

Étude AENV14

Revue de littérature sur les critères de qualité d'eau de surface pour les hydrocarbures pétroliers



Décembre 2015
Version 2 (mise à jour 2019)
Direction générale du suivi de l'état de l'environnement
Direction des avis et des expertises

Avertissement

Le présent document a été réalisé pour le compte du gouvernement du Québec dans le cadre des évaluations environnementales stratégiques sur les hydrocarbures annoncées le 30 mai 2014. Le document initial paru en décembre 2015 s'intitulait *Développement de critères de qualité d'eau de surface pour les hydrocarbures pétroliers*. ISBN 978-2-550-74762-8 (PDF).

Coordination et rédaction

Cette publication a été réalisée sous la coordination de la Direction générale du suivi de l'état de l'environnement du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC).

Référence à citer :

BOUDREAU, L., M. SINOTTE ET M. A. DEFO (2019), MELCC. *Revue de littérature sur les critères de qualité d'eau de surface pour les hydrocarbures pétroliers – réalisé dans le cadre de l'évaluation environnementale stratégique (Étude AENV14)*, Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, ISBN : 978-2-550-83277-5, 28 p. + 2 ann.

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Rédaction

Lise Boudreau
Direction générale du suivi de l'état de l'environnement
Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

Marc Sinotte
Direction générale du suivi de l'état de l'environnement
Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

Michel Amery Defo (contractuel)
Direction générale du suivi de l'état de l'environnement
Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

Révision scientifique

Isabelle Guay
Direction générale du suivi de l'état de l'environnement
Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

Soutien technique

Christelle Guillemin (documentation)
France Gauthier (support graphique)
Direction générale du suivi de l'état de l'environnement
Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

Mise en page

Manon Laplante
Direction générale du suivi de l'état de l'environnement
Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

ACRONYMES

BTEX	Benzène, toluène, éthylbenzène, xylène
CE ₅₀	Concentration effective pour 50 % des organismes testés
CL ₅₀	Concentration létale pour 50 % des organismes testés
CFTP	Critères de protection de la faune terrestre piscivore
CPCEO	Critère de prévention de la contamination (eau et organismes aquatiques)
CPCO	Critère de prévention de la contamination (organismes aquatiques seulement)
CSEO	Concentration sans effet observé
CVAA	Critère de vie aquatique (effet aigu)
CVAC	Critère de vie aquatique (effet chronique)
EQS	<i>Environmental quality standards</i>
ERL	<i>Environmental risk limits</i>
FCV	<i>Final chronic value</i>
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HP	Hydrocarbures pétroliers
HC ₅	<i>Hasardous concentration for 5 % of the species</i>
HC ₅₀	<i>Hasardous concentration for 50 % of the species</i>
HPT	Hydrocarbures pétroliers totaux
K _{co}	Coefficient de partage carbone organique/eau
K _{oe}	Coefficient de partage octanol/eau
MAC	<i>Maximum acceptable concentration</i>
MPC	<i>Maximum permissible concentration</i>
NC	<i>Negligible concentration</i>
NQE	Normes de qualité environnementales
OER	Objectifs environnementaux de rejets
SRC	<i>Serious risk concentration</i>
TV	<i>Target value</i>
UV	Ultraviolet
USEPA	Agence de protection de l'environnement des États-Unis (<i>United States Environmental Protection Agency</i>)
VAF _e	Valeur aiguë finale à l'effluent

RÉSUMÉ

Contexte et objectif du projet

Notre consommation de pétrole implique plusieurs activités susceptibles de générer des rejets dans l'environnement, qu'ils soient accidentels ou non. D'une part, les activités d'exploitation, de production et de raffinage du pétrole génèrent en elles-mêmes des effluents de procédés qui contiennent des hydrocarbures pétroliers (HP) et qui sont rejetés vers les eaux de surface. D'autre part, lorsque des accidents surviennent, les volumes d'hydrocarbures rejetés dans l'environnement peuvent être importants durant un laps de temps variable. Des déversements accidentels peuvent survenir à toutes les étapes de l'exploitation et de la production des hydrocarbures pétroliers, et en particulier lors de leur transport, qu'il soit routier, ferroviaire, maritime ou par pipeline.

Les hydrocarbures qui contaminent les eaux de surface à la suite de ces rejets peuvent provenir de divers mélanges, que ce soit des produits pétroliers plus ou moins raffinés (essence, carburant diesel, mazout, etc.) ou du pétrole brut (classique léger ou lourd, bitume valorisé ou non, condensats, etc.), et se comporter différemment selon la composition de ces mélanges. C'est pourquoi il est nécessaire de concevoir des outils d'évaluation de la contamination qui prennent en compte la complexité des mélanges d'hydrocarbures et offrent des balises de protection du milieu aquatique ciblées pour le type de mélange en présence et ses effets potentiels ou appréhendés. Les critères de qualité de l'eau de surface constituent l'outil de base pour évaluer la qualité de l'eau. Ils indiquent les concentrations seuils des contaminants à ne pas dépasser dans le milieu pour assurer la protection des usages.

Le présent projet vise à documenter l'état actuel des connaissances dans le domaine de l'écotoxicité des hydrocarbures pétroliers en ciblant les développements récents qui peuvent permettre d'actualiser ou de compléter les critères de qualité de l'eau du Québec.

Nature des hydrocarbures pétroliers

Les produits pétroliers sont composés essentiellement d'hydrocarbures – molécules constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène –, mais peuvent également contenir en quantité moindre et variable des métaux et des composés comportant de l'azote, du soufre ou de l'oxygène.

Des centaines d'hydrocarbures pétroliers se distinguent selon la configuration des molécules et la longueur de leurs chaînes de carbone et selon que celles-ci contiennent seulement des liaisons simples (hydrocarbures saturés : alcanes) ou au moins une liaison double ou triple (hydrocarbures insaturés : alcènes, alcynes, hydrocarbures aromatiques). Ces centaines de composés peuvent aussi être répartis en deux grands groupes : les hydrocarbures aliphatiques (alcanes, alcènes et alcynes) et les hydrocarbures aromatiques, composés d'un ou de plusieurs noyaux benzéniques (benzène, éthylbenzène, toluène, xylène et hydrocarbures aromatiques polycycliques). Chaque produit pétrolier constitue généralement un mélange de divers types d'hydrocarbures. Les molécules d'hydrocarbures présentes dans ces mélanges et leurs concentrations relatives varient d'un produit pétrolier à l'autre.

Il est également courant de grouper les produits pétroliers selon leur poids moléculaire (nombre d'atomes de carbone) : les légers (moins de 10 atomes de carbone; par exemple l'essence), les moyens (entre 11 et 22 atomes de carbone; par exemple l'huile à chauffage n° 2) et les lourds (plus de 23 atomes de carbone; par exemple l'huile « Bunker C »).

Comportement des hydrocarbures pétroliers et effets sur la vie aquatique

La persistance et la toxicité des hydrocarbures pétroliers varient grandement d'un composé à l'autre. En règle générale, la solubilité aqueuse des hydrocarbures décroît avec l'augmentation du nombre d'atomes de carbone, alors que la toxicité aquatique augmente. Les composés de faible poids moléculaire sont plus volatils que ceux ayant un poids moléculaire élevé. Les hydrocarbures à poids moléculaire élevé sont peu solubles dans l'eau et ont davantage d'affinités pour le carbone organique des sédiments et les lipides des cellules biologiques.

Pour un même nombre d'atomes de carbone, les hydrocarbures aliphatiques sont moins solubles que les hydrocarbures aromatiques et sont plus biodégradables, donc moins persistants dans l'environnement. Les hydrocarbures aromatiques monocycliques comme le benzène, l'éthylbenzène, le toluène et le xylène (les BTEX) sont relativement volatils et plus solubles que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Ils ne sont pas persistants dans l'eau et ne sont pas censés s'accumuler dans les sédiments en concentrations importantes.

Les études en laboratoire et les observations rapportées à la suite de divers déversements indiquent que les hydrocarbures pétroliers peuvent induire une multitude de dommages, dont la mortalité des organismes exposés, l'augmentation des anomalies de développement, la perturbation des capacités reproductives, le dérèglement des comportements, l'apparition de dommages génétiques et des altérations du système immunitaire. De plus, les hydrocarbures pétroliers sont en mesure de se bioaccumuler dans les organismes aquatiques de manière à les rendre dangereux pour la consommation par d'autres êtres vivants, y compris les humains. Enfin, ces substances sont reconnues pour causer, à très faibles concentrations, des altérations du goût et de la couleur de l'eau ou des organismes qui y vivent.

Critères de qualité utilisés actuellement au Québec pour les hydrocarbures pétroliers

Actuellement, pour assurer la protection des eaux de surface contre les effets toxiques des hydrocarbures pétroliers, nous disposons de critères de qualité de l'eau pour la vie aquatique pour cinq produits pétroliers types, soit l'essence, le carburant diesel, l'huile à chauffage n° 2, l'huile « Bunker C » et le pétrole brut (MDDELCC, 2017). Ces critères ont été définis dans les années 1990 par le Minnesota à partir de données de toxicité. Lorsque le type de produits pétroliers en cause n'est pas connu, un critère opérationnel applicable aux hydrocarbures pétroliers totaux (C10-C50) est utilisé.

Des critères de qualité ont également été adoptés pour les BTEX et les HAP pour protéger les organismes et la santé humaine contre les effets à long terme découlant de la bioaccumulation et de la cancérogénicité. Ainsi, nous disposons de critères de qualité pour dix HAP individuels, pour la protection de la vie aquatique ou pour la prévention de la contamination des organismes aquatiques : acénaphthène, anthracène, fluoranthène, fluorène, 2-méthylnaphtalène, naphtalène, phénanthrène, pyrène, 1-chloronaphtalène et 2-chloronaphtalène.

Nous disposons également de critères de qualité globaux pour sept HAP reconnus pour leurs effets cancérogènes, pour la prévention de la contamination de l'eau et des organismes aquatiques (à des fins de consommation humaine). Ces critères s'appliquent à la somme des concentrations des sept HAP cancérogènes suivants : benzo(a)anthracène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, benzo(a)pyrène, chrysène, dibenzo(a,h)anthracène et indéno(1,2,3-cd)pyrène.

État des connaissances et développements récents

Les résultats de la revue de littérature qui a été effectuée montrent que les outils qui sont actuellement conçus pour estimer les impacts des rejets d'hydrocarbures pétroliers dans l'environnement visent à préciser davantage la composition du produit en cause. Étant donné la multitude de molécules diverses qui peuvent être présentes dans ces mélanges et que les effets peuvent varier passablement d'un mélange à l'autre, il s'avère souhaitable d'établir des critères de qualité pour des molécules relativement spécifiques et des classes de molécules dont les effets toxiques sont du même ordre.

Ainsi, les développements récents permettent de définir des classes d'hydrocarbures basées sur la longueur de leurs chaînes de carbone, dont les effets attendus sur les organismes aquatiques sont semblables. Ainsi, au lieu de la seule valeur de référence actuelle pour les HP totaux, considérés dans la classe C₁₀-C₅₀ (dont la longueur des chaînes de carbone comprend de 10 à 50 atomes), des valeurs de référence sont maintenant proposées pour plusieurs classes, plus petites, et qui diffèrent selon qu'il s'agit d'hydrocarbures aliphatiques ou d'hydrocarbures aromatiques. Les classifications proposées varient légèrement d'un auteur à l'autre. Par exemple, Battelle (2007) suggère quatre classes de fractions aliphatiques (C₅-C₈, C₉-C₁₂, C₁₃-C₁₈ et C₁₉-C₃₆) et quatre classes de fractions aromatiques (C₆-C₈, C₉-C₁₂,

C₁₃-C₁₆ et C₁₆-C₃₆), alors que Verbruggen (2008) propose cinq classes pour les hydrocarbures aliphatiques (C₅-C₆, C₇-C₈, C₉-C₁₀, C₁₁-C₁₂ et C₁₃-C₁₆) et sept classes pour les hydrocarbures aromatiques (C₅-C₇, C₈, C₉-C₁₀, C₁₁-C₁₂, C₁₃-C₁₆, C₁₇-C₂₁ et C₂₂-C₃₅).

Pour déterminer les seuils d'effets sur la vie aquatique des diverses molécules d'hydrocarbures, le modèle de partition à l'équilibre conçu par Di Toro *et al.* (2000) et Di Toro et McGrath (2000) est généralement utilisé. Ce modèle permet de prévoir la partition des molécules entre trois compartiments, soit l'eau, les sédiments et les organismes aquatiques (biote). Des coefficients de partage carbone organique/eau (K_{oc}) et octanol/eau (K_{oe}) permettent de prévoir la concentration des molécules dans chacun de ces compartiments, dans une relation à l'équilibre.

L'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (USEPA) a établi des balises de gestion des HAP, pour le déversement d'hydrocarbures pétroliers de Deepwater Horizon, qui permettent de tenir compte de l'ensemble des HAP, y compris les HAP alkylés généralement présents dans ces produits pétroliers et qui ne sont pas mesurés par des analyses standards. Des facteurs d'alkylation ont été déterminés à partir des HAP parents. La sommation des unités toxiques calculées pour chacun des HAP alkylés et non alkylés permet de tenir compte de l'additivité des effets de ces molécules. L'Union européenne et les Pays-Bas ont également établi des critères de qualité des HAP.

Conclusion

La revue qui a été effectuée révèle que les développements récents en matière d'écotoxicologie des hydrocarbures pétroliers offrent des outils d'analyse et de gestion plus à jour qui permettront d'affiner et de compléter la liste de contaminants visés et les critères de qualité dont le Ministère dispose actuellement. Le but recherché est de concevoir des outils qui, dans une situation donnée, nous évitent de sous-estimer les impacts potentiels ou de surestimer les risques encourus.

Le Ministère verra à intégrer ces nouveaux outils dans son processus d'actualisation des critères de qualité de l'eau de surface et à les harmoniser avec le développement des analyses de laboratoire.

TABLE DES MATIÈRES

ÉQUIPE DE RÉALISATION.....	III
ACRONYMES.....	IV
RÉSUMÉ.....	V
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	X
1 INTRODUCTION.....	1
2 NATURE DES HYDROCARBURES PÉTROLIERS.....	2
3 PRODUITS PÉTROLIERS TYPES	4
4 COMPORTEMENT DES HYDROCARBURES PÉTROLIERS DANS L'EAU DE SURFACE.....	6
5 EFFETS DES HYDROCARBURES PÉTROLIERS DANS LE MILIEU AQUATIQUE.....	8
6 CRITÈRES DE QUALITÉ UTILISÉS ACTUELLEMENT AU QUÉBEC POUR LES HYDROCARBURES PÉTROLIERS.....	11
7 DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS RELATIFS AUX CRITÈRES DE QUALITÉ DES HYDROCARBURES PÉTROLIERS	
TOTAUX.....	14
7.1 FONDEMENTS DES DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS : L'ACTION NARCOTIQUE DES HYDROCARBURES..	14
7.2 VALEURS DE TOXICITÉ PROPOSÉES POUR DES FRACTIONS D'HYDROCARBURES ALIPHATIQUES ET	
AROMATIQUES.....	15
7.2.1 BATTELLE (MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION, ÉTATS-UNIS).....	15
7.2.2 VERBRUGGEN (PAYS-BAS).....	16
7.2.3 MODÈLE PETROTOX (RÉGION DE L'ATLANTIQUE, CANADA).....	17
8 DÉVELOPPEMENTS CONCERNANT LES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP).....	19
8.1 ÉTATS-UNIS.....	19
8.2 PAYS-BAS	22
8.3 UNION EUROPÉENNE	23
9 CONCLUSION	24
10 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	26
ANNEXE 1 SUBSTANCES PÉTROLIÈRES IDENTIFIÉES DANS LE CADRE DU PLAN DE GESTION DES PRODUITS	
CHIMIQUES DU GOUVERNEMENT DU CANADA (2015).....	29
ANNEXE 2 EXEMPLE DE L'APPLICATION DES VALEURS SEUILS POUR LA VIE AQUATIQUE LORS DU DÉVERSEMENT	
DE DEEPWATER HORIZON, INTÉGRANT LES FACTEURS D'ALKYLATION ET L'ADDITIVITÉ DES EFFETS	
DES HP (USEPA, 2015)	35

