

Tragédie ferroviaire de Lac-Mégantic

Évaluation *in situ* de la toxicité des sédiments de la rivière Chaudière pour les communautés de macroinvertébrés benthiques en 2016



Coordination et rédaction

Cette publication a été réalisée par la Direction générale du suivi de l'état de l'environnement du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). Elle s'inscrit dans le plan d'action mis en œuvre par le MDDELCC pour faire face au déversement de pétrole dans la rivière Chaudière survenu le 6 juillet 2013, lors de l'accident ferroviaire de Lac-Mégantic.

Renseignements

Pour tout renseignement, vous pouvez remplir le formulaire accessible à cette adresse :

www.mddelcc.gouv.qc.ca/formulaires/reenseignements.asp

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

Télécopieur : 418 646-5974

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

Direction générale du suivi de l'état de l'environnement
675, boulevard René-Lévesque Est, 7^e étage, boîte 22
Québec (Québec) G1R 5V7
Téléphone : 418 521-3820

Ce document peut être consulté sur le site du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques à l'adresse suivante :

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

Référence à citer

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2018. *Tragédie ferroviaire de Lac-Mégantic – Évaluation in situ de la toxicité des sédiments de la rivière Chaudière pour les communautés de macroinvertébrés benthiques en 2016*, Québec, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 25 p. + 4 ann.

Dépôt légal – 2018
Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN : 978-2-550-81139-8 (PDF)

Tous droits réservés pour tous les pays.

© Gouvernement du Québec – 2018

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Rédaction	Julie Moisan, spécialiste en sciences physiques ¹
Échantillonnage	René Therreault, technicien de la faune ¹ Sylvie Legendre, technicienne en environnement ¹ Julie Moisan, spécialiste en sciences physiques ¹
Laboratoire – taxonomie	Diane Grenier, technicienne de laboratoire ²
Révision scientifique	David Berryman, biologiste, M. Sc. ¹ Lyne Pelletier, biologiste, M. Sc. ¹ Mélanie Desrosiers, écotoxicologue, Ph. D. ³ Gaëlle Triffault-Bouchet, écotoxicologue, Ph. D. ³ Bernadette Pinel-Alloul, professeure titulaire ⁴ Frédérique Dechamplain, M. Sc. ⁵

¹ Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement

² Contrat personnel

³ Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec

⁴ Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie (GRIL), Université de Montréal, Département de sciences biologiques

⁵ Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des opérations régionales faune Estrie-Montréal-Montérégie

RÉSUMÉ

La catastrophe ferroviaire de Lac-Mégantic survenue le 6 juillet 2013 a entraîné un déversement de pétrole dans la rivière Chaudière, causant ainsi la contamination des sédiments. En 2014, un an après le déversement, un premier échantillonnage des communautés benthiques a permis de constater que celles-ci ont été touchées par le déversement. La présence d'hydrocarbures pétroliers dans des zones d'accumulation de sédiments a favorisé les oligochètes, alors que les diptères Chironomidae de la tribu des Chironomini semblaient sensibles aux hydrocarbures.

Un second échantillonnage a été effectué en 2016, aux mêmes stations qu'en 2014. Simultanément à l'échantillonnage des communautés benthiques, il y a eu récolte de sédiments pour en vérifier la contamination par les hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀ et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). À ce moment-là, le secteur initialement le plus contaminé (PK 4,5), où un enlèvement des sédiments a eu lieu à l'automne 2014, présentait certaines concentrations d'hydrocarbures pétroliers situées entre la valeur d'effets chroniques et celle d'effets aigus pour la protection de la vie aquatique ($164 \text{ mg/kg} < C_{10}\text{-}C_{50} \leq 832 \text{ mg/kg}$). Les concentrations des différents HAP étaient sous la concentration d'effets probables à toutes les stations.

En 2016, des signes de rétablissement des communautés de la rivière Chaudière sont observés :

1. L'abondance relative des oligochètes a diminué;
2. L'abondance relative des diptères Chironomidae a augmenté et leur communauté s'est complexifiée;
3. Quarante taxons, absents des échantillons de 2014, étaient présents dans ceux de 2016. Plusieurs de ces taxons appartiennent aux EPT (éphéméroptères, plécoptères et trichoptères), reconnus pour leur sensibilité aux perturbations;
4. L'abondance relative d'insectes a augmenté;
5. Les crustacés Gammaridae et Asellidae, considérés comme sensibles aux hydrocarbures, sont présents dans la majorité des échantillons;
6. Les mollusques pélicypodes de la famille des Sphaeriidae (*Pisidium*) sont plus abondants.

Le rétablissement des communautés benthiques à la suite d'un déversement pétrolier se déroule en quatre étapes. Tout porte à croire qu'en 2014, un an après le déversement, l'échantillonnage se situait dans la troisième phase de réponse, soit l'augmentation de taxons opportunistes, illustrée principalement par la prolifération des oligochètes. En 2016, trois ans après le déversement, il semble que l'échantillonnage se situe dans la quatrième phase de la séquence, qui correspond au déclin des taxons opportunistes et à la recolonisation par des taxons sensibles. L'abondance des oligochètes diminue, les communautés se diversifient et de nouveaux taxons apparaissent, dont certains sont reconnus pour leur sensibilité aux perturbations.

TABLE DES MATIÈRES

Mise en contexte _____	viii
1. Introduction _____	1
2. Méthodologie _____	2
2.1 Stations d'échantillonnage _____	2
2.2 Échantillonnage, traitement des échantillons et identification des macroinvertébrés benthiques _____	3
2.3 Échantillonnage des sédiments, classes de sédiments et physicochimie de l'eau _____	3
2.4 Analyse des données _____	4
3. Résultats et discussion _____	6
3.1 Caractérisation des sédiments et physicochimie de l'eau _____	6
3.2 Communautés de macroinvertébrés benthiques _____	9
3.3 Changement des communautés de 2014 à 2016 _____	12
3.4 Évolution de la contamination et rétablissement des communautés benthiques _____	18
4. Conclusion _____	21
5. Références bibliographiques _____	22
Annexes _____	26

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Coordonnées géographiques des stations _____	2
Tableau 2	Données physicochimiques prises <i>in situ</i> en 2016 _____	6
Tableau 3	Analyse granulométrique et concentrations d'hydrocarbures pétroliers C ₁₀ -C ₅₀ et de HAP _____	7
Tableau 4	Évolution des teneurs en hydrocarbures C ₁₀ -C ₅₀ de 2013 à 2016 _____	8
Tableau 5	Corrélations de Spearman entre la composition du substrat, le pourcentage de carbone organique total et les hydrocarbures pétroliers C ₁₀ -C ₅₀ _____	8
Tableau 6	Meilleurs taxons indicateurs des groupes issus du groupement hiérarchique _____	10
Tableau 7	Comparaison statistique des variables de communauté entre les deux campagnes d'échantillonnage _____	17

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Carte des stations d'échantillonnage des macroinvertébrés benthiques _____	2
Figure 2	Diagramme ternaire sable – limon – argile (Shepard, 1954) des textures sédimentaires aux stations ____	6
Figure 3	Corrélations entre les concentrations d'hydrocarbures pétroliers C ₁₀ -C ₅₀ et le carbone organique total, entre les hydrocarbures pétroliers C ₁₀ -C ₅₀ et le limon et entre le carbone organique total et le limon _____	8
Figure 4	Groupement hiérarchique des échantillons prélevés en 2014 et en 2016 _____	9
Figure 5	Distribution des valeurs a) du nombre de taxons et b) du nombre de taxons POET aux stations ____	12
Figure 6	Distribution des valeurs du pourcentage a) d'insectes et b) d'organismes EPT aux stations _____	13
Figure 7	Distribution des valeurs a) du pourcentage de diptères Chironomidae, b) du nombre de taxons Chironomidae et c) du nombre de taxons diptères aux stations _____	13
Figure 8	Distribution des valeurs du pourcentage a) de crustacés, b) de gastéropodes et c) de pélicypodes aux stations _____	14
Figure 9	Distribution des valeurs de pourcentage a) d'oligochètes et b) du taxon dominant aux stations ____	15
Figure 10	Histogramme cumulé des sous-familles de Chironomidae présentes dans les échantillons _____	16
Figure 11	Histogramme cumulé des tribus de Chironominae présentes dans les échantillons _____	17
Figure 12	Pourcentage et nombre de taxons d'insectes fouisseurs par station (moyenne des trois échantillons) en 2014 et en 2016 _____	18

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1	Sédiments échantillonnés dans la rivière Chaudière en 2016 – variables et méthodes d'analyse	26
Annexe 2	Liste des variables de communauté évaluées et des abréviations utilisées	27
Annexe 3	Liste de taxons	28
Annexe 4	Variables de communauté calculées par échantillon	30

MISE EN CONTEXTE

Le 6 juillet 2013, un train de 72 wagons transportant 7,679 millions de litres de pétrole brut a déraillé dans le centre-ville de Lac-Mégantic. Un incendie s'est déclaré, provoquant des explosions ainsi qu'un déversement de pétrole et l'émission d'autres contaminants dans l'environnement. Des quelque 6 millions de litres de pétrole déversés ou brûlés, il a été estimé qu'environ 100 000 litres se sont répandus dans la rivière Chaudière, dont la tête est située à Lac-Mégantic.

Au cours de l'été et de l'automne 2013, des équipes ont nettoyé, autant que possible, le littoral et le fond de la rivière par des méthodes manuelles. Durant l'automne 2014, des sédiments ont été retirés du secteur le plus contaminé de la rivière, situé 4,5 km en aval du lac Mégantic. De 2013 à 2016, un grand nombre d'observations visuelles et d'échantillonnages ont été réalisés pour évaluer le niveau et l'étendue de la contamination du milieu par le pétrole et ses produits dérivés.

En janvier 2014, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) a confié au Comité expert sur la contamination résiduelle de la rivière Chaudière par les hydrocarbures pétroliers (Comité expert) le mandat de dégager un état de situation de la rivière sur la base des résultats obtenus en 2013, de déterminer les conséquences potentielles du déversement sur l'écosystème et d'élaborer un plan de gestion de la contamination résiduelle. Le plan proposé par le Comité expert a été adopté par le MDDELCC, qui l'a rendu public le 12 mai 2014 et mis en œuvre en 2014-2015 (MDDELCC, 2014).

Un deuxième plan d'action, visant trois objectifs et comprenant neuf projets, a été lancé en 2015 (MDDELCC, 2015a). Issu de ce deuxième plan d'action, le présent rapport fait notamment état des résultats du projet numéro 2.2, intitulé *Étude post-intervention des communautés benthiques dans le secteur du point kilométrique (PK) 4,5 en 2016*. Or, depuis l'annonce du plan d'action, ce projet a vu sa portée élargie pour comprendre des échantillonnages dans d'autres secteurs que le PK 4,5. Il est à noter que ce rapport est le second à porter sur les communautés benthiques des zones d'accumulation de sédiments fins. Un premier rapport sur ces zones a été rendu public en 2016 (MDDELCC, 2016a) et trois autres rapports sur les communautés de substrats grossiers ont été diffusés (Grenier, 2014a; MDDELCC, 2016b, 2017a).

1. INTRODUCTION

Ce rapport fait suite à une étude effectuée en 2014 dans laquelle la composition des communautés benthiques de huit stations situées dans des zones d'accumulation de sédiments avait été mise en relation avec la contamination des sédiments par les hydrocarbures pétroliers. Les résultats montraient les effets qu'avait occasionnés cette contamination sur les communautés benthiques en place. En 2014, la présence d'hydrocarbures pétroliers avait favorisé les annélides oligochètes, alors que les diptères Chironomidae de la tribu des Chironomini semblaient sensibles aux hydrocarbures (MDDELCC, 2016a).

La présente étude décrit les résultats d'un échantillonnage effectué en juin 2016 aux mêmes huit stations qu'en 2014. L'échantillonnage s'est donc déroulé trois années après le déversement. L'ensemble des stations étudiées sont situées dans les 10 premiers kilomètres de la rivière, qui prend sa source dans le lac Mégantic. De 2013 à 2016, la contamination des sédiments de ces kilomètres de rivière a diminué, mais des concentrations supérieures à la valeur de référence pour les effets aigus (VRA) sont encore observées dans les 8,6 premiers kilomètres (MDDELCC, 2017b). Parmi les stations échantillonnées, trois sont situées à 4,5 km du barrage de Lac-Mégantic (PK 4,5), secteur le plus contaminé en 2013 et en 2014. À l'automne 2014, des sédiments contaminés ont été retirés de ce secteur. Une caractérisation après dragage a montré une baisse notable des teneurs en hydrocarbures pétroliers dans les sédiments, la plus grande partie du secteur se caractérisant alors par des teneurs sous la valeur de référence pour les effets chroniques (VRC), de 164 mg/kg (WSP, 2017; MDDELCC, 2017c).

La restauration du secteur du PK 4,5 a été achevée au début de l'été 2015 avec la remise en état des lieux et la végétalisation des berges. Une caractérisation subséquente a montré une contamination résiduelle en hydrocarbures pétroliers supérieure à celle observée immédiatement après le dragage de 2014, mais nettement inférieure à celle qui avait cours avant celui-ci (WSP, 2017; MDDELCC, 2017c). Une autre caractérisation, réalisée en 2016, a montré une nouvelle diminution des concentrations, avec une baisse du nombre de stations en dépassement de la VRC ou de la VRA, ainsi qu'une diminution marquée (près de neuf fois) de la valeur médiane des teneurs en hydrocarbures. Malgré cette diminution, il persiste, dans le secteur du PK 4,5 comme dans certaines autres zones d'accumulation de sédiments fins, des endroits où les teneurs en hydrocarbures pétroliers sont élevées (WSP, 2017).

