthiques	à partir de 840 mg/kg	Anson et collab. (2008)
<i>Hexagenia bilineata</i> (éphémère)	Pétrole brut Rothville No. 2	21 jours	100-1400 mg de pétrole /kg	Mortalité	à partir de 500 mg/kg	Ort et collab. (1995)
<i>Chironomus riparius</i> (Chironome)	Essence distillée grade A (DMA gasoil)	10 jours	N.D. (C ₁₀ -C ₄₀)	Mortalité et croissance	CL ₅₀ = 3200 mg/kg; CE ₅₀ (croissance) = 2400 mg/kg; NOEC (mortalité) = 710 mg/kg; NOEC(croissance) = 710 mg/kg	Verbruggen et collab. (2008)
	Huile hydraulique haute viscosité grade 46 (HV46)	10 jours	N.D. (C ₁₀ -C ₄₀)	Mortalité et croissance	CL ₅₀ = 3300 mg/kg; CE ₅₀ (croissance) = 2600 mg/kg; NOEC (mortalité) = 1100 mg/kg; NOEC(croissance) = 1100 mg/kg	Verbruggen et collab.(2008)
<i>Chironomus dilutus</i> (Chironome)	Huile #2	10 jours	0-800 mg/kg (C ₆ -C ₃₂ sans les BTEX)	mortalité et croissance	CL ₅₀ = 298 mg/kg; Cl ₂₅ (croissance) = 200 mg/kg; Cl ₂₅ (biomasse) = 89 mg/kg	Mroz (2011)

Espèce	Substance	Durée de l'exposition à des sédiments	Gamme de concentrations testées	Effet observé	Valeur de toxicité	Référence
Invertébrés aquatiques						
<i>Hyalala azteca</i> (Hyalèle)	Essence distillée grade A (DMA gasoil)	10 jours	N.D. (C ₁₀ -C ₄₀)	Mortalité et croissance	CL ₅₀ = 500 mg/kg; CE ₅₀ (croissance) = 75 mg/kg; NOEC (mortalité) = 240 mg/kg; NOEC(croissance) = 25 mg/kg	Verbruggen et collab.(2008)
	Huile hydraulique haute viscosité grade 46 (HV46)	10 jours	N.D. (C ₁₀ -C ₄₀)	Mortalité et croissance	CL ₅₀ = 1800 mg/kg; CE ₅₀ (croissance) = 170 mg/kg; NOEC (mortalité) = 210 mg/kg; NOEC(croissance) = 84 mg/kg	Verbruggen et collab. (2008)
	Huile #2	14 jours	0-800 mg/kg (C ₆ -C ₃₂ sans les BTEX)	mortalité et croissance	CL ₅₀ = 278 mg/kg; Cl ₂₅ (croissance) > 400 mg/kg; Cl ₂₅ (biomasse) = 133 mg/kg	Mroz (2011)
	Huile #6	14 jours	0-800 mg/kg (C ₆ -C ₃₂ sans les BTEX)	mortalité et croissance	CL ₅₀ = 608 mg/kg; Cl ₂₅ (croissance) < 50 mg/kg; Cl ₂₅ (biomasse) < 50 mg/kg	Mroz (2011)
<i>Ephoron virgo</i> (Éphéméroptère)	Essence distillée grade A (DMA gasoil)	10 jours	N.D. (C ₁₀ -C ₄₀)	Mortalité et croissance	CL ₅₀ = 310 mg/kg; CE ₅₀ (croissance) = 160 mg/kg; NOEC (mortalité) = 130 mg/kg; NOEC(croissance) < 25 mg/kg	Verbruggen et collab. (2008)
	Huile hydraulique haute viscosité grade 46 (HV46)	10 jours	N.D. (C ₁₀ -C ₄₀)	Mortalité et croissance	CL ₅₀ = 860 mg/kg; CE ₅₀ (croissance) = 250 mg/kg; NOEC (mortalité) = 440 mg/kg; NOEC(croissance) = 84 mg/kg	Verbruggen et collab. (2008)