LISTE DES TABLEAUX

<i>TABLEAU 1</i>	<i>LES HYDROCARBURES ALIPHATIQUES ET AROMATIQUES.....</i>	<i>3</i>
<i>TABLEAU 2</i>	<i>POURCENTAGE (%) DES DIVERSES FRACTIONS ALIPHATIQUES ET AROMATIQUES MESURÉES DANS QUELQUES PRODUITS PÉTROLIERS TYPES (ATLANTIC PIRI, 2012).....</i>	<i>6</i>
<i>TABLEAU 3</i>	<i>CRITÈRES DE QUALITÉ DE L'EAU DE SURFACE (MG/L) ACTUELLEMENT EN COURS AU QUÉBEC POUR LES HYDROCARBURES PÉTROLIERS (MDDELCC, 2017)</i>	<i>13</i>
<i>TABLEAU 4</i>	<i>SEUILS DE TOXICITÉ CHRONIQUE (VALEURS CHRONIQUES FINALES) POUR QUATRE CLASSES D'HYDROCARBURES PÉTROLIERS (MG/L) (BATELLE, 2007).....</i>	<i>15</i>
<i>TABLEAU 5</i>	<i>VALEURS SEUILS (MG/L) POUR LES FRACTIONS D'HYDROCARBURES ALIPHATIQUES ET AROMATIQUES DANS LES EAUX DE SURFACE (DOUCES ET SALÉES) PROPOSÉES PAR VERBRUGGEN ET AL. (2008).....</i>	<i>16</i>
<i>TABLEAU 6 :</i>	<i>POINT D'ÉBULLITION ET VALEURS SEUILS DE TOXICITÉ AQUATIQUE DES FRACTIONS D'HYDROCARBURES (MG/L) CALCULÉS À PARTIR DU MODÈLE PETROTOX (ATLANTIC PIRI, 2012).</i>	<i>17</i>
<i>TABLEAU 7</i>	<i>VALEURS SEUILS POUR LA VIE AQUATIQUE (MG/L) DÉFINIES PAR L'USEPA (2003, 2008) POUR LES HYDROCARBURES ALIPHATIQUES ET AROMATIQUES ET LEURS DÉRIVÉS ALKYLÉS DANS LES EAUX DE SURFACE, LORS DU DÉVERSEMENT DE PÉTROLE DE DEEPWATER HORIZON (USEPA, 2015)</i>	<i>19</i>
<i>TABLEAU 8</i>	<i>VALEURS SEUILS POUR LA SANTÉ HUMAINE (MG/L) DÉFINIES POUR LES HYDROCARBURES ALIPHATIQUES ET AROMATIQUES ET LEURS DÉRIVÉS ALKYLÉS DANS LES EAUX DE SURFACE, LORS DU DÉVERSEMENT DE PÉTROLE DE DEEPWATER HORIZON (USEPA, 2015).....</i>	<i>21</i>
<i>TABLEAU 9</i>	<i>VALEURS SEUILS DE RISQUE ENVIRONNEMENTAL (ERL) DÉFINIES POUR LES ÉCOSYSTÈMES AQUATIQUES D'EAU DOUCE ET D'EAU SALÉE (MG/L) (VERBRUGGEN, 2012)</i>	<i>22</i>
<i>TABLEAU 10</i>	<i>NORMES DE QUALITÉ ENVIRONNEMENTALES – NQE (MG/L) DE L'UNION EUROPÉENNE (2013) POUR QUELQUES HYDROCARBURES.....</i>	<i>23</i>

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1	PROPORTIONS DES PRODUITS PÉTROLIERS OBTENUS, POUR TROIS TYPES DISTINCTS DE PÉTROLES BRUTS (LÉGER, MOYEN ET LOURD), LORS DU RAFFINAGE (API, 1999).....	4
FIGURE 2	PROFILS DE DIVERS TYPES DE PRODUITS PÉTROLIERS RÉSULTANT DU DOSAGE PAR CHROMATOGRAPHIE EN PHASE GAZEUSE COUPLÉE À UN DÉTECTEUR À IONISATION DE FLAMME ...	5
FIGURE 3	DIAGRAMME CONCEPTUEL DES PROCESSUS PHYSIQUES ET ÉCOLOGIQUES QUI SURVIENNENT APRÈS UN DÉVERSEMENT D'HYDROCARBURES PÉTROLIERS DANS LES EAUX DE SURFACE (ADAPTÉ DE PERHAR ET ARHONDITSIS, 2014)	7
FIGURE 4	COURBES DE SENSIBILITÉ (TOXICITÉ AIGUË ET CHRONIQUE) DES ESPÈCES AQUATIQUES AUX PRODUITS TYPES D'HYDROCARBURES PÉTROLIERS (ATLANTIC PIRI, 2012)	18

1 INTRODUCTION

Notre consommation de pétrole implique plusieurs activités susceptibles de générer des rejets dans l'environnement, qu'ils soient accidentels ou non. D'une part, les activités d'exploitation, de production et de raffinage du pétrole génèrent en elles-mêmes des effluents de procédés qui contiennent des hydrocarbures pétroliers (HP) et qui sont rejetés vers les eaux de surface. D'autre part, lorsque des accidents surviennent, les volumes d'hydrocarbures rejetés dans l'environnement peuvent être importants durant un laps de temps variable. Des déversements accidentels peuvent survenir à toutes les étapes de l'exploitation et de la production des hydrocarbures pétroliers, et en particulier lors de leur transport, qu'il soit routier, ferroviaire, maritime ou par pipeline.

Les hydrocarbures qui contaminent les eaux de surface à la suite de ces rejets ont des effets physiques (engluement, baisse de l'oxygène dissous) et toxiques sur la vie aquatique qui sont susceptibles de se manifester à court et à moyen termes par des perturbations diverses dommageables pour les populations et les écosystèmes. À plus long terme, les hydrocarbures pétroliers qui s'accumulent dans les organismes aquatiques rendent ces derniers impropres à la consommation par d'autres êtres vivants, y compris l'humain. Les hydrocarbures pétroliers sont également reconnus pour causer, à de très faibles concentrations, des altérations du goût et de la couleur, et ce, autant de l'eau que de la chair des organismes qui y vivent.

Le comportement des produits pétroliers dans l'eau et la sévérité des effets engendrés dépendent notamment des substances présentes dans le mélange d'hydrocarbures et de leurs concentrations relatives. Chaque produit pétrolier contient des centaines, voire des milliers de molécules différentes en proportions variables selon qu'il s'agit de l'un ou l'autre des produits pétroliers ayant subi un degré plus ou moins élevé de raffinage, des types de pétrole brut ou d'autres types d'hydrocarbures liquides associés aux forages.

C'est pourquoi il est nécessaire de concevoir des outils d'évaluation de la contamination qui prennent en compte la complexité des mélanges d'hydrocarbures et offrent des balises de protection du milieu aquatique ciblées pour le type de mélange en présence et ses effets potentiels ou appréhendés. Les critères de qualité de l'eau de surface servent à protéger de façon adéquate la santé des écosystèmes aquatiques et celle des humains. Ce sont des indicateurs de risque pour la qualité de l'eau qui peuvent être utilisés, notamment, pour définir des objectifs environnementaux de rejets (OER), pour évaluer l'ampleur des dommages constatés, ou pour établir les niveaux à atteindre pour regagner les usages perdus dans le milieu aquatique (MDDELCC, 2017).

Afin de protéger tous les usages de l'eau, des critères de qualité ont été définis à la fois pour des produits pétroliers types, contenant des mélanges relativement standards de diverses molécules, et pour des molécules spécifiques dont les effets individuels ont été étudiés. Par exemple, des critères de qualité pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont été établis pour protéger les organismes aquatiques contre les effets toxiques et d'autres ont été établis pour protéger la santé humaine contre les effets à plus long terme découlant de leur accumulation dans les organismes aquatiques et de leur cancérogénicité potentielle pour les humains.

Au Québec, le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) est responsable de l'établissement des critères de qualité pour la protection de la vie aquatique et des usages du milieu. Historiquement, les HP ont fait l'objet de critères narratifs simples (pas de film visible à la surface de l'eau, par exemple), puis de critères numériques pour les huiles et graisses (solubles dans l'hexane), les hydrocarbures pétroliers totaux (HP non volatils compris dans la classe C10-C50), les types de produits pétroliers (essence, carburant diesel, pétrole brut, etc.) et finalement pour certaines molécules plus étudiées (benzène, toluène, HAP, etc.).

Les développements récents sur la compréhension des mécanismes d'action des HP ont permis l'émergence de nouvelles approches et de nouvelles données (USEPA, 2015; Verbruggen, 2012) permettant de mieux cerner la totalité de la toxicité de ces mélanges complexes et variables que sont les

HP. La présente étude vise à documenter l'état actuel des connaissances dans le domaine de l'écotoxicité des hydrocarbures pétroliers en ciblant les développements récents qui peuvent permettre d'actualiser ou de compléter les critères de qualité de l'eau du Québec.

2 NATURE DES HYDROCARBURES PÉTROLIERS

Le pétrole est composé essentiellement d'hydrocarbures – molécules constituées d'atomes de carbone (de 82 à 87 %) et d'hydrogène (de 11 à 15 %) – et, en quantité moindre, de composés organiques contenant du soufre (0 à 8 %), de l'azote (de 0 à 1 %) ou de l'oxygène (de 0 à 0,5 %) (API, 1999). Certains métaux peuvent également être associés au pétrole. L'aluminium, le cuivre, le nickel, le vanadium et le chrome seraient en plus fortes concentrations dans les pétroles lourds, alors que le mercure serait plus concentré dans les pétroles légers (Dupuis et Ucan-Marin, 2015).

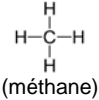
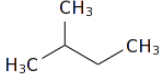


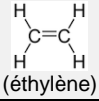



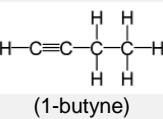


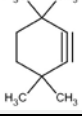

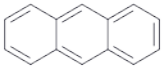
Des centaines, voire des milliers d'hydrocarbures se distinguent selon la configuration de leurs molécules et la longueur de leurs chaînes de carbone et selon que celles-ci contiennent seulement des liaisons simples (hydrocarbures saturés : alcanes) ou au moins une liaison double ou triple (hydrocarbures insaturés : alcènes, alcynes, hydrocarbures aromatiques). La majorité des hydrocarbures peuvent être répartis en deux grands groupes (tableau 1) : les hydrocarbures aliphatiques (alcanes, alcènes et alcynes) et les hydrocarbures aromatiques, composés d'un ou de plusieurs noyaux benzéniques, tels que les BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylène) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Le pétrole brut et les produits pétroliers issus du raffinage contiennent, en proportions variables, des alcanes et des hydrocarbures aromatiques – monocycliques et polycycliques. Les produits raffinés contiennent également des alcènes, alors que ceux-ci ne sont pas présents en quantité appréciable dans le pétrole brut (Dupuis et Ucan-Marin, 2015). Quant aux alcynes, ils seraient peu associés au pétrole.

Théoriquement, il existe plus de 1 000 molécules différentes de HAP. Toutefois, seulement un peu plus d'une centaine ont été identifiées. Ce groupe couvre une gamme de molécules de complexité très variable. Par exemple, le naphthalène, avec ses deux anneaux benzéniques, fait partie des HAP de faible poids moléculaire, alors que le benzo(a)pyrène, avec ses cinq anneaux, figure parmi les HAP de haut poids moléculaire.

Les asphaltènes sont des molécules très complexes et de grande dimension qui contribuent à la viscosité et à la densité élevée du pétrole. En général, le pétrole contient plus de HAP de faible poids moléculaire que de HAP de haut poids moléculaire (Dupuis et Ucan-Marin, 2015). Les HAP pétrogéniques (présents naturellement dans le pétrole brut) sont majoritairement des HAP alkylés, c'est-à-dire qu'un ou plusieurs des atomes d'hydrogène sont remplacés par un groupe alkyle, dont la formule générale est C_nH_{2n+1} (par exemple CH_3 , C_2H_5 , etc.).

TABLEAU 1 LES HYDROCARBURES ALIPHATIQUES ET AROMATIQUES

Grand groupe d'hydrocarbures	Classe d'hydrocarbures		Exemples de molécules d'hydrocarbures (nombre de C)
Hydrocarbures aliphatiques Chaînes linéaires, ramifiées ou cycliques	Alcanes Seulement des liaisons simples (Hydrocarbures saturés)	Chaîne linéaire (Paraffines)	méthane (C1), éthane (C2), propane (C3), butane (C4), pentane (C5), hexane (C6), etc. 
		Chaîne ramifiée	méthylbutane (C5) 
		Chaîne cyclique (Naphtènes)	cyclohexane (C6) 
		Chaîne cyclique ramifiée	méthylcyclohexane (C7) 
	Alcènes* (Oléfines) Au moins une liaison double C=C (Hydrocarbures insaturés)	Chaîne linéaire	éthylène (C2), propène (C3), butène (C4), etc. 
		Chaîne ramifiée	méthylpropène (C4) 
		Chaîne cyclique	cyclohexène (C6) 
		Chaîne cyclique ramifiée	3-méthylcyclopentène (C6) 
	Alcynes** Au moins une liaison triple C≡C (Hydrocarbures insaturés)	Chaîne linéaire	acétylène (C2), propyne (C3), butyne (C4), pentyne (C5), hexyne (C6), etc. 
		Chaîne ramifiée	3-méthyl-1-butyne (C5) 
		Chaîne cyclique	cyclohexyne (C6) 
		Chaîne cyclique ramifiée	3,3,6,6-tétraméthylcyclohexyne (C10) 
Hydrocarbures aromatiques (Hydrocarbures insaturés) Noyau benzénique – cycle aromatique : enchaînement cyclique de six atomes de carbone comportant trois liaisons doubles alternant avec trois liaisons simples	Hydrocarbures aromatiques monocycliques (Alkylbenzènes) Un seul cycle aromatique		benzène (C6), toluène (C7), éthylbenzène (C8), xylène (C8), styrène (C8), cumène (C9), mésitylène (C9), etc. 
	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) Deux cycles aromatiques et plus		naphtalène (C10), anthracène (C14), pyrène (C16), benzoanthracène (C18), benzopyrène (C20), benzofluoranthène (C20), indéno(1,2,3-cd)pyrène (C22), etc. 

* Les alcènes sont associés aux produits pétroliers issus du raffinage.

** Les alcynes sont rarement associés au pétrole et aux produits pétroliers.

3 PRODUITS PÉTROLIERS TYPES

Étant donné la diversité des molécules d'hydrocarbures, la composition et les propriétés physiques du pétrole brut varient considérablement d'un site à l'autre. Il y a plusieurs types de pétrole : le pétrole brut classique léger ou lourd, le bitume valorisé ou non, les condensats, etc.

Le processus de raffinage du pétrole consiste à isoler, par distillation, les molécules d'hydrocarbures ayant des points d'ébullition semblables et à stimuler les réactions chimiques qui transforment les hydrocarbures d'une forme à l'autre. Selon l'origine des pétroles bruts ou des bitumes, ceux-ci seront plus ou moins légers ou lourds, et leur raffinage permettra une récupération proportionnelle de produits pétroliers légers ou lourds (figure 1).

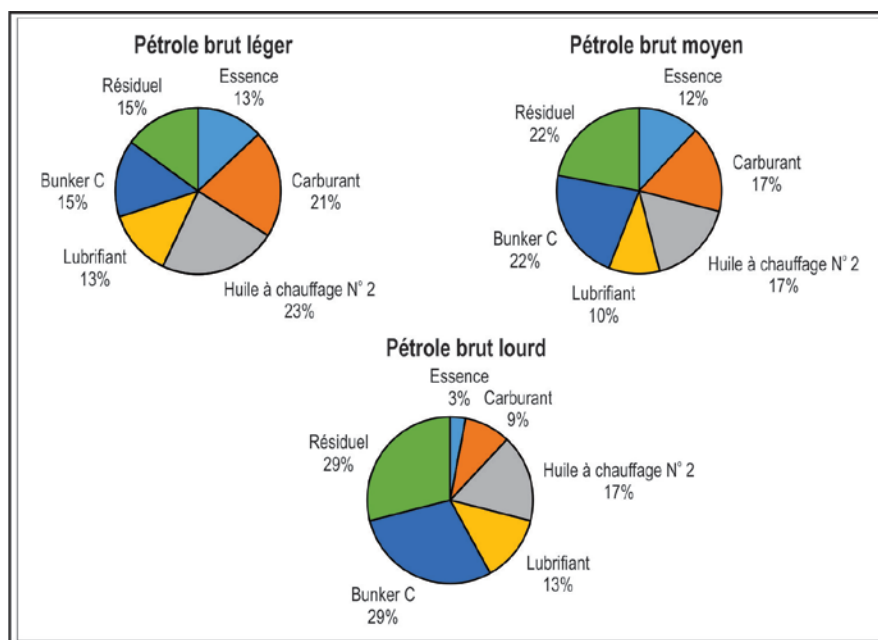


FIGURE 1 PROPORTIONS DES PRODUITS PÉTROLIERS OBTENUS, POUR TROIS TYPES DISTINCTS DE PÉTROLES BRUTS (LÉGER, MOYEN ET LOURD), LORS DU RAFFINAGE (API, 1999)

Les produits pétroliers qui résultent du raffinage sont notamment l'essence, le carburant diesel, le carburant proprement dit (*jet fuel*), le kérosène et l'huile de chauffage domestique. Le pétrole résiduel comprend toutes les fractions d'hydrocarbures qui restent après l'enlèvement du pétrole légèrement (essence) et moyennement (carburant, carburant diesel, huile de chauffage) distillé. Ce pétrole résiduel est utilisé comme carburant pour alimenter les navires et les centrales thermiques (*bunker fuel*) ou pour la production de l'asphalte servant de revêtement routier. Aussi, les huiles lubrifiantes et le goudron sont fabriqués à partir du pétrole résiduel.

Ces divers produits pétroliers, issus du raffinage du pétrole brut, se distinguent également selon leur poids moléculaire, associé au nombre d'atomes de carbone des molécules qu'ils contiennent. On les répartit ainsi en trois grands groupes : 1) les produits légers, comme l'essence, constitués principalement de molécules qui contiennent moins de 10 atomes de carbone ($C < 10$); 2) les produits moyennement lourds, comme le carburant diesel et l'huile à chauffage n° 2, constitués principalement de molécules qui contiennent de 11 à 22 atomes de carbone ($C_{11}-C_{22}$); 3) et les produits lourds, comme l'huile « Bunker C », constitués principalement de molécules qui contiennent plus de 23 atomes de carbone ($C > 23$). Les chromatogrammes produits lors des analyses d'hydrocarbures permettent de distinguer les

patrons de ces types de produits pétroliers (figure 2). Le tableau 2 illustre la composition en fractions aromatiques et aliphatiques de quelques-uns de ces produits pétroliers.