Cette étude a pour objectif de suivre l'évolution des communautés benthiques dans des zones d'accumulation de sédiments échantillonnées en 2014, dont le secteur du PK 4,5. Elle vise plus précisément à évaluer si l'état des communautés benthiques de ces zones s'est amélioré en 2016 à la suite de la diminution de la contamination des sédiments.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Stations d'échantillonnage

Le territoire étudié se situe dans la région naturelle des Appalaches dans le secteur de la haute Chaudière. Les stations échantillonnées en 2016 sont les mêmes qu'en 2014. Leurs positions respectives sont indiquées dans le tableau 1 et la figure 1.

Tableau 1 Coordonnées géographiques des stations

Station	N° BQMA ¹	PK ²	Latitude NAD 83	Longitude NAD83	Niveau de contamination considéré en 2014
282	02340276	1,2	45,58216	-70,87526	Référence
48-49	02340274	4,0	45,59387	-70,85897	Contaminé
DR41	02340270	4,5	45,59845	-70,86312	Contaminé
DR42	02340271	4,5	45,59841	-70,86346	Contaminé
DR49	02340272	4,5	45,59885	-70,86415	Contaminé
STA-6A ³	02340277	5,0	45,59889	-70,85896	Contaminé
24	02340275	5,2	45,59835	-70,85743	Contaminé
121	02340273	9,0	45,62460	-70,85418	Référence

¹ N° BQMA : numéro de la station dans la banque de la qualité du milieu aquatique du MDDELCC

² PK : point kilométrique, c.-à-d. la distance à partir du barrage de Lac-Mégantic

³ Nom d'origine abrégé par 6A dans ce document

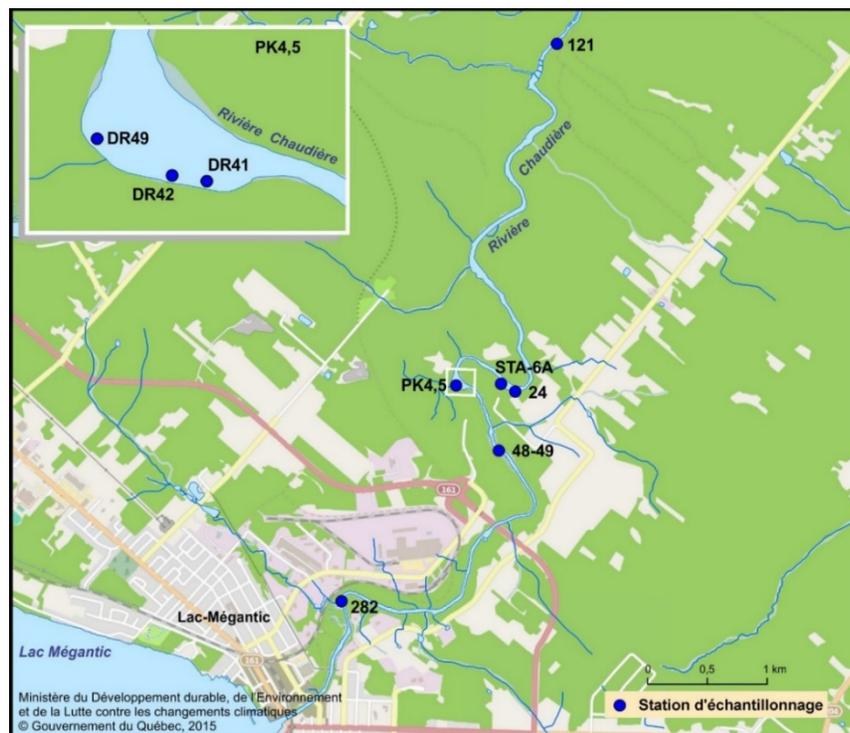


Figure 1 Carte des stations d'échantillonnage des macroinvertébrés benthiques

2.2 Échantillonnage, traitement des échantillons et identification des macroinvertébrés benthiques

En 2014, les stations situées dans le secteur du PK 4,5 (DR41, DR42 et DR49) avaient été échantillonnées en juin afin qu'il soit possible d'évaluer l'état des communautés benthiques avant que ce secteur ne subisse des travaux d'enlèvement des sédiments contaminés, lesquels ont été réalisés à l'automne. Les autres stations, elles, avaient été échantillonnées en octobre 2014. En 2016, tous les échantillons ont été prélevés en juin selon la recommandation de MDDELCC, 2016a.

À chaque station, trois échantillons ont été prélevés à l'aide d'une benne Eckman standard (6 x 6 x 6 pouces) montée sur une tige de métal. L'échantillonnage a été fait à gué dans des zones peu profondes de la rivière. La benne y était enfoncée dans le substrat meuble en amont de l'opérateur. Une fois bien fermée, la benne était sortie délicatement de l'eau et son contenu était transféré dans une chaudière à fond grillagé de 540 µm de maille. Le contenu de la chaudière était ensuite tamisé pour que soit éliminée une partie des sédiments fins, puis transféré dans des pots. L'agent de conservation utilisé était l'alcool éthylique à 95 % de volume, préalablement coloré avec du rose bengale. Un minimum de concentration de 70 % de volume d'alcool était visé pour la conservation des échantillons. Chacun des échantillons, a été identifié par le numéro de station et les répliqués ont été désignés par les lettres A, B et C. La distance entre les répliqués variait de un à quelques mètres, sauf pour l'échantillon C de la station 48-49 en 2014, qui se situait à une trentaine de mètres des deux autres échantillons.

En laboratoire, une inspection visuelle des échantillons a visé à évaluer le pourcentage de substrat composé de copeaux de bois. Ce matériau avait en effet été observé dans certains échantillons prélevés en 2014. Ensuite, les échantillons ont été tamisés sur une maille de 600 µm. Le tri et l'identification des macroinvertébrés benthiques ont été effectués sous une loupe binoculaire. Tous les organismes contenus dans les échantillons ont été identifiés, et ce, majoritairement au niveau taxonomique du genre. À noter que les oligochètes ont été identifiés comme tels (classe) et que les diptères Chironomidae ont été identifiés au niveau de la tribu (Chironomini, Tanytarsini et Pentaneurini) ou de la sous-famille. L'identification des insectes est basée sur les clés taxonomiques présentées par Merritt et collab. (2008). L'identification des autres organismes se fonde sur les clés présentées par Smith (2001).

2.3 Échantillonnage des sédiments, classes de sédiments et physicochimie de l'eau

À chacune des stations, simultanément à l'échantillonnage des macroinvertébrés benthiques, un échantillon de sédiments a été prélevé. Le matériel utilisé, soit une benne Eckman standard, un contenant et une cuillère en acier inoxydable, a été décontaminé en laboratoire avant l'échantillonnage. Ce matériel a été lavé avec du détergent décontaminant et rincé à l'eau déminéralisée entre chaque station. Trois prélèvements de sédiments, effectués à proximité des lieux de prélèvement des organismes benthiques, ont été homogénéisés pour constituer un échantillon composite représentatif de la station. Les échantillons prélevés ont été conservés au frais jusqu'à leur livraison au Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ). L'annexe 1 présente les variables mesurées ainsi que les méthodes analytiques utilisées pour les analyses.

Les valeurs de référence retenues pour les hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀ sont celles suggérées dans MDDEFP, 2013a :

- la valeur de référence – effets chroniques (VRC) : 164 mg/kg d'hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀
- la valeur de référence – effets aigus (VRA) : 832 mg/kg d'hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀

Les classes retenues sont tirées de MDDELCC, 2015b :

- C₁₀-C₅₀ ≤ VRC – sédiment de classe 1
- VRC < C₁₀-C₅₀ ≤ VRA – sédiment de classe 2
- C₁₀-C₅₀ > VRA – sédiment de classe 3

Les critères utilisés pour les HAP sont ceux suggérés par EC et MDDEP (2007) :

- la concentration d'effets probables (CEP)
- la concentration d'effets fréquents (CEF)

Les classes retenues sont tirées de MDDELCC, 2015b :

- concentration HAP ≤ CEP – sédiment de classe 1
- CEP < concentration HAP ≤ CEF – sédiment de classe 2
- concentration HAP > CEF – sédiment de classe 3

En 2016, des données de qualité de l'eau ont également été récoltées à chacune des stations à l'aide d'une sonde YSI556. Il s'agit de données de température, d'oxygène dissous, de conductivité et de pH.

2.4 Analyse des données

Sédiments

Un diagramme ternaire est présenté pour permettre de visualiser les textures sédimentaires. Cette méthode est utile dans les domaines où l'on travaille avec trois éléments dont les proportions varient et dont la somme fait 100 %. Elle est utilisée ici pour illustrer la répartition des pourcentages d'argile, de limon et de sable à chaque station. Plus un point est situé à proximité d'un apex du triangle, plus l'élément associé à cet apex est important dans la composition du sédiment. Ce diagramme a été réalisé à l'aide du logiciel SigmaPlot 11.0.

Des nuages de points accompagnés de courbes de corrélation sont utilisés pour représenter les liens entre certaines caractéristiques du sédiment.

Macroinvertébrés benthiques

Plusieurs variables exprimant différents aspects de la structure de la communauté benthique ont été calculées (annexe 2). Elles se répartissent dans trois grandes catégories : mesure de richesse taxonomique, composition taxonomique et tolérance à la pollution (MDDEFP, 2013b). Les plus pertinentes sont illustrées à l'aide de nuages de points et d'histogrammes.

Classification des communautés de macroinvertébrés benthiques et taxons indicateurs

Les analyses de description des communautés benthiques ont été réalisées à partir de l'abondance relative des taxons présents dans chacun des échantillons et ont été exécutées avec le logiciel PC-ORD, version 5.

L'analyse de groupement sert à visualiser les liens hiérarchiques unissant les communautés de différents échantillons. Elle groupe donc les communautés qui partagent des caractéristiques communes. Le type de lien choisi est le groupement à liaison moyenne (*unweighted arithmetic average clustering* ou *unweighted pair-group method using arithmetic average* [UPGMA]; Legendre et Legendre, 1998), associé à une distance de Sorensen (coefficient de Bray-Curtis, qui mesure le pourcentage de dissimilarité).

La procédure de permutation à réponses multiples (PPRM; *multiple response permutation procedure* [MRPP]) permet d'évaluer si les groupes obtenus sont significativement différents. La PPRM est un test non paramétrique permettant d'évaluer la capacité d'une classification à maximiser la similarité à l'intérieur d'un groupe et à minimiser la similarité entre les groupes, à partir du calcul de la statistique d'agrément à l'intérieur d'un groupe (A) et de la valeur de signification p associée (Mielke et Berry, 1982). Le calcul de la PPRM a utilisé la distance de Sorensen (Bray-Curtis). La statistique A décrit l'homogénéité à l'intérieur d'un groupe en la comparant à ce qui est attendu du hasard. Si tous les taxons sont identiques à l'intérieur des groupes, alors $A = 1$, ce qui est la plus haute valeur possible. Si l'hétérogénéité à l'intérieur des groupes est égale à ce qui peut être obtenu par hasard, alors $A = 0$. Avec des données écologiques, les valeurs sous 0,1 sont communes et une valeur supérieure à 0,3 est considérée comme élevée. La valeur de probabilité (p) détermine si les groupes sont significativement différents. Une valeur de $p < 0,0002$ est considérée comme significativement différente de ce qui peut être attendu du hasard (Mazor et collab., 2006).

L'analyse de taxons indicateurs (*indicator species analysis*) combine des informations sur l'abondance et la fidélité de la présence d'un taxon dans un groupe particulier. Un taxon indicateur caractérise un groupe d'échantillons. Un bon taxon indicateur devrait se trouver surtout dans un seul groupe et être présent à la plupart des sites qui appartiennent à ce groupe (Dufrêne et Legendre, 1997; Legendre et Legendre, 2012). La valeur indicatrice de chaque taxon est calculée pour chacun des groupes. Les valeurs indicatrices (VI) des taxons s'échelonnent de 1 à 100, 1 représentant un taxon qui n'est pas indicateur et 100, un taxon qui est un très bon indicateur. Cette analyse s'accompagne d'une probabilité.

Ces analyses ont été exécutées avec le logiciel PC-ORD, version 5 (McCune et Mefford, 1999).

Test de Wilcoxon pour échantillons appariés

Le test de Wilcoxon pour échantillons appariés (*signed-rank*) est utilisé (SYSTAT, version 13) afin de comparer une valeur quantitative continue pour deux échantillons reliés, donc dépendants. Ce test est analogue au test paramétrique de Student pour échantillons appariés (*paired t-test*). Dans cette étude, la valeur moyenne des trois échantillons donne lieu à une valeur moyenne par station. Certaines variables de communauté des stations échantillonnées en 2014 et en 2016 ont ainsi été comparées. Cette analyse sert à évaluer la signification de différences observées entre les résultats des deux années. Compte tenu du faible nombre de données, elle est présentée à titre indicatif.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Caractérisation des sédiments et physicochimie de l'eau

Pour une meilleure compréhension de l'environnement auquel étaient exposés les organismes benthiques, des données concernant la physicochimie de l'eau ont été prises (tableau 2) et des analyses de caractérisation des sédiments ont été effectuées.