Tableau A2 Toxicité des sédiments contenant des hydrocarbures pétroliers envers des organismes d'eau douce déterminée à partir d'études de terrain ou en laboratoire avec des sédiments prélevés sur le terrain¹

Espèce	Durée de l'exposition à des sédiments	Sédiments utilisés	Concentrations en hydrocarbures	Effet observé	Référence
Macroinvertébrés benthiques	exposition chronique sur le terrain	Station 3 en aval de la décharge d'effluents provenant de champs de pétrole	12,6 mg/kg (C ₁₂ -C ₂₈)	Diminution de la diversité et altération de la structure de la communauté	Woodward et Riley (1983)
		Station 4 en aval de la décharge d'effluents provenant de champs de pétrole	20,7mg/kg (C ₁₂ -C ₂₈)	Diminution de la diversité et altération de la structure de la communauté	Woodward et Riley (1983)
		Station 5 en aval de la décharge d'effluents provenant de champs de pétrole	19,7 mg/kg (C ₁₂ -C ₂₈)	Diminution de la diversité et altération de la structure de la communauté	Woodward et Riley (1983)
<i>Chironomus riparius</i> (chironome)	7 jours en laboratoire	Station 14, Lac St-Pierre	<14 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 30 % ; croissance = 5,1 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 34, Lac St-Pierre	<14 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 6 % ; croissance = -46,1 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 30, Lac St-Pierre	<14 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 48 % ; croissance = -19,7 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 16, Lac St-Louis	<15 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 36 % ; croissance = 30,1 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 23, Lac St-Louis	<15 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 20 % ; croissance = 5,4 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 26, Lac St-Louis	<15 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 6 % ; croissance = -1,6 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle

Espèce	Durée de l'exposition à des sédiments	Sédiments utilisés	Concentrations en hydrocarbures	Effet observé	Référence
		Station 42, Lac St-Louis	<16 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 34 % ; croissance = -14,6 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 33, Lac St-Pierre	19 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 2 % ; croissance = -34,5 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 22, Lac St-Louis	23 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 34 % ; croissance = 22,1 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 25, Lac St-Louis	26 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 10 % ; croissance = 19,5 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 24, Lac St-Louis	32 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 12 % ; croissance = 4,8 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 17, Lac St-Louis	34 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 32 % ; croissance = 10,5 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 40, Lac St-Louis	34 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 4 % ; croissance = -7,7 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 9, Port de Montréal	35 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 30 % ; croissance = 9 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 15, Lac St-Pierre	35 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 16 % ; croissance = -9,9 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 51, Lac St-François	39 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 18 % ; croissance = -10,3 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 53, Lac St-François	48 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 8 % ; croissance = -18,8 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle

Espèce	Durée de l'exposition à des sédiments	Sédiments utilisés	Concentrations en hydrocarbures	Effet observé	Référence
		Station 19, Lac St-Louis	55 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 18 % ; croissance = 7,4 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 20, Lac St-Louis	61 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 14 % ; croissance = 6,1 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 18, Lac St-Louis	64 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 32 % ; croissance = 14,1 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 50, Lac St-François	65 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 16 % ; croissance = -12 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 52, Lac St-François	65 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 4 % ; croissance = -9,4 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 21, Lac St-Louis	71 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 8 % ; croissance = 2,6 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 1, Port de Montréal	74 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 16 % ; croissance = -11,7 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 55, Lac St-François	85 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 58 % ; croissance = 6,6 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 31, Lac St-Pierre	90 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 10 % ; croissance = -15,2 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 43, Lac St-Louis	100 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 12 % ; croissance = -14,1 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 57, Lac St-François	110 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 28 % ; croissance = -6,9 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle

Espèce	Durée de l'exposition à des sédiments	Sédiments utilisés	Concentrations en hydrocarbures	Effet observé	Référence
		Station 13, Lac St-Pierre	130 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 30 % ; croissance = 10,3 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 5, Port de Montréal	180 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 42 % ; croissance = -3,7 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 32, Lac St-Pierre	190 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 12 % ; croissance = 16,6 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 56, Lac St-François	190 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 22 % ; croissance = 1,8 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 39, Lac St-Pierre	250 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 40 % ; croissance = -12,9 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 35, Lac St-Pierre	230 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 2 % ; croissance = -30,1 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 44, Lac St-Louis	300 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 32 % ; croissance = -9 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 36, Lac St-Pierre	320 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 6 % ; croissance = -25 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 49, Lac St-Louis	340 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 24 % ; croissance = 4,6 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 47, Lac St-Louis	400 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 4 % ; croissance = -1,7 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 48, Lac St-Louis	400 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 10 % ; croissance = -0,8 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle

Espèce	Durée de l'exposition à des sédiments	Sédiments utilisés	Concentrations en hydrocarbures	Effet observé	Référence
<i>Hyalalela azteca</i> (Hyalèle)	14 jours en laboratoire	Station 38, Lac St-Pierre	440 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 30 % ; croissance = -1,5 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 7, Port de Montréal	640 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 44 % ; croissance = -14,7 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 45, Lac St-Louis	660 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 6 % ; croissance = -16,3 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 2, Port de Montréal	670 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 44 % ; croissance = 7,9 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 12, Lac St-Pierre	890 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 25 % ; croissance = -5,1 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 29, Port de Montréal	900 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 42 % ; croissance = 12,5 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 6, Port de Montréal	1110 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 20 % ; croissance = 12,9 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 28, Port de Montréal	2500 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 28 % ; croissance = 28,4 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 27, Port de Montréal	3700 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 100 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 4, Port de Montréal	17 000 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 100 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 14, Lac St-Pierre	<14 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 13 % ; croissance = 10 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle

Espèce	Durée de l'exposition à des sédiments	Sédiments utilisés	Concentrations en hydrocarbures	Effet observé	Référence
		Station 30, Lac St-Pierre	<14 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 42 % ; croissance = -15 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 34, Lac St-Pierre	<14 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 2 % ; croissance = -4 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 16, Lac St-Louis	<15 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 76 % ; croissance = 8 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 23, Lac St-Louis	<15 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 23 % ; croissance = 19 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 26, Lac St-Louis	<15 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 40 % ; croissance = 5 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 41, Lac St-Louis	<15 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 10 % ; croissance = -15 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 42, Lac St-Louis	<16 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 54 % ; croissance = 9 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 33, Lac St-Pierre	19 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 2 % ; croissance = -15 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 22, Lac St-Louis	23 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 38 % ; croissance = 22 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 17, Lac St-Louis	34 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 50 % ; croissance = 2 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 40, Lac St-Louis	34 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 56 % ; croissance = -4 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle

Espèce	Durée de l'exposition à des sédiments	Sédiments utilisés	Concentrations en hydrocarbures	Effet observé	Référence
		Station 9, Port de Montréal	35 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 4 % ; croissance = 17 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 15, Lac St-Pierre	35 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 32 % ; croissance = -3 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 51, Lac St-François	39 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 64 % ; croissance = -9 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 8, Port de Montréal	46 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 16 % ; croissance = 8 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 53, Lac St-François	48 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 8 % ; croissance = 8 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 19, Lac St-Louis	55 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 76 % ; croissance = -3 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 20, Lac St-Louis	61 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 84 % ; croissance = 2 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 18, Lac St-Louis	64 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 36 % ; croissance = 2 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 50, Lac St-François	65 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 2 % ; croissance = -9 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 52, Lac St-François	65 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 22 % ; croissance = 22 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 21, Lac St-Louis	71 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 80 % ; croissance = -12 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle

Espèce	Durée de l'exposition à des sédiments	Sédiments utilisés	Concentrations en hydrocarbures	Effet observé	Référence
		Station 1, Port de Montréal	74 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 50 % ; croissance = 2 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 55, Lac St-François	85 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 28 % ; croissance = 5 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 11, Lac St-Pierre	89 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 62 % ; croissance = -3 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 31, Lac St-Pierre	90 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 0 % ; croissance = -15 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 54, Lac St-François	96 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 86 % ; croissance = 8 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 59, Lac St-François	99 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 10 % ; croissance = 11 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 43, Lac St-Louis	100 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 10 % ; croissance = 20 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 57, Lac St-François	110 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 32 % ; croissance = 16 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 13, Lac St-Pierre	130 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 4 % ; croissance = 14 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 58, Lac St-François	140 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 18 % ; croissance = 8 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 5, Port de Montréal	180 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 62 % ; croissance = 14 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle)