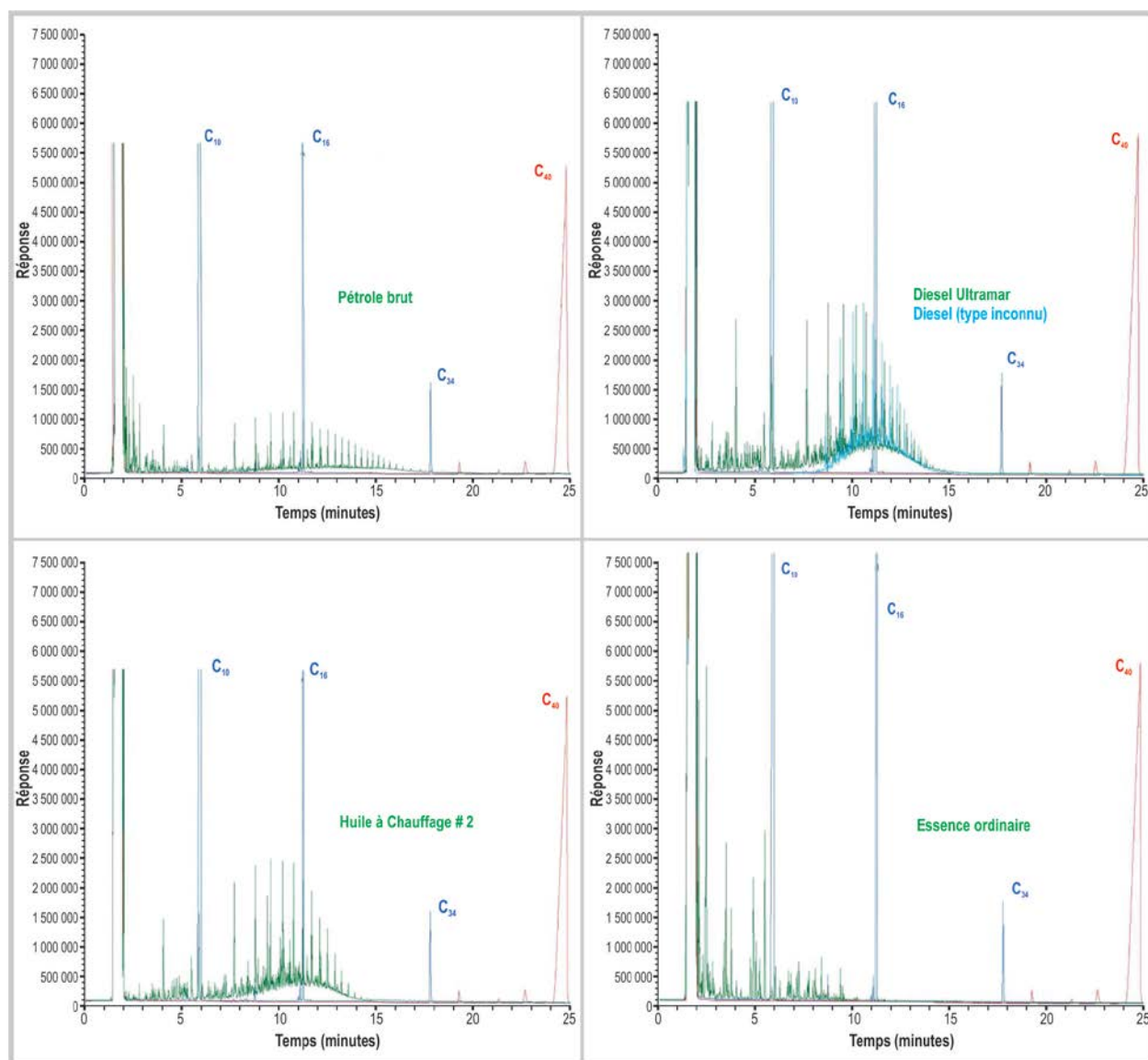


FIGURE 2 PROFILS DE DIVERS TYPES DE PRODUITS PÉTROLIERS RÉSULTANT DU DOSAGE PAR CHROMATOGRAPHIE EN PHASE GAZEUSE COUPLÉE À UN DÉTECTEUR À IONISATION DE FLAMME (produits par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec). Les signaux de chacun des produits pétroliers apparaissent en vert (et en bleu clair pour le carburant diesel de type inconnu). Les pics C₁₀, C₁₆ et C₃₄ apparaissent en bleu sombre et les pics C₄₀ apparaissent en rouge.

TABEAU 2 POURCENTAGE (%) DES DIVERSES FRACTIONS ALIPHATIQUES ET AROMATIQUES MESURÉES DANS QUELQUES PRODUITS PÉTROLIERS TYPES (ATLANTIC PIRI, 2012)

Fractions	Essence	Carburant diesel et huile à chauffage n° 2	Huile n° 6 et huile lubrifiante
Aliphatiques			
C>5-C6	27	-	-
C>6-C8	27	-	-
C>8-C10	16	5	1
C>10-C12	12	19	5
C>12-C16	-	26	17
C>16-C21	-	17	26
C>21-C34	-	3	32
Aromatiques			
C>7-C8	-	-	-
C>8-C10	6	-	-
C>10-C12	12	6	1
C>12-C16	-	12	3
C>16-C21	-	9	7
C>21-C34	-	2	8

À une échelle plus fine, ce sont des centaines de substances pétrolières distinctes qui ont été identifiées. Ainsi, dans le cadre de son Plan de gestion des produits chimiques, le gouvernement du Canada (GC, 2015) distingue près de 160 substances pétrolières qui seraient utilisées ou fabriquées au cours des activités de raffinage du pétrole ou de valorisation du bitume ou du pétrole brut lourd (annexe 1, tableau 1.1). Les substances répertoriées ont été réparties dans quatre grands groupes définis en fonction de la production et de l'utilisation de ces produits. Selon le gouvernement du Canada (GC, 2015), il y a environ 210 substances pétrolières restantes qui devront être abordées. Soixante-dix de ces substances ont fait l'objet d'un avis d'enquête obligatoire en juillet 2015 (annexe 1, tableau 1.2).

4 COMPORTEMENT DES HYDROCARBURES PÉTROLIERS DANS L'EAU DE SURFACE

À la suite d'un déversement dans le milieu aquatique, le devenir du pétrole dépend de plusieurs facteurs tels que la nature et la composition du pétrole déversé, le type de milieu (lac, rivière, fleuve, mer, océan), les conditions météorologiques, la direction du vent et des vagues, de même que la température de l'eau et de l'air. Au fil du temps, sous l'influence de facteurs physicochimiques et biologiques, les hydrocarbures pétroliers subiront des transformations qui modifieront leur composition initiale, leur répartition, leur concentration et même leur nature (Dupuis et Ucan-Marin, 2015). La figure 3 illustre les processus majeurs qui affectent le comportement des hydrocarbures pétroliers à la suite d'un déversement dans les eaux de surface.

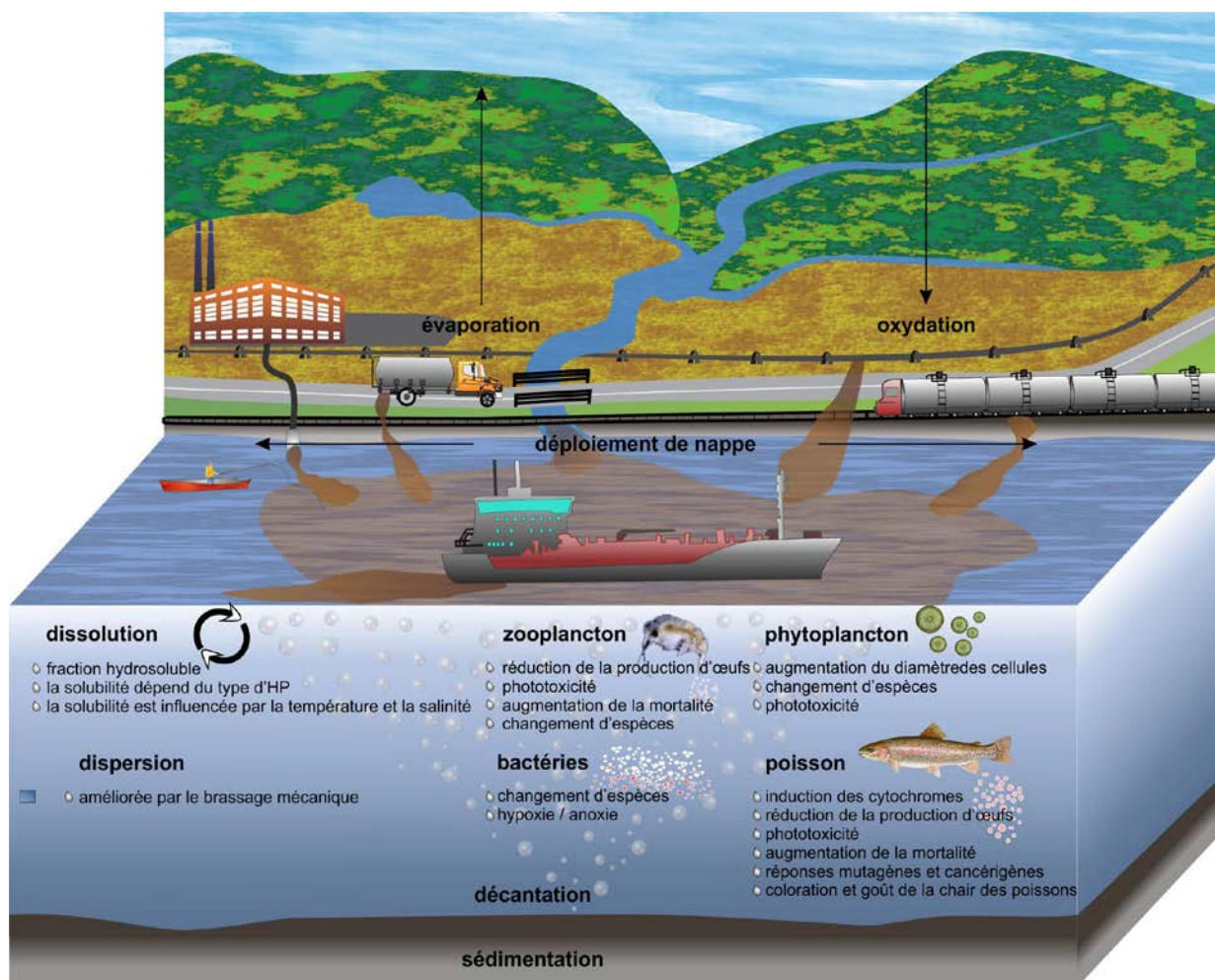


FIGURE 3 *DIAGRAMME CONCEPTUEL DES PROCESSUS PHYSIQUES ET ÉCOLOGIQUES QUI SURVIENNENT APRÈS UN DÉVERSEMENT D'HYDROCARBURES PÉTROLIERS DANS LES EAUX DE SURFACE (ADAPTÉ DE PERHAR ET ARHONDITSIS, 2014)*

Dans un premier temps, les hydrocarbures pétroliers se répandent et se déploient à la surface de l'eau. Bien que ce processus n'altère pas la composition chimique des hydrocarbures, il augmente la surface de contamination et accroît les impacts potentiels des hydrocarbures sur les organismes aquatiques.

Le deuxième processus majeur est l'évaporation, durant laquelle une portion importante des produits légers passe de la phase liquide à la phase gazeuse, en raison de la volatilité élevée de ces composés. Ce processus diminue le volume des hydrocarbures dans l'eau, modifie sa composition chimique et peut affecter sa toxicité aiguë, puisque les fractions légères (C1-C8), plus rapidement biodisponibles, sont parfois considérées comme les plus toxiques (API, 1999). Malgré le fait que les molécules de la fraction moyenne C10-C12 soient aussi susceptibles de s'évaporer, leur taux d'évaporation est plus faible que celui des produits plus légers. Comme ils vont rester plus longtemps dans l'eau, leur toxicité chronique potentielle est plus élevée. Une température froide ou un couvert de glace vont réduire la possibilité d'évaporation rapide.

La dissolution est un processus en compétition avec l'évaporation parce que les produits susceptibles de se solubiliser dans la colonne d'eau ont aussi tendance à s'évaporer. Ce processus ne contribue pas de manière importante à la réduction du volume de pétrole déversé. Environ 2 à 5 % des pétroles seraient enlevés de la surface de l'eau par dissolution naturelle (Neff, 1990). La baisse de la température et l'augmentation de la salinité réduisent les phénomènes de dissolution.

La dispersion naturelle consiste en la formation de gouttelettes d'huile qui s'incorporent dans la colonne d'eau et se présentent sous forme de suspension. Ce processus, sous l'influence du vent et des vagues, apparaît durant les premiers jours d'un déversement. Bien que la dispersion diminue le volume du pétrole à la surface de l'eau, elle n'en modifie pas les propriétés physicochimiques. La dispersion chimique effectuée à l'aide de dispersant peut réduire la quantité d'hydrocarbures en surface. Toutefois, l'utilisation de dispersants augmente l'exposition des organismes pélagiques (i. e. vivant dans la colonne d'eau) aux hydrocarbures. Les dispersants et les pétroles dispersés auraient une toxicité plus élevée que le pétrole en lui-même (DeLeo *et al.*, 2015).

L'émulsification, à la différence de la dispersion qui consiste en une suspension d'huile dans l'eau, est un mélange des gouttelettes d'eau dans du pétrole en surface (émulsion d'eau dans du pétrole) qui forment un nouveau composé relativement résistant à l'évaporation et à la dissolution. Ce nouveau composé peut prendre l'apparence d'une mousse brune. Ce processus tend à augmenter le volume qu'occupe le pétrole présent dans l'environnement.

Sous l'action de la lumière, la photooxydation peut transformer chimiquement certains composés en de nouvelles substances plus hydrosolubles et plus toxiques à court terme que les composés parents (Neff, 1990). La photooxydation engendre aussi des produits lourds qui ne sont ni hydrosolubles ni liposolubles (Neff, 1990).

La sédimentation concerne, dans la majorité des cas, les fractions plus lourdes qui n'ont pas subi de dissolution ou d'évaporation. Ces fractions d'hydrocarbures pétroliers peuvent adhérer à la matière organique, aux bactéries ou aux particules d'argile de petite taille, s'alourdir et se déposer sur le fond. La sédimentation s'opère aussi par la déposition sous forme de fèces, après le passage des hydrocarbures dans le système digestif des organismes aquatiques, ou par la précipitation directe à la suite de l'augmentation de la densité des résidus pétroliers. La sédimentation des hydrocarbures pétroliers peut commencer immédiatement après un déversement, cependant ce processus dépend fortement de la nature des hydrocarbures, du lieu du déversement, de la présence des matières en suspension et des organismes aquatiques (Neff, 1990) et probablement de la température.

La biodégradation est un processus lent qui nécessite la croissance et la multiplication de microorganismes (bactéries et champignons) qui peuvent utiliser les hydrocarbures pétroliers comme source d'énergie en les transformant en sous-produits oxydés qui seront par la suite dégradés, par oxydation, en dioxyde de carbone et en eau. Après l'arrêt des processus physiques et chimiques de transformation des hydrocarbures légers et moyens, la biodégradation devient le processus majeur de transformation de ces composés. Cependant, à cause de la structure complexe des hydrocarbures lourds, ces derniers ne sont pas sujets à la biodégradation, au moins pour plusieurs mois, voire plusieurs années (API, 1999). À poids moléculaire équivalent, les hydrocarbures ramifiés ou cycliques auront un taux de biodégradation plus faible que les hydrocarbures linéaires.

5 EFFETS DES HYDROCARBURES PÉTROLIERS DANS LE MILIEU AQUATIQUE

L'introduction de quantités importantes d'hydrocarbures pétroliers dans le milieu aquatique a d'abord des effets physiques directs sur les organismes aquatiques qui se manifestent rapidement, soit l'engluement et la baisse d'oxygène dissous dans l'eau. Ces deux phénomènes peuvent entraîner rapidement la mort des organismes aquatiques. De plus, des effets toxiques divers, létaux et sublétaux, apparaissent à plus ou moins brève échéance.

La persistance et la toxicité des hydrocarbures pétroliers varient d'un composé à l'autre. Leur potentiel de toxicité pour les organismes aquatiques est inhérent à leur hydrosolubilité et proportionnel à leur liposolubilité (Di Toro *et al.*, 2007), c'est-à-dire leur capacité de se dissoudre dans les lipides des membranes cellulaires.

En règle générale, la solubilité aqueuse des hydrocarbures décroît avec l'augmentation du nombre d'atomes de carbone de leurs molécules, alors que la toxicité augmente. Les composés de faible poids moléculaire sont plus volatils que ceux ayant un poids moléculaire élevé. Les hydrocarbures aromatiques monocycliques comme le benzène, le toluène, l'éthylbenzène et le xylène (les BTEX) sont relativement volatils et plus solubles que les HAP. Ils ne sont pas persistants dans l'eau et ne sont pas censés s'accumuler dans la chair de poissons ou dans les sédiments en concentrations importantes.

Les hydrocarbures à poids moléculaire élevé sont peu solubles dans l'eau et ont davantage d'affinités pour le carbone organique des sédiments et les lipides des cellules biologiques. Pour un même poids moléculaire (lié au nombre d'atomes de carbone), les hydrocarbures aliphatiques sont moins solubles que les hydrocarbures aromatiques et sont plus biodégradables, donc moins persistants dans l'environnement (Battelle, 2007). Des études récentes démontrent que les HAP alkylés (ou substitués) seraient nettement plus toxiques que leurs HAP parents en raison de leur bioaccumulation plus forte (Verbruggen *et al.*, 2008).

La majeure partie de la toxicité des hydrocarbures pétroliers est considérée de type narcotique, c'est-à-dire que ces substances entraînent une série de réactions biochimiques qui dérèglent le fonctionnement des organismes une fois qu'elles y ont pénétré. L'ampleur de cette toxicité dépend de la charge corporelle des hydrocarbures, ceux-ci se liant facilement aux lipides membranaires des cellules biologiques. Ainsi, la toxicité attribuable à la narcose est directement liée à la fraction d'hydrocarbures liposolubles et, par conséquent, à sa capacité de se bioconcentrer dans le biote (Dupuis et Ucan-Marin, 2015). Les hydrocarbures présents dans l'eau peuvent être ingérés par les organismes directement avec l'eau qu'ils ingurgitent, avec leur alimentation ou être absorbés par les branchies ou la peau.