Tableau 2 Données physicochimiques prises *in situ* en 2016

Station	Température (°C)	Oxygène dissous (mg/l)	Conductivité spécifique (µs/cm)	pH
282	18,2	6,94	550,9	7,53
48-49	17,8	8,01	158,0	7,61
DR41	15,0	7,72	73,6	7,21
DR42	15,1	7,32	79,0	7,05
DR49	15,1	8,14	72,9	7,26
6A	15,6	9,06	100,5	7,77
24	17,4	8,63	595,3	7,62
121	16,7	8,91	74,3	7,60

En 2014, aucun échantillon de sédiments n'avait été prélevé en vue d'analyses granulométrique et de contamination lors de l'échantillonnage de benthos. Les résultats de la figure 2 et du tableau 3 présentent donc les résultats de l'année 2016. Il s'agit, pour chacune des stations, d'un échantillon composite de trois prélèvements effectués à proximité des échantillons prélevés pour les organismes benthiques.

Les sédiments aux stations échantillonnées sont majoritairement composés de sable, comme l'atteste la figure 2. La station 24 diffère, avec plus de 80 % d'argile. Le limon dominait aux stations 282 et DR42.

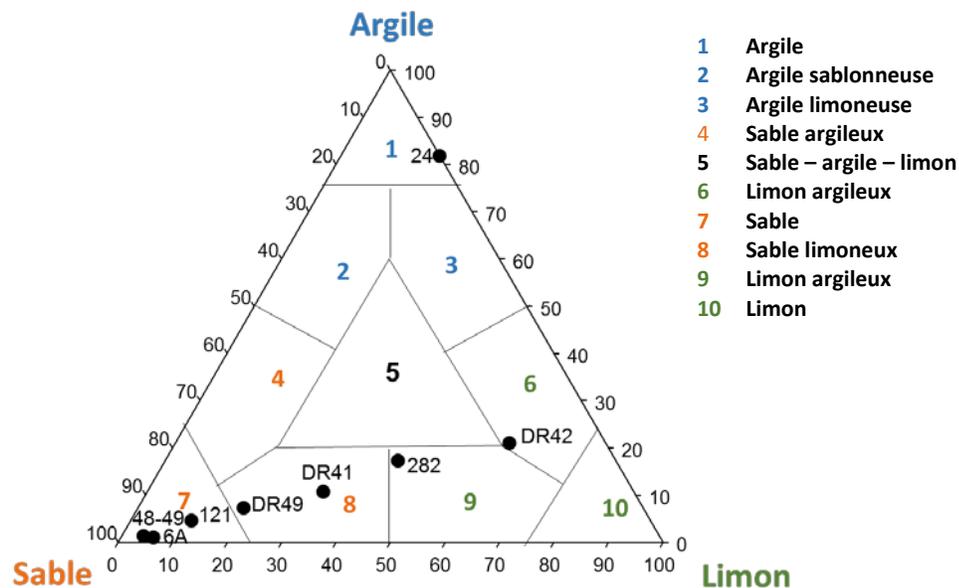


Figure 2 Diagramme ternaire sable – limon – argile (Shepard, 1954) des textures sédimentaires aux stations

Le tableau 3 présente les résultats des analyses effectuées sur les sédiments prélevés aux stations en 2016. Cet échantillonnage a été effectué simultanément à celui des organismes benthiques. La majorité des stations sont de classe 1 pour l'ensemble des paramètres mesurés. Trois stations se situent dans la classe 2 pour les hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀. Il s'agit des stations 282, DR41 et DR42. La première station avait été considérée comme une référence en 2014. Les concentrations d'hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀ variaient de 0 à 200 mg/kg de 2013 à 2014, mais, au moment de la récolte des organismes benthiques, aucune irisation des sédiments n'avait été observée. Cette station était peu contaminée en 2014 (MDDELCC, 2016a), ce qui n'est plus le cas en 2016. Lors de l'échantillonnage de 2016, la conductivité à la station différait grandement de celle de la rivière (551 et 61 µS/cm). L'eau présente à la station lors de l'échantillonnage 2016 était majoritairement constituée d'eau provenant du ruisseau se jetant dans cette baie, ruisseau dont la conductivité était de 566 µS/cm. Les deux autres stations (DR41 et DR42) sont issues du PK 4,5, secteur qui était le plus contaminé et qui a subi un dragage à l'automne 2014. La seconde station de référence de 2014 était la station 121, dont la contamination en C₁₀-C₅₀ lors de l'échantillonnage de 2016 était près de la VRC. Les concentrations des différents HAP sont sous la concentration d'effets probables à toutes les stations.

Tableau 3 Analyse granulométrique et concentrations d'hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀ et de HAP

Paramètres	Unité			121	24	282	48-49	6A	DR41	DR42	DR49
Granulométrie, carbone et perte à 105 °C											
Argile	%			4,5	81,8	17,3	1,25	1	10,7	21	7,2
Limon	%			11,2	18,1	42,7	4	6	32,3	61,3	19,4
Sable	%			84,3	0,1	40	94,75	93	57	17,7	73,4
Carbone organique total	%			1,02	0,42	3,93	0,53	0,45	9,64	12,1	2,08
Perte de poids à 105 °C	%			32	32,3	50,3	24,4	27,3	68,2	74,5	27,1
Hydrocarbures pétroliers (C ₁₀ à C ₅₀)		VRC	VRA								
Hydrocarbures pétroliers (C ₁₀ à C ₅₀)	mg/kg	164	832	160	< 43	570	DNQ	DNQ	460	770	DNQ
HAP et HAP alkylés		CEP	CEF								
2-Méthylnaphtalène	mg/kg	0,2	0,38	DNQ	< 0,007	DNQ	< 0,006	< 0,007	< 0,02	DNQ	< 0,006
Acénaphthène	mg/kg	0,089	0,94	< 0,008	< 0,006	< 0,006	< 0,009	< 0,005	< 0,01	< 0,02	< 0,007
Acénaphthylène	mg/kg	0,13	0,34	< 0,008	< 0,006	DNQ	< 0,006	< 0,007	DNQ	0,06	DNQ
Anthracène	mg/kg	0,24	1,1	< 0,007	< 0,006	DNQ	< 0,006	< 0,006	DNQ	DNQ	DNQ
Benzo(a)anthracène	mg/kg	0,39	0,76	DNQ	< 0,007	0,11	DNQ	DNQ	0,05	0,12	0,01
Benzo(a)pyrène	mg/kg	0,78	3,2	DNQ	< 0,009	DNQ	DNQ	DNQ	0,07	0,13	0,01
Chrysène	mg/kg	0,86	1,6	0,02	< 0,007	0,1	DNQ	0,02	0,06	0,15	0,02
Dibenzo(a,c)anthracène	mg/kg	0,14	0,2	< 0,009	< 0,001	DNQ	< 0,006	< 0,007	< 0,02	< 0,02	< 0,006
Fluoranthène	mg/kg	2,4	4,9	0,06	< 0,006	0,24	0,03	0,04	0,24	0,49	0,07
Fluorène	mg/kg	0,14	1,2	< 0,007	< 0,006	DNQ	< 0,006	< 0,006	< 0,01	DNQ	< 0,006
Naphtalène	mg/kg	0,39	1,2	DNQ	< 0,007	DNQ	< 0,006	< 0,007	0,04	0,12	DNQ
Phénanthrène	mg/kg	0,52	1,1	0,05	< 0,006	0,13	DNQ	0,02	0,12	0,3	0,04
Pyrène	mg/kg	0,88	1,5	0,04	< 0,006	0,2	0,02	0,03	0,28	0,53	0,07

■ Classe 1 ■ Classe 2 ■ Classe 3 DNQ : détectable mais non quantifiable

Le tableau 4 présente l'évolution des teneurs en hydrocarbures pétroliers aux stations de 2013 à 2016. Ces teneurs sont de façon globale en baisse. Outre la hausse observée à la station 282, la station 121 montre une concentration plus élevée en 2016 que précédemment. Concernant le secteur du PK 4,5, la station DR41 est la seule où le niveau de contamination des sédiments n'a pas baissé après le dragage. Ce secteur est l'un des plus propices à la sédimentation dans la haute Chaudière. Ainsi, les crues peuvent y déposer de nouveaux sédiments et les teneurs en contaminants n'y sont pas stables.

Tableau 4 Évolution des teneurs en hydrocarbures C₁₀-C₅₀ de 2013 à 2016

Station	Km du lac Mégantic	C ₁₀ -C ₅₀ (mg/kg) 2013 ¹	C ₁₀ -C ₅₀ (mg/kg) 2014 ¹	C ₁₀ -C ₅₀ (mg/kg) 2014 avant dragage ²	C ₁₀ -C ₅₀ (mg/kg) 2014 après dragage ²	C ₁₀ -C ₅₀ (mg/kg) 2015 ²	C ₁₀ -C ₅₀ (mg/kg) 2016
282	1,2	100*	200*	—	—	—	570
48-49	4	9400*	650	—	—	—	DNQ
DR41	4,5	3500*	—	34*	420*	570*	460
DR42	4,5	3500*	—	8000*	2200*	130*	770
DR49	4,5	—	—	1100*	93*	370*	DNQ
6A	5	540*	1500*	—	—	340*	DNQ
24	5,2	35000*	6000*	—	—	<LD	<LD
121	9	<LD	<LD	—	—	—	160

Note : Le dragage ne concerne que les stations DR41, DR42 et DR49 (secteur du PK 4,5).

* Concentration maximale, LD limite de détection, DNQ : détectable mais non quantifiable

¹ Résultats tirés de MDDELCC, 2016a

² Résultats tirés de MDDELCC, 2017c

Comme cela a été noté dans le rapport concernant l'évaluation du risque écotoxicologique associé à la contamination des sédiments de la rivière Chaudière (MDDELCC, 2015b), la concentration en hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀ est corrélée avec le pourcentage de carbone organique total (COT). Elle est également corrélée avec le pourcentage de limon qui compose les sédiments, lui-même corrélé avec le COT (figure 3). Un sédiment plus limoneux contient donc davantage de carbone organique total et les hydrocarbures ont une affinité à s'y fixer. Les corrélations de Spearman présentées au tableau 5 montrent que ces résultats sont significatifs. La contamination est plus faible dans les sédiments sablonneux.

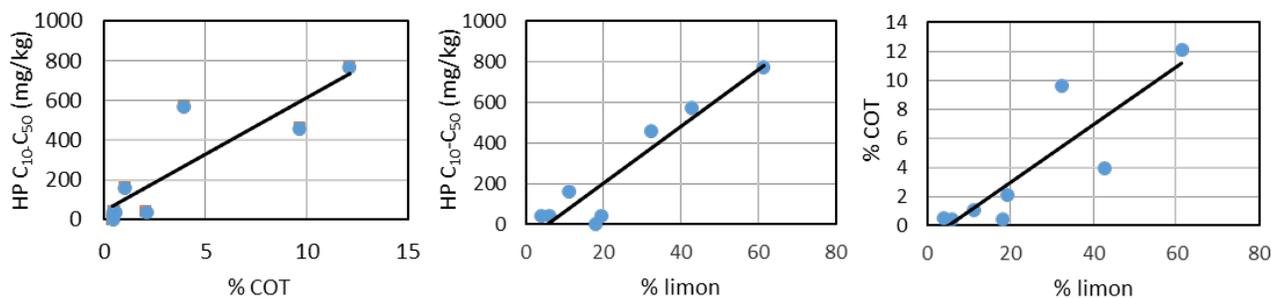


Figure 3 Corrélations entre les concentrations d'hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀ et le carbone organique total, entre les hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀ et le limon et entre le carbone organique total et le limon

Tableau 5 Corrélations de Spearman entre la composition du substrat, le pourcentage de carbone organique total et les hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀

Matrice de corrélation de Spearman					
	% Argile	% Limon	% Sable	% COT	HP C ₁₀ -C ₅₀
% Argile	1				
% Limon	0,738	1			
% Sable	-0,976	-0,762	1		
% COT	0,31	0,81	-0,286	1	
HP C ₁₀ -C ₅₀	0,244	0,732	-0,244	0,903	1

3.2 Communautés de macroinvertébrés benthiques

Groupement des communautés

Pour cette analyse, les échantillons ont été considérés comme indépendants et non comme des répliqués. Il a été possible, par le groupement hiérarchique, de regrouper les 48 échantillons des huit stations échantillonnées en 2014 et en 2016 en sept groupes, en coupant à 52 % (figure 4). Les échantillons 16_24B et 14_282A ne font partie d'aucun groupe. L'échantillon 14_282A se rapproche du groupe 6, alors que l'échantillon 16_24B s'apparente aux groupes 1 et 2. L'homogénéité à l'intérieur des groupes est élevée ($A = 0,443$) et les groupes sont significativement différents ($p = 0,000$; PPRM). Cette analyse permet de voir que les échantillons des différentes stations étaient plus semblables en 2014 qu'en 2016. En effet, les échantillons des stations DR41, DR42, DR49 et 6A de 2014 appartiennent tous au premier groupe. Plusieurs échantillons d'une même station et d'une même année, particulièrement ceux de 2016, sont distribués dans différents groupes, ce qui indique l'hétérogénéité de leur composition.