Espèce	Durée de l'exposition à des sédiments	Sédiments utilisés	Concentrations en hydrocarbures	Effet observé	Référence
		Station 46, Lac St-Louis	180 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 16 % ; croissance = 14 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 32, Lac St-Pierre	190 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 2 % ; croissance = - 6 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 56, Lac St-François	190 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 92 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 35, Lac St-Pierre	230 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 32 % ; croissance = - 12 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 39, Lac St-Pierre	250 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 4 % ; croissance = - 12 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 44, Lac St-Louis	300 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 0 % ; croissance = 2 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 36, Lac St-Pierre	320 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 2 % ; croissance = - 12 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 49, Lac St-Louis	340 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 4 % ; croissance = 8 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 47, Lac St-Louis	400 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 12 % ; croissance = 5 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 48, Lac St-Louis	400 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 2 % ; croissance = 2 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 38, Lac St-Pierre	440 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 12 % ; croissance = - 9 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle

Espèce	Durée de l'exposition à des sédiments	Sédiments utilisés	Concentrations en hydrocarbures	Effet observé	Référence
		Station 7, Port de Montréal	640 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 65 % ; croissance = 27 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 45, Lac St-Louis	660 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 4 % ; croissance = 2 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 2, Port de Montréal	670 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 62 % ; croissance = 31 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 37, Lac St-Pierre	820 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 8 % ; croissance = - 9 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 12, Lac St-Pierre	890 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 82 % ; croissance = 10 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 29, Port de Montréal	900 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 54 % ; croissance = - 15 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 6, Port de Montréal	1110 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 58 % ; croissance = 10 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 10, Port de Montréal	1400 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Sans effet (mortalité = 12 % ; croissance = 29 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 28, Port de Montréal	2500 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 100 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 27, Port de Montréal	3700 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 96 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle
		Station 4, Port de Montréal	17 000 mg/kg (C ₁₀ -C ₅₀)	Effet (mortalité = 100 %)	Desrosiers et collab. (2010) et communication personnelle

¹Les sédiments utilisés pour les essais de toxicité présentés dans ce tableau contiennent d'autres contaminants que les hydrocarbures qui ont pu contribuer à leur toxicité globale. Les effets observés ne sont pas nécessairement liés qu'à la présence d'hydrocarbures pétroliers.

Tableau A3 Toxicité des produits pétroliers dans les sédiments envers des organismes d'eau marine déterminée à partir d'études en laboratoire

Espèce	Substance	Durée de l'exposition à des sédiments	Gamme de concentrations testées	Effet observé	Valeur de toxicité	Référence
Bactéries						
<i>Vibrio fischeri</i> (bactérie marine)	Essence distillée grade A (DMA gasoil)	10 minutes	0-1707 mg/kg (C ₁₀ -C ₄₀)	Inhibition de la luminescence	NOEC = 0,6 mg/kg; LOEC = 2,9 mg/kg; CE ₅₀ = 43,7 mg/kg	Brils et collab. (2002)
	Huile hydraulique haute viscosité grade 46 (HV46)	10 minutes	0-18 957 mg/kg (C ₁₀ -C ₄₀)	Inhibition de la luminescence	NOEC = 26 mg/kg; LOEC = 143 mg/kg; CE ₅₀ = 2682 mg/kg	Brils et collab. (2002)
Algues et cyanobactéries						
Périphyton	Diesel	3 jours	20,55; 148,23; 541,04 mg/kg (HPT)	Diminution de la chlorophylle	à partir de 148,23 mg/kg dw	Nayar et collab. (2004)
Invertébrés aquatiques						
<i>Corophium volutator</i> (corophie tourneur)	Pétrole brut Alaskan North Slope	35 jours	500 mg de pétrole/kg	Diminution du nombre de survivants chez la progéniture	à 500 mg/kg	Scarlett et collab. (2007)
		60 jours	500 mg de pétrole/kg	Réduction du taux de croissance	à 500 mg/kg	Scarlett et collab. (2007)
	Pétrole brut Tia Juana Pesada	35 jours	500 mg de pétrole/kg	Diminution du nombre de survivants chez la progéniture	à 500 mg/kg	Scarlett et collab. (2007)
		60 jours	500 mg de pétrole/kg	Réduction du taux de croissance	à 500 mg/kg	Scarlett et collab. (2007)
	Essence distillée grade A (DMA gasoil)	10 jours	0-680 mg/kg (C ₁₀ -C ₄₀)	Mortalité	NOEC = 40 mg/kg; LOEC = 87 mg/kg; CE ₅₀ = 100 mg/kg	Brils et collab. (2002)
Huile hydraulique haute viscosité grade 46 (HV46)	10 jours	0-18 957 mg/kg (C ₁₀ -C ₄₀)	Mortalité	NOEC = 2708 mg/kg; LOEC = 7448 mg/kg; CE ₅₀ = 9138 mg/kg	Brils et collab. (2002)	