La toxicité des hydrocarbures pour les organismes aquatiques peut être favorisée par le rayonnement solaire. Des études en laboratoire ont montré que le pétrole brut peut être de 1,5 à 1 000 fois plus toxique lorsqu'il est exposé à un éclairage en spectre continu comparativement à un éclairage fluorescent (Dupuis et Ucan-Marin, 2015). Deux mécanismes de toxicité due au rayonnement solaire ont été mis au jour : ce sont la photooxydation et la phototoxicité. Par la photooxydation, le rayonnement solaire donne lieu à la formation de composés oxydés solubles qui contribuent à la toxicité du pétrole altéré. Par la phototoxicité, des radicaux libres seraient formés lorsque la lumière du soleil réagit avec certains HAP. Il semble que ce phénomène se produit dans l'organisme, après l'absorption des HAP (Dupuis et Ucan-Marin, 2015). Les stades embryonnaires et larvaires, souvent translucides et occupant la zone photique de la colonne d'eau, seraient particulièrement vulnérables à ce phénomène.

Les accidents survenus en Amérique du Nord, tels que celui d'*Exxon Valdez* en 1989, en Alaska, et celui de la plateforme Deepwater Horizon en 2010 dans le golfe du Mexique, ont forcé la réalisation de plusieurs études et, subséquemment, la documentation des impacts des déversements du pétrole sur les organismes (Dupuis et Ucan-Marin, 2015). La National Oceanic and Atmospheric Administration a recensé et mis en ligne la liste des documents publiés à la suite du déversement de la Deepwater Horizon (NOAA, 2014).

Les études de laboratoire et les observations de terrain indiquent que les hydrocarbures pétroliers peuvent induire une multitude de dommages, dont la mortalité des organismes exposés, l'augmentation des anomalies de développement, la perturbation des capacités reproductives, le dérèglement des comportements, l'apparition de dommages génétiques et des altérations du système immunitaire (Perhar et Arhonditsis, 2014; Dupuis et Ucan-Marin, 2015).

Effets létaux observés

La toxicité aiguë des hydrocarbures est mise en évidence par des essais de toxicité de courte durée, effectués en laboratoire, sur divers organismes aquatiques. Ces essais et les observations de terrain qui ont suivi les déversements accidentels ont montré que des expositions de courte durée à de faibles concentrations d'hydrocarbures pétroliers peuvent entraîner des effets létaux.

Dupuis et Ucan-Marin (2015) rapportent une étude effectuée sur un copépode marin commun, *Calanus finmarchicus*, qui a montré que des concentrations variant de 0,7 à 1,0 mg d'hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) par litre d'eau (mg HPT/L) pouvaient être létales pour 50 % des individus après une exposition de 96 heures (CL₅₀-96 h).

Aux États-Unis, de nombreux essais de toxicité ont porté sur un crustacé marin, le mysis du golfe (*Americamysis bahia*). Les valeurs de CL₅₀ (96 h) mesurées dans des larves du mysis exposées à du pétrole dispersé physiquement varient de 0,15 à 83,1 mg HPT/L (Dupuis et Ucan-Marin, 2015). D'autres études, moins nombreuses, ont porté sur une espèce commerciale importante du Canada, le homard américain (*Homarus americanus*). Les valeurs de CL₅₀ (96 h) rapportées pour les premiers stades de vie varient de 0,86 à 4,9 mg HPT/L (Dupuis et Ucan-Marin, 2015).

Les mollusques bivalves sont particulièrement sensibles au pétrole du fait que leur mobilité est limitée et qu'ils filtrent l'eau pour se nourrir. Ils sont susceptibles de consommer les gouttelettes de pétrole et les particules fixées aux hydrocarbures qui sont en suspension dans la colonne d'eau. Les valeurs de CL₅₀ (96 h) indiquées pour les premiers stades de vie des mollusques se situent entre 1,14 et 1,83 mg HPT/L (Dupuis et Ucan-Marin, 2015).

Les stades larvaires et embryonnaires des poissons sont plus sensibles à la toxicité du pétrole que les stades adultes. Des mortalités à ces stades peuvent avoir des conséquences importantes pour le recrutement ultérieur des populations. De très faibles concentrations d'hydrocarbures totaux, de l'ordre de 0,7 à 7,6 µg HPT/L, ont causé la mort de harengs du Pacifique après que les œufs ont été exposés à du pétrole brut Alaska North Slope altéré (Dupuis et Ucan-Marin, 2015).

Effets sublétaux observés

Les effets sublétaux des contaminants sont ceux qui donnent lieu à des changements dans les populations sans directement provoquer la mort des individus exposés. Ils se manifestent normalement après une exposition plus ou moins longue, variable selon la durée de vie des individus. Il peut s'agir, par exemple, de lésions externes ou internes, de déformations squelettiques ou de malformations cardiaques conduisant à des troubles de croissance, d'alimentation ou de reproduction et des changements de comportement. Des effets sublétaux peuvent se mesurer à tous les niveaux d'organisation biologique incluant les niveaux moléculaire, biochimique, individuel ou communautaire.

Les malformations sont les effets les plus souvent observés chez les poissons lorsqu'ils sont exposés au pétrole à leurs premiers stades de vie. Après le déversement de l'*Exxon Valdez*, une proportion élevée de larves de hareng prélevées sur le terrain présentait des défauts squelettiques (Dupuis et Ucan-Marin, 2015). Une étude récente effectuée en laboratoire a montré que des embryons de poissons prédateurs pélagiques, comme les thons et les sérioles, exposés à de faibles concentrations de HAP totaux (de 3,4 à 13,8 µg/l), ont développé des œdèmes péricardiques, des nageoires déformées, des courbures de l'axe du corps et une croissance réduite des yeux (Dupuis et Ucan-Marin, 2015). Les HAP pourraient être, le plus souvent, les principales substances responsables de la toxicité chronique des hydrocarbures pétroliers (Boehm et Page, 2007; Neff *et al.*, 2000).

Les hydrocarbures peuvent également perturber le fonctionnement normal des branchies et nuire ainsi à l'osmorégulation des poissons (Dupuis et Ucan-Marin, 2015). Des effets sur les processus métaboliques et sur la croissance des poissons sont également rapportés.

Les HAP sont également considérés comme des perturbateurs endocriniens, c'est-à-dire qu'ils peuvent nuire au bon déroulement des processus régulés par les hormones, comme celui de la reproduction. Dupuis et Ucan-Marin (2015) citent des études qui indiquent qu'une exposition aux HAP de faible poids moléculaire peut retarder la maturation sexuelle, diminuer le développement des gonades et retarder la spermatogenèse. Des études sur les poissons ont démontré que des HAP, notamment le naphthalène, le phénathène et le chrysène, entraînent une baisse des concentrations d'estradiol dans le plasma, une hormone qui régule la synthèse de la vitellogénine, source des réserves énergétiques destinées au développement de l'embryon (Dupuis et Ucan-Marin, 2015). D'autres études ont montré des effets endocriniens sur les invertébrés exposés à des produits pétroliers. Ainsi, chez les moules exposées à des concentrations sublétales de pétrole brut, les effets qui ont été observés indiquent que le pétrole réduit potentiellement l'affinité de l'estradiol pour les récepteurs œstrogéniques (Dupuis et Ucan-Marin, 2015).

L'exposition des organismes aquatiques aux hydrocarbures pétroliers peut également endommager leur matériel génétique. Les dommages génétiques peuvent éventuellement entraîner la perte de gamètes, un développement anormal, des mutations et le cancer. Les HAP suivants sont considérés comme des substances cancérigènes pour l'humain : benzo[a]anthracène, benzo[a]pyrène, benzo[b]fluoranthène, benzo[k]fluoranthène, chrysène, dibenzo[a,h]anthracène, indéno[1,2,3-cd]pyrène.

Bioaccumulation

L'accumulation des hydrocarbures pétroliers dans les tissus biologiques des organismes aquatiques dépend de plusieurs facteurs, comme les conditions environnementales, le stade du cycle de vie et la voie d'exposition (prise directe par l'eau ou les sédiments ou par l'alimentation, ou par ces deux voies). La contribution relative de chaque voie varie selon les espèces exposées et les facteurs qui influencent la biodisponibilité des divers hydrocarbures pétroliers, tels que leur nature, leur concentration et la durée d'exposition (Gallagher et Pola, 1984).

En raison de leur propriété lipophile, les hydrocarbures pétroliers s'accumulent rapidement dans les tissus adipeux. De faibles proportions ont également été mesurées dans les muscles, les reins et les branchies des poissons exposés à ces contaminants. Leur élimination peut s'opérer à la suite du nettoyage des eaux salies par les déversements. La présence des mécanismes de détoxification chez les organismes occupant le sommet de la chaîne alimentaire, comme les poissons prédateurs, tend à réduire la bioaccumulation des hydrocarbures pétroliers chez ces derniers (Jonsson *et al.*, 2004).

Les effets toxiques des hydrocarbures qui s'accumulent dans les organismes aquatiques peuvent se répercuter d'un niveau trophique à l'autre (Perhar et Arhonditsis, 2014). Ainsi, le déversement de pétrole brut peut avoir des effets délétères sur la structure et la fonction des chaînes alimentaires des milieux d'eau douce et d'eau salée (Paine *et al.*, 1996).

6 CRITÈRES DE QUALITÉ UTILISÉS ACTUELLEMENT AU QUÉBEC POUR LES HYDROCARBURES PÉTROLIERS

Pour assurer la protection des eaux de surface contre la contamination des hydrocarbures pétroliers et ainsi protéger tous les usages de l'eau, le Ministère a adopté des critères de qualité narratifs et numériques.

Critères narratifs

Les critères de qualité narratifs, établis par le ministère de l'Environnement de l'Ontario, indiquent que les huiles et produits pétrochimiques ne doivent pas être présents en concentrations pouvant :

1. être détectées par un film visible faisant écran ou occasionnant une décoloration de la surface;
2. être détectées par l'odeur;

3. causer la coloration de la chair des organismes aquatiques comestibles;
4. former des dépôts sur le rivage et les sédiments de fond, être détectables visuellement ou par les odeurs ou être nocifs pour les organismes aquatiques résidents.

Critères numériques

Les critères de qualité numériques indiquent les concentrations seuils qui ne doivent pas être dépassées dans les eaux de surface pour assurer la protection de la vie aquatique ou de la santé humaine, cette dernière étant visée par la consommation d'eau ou d'organismes aquatiques.

Vie aquatique

Pour protéger les organismes aquatiques, deux critères de vie aquatique sont établis. Le critère de vie aquatique aigu (CVAA) correspond à la concentration maximale d'une substance à laquelle les organismes aquatiques peuvent être exposés pour une courte période de temps sans être gravement touchés. Le critère de vie aquatique chronique (CVAC) correspond à « la concentration la plus élevée d'une substance qui ne produira aucun effet néfaste sur les organismes aquatiques (et leur progéniture) lorsqu'ils sont exposés quotidiennement pendant toute leur vie » (MDDELCC, 2017). Le CVAA correspond à la concentration potentiellement néfaste pour 5 % des espèces (HC₅), basée sur les données de toxicité aiguë. Le CVAC correspond à la concentration potentiellement néfaste pour 5 % des espèces (HC₅), basée sur les données de toxicité chronique, ou si les données chroniques sont insuffisantes, sur la base des données de toxicité aiguë et d'un ratio aiguë-chronique. La description des méthodes employées est fournie dans *Méthodologie de calcul des critères de qualité de l'eau pour les substances toxiques* (MENVIQ, 1992).

De tels critères de qualité ont été adoptés pour cinq produits pétroliers types incluant le pétrole brut, pour les BTEX et six HAP individuels (tableau 3). Les critères de qualité de vie aquatique pour l'essence, le carburant diesel, l'huile à chauffage n° 2, l'huile « Bunker C » et le pétrole brut ont été définis en 1996 par le Minnesota à partir de données de toxicité et de la méthode d'élaboration de critères de qualité du Minnesota, qui s'apparente à celle retenue au Québec (MENVIQ, 1992). Lorsque la nature des produits pétroliers en cause est incertaine, le Ministère opte pour un critère opérationnel applicable à l'ensemble des hydrocarbures pétroliers inclus dans la fraction C10-C50 (tableau 3). Ce dernier a été adopté dans les années 1980, sur la base du principe de précaution, à partir des données de toxicité sur les hydrocarbures les plus toxiques recensées alors.

Santé humaine – consommation d'eau et d'organismes

Des critères de qualité de l'eau ont également été établis pour protéger l'eau et les organismes aquatiques de toute contamination pouvant nuire à la consommation humaine actuelle ou future. Basés sur les principes de l'analyse de risque, ces critères servent à déterminer les concentrations des contaminants dans les eaux qui minimiseraient ou établiraient le risque potentiel d'effets délétères pour l'être humain, résultant soit d'une consommation d'eau et des organismes aquatiques (CPCEO), soit d'une consommation exclusive d'organismes aquatiques (CPCO). La base méthodologique adoptée pour les établir est décrite en détail dans *Méthodologie de calcul des critères de qualité de l'eau pour les substances toxiques* (MENVIQ, 1992). Cette méthode tirée de la publication de l'USEPA (1980) a été, à quelques reprises, mise à jour depuis (USEPA, 1995, 2000). Conséquemment, les valeurs retenues ont été établies sur la base de ces mises à jour et elles seront revues sur la base de celles à venir. De tels critères de qualité ont été adoptés pour les BTEX, pour huit hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) individuels et pour sept HAP reconnus pour leurs effets cancérigènes (tableau 3).

Certains CPCEO sont basés sur les propriétés organoleptiques des hydrocarbures pétroliers, ceux-ci étant reconnus pour causer des altérations du goût et de la couleur de l'eau ou des organismes aquatiques à de très faibles concentrations. De tels critères de qualité ont été adoptés pour deux BTEX et deux HAP (tableau 3).

TABEAU 3 CRITÈRES DE QUALITÉ DE L'EAU DE SURFACE (MG/L) ACTUELLEMENT EN COURS AU QUÉBEC POUR LES HYDROCARBURES PÉTROLIERS (MDDELCC, 2017)

SUBSTANCES	CPCEO Propriétés organo- leptiques ¹	CPCEO ²	CPCO ³	CVAC ⁴	CVAA ⁵	VAF _e ⁶
Produits pétroliers						
Carburant diesel				0,2	2,8	5,5
Essence				0,2	1,8	3,6
Huile à chauffage domestique n° 2				0,2	2,8	5,5
Huile « Bunker C »				0,011	0,11	0,22
Pétrole brut				0,063	0,13	0,26
Hydrocarbures C ₁₀ -C ₅₀ ⁷				0,01		
BTEX						
Benzène		0,0022	0,051	0,37 (0,11) ⁹	0,95	1,9
Toluène	0,024	0,7	15	0,002 (0,2) ⁹	1,3	2,6
Éthylbenzène	0,0024	0,53	2,1	0,09 (0,025) ⁹	0,16	0,32
Xylènes	0,3	0,5	16	0,041	0,37	0,73
HAP reconnus cancérogènes						
Somation de 7 HAP ⁸		0,0000038	0,000018			
Autres HAP						
Acénaphène	0,02	0,67	0,99	0,038	0,1	0,2
Anthracène		8,3	40			
Chloronaphtalène, 1-				0,0025	0,057	0,11
Chloronaphtalène, 2-		1	1,6			
Fluoranthène		0,13	0,14	0,0016	0,014	0,028
Fluorène		1,1	5,3	0,012	0,11	0,22
Méthylnaphtalène, 2-		0,6	1			
Naphtalène	0,01	0,1	1,2	0,011	0,1	0,2
Phénanthrène				0,0014 (0,0046) ⁹	0,0047 (0,0077) ⁹	0,0094 (0,015) ⁹
Pyrène		0,83	4			

¹ Au-delà de cette concentration, les propriétés organoleptiques ou esthétiques de l'eau de consommation pourront être altérées.

² CPCEO : critère de prévention de la contamination (eau et organismes aquatiques).

³ CPCO : critère de prévention de la contamination (organismes aquatiques seulement).

⁴ CVAC : critère de la vie aquatique (effet chronique).

⁵ CVAA : critère de la vie aquatique (effet aigu).

⁶ VAF_e : valeur aiguë à l'effluent.

⁷ A partir des données disponibles, un critère de qualité opérationnel de 0,01 mg/L est recommandé pour les hydrocarbures pétroliers totaux.

⁸ Ce critère de qualité équivaut à un niveau de risque de un cas de cancer supplémentaire pour une population de un million d'individus exposés. Il s'applique à la somme des concentrations des sept HAP suivants considérés comme cancérogènes : benzo[a]anthracène, benzo[a]pyrène, benzo[b]fluoranthène, benzo[k]fluoranthène, chrysène, dibenzo[a,h]anthracène, indéno[1,2,3-cd]pyrène.

⁹ Les valeurs entre parenthèses sont appliquées aux eaux saumâtres et salées.

7 DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS RELATIFS AUX CRITÈRES DE QUALITÉ DES HYDROCARBURES PÉTROLIERS TOTAUX

Étant donné la multitude de molécules diverses qui peuvent être présentes dans les mélanges d'hydrocarbures pétroliers, il est impossible de les analyser toutes individuellement. Par ailleurs, l'analyse de quelques composés seulement ne permet pas de caractériser de manière adéquate les risques posés par tous les hydrocarbures pétroliers présents dans les mélanges qui peuvent être déversés (MADEP, 2001).