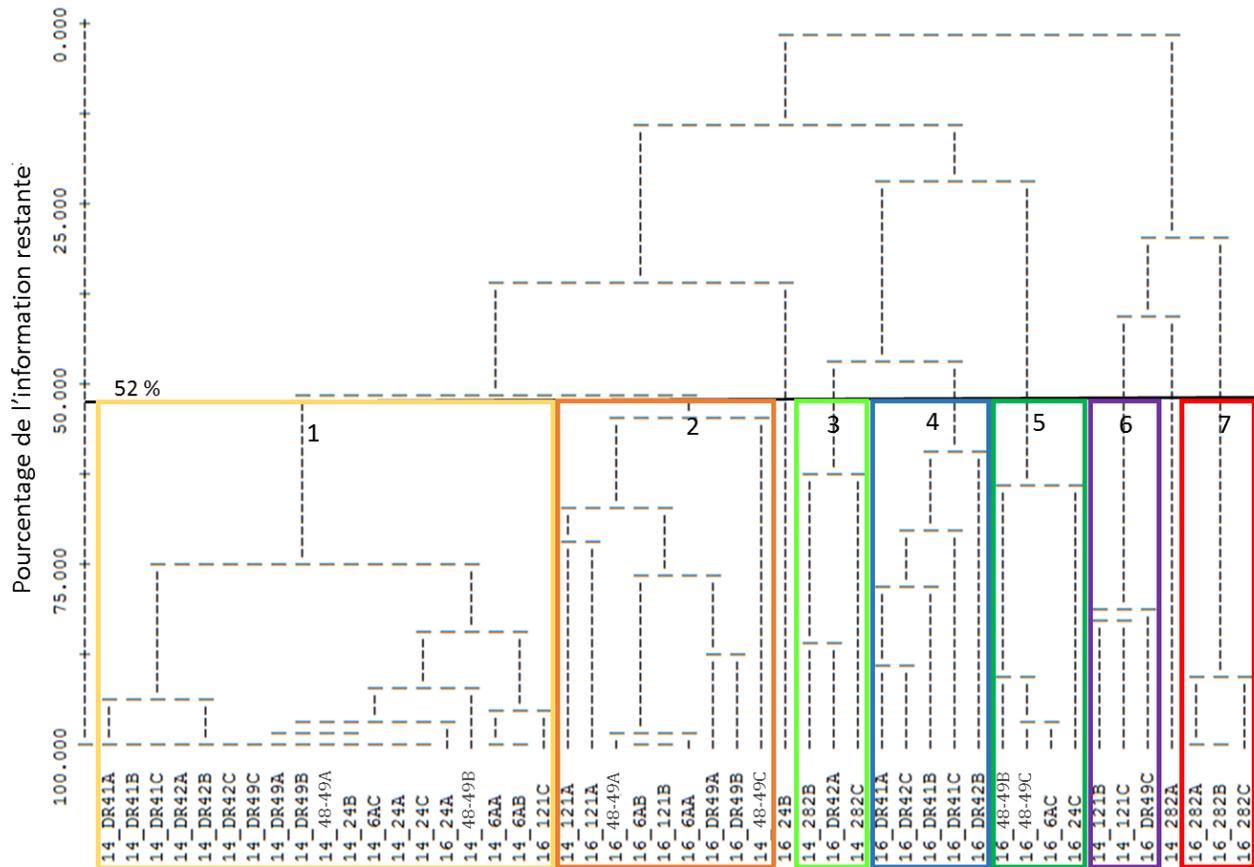


Figure 4 Groupement hiérarchique des échantillons prélevés en 2014 et en 2016

N. B. à propos de l'étiquette des échantillons (ex : 14_DR41A) : 14_ = année d'échantillonnage, DR41 = station, A = échantillon

Les résultats de l'analyse de taxons indicateurs des différents groupes issus du groupement hiérarchique sont présentés au tableau 6. Les meilleurs taxons indicateurs de chacun des groupes sont indiqués. Ceux dont la valeur indicatrice est de 50 ou plus et accompagnée d'une probabilité de 0,05 ou moins (considérée comme significative) sont en grisé.

Tableau 6 Meilleurs taxons indicateurs des groupes issus du groupement hiérarchique
(Taxons en grisé : $VI \geq 50$ et $p \leq 0,05$)

Groupe	Taxon (VI = valeur indicatrice et p = probabilité)	Famille – ordre ou (classe)
1	<i>Oligochaeta</i> (VI = 28,0 et p = 0,0002) <i>Amnicola</i> (VI = 29,6 et p = 0,3515)	– Hydrobiidae – gastéropode
2	<i>Eurylophella</i> (VI = 25,0 et p = 0,1722) <i>Physa</i> (VI = 21,6 et p = 0,8250)	Ephemerellidae – éphéméroptère Physidae – gastéropode
3	<i>Centroptilum</i> (VI = 66,2 et p = 0,0044) <i>Bezzia</i> – <i>Palpomyia</i> (VI = 58,2 et p = 0,0492)	Baetidae – éphéméroptère Cerapotonidae – diptère
4	<i>Turbellaria</i> (VI = 73,2 et p = 0,0016) <i>Siphonurus</i> (VI = 69,4 et p = 0,0040) <i>Oecetis</i> (VI = 56,0 et p = 0,0058) <i>Mystacides</i> (VI = 52,2 et p = 0,0144)	(Turbellaria) Siphonuridae – éphéméroptère Leptoceridae – trichoptère Leptoceridae – trichoptère
5	<i>Tardigrada</i> (VI = 70,6 et p = 0,0048) <i>Nemertea</i> (VI = 65,8 et p = 0,0052) <i>Orthocladinae</i> (VI = 65,6 et p = 0,0004) <i>Diamesinea</i> (VI = 62,4 et p = 0,0110)	– – Chironomidae – diptère Chironomidae – diptère
6	<i>Chironomini</i> (VI = 35,7 et p = 0,0302)	Chironomidae – diptère
7	<i>Copepoda</i> (VI = 67,2 et p = 0,0024) <i>Cladocera</i> (VI = 57,7 et p = 0,0018) <i>Corixidae</i> (VI = 57,7 et p = 0,0160)	(Crustacea) (Crustacea) Corixidae – hémiptère

Description des groupes

Le groupe 1 comprend la majorité des échantillons prélevés en 2014 et deux prélevés en 2016. Parmi les sept échantillons de 2014 qui sont exclus de ce groupe, six étaient issus de stations de référence (14_121 et 14_282). Ces stations étaient donc différentes des autres en 2014. Les meilleurs taxons indicateurs sont les oligochètes et les gastéropodes *Amnicola* (tableau 6), mais leurs valeurs indicatrices sont faibles. La prolifération des oligochètes en 2014 était liée à la contamination aux hydrocarbures pétroliers, alors que les gastéropodes *Amnicola* étaient particulièrement concentrés dans les échantillons du secteur du PK 4,5. En 2014, ce secteur était contaminé par les hydrocarbures pétroliers et le substrat contenait beaucoup de copeaux de bois (MDDELCC, 2016a). Les échantillons du secteur 4,5 de 2014 (échantillons 14_DRxxx) sont d'ailleurs rassemblés sur la gauche du groupe 1 (figure 4).

Le groupe 2 est formé de sept échantillons de 2016 et de deux échantillons de 2014. Les deux meilleurs taxons indicateurs sont un éphéméroptère et un gastéropode, lesquels n'ont pas de très bonnes valeurs indicatrices (tableau 6). L'analyse de groupement montre que ce groupe a une communauté s'apparentant au groupe 1. La communauté y semble en meilleur état, mais probablement toujours dans un processus de récupération.

Le groupe 3 est constitué d'un échantillon de 2016 issu du PK 4,5 (16_DR42A) et de deux échantillons de la station de référence 282 de l'année 2014. Les taxons indicateurs, un éphéméroptère et un diptère, ont de bonnes valeurs indicatrices. Ce groupe s'apparente au groupe 4 (figure 4).

Le groupe 4 est constitué d'échantillons de 2016 issus du PK 4,5 (16_DRxx). Les meilleurs taxons indicateurs sont le Turbellaria (ver plat), un éphéméroptère et un trichoptère. Les échantillons du PK 4,5 comportaient en moyenne 0,5 % d'éphéméroptères et de trichoptères en 2014, comparativement à 3,6 % en 2016. Le dragage effectué dans ce secteur, combiné à la dégradation des contaminants, semble avoir eu des effets bénéfiques sur la communauté.

Le groupe 5 est constitué de quatre échantillons de 2016, dont deux prélevés à la même station. Trois des quatre meilleurs taxons indicateurs étaient absents de tous les échantillons de 2014. Les Orthocladinae y étaient présents, mais leur abondance relative était faible, à moins de 5 % pour toutes les stations. Les deux meilleurs taxons indicateurs, les tardigrades et les németes, ont la faculté de s'enkyster lorsque les conditions environnementales sont adverses. Cette particularité explique peut-être leur absence des échantillons de 2014. La littérature consultée ne mentionne cependant pas la sensibilité de ces taxons aux hydrocarbures.

Le groupe 6 comprend trois échantillons, soit deux qui appartiennent à une des stations de référence de 2014 et l'autre au PK 4,5 de 2016 (16_DR49C). Le meilleur taxon indicateur, le diptère Chironomini, n'a cependant pas une très bonne valeur indicatrice. En 2014, le pourcentage de Chironomini des trois échantillons de la station DR49 avoisinait 0 %, alors que l'échantillon de 2016 (16_DR49C) en comporte 43 %. Le fait que la communauté benthique d'un échantillon du secteur le plus contaminé s'apparente à une station de référence de 2014 est plutôt bon signe.

Le groupe 7 est composé des trois échantillons prélevés à la station 282 en 2016, et ces répliqués sont les plus homogènes de cette année-là. Les taxons indicateurs sont deux crustacés, les copépodes et les cladocères, ainsi que l'hémiptère de la famille des Corixidae. Alors qu'en 2014, la communauté de cette station était en meilleure santé que celles des autres stations, il semble que ce ne soit plus le cas en 2016.

Deux échantillons n'appartiennent à aucun groupe, soit les échantillons 16_24B et 14_282A. Le premier, avec son substrat constitué d'argile compactée dans des proportions supérieures aux échantillons A et C (observation au laboratoire), était peu propice aux macroinvertébrés benthiques et ne comportait que quatre organismes et trois taxons, ce qui en fait une communauté extrêmement pauvre. La médiane de l'abondance des organismes dans tous les échantillons est de 396. La station 16_24 présente également une conductivité de l'eau plus élevée que celle rapportée aux autres stations en 2016, la station 16_282 mise à part (tableau 2, stations 24 et 282). La différence de conductivité entre les stations 24 et 6A en 2016 (595 et 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lesquelles ne sont distantes que d'environ 200 mètres (figure 1), ne semble s'expliquer que par un apport local d'eau de résurgence. Quant à l'échantillon 14_282A, il avait 80 % de diptères *Chironomini*, et c'est ce taxon qui explique sa ressemblance avec les échantillons du groupe 6 (figure 4).

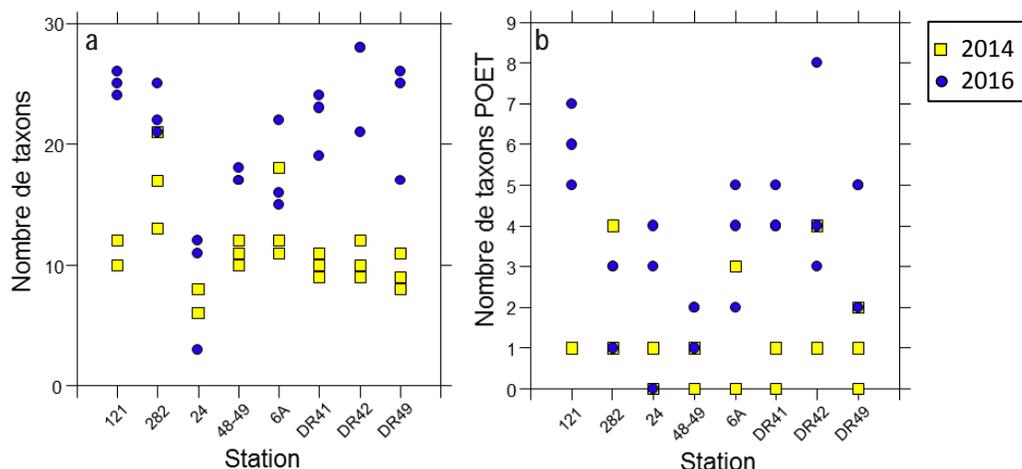
3.3 Changement des communautés de 2014 à 2016

En 2014, un total de 43 taxons a été récolté, toutes stations confondues, tandis que ce nombre a atteint 71 pour l'année 2016. Des taxons présents en 2016, 40 n'avaient pas été échantillonnés en 2014, alors que 12 taxons n'ont été récoltés qu'en 2014 (annexe 3).

L'analyse de groupement (figure 4) et l'analyse de taxons indicateurs (tableau 6) montrent que les communautés de 2014 et de 2016 diffèrent entre elles. Dans les échantillons du groupe 2 se trouvent cependant des communautés qui s'apparentent à celles du groupe 1, qui est constitué majoritairement d'échantillons de 2014. Cela porte à croire qu'elles sont possiblement encore en processus de récupération. L'analyse de groupement montre également une hétérogénéité des échantillons d'une même station et d'une même année.