Espèce	Substance	Durée de l'exposition à des sédiments	Gamme de concentrations testées	Effet observé	Valeur de toxicité	Référence
Invertébrés aquatiques						
<i>Echinocardium cordatum</i> (oursin cœur)	Essence distillée grade A (DMA gasoil)	14 jours	0-1601 mg/kg (C ₁₀ -C ₄₀)	Mortalité	NOEC = 87 mg/kg; LOEC = 255 mg/kg; CE ₅₀ = 190 mg/kg	Brils et collab. (2002)
		14 jours	0-1601 mg/kg (C ₁₀ -C ₄₀)	Ré-ensevelissement en 30 minutes	NOEC = 19mg/kg; LOEC = 87 mg/kg; CE ₅₀ = 112 mg/kg	Brils et collab. (2002)
	Huile hydraulique haute viscosité grade 46 (HV46)	14 jours	0-20 916 mg/kg (C ₁₀ -C ₄₀)	Mortalité	NOEC = 734 mg/kg; LOEC = 1068 mg/kg; CE ₅₀ = 2792 mg/kg	Brils et collab. (2002)
		14 jours	0-20 916 mg/kg (C ₁₀ -C ₄₀)	Ré-ensevelissement en 30 minutes	NOEC = 328 mg/kg; LOEC = 734 mg/kg; CE ₅₀ = 1988 mg/kg	Brils et collab. (2002)

Tableau A4 Toxicité des sédiments contenant des hydrocarbures pétroliers envers des organismes d'eau marine déterminée à partir d'une étude de terrain

Espèce	Durée de l'exposition à des sédiments	Sédiments utilisés	Concentrations en hydrocarbures	Effet observé	Référence
Invertébrés aquatiques					
Faune macrobenthique	7 mois	Sédiments dopés avec de l'huile diesel et placé en milieu naturel	5000 mg d'huile diesel/kg	Diminution de l'abondance de la faune macrobenthique et du nombre d'espèces	Lu et Wu (2006)

Tableau A5 Toxicité de certains HAP dans les sédiments envers des organismes aquatique