C'est pourquoi il est pratique d'analyser les hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) puisqu'une telle analyse prend en compte et intègre tous les composés présents. Toutefois, cette approche traditionnelle d'analyse des HPT offre peu ou pas d'informations sur la toxicité associée aux valeurs mesurées, car les effets peuvent varier passablement d'une molécule à l'autre. Aussi, l'estimation du risque écologique des produits pétroliers dans l'environnement, basée sur la seule valeur de HPT, est considérée comme une simplification excessive, pouvant contribuer à des erreurs dans l'estimation du risque (Batelle, 2007).

Les nouvelles approches visent à déterminer des classes d'hydrocarbures dont le comportement et la toxicité sont semblables afin d'améliorer la capacité d'estimer avec plus de précision le potentiel de risque écologique de l'ensemble des produits pétroliers présents dans l'environnement.

7.1 Fondements des développements récents : l'action narcotique des hydrocarbures

La majorité des développements relatifs aux critères de qualité des hydrocarbures pétroliers sont basés sur l'hypothèse que le mode d'action de ces substances est la narcose et que, de ce fait, c'est leur affinité pour les lipides biologiques présents dans les membranes cellulaires qui crée des différences entre leur toxicité spécifique. Les modèles de partition à l'équilibre, conçus notamment pour établir les critères de qualité des sédiments (Di Toro *et al.*, 2000 ; Di Toro et McGrath, 2000; USEPA, 2003, 2008), sont également fondés sur ce postulat.

La partie des hydrocarbures présents dans l'eau qui peut se lier aux lipides des membranes biologiques est estimée à l'aide du coefficient de partition octanol/eau (K_{oe}). Un tel facteur de partition est établi pour diverses molécules d'hydrocarbures. Ce coefficient est utilisé pour prévoir la toxicité des hydrocarbures chez les organismes aquatiques à partir des concentrations présentes dans l'eau (Di Toro *et al.*, 2000a).

Sur la base que tous les hydrocarbures ont une toxicité proportionnelle à leur liposolubilité (c'est-à-dire la solubilité dans les lipides des membranes cellulaires) (Di Toro *et al.*, 2007), les modèles de partition à l'équilibre (EqP) permettent d'estimer des valeurs de toxicité pour des classes d'hydrocarbures totaux ayant des valeurs de K_{oe} semblables, plutôt qu'uniquement pour des molécules individuelles.

C'est ainsi que plusieurs auteurs ont entrepris de déterminer des valeurs de toxicité pour des fractions plus ou moins fines d'hydrocarbures ayant des propriétés chimiques et toxicologiques similaires. Les développements récents permettent de définir des classes d'hydrocarbures basées sur la longueur de leurs chaînes de carbone, dont les effets attendus sur les organismes aquatiques sont semblables. Ainsi, au lieu de la seule valeur de référence actuelle pour les HP totaux, considérés dans la classe C₁₀-C₅₀ (dont la longueur des chaînes de carbone comprend de 10 à 50 atomes), des valeurs de référence sont maintenant proposées pour plusieurs classes, plus petites, et qui diffèrent selon qu'il s'agit d'hydrocarbures aliphatiques ou d'hydrocarbures aromatiques.

Prise en compte des effets autres que la narcose

D'autres effets nocifs connus ne sont pas couverts par le mode d'extrapolation de la toxicité basé sur la solubilité des fractions ou des molécules. Il est maintenant connu que la phototoxicité est un mécanisme non négligeable par lequel le rayonnement UV peut exacerber les propriétés toxiques des hydrocarbures pétroliers. Certains développements de seuils de toxicité incluent des facteurs de correction qui tiennent compte de ce phénomène (CE, 2011; Verbruggen, 2012).

De plus, pour les molécules ou les fractions qui semblent trop peu solubles pour exercer de la toxicité, il faut tenir compte des effets directs du recouvrement ou de l'engluement des organismes et des effets indirects liés à la baisse d'oxygène dissous causée par les hydrocarbures présents dans l'eau.

7.2 Valeurs de toxicité proposées pour des fractions d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques

7.2.1 Battelle (Massachusetts Department of Environmental Protection, États-Unis)

Battelle (2007) a analysé la base de données ECOTOX de la USEPA afin d'établir des classes de fraction d'hydrocarbures et d'y associer des valeurs seuils de toxicité. L'analyse a porté sur 754 données de toxicité aiguë et chronique associées à 25 molécules d'hydrocarbures aromatiques et 58 données de toxicité aiguë associées à 12 molécules d'hydrocarbures aliphatiques.

Pour chacun des groupes aliphatiques et aromatiques, la relation entre les valeurs de toxicité et le facteur de partition octanol/eau (K_{oe}) des molécules a permis d'établir une droite de régression. L'équation qui découle de chacune des droites a été utilisée pour déterminer les valeurs de concentrations létales (CL_{50}) d'une vaste gamme de molécules d'hydrocarbures pétroliers dont le facteur de partition octanol/eau (K_{oe}) est connu.

Des classes d'hydrocarbures ont ensuite été déterminées de façon à grouper les molécules d'hydrocarbures semblables (selon leur poids moléculaire) ayant des valeurs de toxicité semblables. C'est ainsi que, selon la longueur des chaînes de carbone, quatre classes de fractions aliphatiques et quatre classes de fractions aromatiques ont été établies. Pour chacune de ces classes, la moyenne géométrique des valeurs de CL_{50} a été calculée puis divisée par 15, pour définir une valeur chronique finale (FCV) (tableau 4).

TABLEAU 4 SEUILS DE TOXICITÉ CHRONIQUE (VALEURS CHRONIQUES FINALES) POUR QUATRE CLASSES D'HYDROCARBURES PÉTROLIERS (MG/L) (BATELLE, 2007)

Fractions d'hydrocarbures	Exemples de molécules d'hydrocarbures (nombre d'atomes de carbone)	Valeurs chroniques finales (mg/L)
Aliphatiques		
C5-C8	pentane (C5), hexane (C6), heptane (C7), octane (C8)	0, 22
C9-C12	méthyl-octane (C9), décane (C10), dodécane (C12)	0,0063
C13-C18	tridécanne (C13), 6-méthyl-tridécanne (C14)	0,00005
C19-C36	onadécane (C19), 2, 4, 6,- triméthyl nonadécane (C22)	0,00000012
Aromatiques		
C6-C8 (BTEX*)	benzène (C6), toluène (C7), éthylbenzène (C8) et xylène (C8)	1,19
C9-C12	naphthalène (C10), mono-méthyl- et diméthyl-naphthalènes (C11 et C12)	0,046
C13-C15	fluorène (C13), méthylfluorène (C14), phénanthrène (C14), anthracène (C14), méthyl phénanthrène/anthracène (C15), tri- et tétra-méthyl naphthalènes	0,0052
C16-C24	fluoranthène, pyrène (C16), benzo(a)pyrène (C20)	0,00012

* À cause du caractère volatil des BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylène), il est recommandé de les analyser à l'aide d'une méthode particulière pour les composés organiques volatils plutôt que par les analyses standards de fractions d'hydrocarbures.

7.2.2 Verbruggen (Pays-Bas)

Verbruggen et ses collaborateurs (2008) proposent également d'évaluer la toxicité des hydrocarbures pétroliers par l'analyse de fractions d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, déterminées en fonction du nombre d'atomes de carbone des molécules et de leur facteur de partition octanol/eau (K_{oe}). L'exercice permet de définir un nombre relativement grand de classes, plus fines, soit six fractions d'hydrocarbures aliphatiques et sept fractions d'hydrocarbures aromatiques (tableau 5).

Toujours selon le postulat que la toxicité des hydrocarbures pétroliers est de type narcotique (section 7.1), Verbruggen et ses collaborateurs (2008) déterminent deux valeurs de toxicité pour chacune des fractions d'hydrocarbures. La *concentration maximale permise* (*maximal permissible concentration* – MPC) correspond à la concentration potentiellement néfaste pour moins de 5 % des espèces (HC_5) et la *concentration associée à un risque écotoxicologique important* (*serious risk concentration* – SRC) correspond à la concentration potentiellement néfaste pour moins de 50 % des espèces (HC_{50}).

TABEAU 5 VALEURS SEUILS (MG/L) POUR LES FRACTIONS D'HYDROCARBURES ALIPHATIQUES ET AROMATIQUES DANS LES EAUX DE SURFACE (DOUCES ET SALÉES) PROPOSÉES PAR VERBRUGGEN ET AL. (2008)

Fractions d'hydrocarbures pétroliers	Concentration maximale permise (MPC)	Concentration causant un risque écotoxicologique important (SRC)
Aliphatiques		
C>5-C6	0,017	0,37
C>6-C8	0,0039	0,083
C>8-C10	0,00050	0,011
C>10-C12	0,000127	0,0027
C>12-C16	0,000071	0,0015
C>16-C21*	-	-
Aromatiques		
C>5-C7	0,123	2,6
C>7-C8	0,083	1,8
C>8-C10	0,055	1,2
C>10-C12	0,032	0,68
C>12-C16	0,014	0,29
C>16-C21	0,0038	0,080
C>21-C35	0,00032	0,0069

* Étant donné les faibles valeurs de solubilité associées aux hydrocarbures aliphatiques C>16-C21, il est attendu que les concentrations dans le milieu seront inférieures à celles susceptibles d'entraîner des impacts sur la vie aquatique.

7.2.3 Modèle PETROTOX (région de l'Atlantique, Canada)

La région de l'Atlantique (Atlantic PIRI, 2012, 2015) a également étudié la possibilité de déterminer des valeurs seuils de toxicité chronique pour la vie aquatique, pour des fractions d'hydrocarbures pétroliers basés sur la longueur des chaînes de carbone. L'objectif est de déterminer la concentration sous laquelle aucun effet délétère ne serait observé dans le milieu récepteur sur une longue période de temps. Le seuil de toxicité retenu pour répondre à cette préoccupation est la HC₅ chronique, soit la concentration qui peut exercer des effets délétères sur moins de 5 % des espèces.

Le calcul de cette valeur seuil est effectué à l'aide du modèle écotoxicologique PETROTOX. Il s'agit d'un modèle quantitatif QSAR (*Quantitative Structure Activity Relationship*) conçu pour simuler la conduite d'essais de toxicité aquatique afin d'étudier la concentration des fractions d'hydrocarbures pétroliers responsables des effets chroniques ou aigus sur les organismes aquatiques.

L'utilisation de ce modèle pour les hydrocarbures pétroliers tient compte des hypothèses suivantes :

- 1- Les hydrocarbures pétroliers exercent un effet toxique sur les organismes aquatiques par un mode d'action narcotique non polaire.
- 2- Les effets narcotiques des hydrocarbures pétroliers sont fonction de la charge corporelle.
- 3- L'effet d'un mélange d'hydrocarbures pétroliers est égal à la somme des effets de ses constituants individuels (toxicité additive).

Le modèle PETROTOX intègre les propriétés des hydrocarbures telles que leur point d'ébullition, leur solubilité dans l'eau et leur coefficient de partition octanol/eau (K_{oe}). La base de données, développée par l'entreprise CONCAWE (Conservation of Clean Air and Water in Europe), contient des données physicochimiques et des modèles de toxicité pour 1 457 structures d'hydrocarbures potentiellement présentes dans les produits pétroliers. Quarante-deux espèces d'organismes aquatiques de diverses communautés, des algues aux poissons, sont représentées.

Un intervalle de points d'ébullition est considéré pour chaque fraction d'hydrocarbures afin de leur attribuer leur valeur de solubilité dans l'eau et leur coefficient de partition octanol/eau (K_{oe}). Avec ces caractéristiques et un modèle de toxicité (*Target Lipid Model*), PETROTOX génère les valeurs seuils souhaitées (tableau 6) pour chaque fraction d'hydrocarbures à partir des valeurs de toxicité aiguë (CL₅₀) ou chronique (CSEO) calculées pour les 42 espèces aquatiques du modèle. Ces valeurs de toxicité sont utilisées pour établir des courbes de sensibilité des espèces aquatiques à divers produits pétroliers types (figure 4). Atlantic PIRI considère que les valeurs de toxicité générées par PETROTOX s'appliquent également aux eaux douces et aux eaux marines.

TABLEAU 6 : POINT D'ÉBULLITION ET VALEURS SEUILS DE TOXICITÉ AQUATIQUE DES FRACTIONS D'HYDROCARBURES (MG/L) CALCULÉS À PARTIR DU MODÈLE PETROTOX (ATLANTIC PIRI, 2012).

Fractions d'hydrocarbures pétroliers		Point d'ébullition (°C)	HC ₅ (chronique) <i>C. reinhardtii</i> (mg/L)	HC ₅₀ (chronique) <i>L. idus melanotus</i> (mg/L)	CL ₅₀ (aigu) <i>O. mykiss</i> (mg/L)
Aliphatiques	C ₅ -C ₆	33,8-68,2	2,35	10,4	20,2
	C ₆ -C ₈	68,2-127,5	0,36	1,6	3,1
	C ₈ -C ₁₀	127,5-178,4	0,033	0,15	0,28
	C ₁₀ -C ₁₂	178,4-221,8	0,0034	>0,034 ⁽¹⁾	>0,034 ⁽¹⁾
	C ₁₂ -C ₁₆	221,8-292,3	>0,00076 ⁽¹⁾	>0,00076 ⁽¹⁾	>0,00076 ⁽¹⁾
	C ₁₆ -C ₂₁	292,3-361,0	>0,000002 ⁽¹⁾	>0,000002 ⁽¹⁾	>0,000002 ⁽¹⁾
	C ₂₁ -C ₃₄	361,0-483,0	>0,000002 ⁽¹⁾	>0,000002 ⁽¹⁾	>0,000002 ⁽¹⁾

Fractions d'hydrocarbures pétroliers			Point d'ébullition (°C)	HC ₅ (chronique) <i>C. reinhardtii</i> (mg/L)	HC ₅₀ (chronique) <i>L. idus melanotus</i> (mg/L)	CL ₅₀ (aigu) <i>O. mykiss</i> (mg/L)
Aromatiques	BTEX	Benzène	77,8	2,1	9,1	17,5 (4,6) ⁽²⁾
		Toluène	117,6	0,77	3,35	6,4 (4,2) ⁽²⁾
		Éthylbenzène	139,7	0,32	1,39	2,7 (5,5) ⁽²⁾
		Xylènes	139,7-143,6	0,33	1,43	2,75
	C ₅ -C ₆		33,8-68,2	-	-	-
	C ₆ -C ₈		68,2-127,5	voir BTEX	voir BTEX	voir BTEX
	C _{>8} -C ₁₀		127,5-178,4	0,70	3,1	6,0
	C _{>10} -C ₁₂		178,4-221,8	0,23	1,00	2,00
	C _{>12} -C ₁₆		221,8-292,3	0,05	0,22	0,43
	C _{>16} -C ₂₁		292,3-361,0	0,011	>0,0136 ⁽¹⁾	>0,0136 ⁽¹⁾
	C _{>21} -C ₃₄		361,0-483,0	>0,000134 ⁽¹⁾	>0,000134 ⁽¹⁾	>0,000134 ⁽¹⁾

(1) Les valeurs précédées du symbole « > » indiquent que le seuil de toxicité prévu est supérieur à la valeur de solubilité prévue.

(2) Les valeurs entre parenthèses pour le benzène, le toluène et l'éthylbenzène représentent des valeurs de toxicité aiguë générées au laboratoire du CCME (2001) pour les espèces de salmonidés. Elles sont généralement en concordance avec les valeurs calculées par PETROTOX.

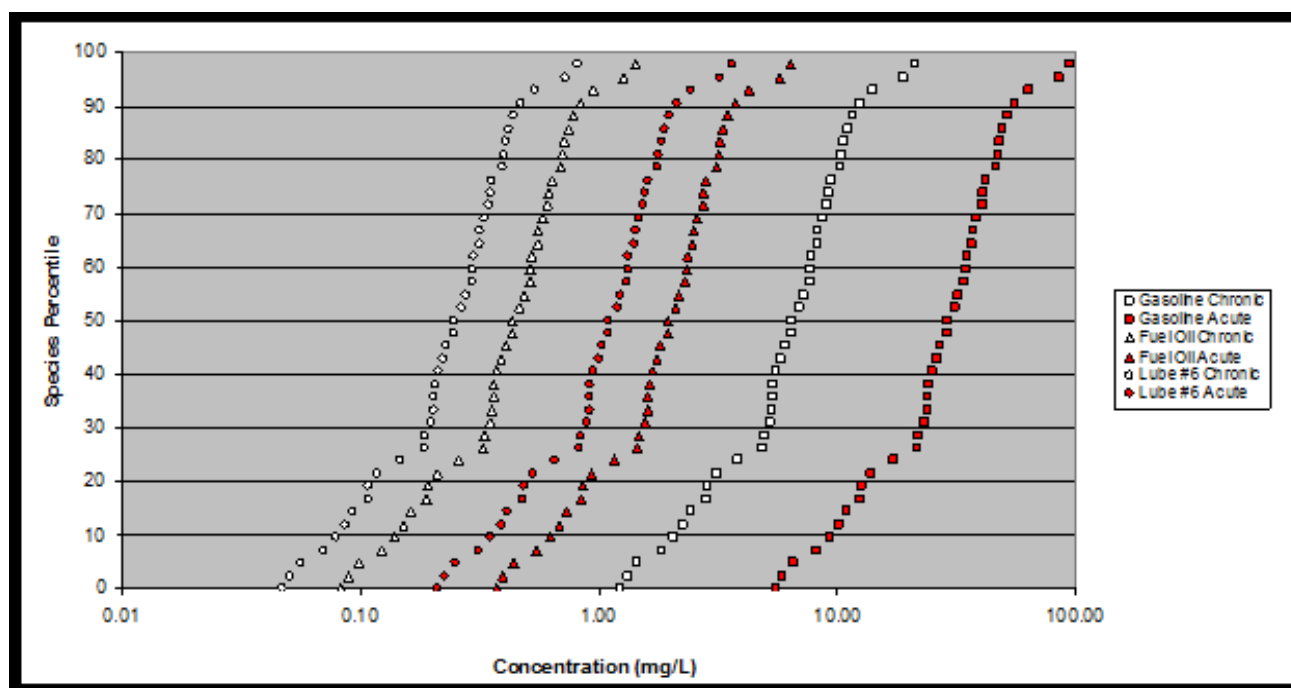


FIGURE 4 COURBES DE SENSIBILITÉ (TOXICITÉ AIGUË ET CHRONIQUE) DES ESPÈCES AQUATIQUES AUX PRODUITS TYPES D'HYDROCARBURES PÉTROLIERS (ATLANTIC PIRI, 2012)

8 DÉVELOPPEMENTS CONCERNANT LES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)

Les HAP constituent souvent les molécules les plus toxiques des produits pétroliers. Des critères de qualité ont été établis pour un bon nombre de HAP et des approches sont proposées pour tenir compte de l'additivité des effets de ces substances.