Une quarantaine de variables exprimant différents aspects de la structure de la communauté benthique ont été calculées, cela pour évaluer les effets des hydrocarbures pétroliers sur la communauté (annexes 2 et 4). Ces variables se répartissent dans trois catégories : mesure de richesse taxonomique, composition taxonomique et tolérance à la pollution (MDDEFP, 2013b). Les figures 5 à 9 permettent de visualiser la répartition des valeurs de certaines variables aux stations en 2014 et en 2016. Les probabilités (test de Wilcoxon) associées à la comparaison des valeurs moyennes des variables aux stations entre 2014 et 2016 sont présentées au tableau 7. Les comparaisons effectuées excluent les stations de référence étant donné que celles-ci sont plus contaminées aux hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀ en 2016 qu'en 2014.

Les valeurs des variables qui suivent diminuent normalement avec l'augmentation des perturbations. Une diminution de la contamination devrait donc se traduire par leur augmentation. Le *nombre de taxons* (figure 5a) a généralement augmenté aux stations, et cela de façon plus remarquable aux stations du secteur du PK 4,5 (DR41, DR42 et DR49) et à la station 121. La station 24 affiche les plus basses valeurs en 2016. Ces valeurs peu élevées sont attribuables à la nature argileuse du substrat, moins hospitalière pour les organismes benthiques (figure 2), plutôt qu'à une contamination du substrat (tableau 3). Le *nombre de taxons POET* (plécoptères, odonates, éphéméroptères et trichoptères) montre également une hausse (figure 5b). La majorité des échantillons de 2014 n'avaient qu'un ou deux taxons POET, alors que la médiane des échantillons de 2016 est de quatre taxons. L'échantillon 16_24B n'a aucun taxon POET et se trouve par ailleurs isolé dans l'analyse de groupement (figure 4). Les différences observées sont significatives ($p \leq 0,05$, tableau 7).

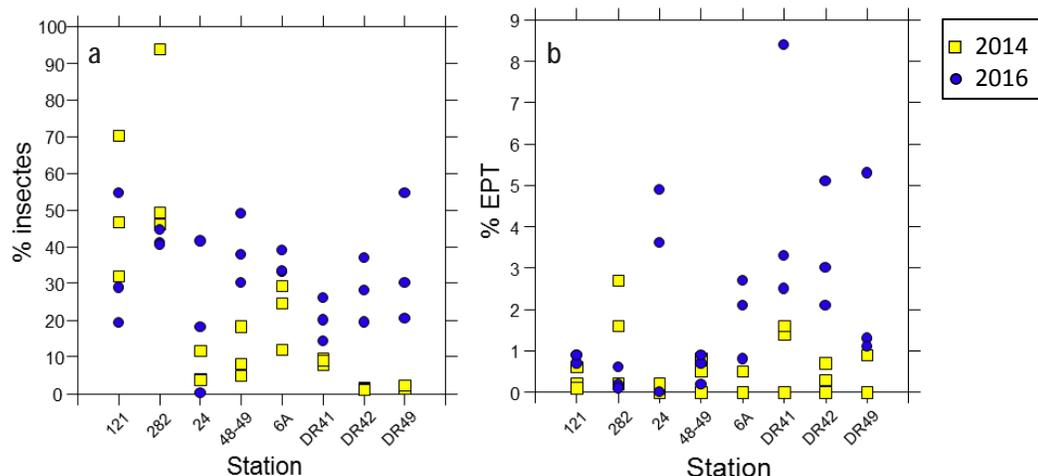


N. B. : Toutes les stations ont six résultats, soit trois par année. Certains points non visibles sont simplement cachés derrière un autre.

Figure 5 Distribution des valeurs a) du nombre de taxons et b) du nombre de taxons POET aux stations

Un *pourcentage d'insectes* et un *pourcentage d'organismes appartenant au groupe EPT* (éphéméroptères, plécoptères et trichoptères) qui augmentent sont perçus comme étant liés à une amélioration de l'état du milieu. L'abondance relative des insectes a augmenté à toutes les stations de 2014 à 2016, sauf à celles considérées comme stations de

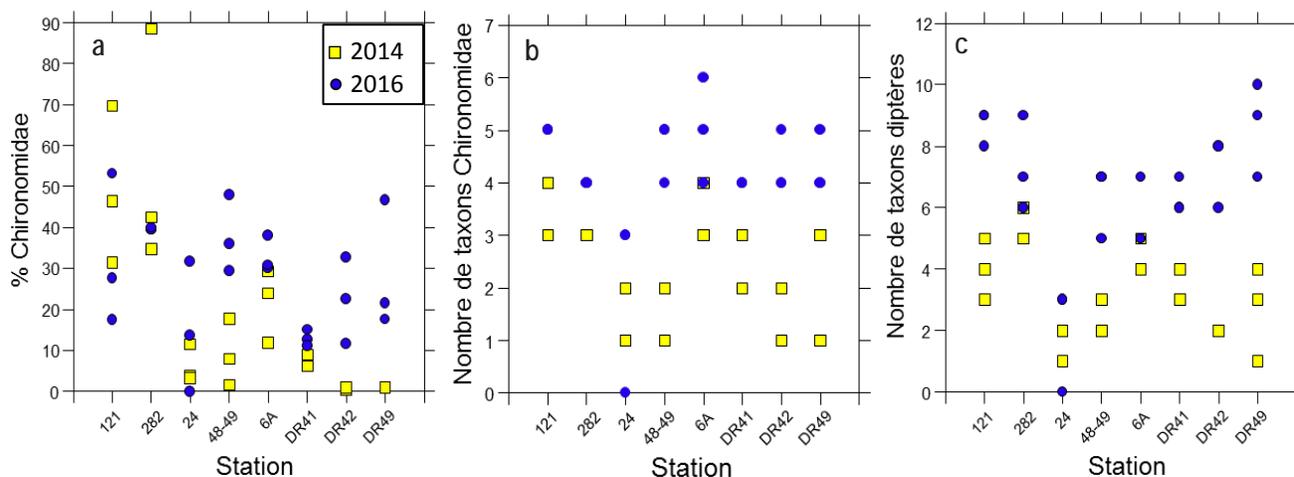
référence en 2014 (figure 6a). La différence observée est significative ($p \leq 0,05$, tableau 7). Le groupe EPT, reconnu pour sa sensibilité à différents types de pollution, n'est cependant pas un groupe qu'on s'attend à trouver en grand nombre dans des échantillons dont le substrat est fin. Le pourcentage d'EPT envoie le même signal que le pourcentage d'insectes et cette différence est également significative ($p \leq 0,05$, tableau 7). La station 48-49 est restée stable pour ce qui est du pourcentage EPT (figure 6b). La variable *nombre de taxons POET* de la figure 5b montre également une stabilité entre les deux années pour cette station.



N. B. : Toutes les stations ont six résultats, soit trois par année. Certains points non visibles sont simplement cachés derrière un autre.

Figure 6 Distribution des valeurs du pourcentage a) d'insectes et b) d'organismes EPT aux stations

Les diptères de la famille des Chironomidae avaient montré une sensibilité à la contamination pétrolière dans la précédente étude (MDDELCC, 2016a). Une augmentation du *pourcentage de Chironomidae* en 2016 est donc un signe de rétablissement des communautés benthiques. Ce signe est visible à toutes les stations, hormis celles de référence, et cette différence est significative ($p \leq 0,05$, tableau 7). L'échantillon 16_24b fait toutefois exception et sa particularité a été expliquée précédemment (figure 7a). Le *nombre de taxons Chironomidae* et le *nombre de taxons diptères* sont eux aussi plus élevés en 2016 qu'en 2014; l'échantillon 16_24b fait encore là exception (figures 7b et 7c). Les différences observées sont significatives ($p \leq 0,05$, tableau 7).

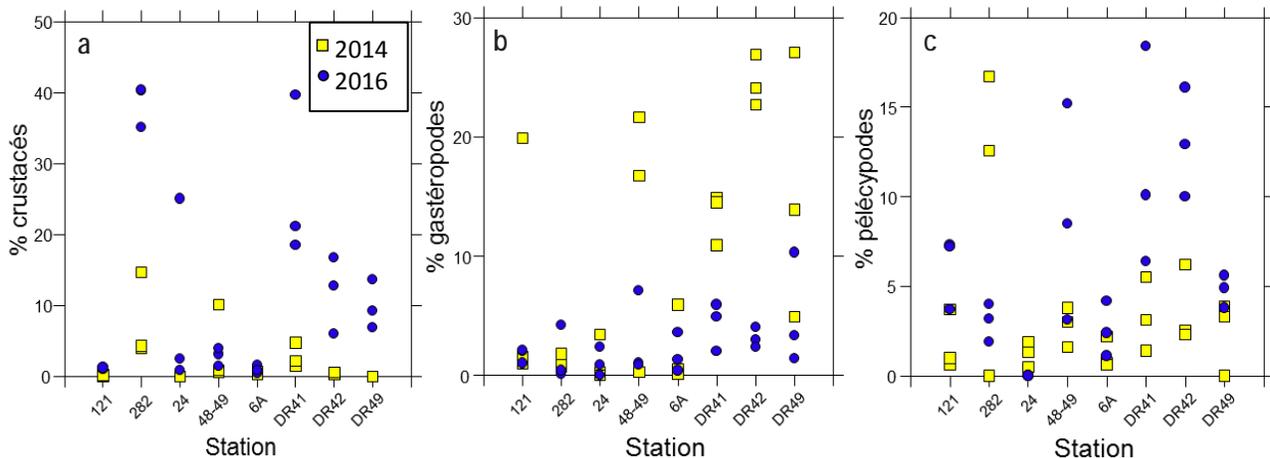


N. B. : Toutes les stations ont six résultats, soit trois par année. Certains points non visibles sont simplement cachés derrière un autre.

Figure 7 Distribution des valeurs a) du pourcentage de diptères Chironomidae, b) du nombre de taxons Chironomidae et c) du nombre de taxons diptères aux stations

Smith et collab. (2010) mentionnent la sensibilité aux hydrocarbures de deux familles de crustacés, les Asellidae et les Gammaridae. La figure 8a montre que les crustacés étaient moins présents en 2014 qu'en 2016. On note la présence de Gammaridae dans 29 % des échantillons en 2014, alors qu'ils sont présents à toutes les stations en 2016. Entre les deux années, les Asellidae passent de 12 % à 62 % de présence dans les échantillons. On observe un fort pourcentage de crustacés à la station 282 en 2016, dont des Gammaridae et des Asellidae, mais il faut souligner qu'il s'agit en large proportion (de 57 % à 82 %) de copépodes. Rappelons que cette station présentait des valeurs de 570 mg/kg en hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀ en 2016 (tableau 3). Les copépodes, contrairement aux Asellidae et aux Gammaridae, ne semblent pas sensibles aux hydrocarbures pétroliers. Ce sont d'ailleurs eux qui caractérisent le groupe 7 (figure 4 et tableau 6), groupe précisément constitué des trois échantillons prélevés à cette station en 2016. Les conditions présentes à cette station étaient alors assurément différentes de celles de 2014. Ces trois échantillons présentent en effet un groupement serré qui caractérise des communautés très semblables. La différence entre les stations des deux campagnes d'échantillonnage quant au *pourcentage de crustacés* est significative ($p \leq 0,05$, tableau 7).

D'importantes abondances de gastéropodes *Ammicola* caractérisaient le secteur du PK 4,5 en 2014, et ce taxon constitue l'essentiel du *pourcentage de gastéropodes* présenté à la figure 8b. Les abondances de 2014 pouvaient être attribuables à une résistance aux hydrocarbures ou à une affinité particulière pour le substrat contenant des copeaux de bois (MDDELCC, 2016a). On constate, deux ans plus tard, que le pourcentage de gastéropodes a baissé et que celui de pélicypodes (*Sphaeriidae* – *Pisidium*) a augmenté (figure 8c). Trois causes peuvent expliquer ce phénomène : la baisse des concentrations en hydrocarbures, le dragage post-échantillonnage de 2014 et le fait que les copeaux associés au substrat en 2014 sont absents dans les échantillons prélevés en 2016. Dillon et collab. (2013) rapportent que l'espèce *Ammicola limosa* est souvent associée aux débris de bois, mais la tolérance des gastéropodes dulcicoles aux hydrocarbures est peu connue. Les pélicypodes sont des organismes qui vivent dans les cinq premiers millimètres de sédiments, où ils se nourrissent de microorganismes des eaux interstitielles (Holopainen et Lopez, 1989). Ils ont possiblement été affectés dès que la contamination s'est liée au substrat, et la baisse de contamination aurait favorisé leur retour dans la rivière. À la station 282, dont le niveau de contamination a augmenté de 2014 à 2016, le pourcentage de pélicypodes a au contraire baissé dans deux échantillons sur trois entre les deux années. Les différences observées en matière de *pourcentage de gastéropodes* et de *pourcentage de pélicypodes* sont significatives ($p \leq 0,05$, tableau 7).