Espèce (nom commun)	Substance	Durée de l'exposition à des sédiments	Gamme de concentrations testées	Effet observé	Valeur de toxicité	Référence
Invertébrés aquatiques						
<i>Chironomus riparius</i> (chironome)	benzo(k)fluoranthène	10 jours	1-300 mg/kg	Mortalité et croissance	CL ₅₀ > 300 mg/kg ; NOEC ¹ = 300 mg/kg	Verrhiest et collab. (2001)
<i>Hyallolella azteca</i> (hyallèle)	benzo(k)fluoranthène	14 jours	1-300 mg/kg	Mortalité et croissance	CL ₅₀ > 300 mg/kg ; NOEC = 300 mg/kg	Verrhiest et collab. (2001)
Poissons						
Embryons de <i>Danio rerio</i> (poisson zèbre)	Pétrole brut Louisiana	48 heures	0-84 mg HAP totaux/kg (1%COT)	Mortalité et anormalités du développement	LOEC = 27 mg/kg; CL ₅₀ = 3070 mg/kg	Raimondo et collab. (2014)
		96 heures	0-84 mg HAP totaux/kg (1%COT)	Mortalité et anormalités du développement	LOEC = 15 mg/kg; CL ₅₀ = 2335 mg/kg	Raimondo et collab. (2014)
		48 heures	0-78 mg HAP totaux/kg (1%COT)	Mortalité et anormalités du développement	LOEC = 22 mg/kg; CL ₅₀ = 5308 mg/kg	Raimondo et collab. (2014)
		96 heures	0-78 mg HAP totaux/kg (1%COT)	Mortalité et anormalités du développement	LOEC = 22 mg/kg; CL ₅₀ = 2743 mg/kg	Raimondo et collab. (2014)
embryons de <i>Oncorhynchus mykiss</i> (truite arc-en-ciel)	mélange de HAP (57-66% de dérivés alkylés) extrait de Arabian light oil	10 jours	0, 3, 10 mg HAP totaux/kg	Augmentation du nombre d'embryons à moitié éclos et augmentation du nombre de larves anormales	à 3 mg/kg	Le Bihanic et collab., (2014a)
	mélange de HAP (40 à 42% de dérivés alkylés) extrait de Erika heavy oil	10 jours	0, 3, 10 mg HAP totaux/kg	Augmentation du nombre de larves anormales	à 10 mg/kg	Le Bihanic et collab., (2014a)
				Augmentation du nombre de larves anormales	à 3 mg/kg	Le Bihanic et collab., (2014a)

Espèce (nom commun)	Substance	Durée de l'exposition à des sédiments	Gamme de concentrations testées	Effet observé	Valeur de toxicité	Référence
				Augmentation du nombre d'embryons à moitié éclos, diminution du taux d'éclosion et augmentation du % de larves anormales (anomalies spinales, cardiaques, cranio-facial et hémorragies)	à 10 mg/kg	Le Bihanic et collab., (2014a)

¹ La NOEC a été attribuée à la plus petite concentration où aucun effet n'était observé, c'est-à-dire à la concentration maximale testée dans ce cas-ci.

Tableau A6 Toxicité de certains HAP alkylés dans les sédiments envers les embryons d'*Oryzias latipes*

Espèce (nom commun)	Substance	Durée de l'exposition à des sédiments	Gamme de concentrations testées	Effet observé	Valeur de toxicité	Référence
Poissons						
embryons <i>Oryzias latipes</i> (médaka)	7,12-diméthylbenz[a]anthracène	10 jours	0-36,0-54 mg/kg	Augmentation du taux de mortalité des embryons	LOEC = 36,05 mg/kg	Vicquelin et collab. (2011)
				Diminution du pourcentage d'éclosion	LOEC = 6,08 mg/kg	Vicquelin et collab. (2011)
				Augmentation du temps pour éclore	LOEC = 0,85 mg/kg	Vicquelin et collab. (2011)
	méthylpyrène	7 à 9 jours post-fertilisation	0; 0,202 et 2,586 mg/kg	Augmentation des anomalies chez les larves	LOEC = 0,15 mg/kg	Vicquelin et collab. (2011)
				Augmentation des dommages à l'ADN	LOEC = 0,15 mg/kg	
				Diminution de la longueur du corps	LOEC = 0,09 mg/kg	Vicquelin et collab. (2011)
				Diminution du taux d'éclosion, augmentation du temps pris pour éclore et augmentation du % de larves anormales (anomalies cardio-vasculaires)	à 0,202 mg/kg	Barjhoux et collab. (2014)
mélange de HAP (57-66% de dérivés alkylés) extrait de Arabian light oil	1 à 12 jours post fertilisation	0,499; 3,618 et 7,253 mg HAP totaux/kg	Diminution de la longueur totale et augmentation du % de larves anormales	à partir de 0,499 mg/kg	Le Bihanic et collab., (2014b)	