Il est maintenant connu que les HAP présents naturellement dans le pétrole sont en grande partie alkylés et que l'alkylation des molécules de HAP rend ces dernières plus toxiques que les HAP parents. Pour mieux tenir compte de ces effets, des critères de qualité pour les HAP alkylés, ainsi que des facteurs d'alkylation, ont notamment été établis.

8.1 États-Unis

Lors du déversement de Deepwater Horizon dans le golfe du Mexique en 2010, l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (USEPA) a sélectionné les outils qui permettent d'évaluer la qualité de l'eau et d'estimer les impacts potentiels sur la vie aquatique (USEPA, 2015). Ce sont les valeurs seuils pour la vie aquatique définies pour deux métaux (le nickel et le vanadium), pour les BTEX et pour les HAP. Aucun critère de qualité des hydrocarbures pétroliers totaux n'a été adopté par l'USEPA.

Des valeurs seuils de toxicité aiguë et chronique dans l'eau de surface, pour la vie aquatique, ont été déterminées pour 43 molécules d'hydrocarbures pétroliers (tableau 7), dont 34 HAP (18 HAP parents et 16 HP alkylés) (USEPA 2003, 2008). Aussi, l'USEPA (2015) a déterminé des facteurs d'alkylation qui peuvent être appliqués aux HAP parents lorsque les HAP alkylés ne sont pas analysés (annexe 2).

Les valeurs seuils pour la vie aquatique ont été définies sur la base de l'action narcotique des hydrocarbures pétroliers, selon l'hypothèse que la capacité de chacune des molécules d'hydrocarbures à se lier aux membranes cellulaires dépend principalement de leur coefficient de partition octanol/eau (K_{oe}) et que, conséquemment, deux substances ayant le même K_{oe} auront la même action sur le biote. Dans le modèle élaboré pour le calcul des valeurs seuils (USEPA, 2003), un grand nombre de données de toxicité aiguë (CL50) et les valeurs de K_{oe} des diverses molécules d'hydrocarbures ont été utilisées afin d'établir, à l'aide de plusieurs équations, une distribution des valeurs de toxicité normalisées pour $K_{oe} = 1$. Le cinquième centile de la distribution de ces données correspond à la valeur aiguë finale (VAF) normalisée pour $K_{oe} = 1$. Cette VAF est par la suite divisée par un ratio de toxicité aiguë-chronique pour obtenir la valeur chronique finale (VCF) normalisée pour $K_{oe} = 1$. Puis, des VCF spécifiques à chaque HAP sont établies à partir de la VCF normalisée sur la base de la relation entre la toxicité et la valeur de K_{oe} de chacune des molécules. Ces VCF deviennent les concentrations seuils d'effets chroniques (tableau 7). Des VAF spécifiques à chacune des molécules sont calculées à l'aide des VCF spécifiques et du ratio de toxicité aiguë-chronique préalablement déterminé. Les VAF sont divisées par un facteur 2 pour établir les concentrations seuils d'effets aigus (tableau 7).

TABLEAU 7 VALEURS SEUILS POUR LA VIE AQUATIQUE (MG/L) DÉFINIES PAR L'USEPA (2003, 2008) POUR LES HYDROCARBURES ALIPHATIQUES ET AROMATIQUES ET LEURS DÉRIVÉS ALKYLÉS DANS LES EAUX DE SURFACE, LORS DU DÉVERSEMENT DE PÉTROLE DE DEEPWATER HORIZON (USEPA, 2015)

Substances	Concentration d'effets aigus ⁽¹⁾	Concentration d'effets chroniques
Hydrocarbures aliphatiques		
Cyclohexane	0,95	0,374
Méthylcyclohexane	0,231	0,091
Hydrocarbures aromatiques monocycliques		
Benzène	13,5	5,3
Éthylbenzène	2,01	0,79

Substances	Concentration d'effets aigus ⁽¹⁾	Concentration d'effets chroniques
Isopropylbenzène	1,07	0,42
Toluène	4,07	1,6
m-xylène	1,78	0,70
o-xylène	1,78	0,70
p-xylène	1,78	0,70
Hydrocarbures aromatiques polycycliques		
Acénaphthène	0,116	0,0558
Acénaphthylène	0,64	0,307
Anthracène	0,0431	0,0207
Benzo(a)anthracène	0,00464	0,00223
Benzo(b)fluoranthène	0,00141	0,000677
Benzo(k)fluoranthène	0,00134	0,000642
Benzo(a)pyrène	0,00199	0,000957
Benzo(e)pyrène	0,00187	0,000901
Benzo(g,h,i)pérylène	0,00091	0,000439
Chrysène	0,00424	0,00204
Dibenzo(a,h)anthracène	0,00059	0,000282
Fluoranthène	0,0148	0,00711
Fluorène	0,0818	0,0393
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	0,00057	0,000275
Naphtalène	0,402	0,193
Pérylène	0,00187	0,000901
Phénanthrène	0,0398	0,0191
Pyrène	0,021	0,0101
Hydrocarbures aromatiques polycycliques alkylés		
C1-chrysène	0,00178	0,000856
C2-chrysène	0,001	0,000483
C3-chrysène	0,00035	0,000168
C4-chrysènes	0,00015	0,0000706
C1-fluorène	0,0291	0,014
C2-fluorène	0,011	0,0053
C3-fluorène	0,004	0,00192
C1-naphtalène	0,170	0,0817
C2-naphtalène	0,063	0,0302
C3-naphtalène	0,0231	0,0111
C4-naphtalène	0,0084	0,00405
C1-phénanthrène	0,0155	0,00744
C2-phénanthrène	0,00665	0,0032
C3-phénanthrène	0,00262	0,00126
C4-phénanthrène	0,00116	0,000559
C1-pyrène/fluoranthène	0,0102	0,00489

⁽¹⁾ En 2015, l'USEPA a publié un avis de correction des valeurs seuils d'effets aigus (USEPA, 2015). Les valeurs initialement calculées, correspondant à la valeur aiguë finale, devaient être divisées par un facteur 2 pour devenir la concentration seuil applicable dans le milieu. Les valeurs présentées ici correspondent à la VAF/2.

Ces valeurs seuils (tableau 7) sont comparées aux teneurs mesurées dans le milieu aquatique. L'approche conçue par l'USEPA pour l'application de ces valeurs tient compte de l'additivité des effets des hydrocarbures (USEPA, 2015). Cette approche consiste à diviser la concentration mesurée de chaque substance par les valeurs seuils de toxicité aiguë et chronique correspondantes afin d'obtenir un quotient de toxicité aiguë et un quotient de toxicité chronique pour chaque substance. Les valeurs de chaque quotient sont ensuite additionnées, séparément, pour la toxicité aiguë et pour la toxicité

chronique. Lorsque la somme des quotients est supérieure à 1, les teneurs en hydrocarbures pétroliers sont considérées comme supérieures aux limites de toxicité aiguë ou chronique, selon le cas. Un exemple de l'application de cette approche est présenté à l'annexe 2.

L'USEPA, en collaboration avec l'US Department of Health and Human Services, a également adopté des valeurs seuils pour la santé humaine afin d'estimer les risques potentiels d'une exposition à l'eau contaminée par le pétrole lors d'activités récréatives (USEPA, 2015). Ces valeurs seuils tiennent à la fois compte des contacts de la peau avec l'eau et de l'ingestion accidentelle de l'eau par des enfants qui se baignent. Elles sont basées sur les risques de cancer potentiels et sur les autres effets sur la santé associés à une exposition de 90 heures à l'eau contaminée par le pétrole dans le golfe du Mexique. De telles valeurs ont été établies pour deux métaux (le nickel et le vanadium) ainsi que pour les hydrocarbures aromatiques monocycliques (BTEX et cumène) et six hydrocarbures aromatiques polycycliques (tableau 8).

TABLEAU 8 VALEURS SEUILS POUR LA SANTÉ HUMAINE (MG/L) DÉFINIES POUR LES HYDROCARBURES ALIPHATIQUES ET AROMATIQUES ET LEURS DÉRIVÉS ALKYLÉS DANS LES EAUX DE SURFACE, LORS DU DÉVERSEMENT DE PÉTROLE DE DEEPWATER HORIZON (USEPA, 2015)

Substances	Valeurs seuils de santé humaine – baignade enfants (mg/L)	Notes
Hydrocarbures aromatiques monocycliques		
Benzène	0,38	1
Cumène	20	2
Éthylbenzène	0,61	1
Toluène	120	2
Xylènes	18	2
Hydrocarbures aromatiques polycycliques		
Acénaphthène	2,5	2
Anthracène	22	2
Benzo(a)anthracène	-	3
Benzo(b)fluoranthène	-	3
Benzo(k)fluoranthène	-	3
Benzo(a)pyrène	-	3
Chrysène	-	3
Dibenzo(a,h)anthracène	-	3
Fluoranthène	-	3
Fluorène	12	2
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	-	3
Naphtalène	1,8	2
Pyrène	4,1	2
Hydrocarbures aromatiques polycycliques alkylés		
2-Méthylnaphtalène	0,17	2

Notes 1 : Concentration pour un niveau de risque de cancer généralement acceptable.
 2 : Concentration pour un niveau acceptable d'effets autres que le cancer.
 3 : En développement.

8.2 Pays-Bas

Pour définir des valeurs seuils de risque environnemental (*environmental risk limits* – ERL) pour les eaux de surface des Pays-Bas, Verbruggen (2012) a analysé un grand nombre de données de toxicité se rapportant à seize hydrocarbures aromatiques polycycliques. Plusieurs de ces données se rapportent à la phototoxicité des HAP. Respectant le cadre méthodologique du projet *International and national environmental quality standards for substances in the Netherlands*, et en cohérence avec la directive-cadre sur l'eau de l'Union européenne, trois valeurs seuils de risque environnemental sont définies pour ces seize HAP (tableau 9) :

- La concentration maximale permise (*maximum permissible concentration* – MPC) : la concentration qui protège l'écosystème aquatique contre les effets d'une exposition à long terme (effets chroniques). La MPC correspond à la concentration potentiellement néfaste pour 5 % des espèces (HC₅), basée sur les données de toxicité chronique (CSEO ou CE₁₀). Les MPC sont déterminées à l'aide de la distribution de sensibilité des espèces et à l'aide de facteurs de sécurité établis en fonction de la qualité des données disponibles. La MPC peut être divisée par un facteur 100 pour définir une concentration d'effets négligeables (*negligible concentration* – NC), ajoutant ainsi une marge de sécurité supplémentaire pour se prémunir contre la présence simultanée de plusieurs contaminants.
- La concentration maximale acceptable (*maximum acceptable concentration* – MAC) : la concentration qui protège l'écosystème aquatique contre les effets d'une exposition de courte durée (effets aigus). La MAC correspond à la concentration potentiellement néfaste pour 5 % des espèces (HC₅), basée sur les données de toxicité aiguë (CL₅₀ ou CE₅₀). Les MAC sont déterminées à l'aide de la distribution de sensibilité des espèces et à l'aide de facteurs de sécurité établis en fonction de la qualité des données disponibles.
- La concentration causant un risque écotoxicologique important (*serious risk concentration* – SRC) : la concentration à partir de laquelle des effets écotoxicologiques importants sont attendus dans le milieu aquatique. La SRC correspond à la concentration potentiellement néfaste pour 50 % des espèces (HC₅₀), basée sur les données de toxicité chronique. Les SRC sont généralement déterminées par la moyenne géométrique des données de toxicité chronique.

Ces valeurs seuils de risque environnemental servent de base scientifique pour établir des critères de qualité environnementaux (*environmental quality standards* – EQS). La NC (MPC/100) peut être utilisée pour définir une valeur cible (*target value* – TV). Les MPC et MAC peuvent être utilisées comme critères de qualité générique. La SRC peut être utilisée pour définir une valeur d'intervention (*intervention value* – IV).

TABEAU 9 VALEURS SEUILS DE RISQUE ENVIRONNEMENTAL (ERL) DÉFINIES POUR LES ÉCOSYSTÈMES AQUATIQUES D'EAU DOUCE ET D'EAU SALÉE (MG/L) (VERBRUGGEN, 2012)

Hydrocarbures aromatiques polycycliques	Concentration maximale acceptable (MAC)		Concentration maximale permise (MPC)		Concentration causant un risque écotoxicologique important (SRC)
	Eau douce	Eau marine	Eau douce	Eau marine	
Naphtalène	0,13	0,13	0,002	0,002	0,52
Acénaphthylène	0,033	0,0033	0,0013	0,00013	0,072
Acénaphtène	0,0038	0,00076	0,0038	0,00038	0,10
Fluorène	0,034	0,0068	0,0015	0,0003	0,12
Phénanthrène	0,0067	0,0067	0,0011	0,0011	0,043
Antracène	0,00010	0,00010	0,0001	0,0001	0,0042
Pyrène	0,000023	0,000023	0,000023	0,000023	0,0042

Hydrocarbures aromatiques polycycliques	Concentration maximale acceptable (MAC)		Concentration maximale permise (MPC)		Concentration causant un risque écotoxicologique important (SRC)
	Eau douce	Eau marine	Eau douce	Eau marine	
Fluoranthène	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,012
Chrysène	0,00007	0,000007	0,00007	0,000007	0,0016
Benzo(a)anthracène	0,00010	0,00001	0,000012	0,0000012	0,0031
Benzo(k)fluoranthène			0,000017	0,000017	0,00093
Benzo(b)fluoranthène			0,000017	0,000017	0,0013
Benzo(a)pyrène	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00087
Benzo(g,h,i)perylène	0,0000082	0,00000082	0,0000082	0,00000082	0,00016
Dibenzo(a,h)anthracène	0,000014	0,0000014	0,0000014	0,00000014	0,00014
Indeno(1,2,3-cd)pyrène			0,0000027	0,00000027	0,00064

8.3 Union européenne

Le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne (UE, 2013) ont adopté des normes de qualité environnementales (NQE) dans les eaux de surface (eau douce et eau marine) pour le benzène et huit HAP (tableau 10).

TABLEAU 10 NORMES DE QUALITÉ ENVIRONNEMENTALES – NQE (MG/L) DE L'UNION EUROPÉENNE (2013) POUR QUELQUES HYDROCARBURES

Hydrocarbures pétroliers	Eau douce		Eau marine		Biote (mg/kg de poids humide)
	Concentration maximale admissible (CMA – toxicité aiguë)	Valeur moyenne annuelle (MA – toxicité chronique)	Concentration maximale admissible (CMA – toxicité aiguë)	Valeur moyenne annuelle (MA – toxicité chronique)	
Anthracène	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	-
Benzène	0,05	0,01	0,05	0,008	-
Fluoranthène	0,00012	0,0000063	0,00012	0,0000063	0,030
Naphthalène	0,13	0,002	0,13	0,002	-
HAP associés au benzo(a)pyrène					
benzo(a)pyrène	0,00027	0,00000017	0,000027	0,00000017	0,005
benzo(b)fluoranthène	0,000017	voir note*	0,000017	voir note*	voir note*
benzo(k)fluoranthène	0,000017	voir note*	0,000017	voir note*	voir note*
benzo(g,h,i)perylène	0,0000082	voir note*	0,00000082	voir note*	voir note*
indéno(1,2,3-cd)pyrène	-	voir note*	-	voir note*	voir note*

*Pour ce groupe d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), la norme pour le biote et la MA correspondante se rapportent à la concentration de benzo(a)pyrène, sur la toxicité duquel elles sont fondées. Le benzo(a)pyrène peut être considéré comme un marqueur des autres HAP et, donc, seul le benzo(a)pyrène doit faire l'objet d'une surveillance aux fins de la comparaison avec la norme pour le biote ou la MA correspondante.

Ces NQE ont été déterminés selon l'approche élaborée par la Commission européenne pour établir des critères de qualité environnementaux (CE, 2011). Des seuils de toxicité sont établis pour la protection de la vie aquatique à partir des effets toxiques observés sur divers organismes aquatiques. Des seuils de toxicité sont également établis pour le biote, sur la base de la bioaccumulation, afin de protéger les consommateurs secondaires (poissons, mammifères et oiseaux prédateurs) et les humains qui consommeraient des proies contaminées. Les seuils de toxicité pour le biote sont définis en termes de mg/kg de poids humide et peuvent être transposés en concentration équivalente dans l'eau (mg/L). Lorsque les seuils de toxicité établis pour le biote (mg/L) sont plus contraignants que ceux établis pour la protection de la vie aquatique, ils deviennent alors la valeur moyenne annuelle (MA – toxicité chronique), comme c'est le cas pour le fluoranthène. Les critères de toxicité pour le biote s'apparentent à nos critères de protection de la faune terrestre piscivore (CFTP), lorsque celle-ci s'avère la plus sensible, et aux critères de prévention de la contamination des organismes aquatiques (CPCO), lorsque ce sont les humains qui sont les plus à risque. Ainsi, les NQE pour les hydrocarbures pétroliers visent la protection des écosystèmes aquatiques dans leur intégralité. Par conséquent, les NQE sont fixées pour protéger l'usage le plus sensible, qu'il s'agisse des organismes aquatiques, des prédateurs qui s'en nourrissent, ou encore des humains pouvant consommer des ressources aquatiques.