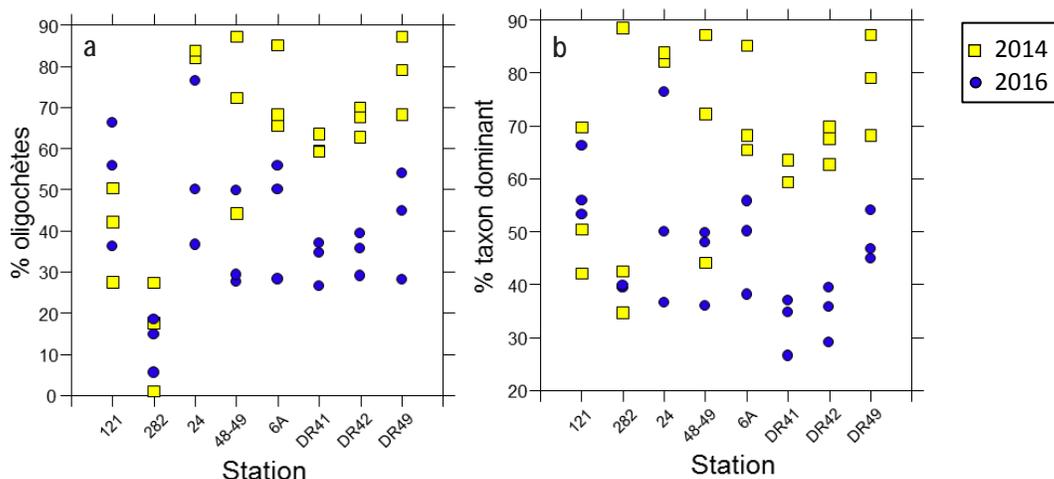
N. B. : Toutes les stations ont six résultats, soit trois par année. Certains points non visibles sont simplement cachés derrière un autre.

Figure 8 Distribution des valeurs du pourcentage a) de crustacés, b) de gastéropodes et c) de pélicypodes aux stations

En 2014, la présence d'hydrocarbures pétroliers dans les sédiments avait favorisé les oligochètes, alors que les diptères Chironomidae de la tribu des Chironomini semblaient sensibles aux hydrocarbures. Ces conclusions avaient été tirées par comparaison avec des communautés de référence, soit celles des stations 121 et 282 (MDDELCC, 2016a). Crunkilton et Duchrow (1990) suggèrent trois explications possibles à la prolifération de taxons opportunistes comme les oligochètes : 1) la tolérance aux matières toxiques présentes dans les hydrocarbures; 2) une réponse à l'augmentation d'une source de nourriture appropriée; ou 3) l'absence de prédateurs.

Deux années plus tard, les oligochètes, considérés comme tolérants aux hydrocarbures par plusieurs auteurs (McCauley, 1966; Harrel, 1985; Crunkilton et Duchrow, 1990; Smith et collab., 2010), sont moins abondants. La figure 9a présente le *pourcentage d'oligochètes* et cette baisse d'abondance est observable partout, sauf aux stations de référence. Les différences observées sont significatives ($p \leq 0,05$, tableau 7). Dans le contexte du même déversement pétrolier, il a également été observé une baisse d'abondance des oligochètes entre les années 2013, 2014 et 2015 et ce, bien que l'échantillonnage ait été effectué dans les zones de seuils (MDDELCC, 2017a). Ces zones rocheuses à écoulement rapide ne constituent pas un habitat préférentiel pour ce taxon.

Le *pourcentage du taxon dominant* (figure 9b) est également une variable dont une baisse est anticipée avec une diminution des perturbations. Cette variable présente un patron semblable au *pourcentage des oligochètes*, car ceux-ci dominent dans la plupart des échantillons. En 2014, quatre échantillons issus des stations de référence ont le diptère Chironomidae comme taxon dominant. En 2016, les oligochètes dominent dans 77 % des échantillons, exception faite de ceux des stations de référence (100 % en 2014), et leur abondance relative est moindre qu'en 2014. Les différences observées entre les deux années sont significatives ($p \leq 0,05$, tableau 7).



N. B. : Toutes les stations ont six résultats, soit trois par année. Certains points non visibles sont simplement cachés derrière un autre.

Figure 9 Distribution des valeurs de pourcentage a) d'oligochètes et b) du taxon dominant aux stations

Les diptères Chironomidae

Un an après le déversement, le principal constat établi quant aux effets des hydrocarbures sur les communautés benthiques concernait les oligochètes et les diptères Chironomidae. Dans MDDELCC (2016a), il était conclu que la présence d'hydrocarbures pétroliers favorisait les oligochètes, alors que les diptères Chironomidae semblaient sensibles aux hydrocarbures. Les oligochètes étant identifiés comme tels, c'est-à-dire au niveau taxonomique de la

classe, il n'est pas possible d'aller plus loin dans l'interprétation de ce groupe. On a vu que le pourcentage de Chironomidae dans les échantillons a augmenté de 2014 à 2016, sauf aux stations de référence (figure 7a). La figure 10 présente la composition de cette famille de diptères suivant une identification à la sous-famille par échantillon. En 2014, les Chironominae dominaient nettement dans la plupart des échantillons. Les échantillons du PK 4,5 (DR41, DR42 et DR49) avaient peu de Chironomidae, et leur présence dans six échantillons sur neuf avoisinait 0. On constate que la composition de la famille des Chironomidae s'est complexifiée en 2016. Les Orthoclaadiinae sont présents dans tous les échantillons, et ce, dans des proportions supérieures aux Chironominae dans plusieurs cas. Les Tanypodinae se trouvent également dans tous les échantillons, ce qui n'était pas le cas en 2014. Deux nouvelles sous-familles, les Diamesinae et les Prodiamesinae, apparaissent dans certains échantillons de 2016, quoiqu'en effectifs restreints. Le pourcentage d'Orthoclaadiinae présente une différence significative entre les deux années d'échantillonnage ($p \leq 0,05$, tableau 7), ce qui n'est pas le cas des autres sous-familles.

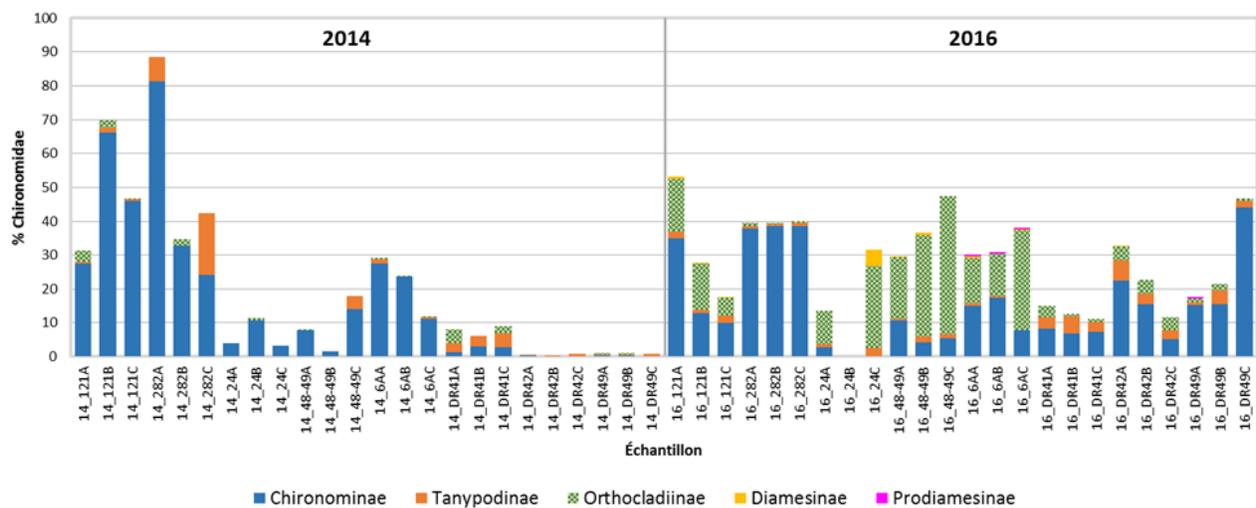


Figure 10 Histogramme cumulé des sous-familles de Chironomidae présentes dans les échantillons

Comme expliqué précédemment, la famille des Chironomidae se sépare en plusieurs sous-familles. Dans la sous-famille des Chironominae, la tribu des Chironomini semblait sensible aux hydrocarbures pétroliers lors des prélèvements de 2014 (MDELCC, 2016a). En 2016, on constate que les Chironomini sont plus présents, particulièrement dans le secteur du PK 4,5 (figure 11), qui était le plus contaminé en 2014, mais qui l'est de façon beaucoup moins importante en 2016 (tableau 4). En 2014, la tribu des Tanytarsini était présente dans 6 % des échantillons (exception faite de ceux des stations de référence), alors qu'en 2016 elle se trouve dans 83 % des échantillons (différence significative, $p \leq 0,05$, tableau 7). Sa présence aux stations de référence s'est maintenue entre les deux années. En 2016, le substrat argileux de la station 24 semble moins propice aux Chironomidae, particulièrement à ceux appartenant à la sous-famille des Chironominae (figures 10 et 11). Une identification encore plus fine, soit au genre ou à l'espèce, aurait probablement pu apporter d'autres éléments d'information. La station 282 est énigmatique : la proportion de Chironomini y est considérable, malgré un taux de contamination en hydrocarbures qui est le deuxième en importance en 2016, mais qui est toutefois inférieur à la VRA (tableau 4). Il existe une possibilité que ces hydrocarbures ne proviennent pas du déversement, mais d'un petit ruisseau se jetant dans le secteur. Les résultats ne permettent cependant pas de prouver cette hypothèse. Une fois la station 282 exclue, les importants écarts constatés en 2014 entre la station 121 (référence) et les autres stations ne sont plus visibles pour les Chironominae et leurs tribus en 2016.

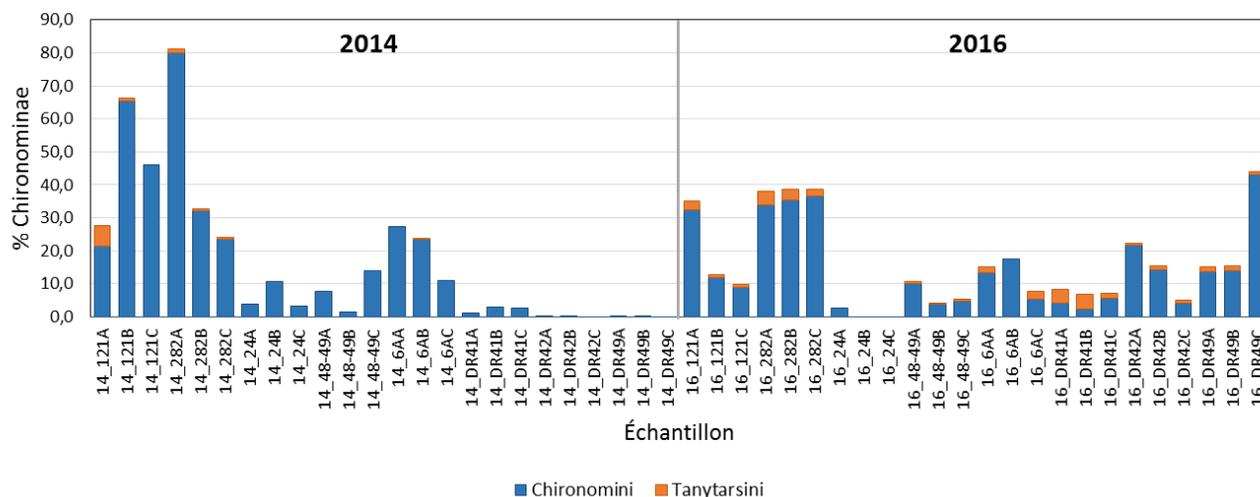


Figure 11 Histogramme cumulé des tribus de Chironominae présentes dans les échantillons

Tableau 7 Comparaison statistique des variables de communauté entre les deux campagnes d'échantillonnage

Variable	Probabilité (stations de référence exclues)
Nombre de taxons	0,028
Nombre de taxons POET	0,027
Nombre de taxons Chironomidae	0,028
% insectes	0,028
% EPT	0,028
% Chironomidae	0,028
% crustacés	0,075
% oligochètes	0,028
% gastéropodes	0,028
% pélicypodes	0,046
% taxon dominant	0,028
% Chironomini	0,6
% Tanytarsini	0,043
% Chironominae	0,463
% Orthocladiinae	0,046
% Tanypodinae	0,225
N. tax. diptères	0,028

Notes : Test de Wilcoxon pour échantillon apparié; les valeurs en gras sont significatives ($p < 0,05$). Étant donné le faible nombre de données, les résultats de ce test sont présentés à titre indicatif.

Les insectes fousseurs

La contamination liée au déversement pétrolier a rapidement cessé d'être décelable dans l'eau de la rivière (MDDELCC, 2014). Par contre, des résidus pétroliers étaient présents dans les sédiments, mais généralement en baisse de 2013 à 2016 (WSP, 2017). Quel effet cette contamination a-t-elle eu sur les insectes fousseurs qui vivent dans le sédiment, donc en étroite relation avec celui-ci et sa contamination? La figure 12 montre que le pourcentage d'insectes fousseurs n'a pas énormément changé entre les deux années. Cependant, le nombre de taxons d'insectes fousseurs a augmenté dans plusieurs stations, et cela de façon plus importante aux stations du secteur du PK 4,5. L'habitat semble donc plus favorable à ces organismes en 2016 qu'en 2014, ce qui peut être lié à la baisse de la contamination ou à la nature du substrat. Rappelons qu'en 2014, le secteur du PK 4,5 était caractérisé par une importante quantité de copeaux de bois associés au substrat (MDDELCC, 2016a). Les insectes fousseurs de cette étude sont identifiés dans l'annexe 3.