9 CONCLUSION

Les développements récents en matière d'écotoxicologie des hydrocarbures pétroliers offrent des outils d'analyse et de gestion plus à jour qui permettront d'affiner et de compléter la liste de contaminants visés et les critères de qualité dont le Ministère dispose actuellement. Le but recherché est de concevoir des outils qui, dans une situation donnée, nous évitent de sous-estimer les impacts potentiels ou de surestimer les risques encourus.

Bien qu'il puisse demeurer pratique d'analyser les hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) par la fraction C₁₀-C₅₀, on peut déjà entrevoir l'utilisation de méthodes d'analyse plus précises. En effet, des critères de qualité basés sur des fractions plus fines d'hydrocarbures permettraient d'estimer la toxicité associée au mélange de molécules qui se trouve effectivement dans un rejet ou dans le milieu sans devoir présumer qu'il s'agit d'huile à chauffage ou de pétrole brut, par exemple. Cela est d'autant plus important que les produits pétroliers, comme les pétroles bruts, varient en composition selon leur origine et selon leur niveau d'altération dans l'environnement. Les développements récents du modèle de partition à l'équilibre, servant à expliquer le mécanisme de narcose associé aux hydrocarbures, permettent désormais d'élaborer des estimations de risque et des critères de qualité plus précis.

Des critères de qualité numériques ont été établis pour les molécules de HAP les plus étudiées. La présente revue a permis de constater que le nombre de contaminants visés par des critères de qualité demeure toutefois relativement restreint par rapport à la multitude de molécules présentes dans les hydrocarbures pétroliers. Néanmoins, les développements récents de l'USEPA visant la toxicité des HAP alkylés, particulièrement présents dans les pétroles bruts, devraient permettre d'estimer la toxicité d'une nouvelle classe de HAP jusqu'ici ignorée. Cette revue a également permis de répertorier des critères de qualité de l'eau intégrant le phénomène de la phototoxicité, qui engendre une augmentation de la toxicité de certains hydrocarbures pétroliers.

Méthodes analytiques

Compte tenu de la complexité des mélanges d'hydrocarbures pétroliers, les méthodes analytiques prennent une importance particulière lorsqu'il s'agit de mesurer les concentrations d'hydrocarbures dans les effluents ou dans le milieu aquatique. Des méthodes analytiques pour les hydrocarbures volatils comme les BTEX sont déjà disponibles. Pour les fractions d'hydrocarbures contenant un nombre d'atomes de carbone déterminé, des méthodes analytiques ont été mises au point et d'autres sont en cours de développement. Il est également souhaitable que des méthodes analytiques soient développées pour des molécules spécifiques, comme les HAP alkylés, afin d'en couvrir plus large qu'à l'heure actuelle.

Respect de tous les critères de qualité, narratifs, numériques, par classe ou spécifiques

Le Ministère verra à intégrer ces nouveaux outils dans son processus d'actualisation des critères de qualité de l'eau de surface et à les harmoniser avec le développement des analyses de laboratoire.

Pour s'assurer que les rejets ou les déversements d'hydrocarbures pétroliers ne portent pas atteinte aux usages de l'eau, le Ministère continuera d'utiliser une batterie de critères de qualité de l'eau de surface associés aux hydrocarbures pétroliers, qu'ils soient narratifs ou numériques, pour des classes d'hydrocarbures ou pour des molécules spécifiques. Le respect simultané de tous les critères de qualité de l'eau dans le milieu naturel permet de s'assurer que l'usage le plus sensible est protégé. L'établissement d'objectifs environnementaux pour des rejets contrôlés au milieu récepteur, définis à partir de ces critères de qualité améliorés, permettra au Ministère de mieux contrôler les rejets d'hydrocarbures, de protéger tous les usages de l'eau, ou de mieux évaluer les usages qui pourraient être les plus à risque.

10 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERSON, J.W. ET R.F. LEE, 2006. "Use of Biomarkers in Oil Spill Risk Assessment in the Marine Environment", *Human and Ecological Risk Assessment* 12 (6): 1192-1222.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). 1999. *Fate of Spilled Oil in Marine Waters: Where Does It Go? What Does It Do? How Do Dispersants Affect It? An Information Booklet for Decision-Makers*, Health and Environmental Sciences Department, Publication number 4691, 47 p.

ATLANTIC PARTNERSHIP IN RBCA IMPLEMENTATION (Atlantic PIRI), 2012. *Atlantic Risk-Based Corrective Action (RBCA), version 3, Ecological Screening Protocol for Petroleum Impacted Sites in Atlantic Canada, Scientific Rationale*, [En ligne], <http://www.atlanticrbca.com/>.

ATLANTIC PARTNERSHIP IN RBCA IMPLEMENTATION (Atlantic PIRI), 2012 (rev. en 2015). *Atlantic Risk-Based Corrective Action (RBCA), version 3, User Guidance*, [En ligne]. <http://www.atlanticrbca.com/>

BATTELLE, 2007. *Sediment Toxicity of Petroleum Hydrocarbon Fractions*, préparé pour Massachusetts Department of Environmental Protection, Office of Research and Standards, Boston. 28 p. + annexes.

BOEHM, P.D., ET D.S. PAGE, 2007. "Exposure Elements in Oil Spill Risk and Natural Resource Damage Assessments: A Review", *Human and Ecological Risk Assessment* 13: 418-448.

COMMISSION EUROPÉENNE (CE), 2011. *Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC) – Guidance Document No. 27 – Technical Guidance for Deriving Environmental Quality Standards*, Technical report, European Communities. 203 p.

DELEO, D.M., D.V. RUIZ-RAMOS, I.B. BAUMS ET E.E. CORDES, 2015. "Response of Deep-Water Corals to Oil and Chemical Dispersant Exposure", *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, [En ligne], <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2015.02.028>.

DI TORO, D.M., J.A. MCGRATH ET W. STUBBLEFIELD, 2007. "Predicting the Toxicity of Neat and Weathered Crude Oil: Toxic Potential and the Toxicity of Saturated Mixtures", *Environmental Toxicology and Chemistry* 26: 24-36.

DI TORO, D.M., J.A. MCGRATH ET D.J. HANSEN, 2000. "Technical Basis for Narcotic Chemicals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Criteria. I. Water and Tissue", *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19 (8): 1951-1970.

DI TORO, D.M. ET J. A. MCGRATH, 2000. "Technical Basis for Narcotic Chemicals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Criteria. II. Mixtures and Sediments", *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19 (8): 1971-1982.

DUPUIS, A. ET F. UCAN-MARIN, 2015. *Analyse documentaire de la toxicologie aquatique des huiles de pétrole : un aperçu des propriétés du pétrole et de ses effets sur le biote aquatique*, Secrétariat canadien de consultation scientifique du ministère des Pêches et des Océans, Document de recherche, 2015/007, vi + 55 p.

GALLAGHER A.F., ET N.B. POLA, 1984. *The Uptake and Depuration of Petroleum Hydrocarbons in Marine Species – A Simulation Study of the Uptake and Depuration of Petroleum Hydrocarbons and its Effect on Selected Marine Species in the Bristol Bay Ecosystem*, NWAFC Processed report 84-16, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service, Northwest and Alaska Fisheries Center, Resource Ecology and Fisheries Management Division, Seattle, Washington, 68 p.

GOUVERNEMENT DU CANADA (GC), 2015. « L'approche pour le secteur pétrolier », dans le portail *Substances chimiques*, [En ligne], <http://www.chemicalsubstanceschimiques.gc.ca/petrole/index-fra.php#prioritaires>.

JONSSON, G., R.K. BECHMANN, S.D. BAMBER ET T. BAUSSANT, 2004. "Bioconcentration, Biotransformation and Elimination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sheepshead Minnows (*Cyprinodon variegatus*) Exposed to Contaminated Seawater", *Environmental Toxicology and Chemistry* 23 (6): 1538-1548.

MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION (MADEP), 2002. *Characterizing Risks Posed by Petroleum Contaminated Sites: Implementation of the MADEP VPH/EPH Approach. Final Policy #WSC-02-411*. Octobre 2002, [En ligne], <http://www.mass.gov/eea/docs/dep/cleanup/laws/02-411.pdf>.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (2017). *Critères de qualité de l'eau de surface au Québec*, [En ligne]. http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/index.htm.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC (MENVIQ), 1990 (rév. 1992). *Méthodologie de calcul des critères de qualité de l'eau pour les substances toxiques*, Service d'évaluation des rejets toxiques, Direction de l'expertise scientifique, ministère de l'Environnement du Québec, Québec, 147 p., [En ligne], http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/1992_Metho_calcul_criteres.pdf.

NEFF, J.M., S. OSTAZESKI, W. GARDINER ET I. STEJSKAL, 2000. "Effects of Weathering on the Toxicity of Three Offshore Australian Crude Oils and a Diesel Fuel to Marine Animals", *Environmental Toxicology and Chemistry* 19, 1809–1821.

NEFF, J.M. 1990. "Composition and Fate of Petroleum and Spill-Treating Agents in the Marine Environment", *Sea Mammals and Oils: Confronting the Risks*, édité par J.R. Geraci et D.J. St-Aubin, Academic Press, p. 1-33.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA), 2014. *Deepwater Horizon: A Preliminary Bibliography of Published Research and Expert Commentary*, NOAA Central Library, [En ligne], <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/10854>.

PAINE, R.T., J.L. RUESINK, A.SUN, E.L. SOULANILLE, M.J. WONHAM, C.D.G. HARLEY, D.R. BRUMBAUGH ET D.L. SECORD. 1996. "Trouble on Oiled Waters: Lessons from the Exxon Valdez Oil Spill", *Annual Review of Ecology and Systematics* 27: 197-235.

PERHAR, G. ET G.B. ARHONDITSIS, 2014. "Aquatic Ecosystem Dynamics Following Petroleum Hydrocarbon Perturbations: A Review of the Current State of Knowledge", *Journal of Great Lakes Research* 40: 56-72.

UNION EUROPÉENNE, 2013. « Directive 2013/39/UE du Parlement européen et du Conseil du 12 août 2013 modifiant les directives 2000/60/CE et 2008/105/CE en ce qui concerne les substances prioritaires pour la politique dans le domaine de l'eau », *Journal officiel de l'Union européenne*.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), 2015. *Water Quality Benchmarks for Aquatic Life – EPA Response to BP Spill in the Gulf of Mexico*, [En ligne], <https://archive.epa.gov/emergency/bpspill/web/html/water-benchmarks.html>.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), 2008. *Procedures for the Derivation of Equilibrium Partitioning Sediment Benchmarks (ESBs) for the Protection of Benthic Organisms: Compendium of Tier 2 Values for Nonionic Organics*, EPA-600-R-02-016, Office of Research and Development, Washington.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), 2003. *Procedures for the Derivation of Equilibrium Partitioning Sediment Benchmarks (ESBs) for the Protection of Benthic Organisms: PAH Mixtures.*, EPA-600-R-02-013, Office of Research and Development, Washington.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), 1985. *Guidelines for Deriving Numerical National Water Quality Criteria for the Protection of Aquatic Organisms and their Uses*, PB85-227049, Washington, DC.

VERBRUGGEN, E.M.J., 2012. *Environmental Risk Limits for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) for Direct Aquatic, Benthic and Terrestrial Toxicity*, RIVM report 6077110007/2012, National Institute for Public Health and the Environment, Ministry of Health, Welfare and Sport, 337 p.

VERBRUGGEN, E.M.J., M. BEEK, J. PIJNENBURG ET T.P. TRAAS, 2008. "Ecotoxicological Environmental Risk Limits for Total Petroleum Hydrocarbons on the Basis of Internal Lipid Concentrations", *Environmental Toxicology and Chemistry* 27 (12): 2436-2448.

ANNEXE 1 SUBSTANCES PÉTROLIÈRES IDENTIFIÉES DANS LE CADRE DU PLAN DE GESTION DES PRODUITS CHIMIQUES DU GOUVERNEMENT DU CANADA (2015)

Tableau 1.1 Liste des substances de l'approche pour le secteur pétrolier, définie par le gouvernement du Canada en 2013 (GC, 2015)

Groupe 0 : Substances n'étant pas pertinentes pour le secteur pétrolier ou n'étant pas commercialisées	
N° CAS	Nom chimique
8007-45-2	Goudron de houille (charbon)
65996-89-6	Goudron de houille à haute température (charbon)
65996-93-2	Brai de goudron de houille à haute température
Groupe 1 : Substances restreintes aux installations, c'est-à-dire les substances qui ne devraient pas être transportées à l'extérieur d'une raffinerie, d'une usine de valorisation ou d'une usine de traitement du gaz naturel	
N° CAS	Nom chimique
64741-45-3	Résidus (pétrole), tour atmosphérique
64741-54-4	Naphta lourd (pétrole), craquage catalytique
64741-55-5	Naphta léger (pétrole), craquage catalytique
64741-61-3	Distillats lourds (pétrole), craquage catalytique
64741-64-6	Naphta à large intervalle d'ébullition (pétrole), alkylation
64741-74-8	Naphta léger (pétrole), craquage thermique
64741-80-6	Résidus (pétrole), craquage thermique
64742-22-9	Naphta lourd (pétrole), neutralisé chimiquement
64742-23-0	Naphta léger (pétrole), neutralisé chimiquement
64742-73-0	Naphta léger (pétrole), hydrodésulfuré
68307-99-3	Gaz de queue (pétrole), polymérisation catalytique de naphta, stabilisateur de colonne de fractionnement
68333-22-2	Résidus de distillation atmosphérique (pétrole)
68333-25-5	Distillats légers (pétrole), craquage catalytique, hydrodésulfuration
68333-27-7	Distillats intermédiaires (pétrole), craquage catalytique, hydrodésulfuration
68410-05-9	Distillats légers de distillation directe (pétrole)
68410-71-9	Raffinats (pétrole), reformage catalytique, extraction à contre-courant à l'aide d'un mélange éthylèneglycol-eau
68410-96-8	Distillats moyens hydrotraités (pétrole), à point d'ébullition intermédiaire
68476-26-6	Gaz combustibles
68476-32-4	Fioul, résidus-gazoles de distillation directe, à haute teneur en soufre
68476-46-0	Hydrocarbures en C3-11, distillats de produits de craquage catalytique
68476-49-3	Hydrocarbures en C2-4, riches en C3
68477-69-0	Gaz de tête (pétrole), colonne de séparation du butane
68477-71-4	Gaz de fond (pétrole), dépropanisation de gazole de craquage catalytique, riches en C4 et désacidifiés
68477-72-5	Gaz de queue (pétrole), débutanisation de naphta de craquage catalytique, riches en C3-5
68477-73-6	Gaz de tête (pétrole), dépropanisation du naphta de craquage catalytique, riches en C3 et désacidifiés
68477-75-8	Gaz (pétrole), craquage catalytique, riches en C1-5
68477-76-9	Gaz de tête (pétrole), stabilisation de naphta de polymérisation catalytique, riches en C2-4
68477-77-0	Gaz de tête (pétrole), rectification du naphta de reformage catalytique
68477-86-1	Gaz de tête (pétrole), déséthaniseur
68477-87-2	Gaz de tête (pétrole), colonne de déisobutanisation
68477-89-4	Distillats de tête (pétrole), dépentaniseur
68477-93-0	Gaz (pétrole), réabsorbeur de concentration des gaz, distillation
68477-97-4	Gaz (pétrole), riches en hydrogène
68478-00-2	Gaz de recyclage (pétrole), riches en hydrogène
68478-01-3	Gaz d'appoint (pétrole), reformage, riches en hydrogène
68478-05-7	Gaz (pétrole), distillation du craquage thermique
68478-12-6	Résidus (pétrole), fonds de colonne de séparation du butane
68478-17-1	Résidus (pétrole), gazole lourd de cokéfaction et gazole sous vide