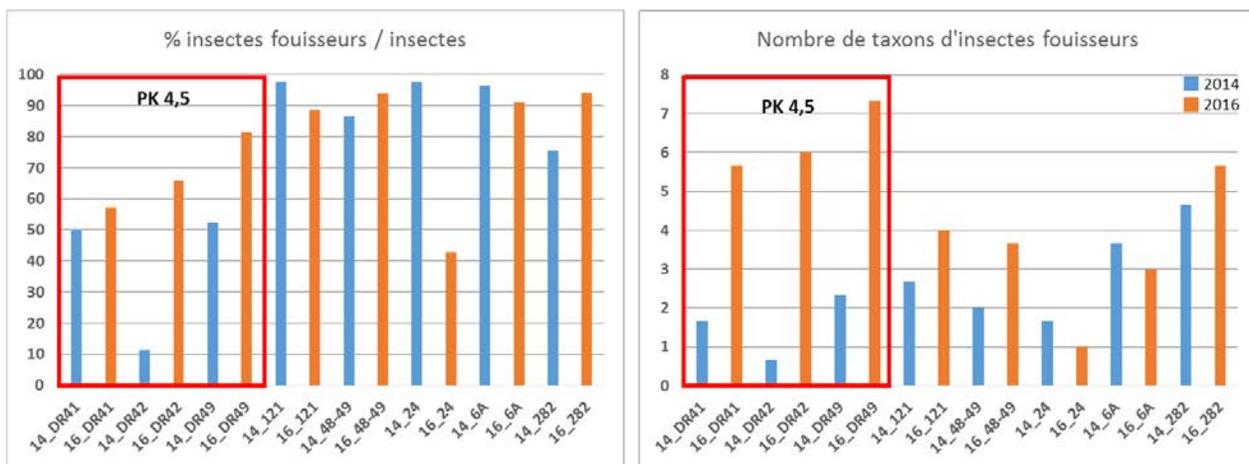


Figure 12 Pourcentage et nombre de taxons d'insectes fousseurs par station (moyenne des trois échantillons) en 2014 et en 2016

3.4 Évolution de la contamination et rétablissement des communautés benthiques

Dans une revue de littérature concernant les effets des déversements d'hydrocarbures sur les macroinvertébrés benthiques, Grenier (2014b) relevait trois facteurs influant sur le temps de rétablissement des communautés : 1) les caractéristiques des hydrocarbures; 2) les caractéristiques physiques du cours d'eau; et 3) les caractéristiques des communautés de macroinvertébrés. Il y est également souligné que l'étude dans laquelle des effets étaient perceptibles après le plus long laps de temps est celle de Harrel (1985). Dans cette dernière, des effets étaient toujours visibles après 26 mois : la diversité avait augmenté, mais les taxons sensibles étaient toujours absents. Hare et Carter (1976) ont constaté que les effets sur les macroinvertébrés benthiques d'un déversement de 10 millions de litres d'hydrocarbures pétroliers dans un port du lac Huron (Ontario, Canada) étaient toujours perceptibles 25 ans plus tard, sous forme de déformations affectant les trois quarts des diptères Chironomidae – *Chironomus cucini*. Soixante ans plus tard, le taux de déformations observé était de nouveau semblable à celui des sites de référence. Les sédiments

contaminés étaient toujours présents, mais suffisamment recouverts par de nouveaux sédiments non contaminés pour être inaccessibles à la plupart des taxons fouisseurs (Bertrand et Hare, 2017).

Les hydrocarbures déversés dans la rivière Chaudière sont du pétrole brut léger. Les effets d'un tel produit sont plus persistants que ceux occasionnés par des produits plus raffinés, comme le diesel (Lytle et Peckarsky, 2001). Les résidus insolubles sont adsorbés dans les sédiments et la matière organique; la quantité et la composition de ces résidus varient en se dégradant (Grenier, 2014b; Blumer et Sass, 1972; Wong et collab., 1984). L'exposition aux radiations ultraviolettes (UV) du soleil est un facteur influant sur la toxicité des produits pétroliers. Elle peut les rendre de 2 à 1000 fois plus toxiques que ce qui est observable dans les protocoles standards de bioessais en laboratoire. Les eaux douces, estuariennes et marines, sont suffisamment exposées aux radiations solaires pour « photoaugmenter » la toxicité de ces produits. Diverses espèces d'invertébrés aquatiques et de poissons peuvent subir cette accentuation de la toxicité lorsqu'elles sont exposées aux produits pétroliers et aux radiations UV. Les premiers stades de vie des organismes qui sont translucides aux UV sont particulièrement sensibles (Barron, 2017).

Le secteur de la haute Chaudière est caractérisé par un substrat principalement rocheux et un écoulement rapide. Des écoulements turbulents accélèrent le rétablissement des cours d'eau affectés par des déversements, du point de vue de la baisse de contamination (Guiney et collab., 1987; Poulton et collab., 1997), mais également de la recolonisation (Pontasch et Brusven, 1988). Poulton et collab. (1997) ont constaté dans les seuils d'une rivière un rétablissement plus rapide que dans les fosses adjacentes. Dans le contexte du déversement pétrolier ayant touché la Chaudière, il a été constaté que, dans les stations étudiées situées dans les zones de seuils de la rivière, la majorité des communautés avaient récupéré un an après la contamination (MDDELCC, 2017a). Seules les trois stations les plus en amont, situées de 1 à 2,3 km du barrage de Lac-Mégantic, comportaient une incertitude par rapport à leur complète récupération. Cependant, les sites échantillonnés pour la présente étude sont des zones d'accumulation de sédiments qui correspondent aux zones d'accumulation des hydrocarbures dans la haute Chaudière. Il a été souligné que des concentrations supérieures à la valeur de référence pour les effets aigus sont encore observées dans les 8,6 premiers kilomètres de la rivière (MDDELCC, 2017b). Le système étant dynamique, les contaminants lessivés par l'eau en amont peuvent se déposer dans une zone de sédimentation plus en aval. De façon générale et sans nouvelles entrées de contaminants dans le système, les niveaux de contamination s'abaisseront avec les successions des futures crues. Cette tendance peut cependant présenter des variations sporadiques, avec des hausses temporaires dans certaines zones de sédimentation, telle celle observée à la station 121 en 2016 (tableau 4).

Le premier facteur de recolonisation des milieux affectés provient de la dérive d'organismes, qui peut se faire de l'amont vers l'aval du même cours d'eau. Le déversement a eu lieu à la tête de la rivière Chaudière, ce qui a sûrement limité l'efficacité de ce phénomène, les secteurs en amont ayant également été touchés par la contamination. Les tributaires contribuent aussi à la dérive d'organismes. Le système hydrographique de la rivière Chaudière en comprend plusieurs, mais peu dans la portion de rivière étudiée. En effet, le seul tributaire d'importance, la rivière Glen, rejoint la rivière Chaudière environ 300 mètres en amont de la dernière station, la station 121. La dérive d'organismes dans la zone à l'étude est limitée, mais elle peut provenir de zones peu ou pas contaminées situées en amont. Les insectes terrestres qui pondent en milieu aquatique contribuent également au rétablissement des communautés. Leurs œufs se développeront en forme larvaire si les conditions environnantes sont propices à leur survie (MDDELCC, 2016a).

Gómez Gesteira et collab. (2005) ont décrit une réaction en quatre temps des communautés benthiques de la zone subtidale peu profonde à la suite d'un déversement pétrolier : 1) mortalité rapide d'espèces sensibles comme les amphipodes; 2) peu d'espèces et abondances faibles (c.-à-d. niches écologiques vides); 3) augmentation de l'abondance d'espèces opportunistes; et 4) déclin rapide des espèces opportunistes et recolonisation concomitante par des espèces sensibles. Bien que cette description concerne le milieu marin, le même déroulement peut s'appliquer à un déversement en rivière. Tout porte à croire qu'en 2014, un an après le déversement, l'échantillonnage se situait dans la troisième phase de réponse. L'importante abondance des oligochètes qui avait alors été observée appuie cette théorie. Perhar et Arhonditsis (2014) voient dans les oligochètes un taxon opportuniste qui s'alimente de microorganismes contribuant à la dégradation des hydrocarbures. En 2016, trois ans après le déversement, il semble

que l'échantillonnage se situe dans la quatrième phase de la séquence. L'abondance des oligochètes diminue, celle des Chironomidae augmente et la composition de cette famille s'est diversifiée. Les Chironomidae, reconnus pour leur tolérance à l'enrichissement par la matière organique et par les nutriments, regroupent plusieurs espèces intolérantes aux hydrocarbures pétroliers (Mozley et Butler, 1978; Pettigrove et Hoffmann, 2005; Anson et collab., 2008). De plus, de nouveaux taxons apparaissent, dont certains dans le groupe POET, même si les valeurs en hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀ dans le secteur du PK 4,5 sont, dans deux stations sur trois, nettement au-dessus de la VRC. Fait intéressant à souligner, un autre rapport relève la même séquence de rétablissement dans les zones de seuils de la rivière Chaudière (MDDELCC, 2017a). Le rétablissement a cependant été beaucoup plus rapide dans ces habitats, ce qui concorde avec les observations de plusieurs auteurs cités précédemment. Le rétablissement des communautés des zones de sédimentation est bel et bien amorcé. Il se poursuivra au fur et à mesure que les concentrations de contaminants dans les sédiments baisseront.

4. CONCLUSION

La rivière Chaudière a, de façon générale, un écoulement rapide et un substrat rocheux, ce qui est favorable au rétablissement de ses communautés benthiques après une perturbation. Elle subit, comme la plupart des rivières du Québec, d'importantes crues printanières qui contribuent à son autoépuration. Cependant, elle présente également des zones d'accumulation de sédiments fins naturellement propices à l'accumulation des contaminants.

Les communautés benthiques des zones d'accumulation de sédiments de la haute Chaudière ont été touchées par le déversement de pétrole de 2013, mais elles montrent maintenant plusieurs signes de rétablissement. Ce constat général s'appuie sur les résultats obtenus à huit stations d'échantillonnage où des prélèvements ont été faits en 2014 et en 2016. Par rapport aux résultats de 2014, ceux de 2016 montrent que :

1. L'abondance relative des oligochètes a diminué;
2. L'abondance relative des diptères Chironomidae a augmenté et leur communauté s'est complexifiée;
3. Quarante taxons absents des échantillons de 2014 étaient présents en 2016. Plusieurs de ces taxons appartiennent aux EPT, reconnus pour leur sensibilité aux perturbations environnementales;
4. L'abondance relative d'insectes a augmenté;
5. Les crustacés Gammaridae et Asellidae, considérés comme sensibles aux hydrocarbures, sont présents dans la majorité des échantillons de 2016;
6. Les mollusques pélicypodes de la famille des Sphaeriidae (*Pisidium*) sont plus abondants.

En 2014, une abondance de gastéropodes *Amnicola* avait été notée dans le secteur du PK 4,5. Ce secteur présentait deux particularités : une importante contamination aux hydrocarbures et la présence de copeaux de bois sur le substrat naturel. En 2016, les sédiments de ce secteur, encore contaminés aux hydrocarbures mais de façon moins importante qu'en 2014, ne présentaient plus d'accumulation notable de copeaux. Le même phénomène a été observé ailleurs dans la rivière. Il est difficile de savoir si la diminution des *Amnicola* au PK 4,5 survenue de 2014 à 2016 est due au dragage, à la diminution de la contamination par les hydrocarbures ou à l'élimination des copeaux de bois. Par ailleurs, le nombre de taxons d'insectes fouisseurs a augmenté dans ce secteur, cette hausse étant largement attribuable aux diptères fouisseurs.

Les deux stations considérées comme stations de référence en 2014 ne le sont plus en 2016. À ces deux endroits, les concentrations d'hydrocarbures pétroliers ont augmenté de 2014 à 2016, ce qui illustre le fait que malgré la tendance générale à la baisse, les concentrations d'hydrocarbures peuvent augmenter temporairement à certains endroits. Ces résultats s'expliquent par le caractère dynamique de la rivière Chaudière, dont les sédiments peuvent se déposer en un lieu donné, être remis en suspension lors d'une crue, puis se déposer à nouveau plus loin en aval.

Le rétablissement des communautés benthiques à la suite d'un déversement pétrolier se déroule en quatre étapes. Tout porte à croire qu'en 2014, un an après le déversement, l'échantillonnage se situait dans la troisième phase de réponse, soit l'augmentation de taxons opportunistes, illustrée principalement par la prolifération des oligochètes. En 2016, trois ans après le déversement, il semble que l'échantillonnage se situe dans la quatrième phase de la séquence, qui se caractérise par le déclin des taxons opportunistes et la recolonisation par des taxons sensibles. L'abondance des oligochètes diminue, les communautés se diversifient et de nouveaux taxons apparaissent, dont certains sont reconnus pour leur sensibilité aux perturbations.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANSON, J. R., V. PETTIGROVE, M. E. CAREW et A. A. HOFFMANN, 2008. « High molecular weight petroleum hydrocarbons differentially affect freshwater benthic macroinvertebrate assemblages », *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 27, n° 5, p. 1077-1083.
- BARRON, M. G., 2017. « Photoenhanced toxicity of petroleum to aquatic invertebrates and fish », *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 73, n° 1, p. 40-46.
- BERTRAND, K. et L. HARE, 2017. « Evaluating benthic recovery decades after a major oil spill in the Laurentian Great Lakes », *Environmental Science & Technology*, vol. 51, n° 17, p. 9561-9568.
- BODE, R. W., M. A. NOVAK et L. E. ABELE, 1996. *Quality Assurance Work Plan for Biological Stream Monitoring in New York State*, Albany (New York), NYS Department of Environmental Conservation, 89 p.
- BODE, R. W., M. A. NOVAK, L. E. ABELE, D. L. HEITZMAN et A. J. SMITH, 2002. *Quality Assurance Work Plan for Biological Stream Monitoring in New York State*, Albany (New York), Stream Biomonitoring Unit Bureau of Water Assessment and Management Division of Water, NYS Department of Environmental Conservation, 41 p. (dont 13 ann.).
- BLUMER, M. et J. SASS, 1972. « Oil pollution: persistence and degradation of spilled fuel oil ». *Science*, vol. 176, p. 1120-1122.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2010. *Détermination de la granulométrie*, MA. 100 – Gran 2.0, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 11 p.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2011. *Détermination des hydrocarbures aromatiques polycycliques : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse*, MA. 400 – HAP 1.1, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 27 p.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2013. *Détermination des hydrocarbures pétroliers (C₁₀ à C₅₀) : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme*, MA. 400 – HYD. 1.1., Rév. 1, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 16 p.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2014. *Détermination du carbone organique total dans les solides : dosage par titration*, MA. 405 – C 1.1, Rév. 1, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 9 p.
- CRUNKILTON, R. L. et R. M. DUCHROW, 1990. « Impact of a massive crude oil spill on the invertebrate fauna of a Missouri Ozark stream », *Environmental Pollution*, vol. 63, p. 13-31.
- DILLON, R. T., Jr., M. ASHTON, M. KOHL, W. REEVES, T. SMITH, T. STEWART et B. WATSON, 2013. *The Freshwater Gastropods of North America*, [En ligne], [<http://www.fwgna.org>] (Consulté le 4 octobre 2017).