68478-25-1	Gaz résiduels (pétrole), refractionnement du craquage catalytique, absorbeur
68478-29-5	Gaz résiduels (pétrole), hydrotraitement de distillat de craquage, séparateur
68478-32-0	Gaz résiduels (pétrole), mélange de l'unité de gaz saturés, riches en C4
68478-34-2	Gaz résiduels (pétrole), craquage thermique de résidus sous vide
68512-91-4	Hydrocarbures riches en C3-4, distillat de pétrole
68513-16-6	Gaz résiduels (pétrole), dépropaniseur d'hydrocraquage, riches en hydrocarbures
68513-17-7	Gaz résiduels (pétrole), stabilisateur de naphta léger de distillation directe
68513-02-0	Naphta de cokéfaction (pétrole), large intervalle d'ébullition
68513-18-8	Gaz résiduels (pétrole), effluent de reformage, ballon de détente à haute pression
68514-31-8	Hydrocarbures en C1-4
68514-36-3	Hydrocarbures en C1-4, adoucis
68514-79-4	Produits pétroliers, reformats Hydrofining-Powerforming
68527-16-2	Hydrocarbures en C1-3
68602-83-5	Gaz humides en C1-5 (pétrole)
68602-84-6	Gaz résiduels (pétrole), absorbeur secondaire, fractionnement des produits de tête du craquage catalytique fluide
68606-11-1	Essence de distillation directe, unité de fractionnement
68606-27-9	Gaz d'alimentation pour l'alkylation (pétrole)
68607-11-4	Produits pétroliers, gaz de raffinerie
68783-12-0	Naphta non adouci (pétrole)
68814-67-5	Gaz de raffinerie (pétrole)
68911-58-0	Gaz (pétrole), kérosène sulfureux hydrotraité, stabilisateur du dépentaniseur
68918-99-0	Gaz résiduels (pétrole), fractionnement de pétrole brut
68919-02-8	Gaz résiduels de fractionnement (pétrole), craquage catalytique fluide
68919-04-0	Gaz résiduels de rectification (pétrole), désulfuration par hydrotraitement de distillat lourd
68919-08-4	Gaz résiduels de prédistillation (pétrole), distillation du pétrole brut
68919-10-8	Gaz résiduels (pétrole), stabilisation des coupes de distillation directe
68919-37-9	Naphta de reformage (pétrole), large intervalle de distillation
68952-79-4	Gaz de queue (pétrole), séparateur de naphta d'hydrodésulfuration catalytique
68955-35-1	Naphta de reformage catalytique (pétrole)
101795-01-1	Naphta léger adouci (pétrole)
Groupe 2 : Substances restreintes aux industries, c'est-à-dire les substances qui peuvent quitter une installation du secteur pétrolier et être transportées dans d'autres installations industrielles pour être utilisées comme matières premières, carburants ou substances de base, mais qui ne se retrouvent pas sur le marché public dans leur forme originale	
N° CAS	Nom chimique
8002-05-9	Pétrole
64741-42-0	Naphta à large intervalle d'ébullition (pétrole), distillation directe
64741-59-9	Distillats légers (pétrole), craquage catalytique
64741-69-1	Naphta léger (pétrole), hydrocraquage
64741-75-9	Résidus (pétrole), hydrocraquage
64741-78-2	Naphta lourd (pétrole), hydrocraquage
64741-82-8	Distillats légers (pétrole), craquage thermique
68131-75-9	Gaz en C3-4 (pétrole)
68477-33-8	Gaz en C3-4 (pétrole), riches en isobutane
68477-85-0	Gaz (pétrole), riches en C4
68527-19-5	Hydrocarbures en C1-4, fraction débutanisée
68783-08-4	Gazoles atmosphériques lourds (pétrole)
70592-76-6	Distillats intermédiaires sous vide (pétrole)
70592-77-7	Distillats légers sous vide (pétrole)
70592-78-8	Distillats sous vide (pétrole)
Groupe 3 : Substances qui sont principalement utilisées par les industries et par les consommateurs comme carburants	
N° CAS	Nom chimique
8006-61-9	Essence naturelle

64741-41-9	Naphta lourd (pétrole), distillation directe
64741-86-2	Distillats moyens (pétrole), adoucis
64741-87-3	Naphta (pétrole), adouci
64742-80-9	Distillats moyens (pétrole), hydrodésulfurés
68334-30-5	Fuels, diesel
68476-30-2	Fioul, n° 2
68476-31-3	Fioul, n° 4
68476-34-6	Combustibles pour moteur diesel n° 2
68527-27-5	Naphta d'alkylation à large intervalle d'ébullition (pétrole), contenant du butane
68553-00-4	Fioul, n° 6
101316-57-8	Distillats moyens à large intervalle d'ébullition (pétrole), hydrodésulfurés
Groupe 4 : Substances qui peuvent être présentes dans les produits mis à la disposition des consommateurs	
N° CAS	Nom chimique
8009-03-8	Pétrolatum
8030-30-6	Naphta
8032-32-4	Ligroïne
8052-41-3	Solvant Stoddard
8052-42-4	Asphalte
64741-46-4	Naphta léger (pétrole), distillation directe
64741-47-5	Gaz naturel (pétrole), condensats
64741-48-6	Gaz naturel (pétrole), mélange liquide brut
64741-50-0	Distillats paraffiniques légers (pétrole)
64741-51-1	Distillats paraffiniques lourds (pétrole)
64741-52-2	Distillats naphténiques légers (pétrole)
64741-53-3	Distillats naphténiques lourds (pétrole)
64741-57-7	Gazoles lourds (pétrole), distillation sous vide
64741-62-4	Huiles clarifiées (pétrole), craquage catalytique
64741-63-5	Naphta léger (pétrole), reformage catalytique
64741-65-7	Naphta lourd (pétrole), alkylation
64741-66-8	Naphta léger (pétrole), alkylation
64741-67-9	Résidus de fractionnement (pétrole), reformage catalytique
64741-68-0	Naphta lourd (pétrole), reformage catalytique
64741-76-0	Distillats lourds (pétrole), hydrocraquage
64741-77-1	Distillats légers (pétrole), hydrocraquage
64741-81-7	Distillats lourds (pétrole), craquage thermique
64741-84-0	Naphta léger (pétrole), raffiné au solvant
64741-88-4	Distillats paraffiniques lourds (pétrole), raffinés au solvant
64741-89-5	Distillats paraffiniques légers (pétrole), raffinés au solvant
64741-91-9	Distillats moyens (pétrole), raffinés au solvant
64741-95-3	Huiles résiduelles (pétrole), désasphaltées au solvant
64741-96-4	Distillats naphténiques lourds (pétrole), raffinés au solvant
64741-97-5	Distillats naphténiques légers (pétrole), raffinés au solvant
64742-01-4	Huiles résiduelles (pétrole), raffinées au solvant
64742-04-7	Extraits au solvant (pétrole), distillat paraffinique lourd
64742-05-8	Extraits au solvant (pétrole), distillat paraffinique léger
64742-11-6	Extraits au solvant (pétrole), distillat naphténique lourd
64742-13-8	Distillats moyens (pétrole), traités à l'acide
64742-18-3	Distillats naphténiques lourds (pétrole), traités à l'acide
64742-30-9	Distillats moyens (pétrole), neutralisés chimiquement
64742-34-3	Distillats naphténiques lourds (pétrole), neutralisés chimiquement
64742-46-7	Distillats moyens (pétrole), hydrotraités
64742-48-9	Naphta lourd (pétrole), hydrotraité
64742-49-0	Naphta léger (pétrole), hydrotraité
64742-52-5	Distillats naphténiques lourds (pétrole), hydrotraités

64742-53-6	Distillats naphéniques légers (pétrole), hydrotraités
64742-54-7	Distillats paraffiniques lourds (pétrole), hydrotraités
64742-55-8	Distillats paraffiniques légers (pétrole), hydrotraités
64742-56-9	Distillats paraffiniques légers (pétrole), déparaffinés au solvant
64742-57-0	Huiles résiduelles (pétrole), hydrotraitées
64742-59-2	Gazoles sous vide (pétrole), hydrotraités
64742-61-6	Gatsch (pétrole)
64742-62-7	Huiles résiduelles (pétrole), déparaffinées au solvant
64742-63-8	Distillats naphéniques lourds (pétrole), déparaffinés au solvant
64742-65-0	Distillats paraffiniques lourds (pétrole), déparaffinés au solvant
64742-79-6	Gazoles (pétrole), hydrodésulfurés
64742-82-1	Naphta lourd (pétrole), hydrodésulfuré
64742-89-8	Solvant naphta aliphatique léger (pétrole)
64742-90-1	Résidus (pétrole), vapocraquage
64742-95-6	Solvant naphta aromatique léger (pétrole)
64743-01-7	Pétrolatum oxydé (pétrole)
68410-97-9	Distillats légers hydrotraités (pétrole), à bas point d'ébullition
68476-85-7	Gaz de pétrole liquéfiés
68476-86-8	Gaz de pétrole liquéfiés adoucis
68477-31-6	Distillats à bas point d'ébullition (pétrole), résidu de fractionnement du reformage catalytique
68919-39-1	Gaz naturel, condensats
68955-27-1	Distillats sous vide (pétrole), résidu de pétrole
72623-85-9	Huiles lubrifiantes (pétrole), C20-50, base huile neutre, hydrotraitement, viscosité élevée
72623-86-0	Huiles lubrifiantes (pétrole), C15-30, base huile neutre, hydrotraitement
72623-87-1	Huiles lubrifiantes (pétrole), C20-50, base huile neutre, hydrotraitement

Tableau 1.2 Liste des substances pétrolières incluses dans l'Avis concernant certaines substances pétrolières prioritaires de la Liste intérieure émis en juillet 2015 (GC, 2015)

N° CAS	Nom de la substance
8002-53-7	Cire de lignite
61789-60-4	Poix
64475-85-0	Essences de pétrole
64741-43-1	Gazoles (pétrole), distillation directe
64741-58-8	Gazoles légers (pétrole), distillation sous vide
64741-60-2	Distillats intermédiaires (pétrole), craquage catalytique
64741-72-6	Naphta (de pétrole), produit par polymérisation
64741-79-3	Coke (pétrole)
64741-83-9	Naphta lourd (pétrole), craquage thermique
64741-85-1	Raffinats (pétrole), adsorption
64741-92-0	Naphta lourd (pétrole), raffiné au solvant
64741-98-6	Extraits au solvant (pétrole), naphta lourd
64741-99-7	Extraits au solvant (pétrole), naphta léger
64742-03-6	Extraits au solvant (pétrole), distillat naphénique léger
64742-06-9	Extraits au solvant (pétrole), distillat moyen
64742-14-9	Distillats légers (pétrole), traités à l'acide
64742-31-0	Distillats légers (pétrole), neutralisés chimiquement
64742-38-7	Distillats moyens (pétrole), traités à la terre
64742-67-2	Huile de ressuage (pétrole)
64742-78-5	Résidus de tour atmosphérique (pétrole), hydrodésulfurés
64742-81-0	Kérosène (pétrole), hydrodésulfuré
64742-86-5	Gazoles lourds sous vide (pétrole), hydrodésulfurés
64742-91-2	Distillats (pétrole), vapocraquage
64742-96-7	Solvant naphta aliphatique lourd (pétrole)
64743-05-1	Coke calciné (pétrole)
67891-79-6	Distillats aromatiques lourds (pétrole)
68131-77-1	Distillats de vapocraquage (de pétrole) polymérisés
68187-58-6	Brai de pétrole aromatique
68333-26-6	Huiles clarifiées (pétrole), craquage catalytique, hydrodésulfuration
68333-81-3	Alcanes en C4-12
68333-88-0	Hydrocarbures aromatiques en C9-17
68410-00-4	Distillats (pétrole), pétrole brut
68410-98-0	Distillats de naphta lourd hydrotraité (pétrole), produits de tête du désisohexaniseur
68425-31-0	Essence naturelle (gaz naturel)
68425-35-4	Raffinats de reformage (pétrole), unité de séparation Lurgi
68425-94-5	Résidus (de pétrole) obtenus au cours de l'étape de fractionnement du reformage catalytique, polymérisés avec le formaldéhyde, sels de sodium
68475-70-7	Hydrocarbures aromatiques en C6-8, dérivés de pyrolysats de naphta et de raffinat
68476-44-8	Hydrocarbures supérieurs à C3
68476-55-1	Hydrocarbures riches en C5
68477-30-5	Distillats à point d'ébullition moyen (pétrole), résidu de fractionnement du reformage catalytique
68478-15-9	Résidus (pétrole), reformage catalytique de charges en C6-8
68512-62-9	Résidus légers sous vide (pétrole)
68512-78-7	Solvant naphta aromatique léger (pétrole), hydrotraité
68513-03-1	Naphta léger de reformage catalytique (pétrole), désaromatisé
68516-20-1	Naphta moyen aromatique (pétrole), vapocraquage
68527-21-9	Naphta de distillation directe à large intervalle d'ébullition (pétrole), traité à la terre
68527-22-0	Naphta léger de distillation directe (pétrole), traité à la terre
68647-60-9	Hydrocarbures supérieurs à C4
68782-99-0	Extraits au solvant d'huiles clarifiées lourdes (pétrole), contenant des aromatiques à noyaux condensés
68783-03-9	Extraits au solvant d'huiles clarifiées légères (pétrole), contenant des aromatiques à noyaux condensés
68814-87-9	Distillats moyens de distillation directe (pétrole), large intervalle d'ébullition

N° CAS	Nom de la substance
68814-89-1	Extraits (pétrole), désasphaltage au solvant de distillats paraffiniques lourds
68815-10-1	Pétrole sulfurisé
68915-96-8	Distillats lourds de distillation directe (pétrole)
68915-97-9	Gazoles de distillation directe (pétrole), fraction à point d'ébullition élevé
68920-06-9	Hydrocarbures en C7-9
68921-07-3	Distillats légers (pétrole), craquage catalytique, hydrotraitement
68921-08-4	Distillats (pétrole), produits de tête du stabilisateur, fractionnement d'essence légère de distillation directe
68955-36-2	Résidus de vapocraquage résineux (pétrole)
69013-21-4	Fioul, pyrolyse
70693-06-0	Hydrocarbures aromatiques en C9-11
70913-85-8	Résidus (de pétrole), résidu de distillation atmosphérique distillé sous vide puis extrait au solvant
90641-09-1	Extraits au solvant (pétrole), distillat paraffinique léger, hydrotraités
92704-36-4	Gazoles (pétrole), distillation directe, traités à la terre
93924-32-4	Huiles de ressuage (pétrole), traitées à l'argile
128683-24-9	Bitumes
128683-26-1	Distillats pétroliers (de sables bitumineux), toute plage de température, à la pression atmosphérique
129893-09-0	Résidus (pétrole), sous vide, hydrocraqué, fraction gazole
129893-21-6	Condensats de gaz naturel, distillats d'hydrocarbures en C4-12
129893-22-7	Condensats de gaz naturel, distillats d'hydrocarbures de C5-12

**ANNEXE 2 EXEMPLE DE L'APPLICATION DES VALEURS SEUILS POUR LA VIE AQUATIQUE LORS
DU DÉVERSEMENT DE DEEPWATER HORIZON, INTÉGRANT LES FACTEURS
D'ALKYLATION ET L'ADDITIVITÉ DES EFFETS DES HP (USEPA, 2015)**

Substances	Colonne A	Colonne B	Colonne C	Colonne D	Colonne E	Colonne F	Colonne G
	Concentration mesurée dans le milieu (mg/L)	Facteur d'alkylation	Concentration ajustée pour l'alkylation (mg/L)	Valeur seuils d'effets aigus ⁽¹⁾ (mg/L)	Valeurs seuils d'effets chroniques (mg/L)	Quotients de toxicité aiguë	Quotients de toxicité chronique
Acénaphthène	0	1	0	0,116	0,0558	0,00000	0,00000
Acénaphthylène	0	1	0	0,640	0,307	0,00000	0,00000
Anthracène	0	1	0	0,043	0,0207	0,00000	0,00000
Benzo(a)anthracène	0	1	0	0,00464	0,00223	0,00000	0,00000
Benzène	0	1	0	13,500	5,300	0,00000	0,00000
Benzo(a)pyrène	0	1	0	0,00199	0,000957	0,00000	0,00000
Benzo(b)fluoranthène	0	1	0	0,0014	0,000677	0,00000	0,00000
Benzo(e)pyrène	0	1	0	0,00187	0,000901	0,00000	0,00000
Benzo(g,h,i)pérylène	0	1	0	0,00091	0,000439	0,00000	0,00000
Benzo(k)fluoranthène	0	1	0	0,00134	0,000642	0,00000	0,00000
Chrysène	0	5	0	0,00424	0,00204	0,00000	0,00000
Cyclohexane	0	1	0	0,950	0,374	0,00000	0,00000
Dibenzo(a,h)anthracène	0	1	0	0,00059	0,000282	0,00000	0,00000
Éthylbenzène	0	1	0	2,010	0,790	0,00000	0,00000
Fluoranthène	0,0042	1	0,0042	0,0148	0,0071	0,28394	0,59072
Fluorène	0	14	0	0,0818	0,0393	0,00000	0,00000
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	0	1	0	0,00057	0,000275	0,00000	0,00000
Isopropylbenzène	0	1	0	1,070	0,420	0,00000	0,00000
Méthylcyclohexane	0	1	0	0,231	0,091	0,00000	0,00000
m-Xylène	0	1	0	1,780	0,700	0,00000	0,00000
Naphtalène	0,003	120	0,36	0,402	0,193	0,89656	1,86528
o-Xylène	0	1	0	1,780	0,700	0,00000	0,00000
Pérylène	0	1	0	0,00187	0,000901	0,00000	0,00000
Phénanthrène	0,0015	0,8	0,0102	0,0398	0,0191	0,25604	0,53270
p-Xylène	0	1	0	1,780	0,700	0,00000	0,00000
Pyrène	0,0012	2,1	0,0025	0,021	0,0101	0,11992	0,24950
Toluène	0	1	0	4,070	1,600	0,00000	0,00000
					TOTAL	1,556	3,238

⁽¹⁾ En 2015, l'USEPA a publié un avis de correction des valeurs seuils d'effets aigus (USEPA, 2015). Les valeurs initialement calculées, correspondant à la valeur aiguë finale (VAF), devaient être divisées par un facteur 2 pour devenir la concentration seuil applicable dans le milieu. Les valeurs présentées ici correspondent à la VAF/2.

Étape 1 : Multiplier la colonne A par la colonne B. Le résultat est la colonne C.

Étape 2a : Diviser la colonne C par la colonne D. Le résultat est la colonne F.

Étape 2b : Diviser la colonne C par la colonne E. Le résultat est la colonne G.

Étape 3a : Additionner les valeurs de la colonne F.

Étape 3b : Additionner les valeurs de la colonne G.

Interprétation des résultats :

Dans cet exemple, étant donné que la somme des quotients aigus et la somme des quotients chroniques sont toutes deux supérieures à 1, la teneur globale en hydrocarbures pétroliers (HP) serait considérée comme supérieure aux limites de toxicité aiguë et de toxicité chronique, et ce, en raison de l'additivité des effets des HP.



Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques

Québec