- DUFRENE, M. et P. LEGENDRE, 1997. « Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach », *Ecological Monographs*, vol. 67, n° 3, p. 345-366.
- ENVIRONNEMENT CANADA (EC) et MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC (MDDEP), 2007. *Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration*, 39 p.
- GÓMEZ GESTEIRA, J. L. et J.-C. DAUVIN, 2005. « Impact of the Aegean Sea oil spill on the subtidal fine sand macrobenthic community of the Ares-Betanzos Ria (Northwest Spain) », *Marine Environmental Research*, vol. 60, n° 3, p. 289-316.
- GRENIER, M., 2014a. *Accident ferroviaire de Lac-Mégantic – Impact du déversement de pétrole brut et des travaux de nettoyage sur les communautés de macroinvertébrés benthiques de la rivière Chaudière – automne 2013*, Rapport préparé pour le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 72 p. + 4 ann.
- GRENIER, M., 2014b. *Accident ferroviaire de Lac-Mégantic – Revue de la littérature portant sur l'impact des déversements d'hydrocarbures et des travaux de nettoyage sur les communautés de macroinvertébrés benthiques*, Rapport préparé pour le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs par CIMA+, 35 p.
- GUINEY, P. D., J. L. SYKORA et G. KELETI, 1987. « Environmental impact of an aviation kerosene spill on stream water quality in Cambria County, Pennsylvania », *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 6, p. 977-988.
- HARE, L. et J. C. CARTER, 1976. « The distribution of *Chironomus* (s. s.)? cucini (salinarius group) larvae (Diptera: Chironomidae) in Parry Sound, Georgian Bay, with particular reference to structural deformities », *Canadian Journal of Zoology*, vol. 54, n° 12, p. 2129-2134.
- HARREL, R. C., 1985. « Effects of a crude oil spill on water quality and macrobenthos of a southeast Texas stream », *Hydrobiologia*, vol. 124, p. 223-228.
- HILSENHOFF, W. L., 1988. « Rapid field assessment of organic pollution with a family-level biotic index », *Journal of the North American Benthological Society*, vol. 7, n° 1, p. 65-68.
- HOLOPAINEN, I. J. et G. R. LOPEZ, 1989. « Functional anatomy and histology of the digestive tract of fingernail clams (Sphaeriidae, Bivalvia) », *Annales Zoologici Fennici*, vol. 26, n° 1, p. 61-72.
- LEGENDRE, P. et L. LEGENDRE, 1998. *Écologie numérique*, 2^e édition, tome 2, Paris, Masson, Presses de l'Université du Québec, 335 p.
- LEGENDRE, P. et L. LEGENDRE, 2012. *Numerical Ecology*, 3^e édition, Amsterdam, Elsevier Science BV, 1006 p.
- LYTLE, D. A. et B. L. PECKARSKY, 2001. « Spatial and temporal impacts of a diesel fuel spill on stream invertebrates », *Freshwater Biology*, vol. 46, p. 693-704.
- MAZOR, R. D., T. B. REYNOLDSON, D. M. ROSENBERG et V. H. RESH, 2006. « Effects of biotic assemblage, classification, and assessment method on bioassessment performance », *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 63, n° 2, p. 394-411.

- MCCAULEY, R. N., 1966. « The biological effects of oil pollution in a river », *Limnology and Oceanography*, vol. 11, p. 475-486.
- MCCUNE, B. et M. J. MEFFORD, 1999. *PC-ORD – Multivariate analysis of ecological data*, Version 4, Oregon, MJM Software Design.
- MERRIT, R. W., K. W. CUMINS et M. B. BERG, 2008. *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*, 4^e édition, Dubuque (Iowa), Kendall/Hunt Publishing Company, 1158 p.
- MIELKE, P. W. Jr. et K. J. BERRY, 1982. « An extended class of permutation techniques for matched pairs », *Communications in Statistics – Theory and Methods*, vol. 11, n^o 11, p. 1197-1207.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA FAUNE ET DES PARCS (MDDEFP), 2013a. *Lignes directrices pour l'évaluation de qualité des sédiments du lac Mégantic et de la rivière Chaudière, en lien avec l'accident ferroviaire du 6 juillet 2013*, Québec, Gouvernement du Québec, 7 p.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA FAUNE ET DES PARCS (MDDEFP), 2013b. *Guide de surveillance biologique basée sur les macroinvertébrés benthiques d'eau douce du Québec – Cours d'eau peu profonds à substrat grossier, 2013*, 2^e édition, Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, 88 p. (dont 6 ann.).
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC), 2014. *Tragédie ferroviaire du Lac-Mégantic – Rapport du Comité expert sur la contamination résiduelle de la rivière Chaudière par les hydrocarbures pétroliers – Constats, recommandations, actions proposées*, Québec, Gouvernement du Québec, 40 p. + 4 ann.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC), 2015a. *Tragédie ferroviaire de Lac-Mégantic – Deuxième rapport du Comité expert sur la contamination résiduelle de la rivière Chaudière par les hydrocarbures pétroliers – Constats, recommandations, actions proposées pour 2015-2017*, Québec, Gouvernement du Québec, 64 p.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC), 2015b. *Tragédie ferroviaire de Lac-Mégantic – Évaluation du risque écotoxicologique associé à la contamination des sédiments de la rivière Chaudière*, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 46 p. + ann.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC), 2016a. *Tragédie ferroviaire de Lac-Mégantic – Évaluation in situ de la toxicité des sédiments de la rivière Chaudière sur les communautés de macroinvertébrés benthiques, un an après le déversement*, Québec, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 14 p. + 3 ann.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC), 2016b. *Tragédie ferroviaire de Lac-Mégantic – Évaluation de l'intégrité biotique des communautés de macroinvertébrés benthiques de la rivière Chaudière, automnes 2013 et 2014*, Québec, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 31 p. + 9 ann.

- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC), 2017a. *Tragédie ferroviaire de Lac-Mégantic – Évaluation de l'intégrité biotique des communautés de macroinvertébrés benthiques de la rivière Chaudière, automnes 2013, 2014 et 2015*, Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 37 p. + 8 ann.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC), 2017b. *Tragédie ferroviaire de Lac-Mégantic – Troisième rapport du Comité expert sur la contamination résiduelle de la rivière Chaudière par les hydrocarbures pétroliers*, Québec, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 7 p. + 1 ann.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC), 2017c. *Tragédie ferroviaire de Lac-Mégantic – Caractérisation complémentaire de certaines zones d'accumulation de sédiments de la haute Chaudière en 2015*, Québec, Direction régionale et Bureau de coordination des urgences du Centre de contrôle environnemental de la Capitale-Nationale et de la Chaudière-Appalaches, 41 p. + 2 ann.
- MOZLEY, S. C. et M. G. BUTLER, 1978. « Effects of crude oil on aquatic insects of tundra pond », *Artic*, vol. 31, n° 3, p. 229-241.
- 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*, vol. 40, p. 56-72.
- PETTIGROVE, V. et A. HOFFMANN, 2005. « Effects of long-chain hydrocarbon-polluted sediment on freshwater macroinvertebrates », *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 24, n° 10, p. 2500-2508.
- PONTASCH, K. W. et M. A. BRUSVEN, 1988. « Macroinvertebrate response to a gasoline spill in Wolf Lodge Creek, Idaho, USA », *Archiv für Hydrobiologie*, vol. 113, p. 41-60.
- POULTON, B. C., S. E. FINDER et S. A. HUMPHREY, 1997. « Effects of a crude oil spill on the benthic invertebrate community in the Gasconade River, Missouri », *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 33, p. 268-276.
- SHEPARD, F. P., 1954. « Nomenclature based on sand-silt ratios », *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 24, n° 3.
- SMITH, D. G., 2001. *Pennak's Freshwater Invertebrates of the United States: Porifera to Crustacean*, 4^e édition, New York, John Wiley & Sons, Inc., 648 p.
- SMITH, P., D. SNOOK, A. MUSCUTT et A. SMITH, 2010. « Effects of a diesel spill on freshwater macroinvertebrates in two urban watercourses, Wiltshire, UK », *Water and Environment Journal*, vol. 24, n° 4, p. 249-260.
- WONG, C. S., F. A. WHITNEY, W. J. CRETNEY, K. LEE, F. MCLAUGHKIN, J. W. T. Fu et D. Zhuang, 1984. « An experimental marine ecosystem response to crude oil and Corexit 9527: Part 1-Fate of chemically dispersed crude oil », *Marine Environmental Research*, vol. 13, n° 4, p. 247-263.
- WSP 2017. *Tragédie ferroviaire de Lac-Mégantic – Suivi temporel de la contamination des sédiments de la rivière Chaudière en 2016*, Rapport produit pour le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 27 p. + ann.

ANNEXES

Annexe 1 Sédiments échantillonnés dans la rivière Chaudière en 2016 – variables et méthodes d’analyse

Variable mesurée	Méthode	Appareil utilisé	Limite de détection	Référence
Hydrocarbures pétroliers C ₁₀ -C ₅₀	Chromatographique en phase gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme (GC-FID) Extraction à l'hexane	GC/FID; Hewlett Packard, GC 5890 série II, FID	39 à 110 mg/kg	MA. 400 – HYD. 1.1 (CEAEQ, 2013).
HAP alkylés	Dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse Extractions à l'acétone-hexane et au dichlorométhane Purification sur silice	GC/MS; Agilent, GC 6890N, MS 5973N	0,005 à 0,05 mg/kg	MA. 400 – HAP 1.1 (CEAEQ, 2011)
Carbone organique total (COT)	Titration	Burette et indicateur coloré	0,10 %	MA. 405 – C 1.1 (CEAEQ, 2014)
Granulométrie	Bouyoucos	Hydromètre de type 152H	-	MA. 100 – Gran 2.0 (CEAEQ, 2010)

Annexe 2 Liste des variables de communauté évaluées et des abréviations utilisées

1. Nombre total de taxons – *nbtax*
2. Nombre de taxons éphéméroptères – *nbtaxEph*
3. Nombre de taxons plécoptères – *nbtaxPlé*
4. Nombre de taxons trichoptères – *nbtaxTri*
5. Nombre de taxons odonates – *nbtaxODO*
6. Nombre de taxons EPT (éphéméroptères, plécoptères et trichoptères) – *nbtaxEPT*
7. Nombre de taxons POET (plécoptères, odonates, éphéméroptères et trichoptères) – *nbtaxPOET*
8. Nombre de taxons Chironomidae – *nbtaxChiro*
9. Nombre de taxons pélicypodes – *nbtaxPélé*
10. Nombre de taxons gastéropodes – *nbtaxGas*
11. Nombre de taxons diptères – *nbtaxDip*
12. Nombre de taxons d'insectes fouisseurs – *nbtaxInsF*
13. % Éphéméroptères – *%ephe*
14. % Éphéméroptères – *%plec*
15. % Trichoptères – *%trich*
16. % Éphéméroptères, plécoptères et trichoptères – *%EPT*
17. % insectes – *%inse*
18. % insectes fouisseurs / insectes – *%inseF/ins*
19. % diptères – *%dipt*
20. % Chironomidae – *%chiro*
21. % Chironomini – *%chirni*
22. % Tanytarsini – *%tany*
23. % Chironominae – *%chirnea*
24. % Orthocladinae – *%ortho*
25. % Tanypodinae (non Pentaneurini) – *%tanyp*
26. % Pentaneurini – *%penta*
27. % Tanytarsini/Chironomidae – *%tany/chir*
28. % crustacés – *%crus*
29. % isopodes – *%iso*
30. % oligochètes – *%olig*
31. % Mollusques – *%moll*
32. % pélicypodes – *%pele*
33. % gastéropodes – *%gast*
34. % Amnicola – *%Amni*
35. % du taxon dominant – *%taxdom*
36. % des deux taxons dominants – *%taxdeuxdo*
37. Nombre de taxons tolérants à la pollution organique* (cote de tolérance > 6) – *nbtaxtol*
38. Nombre de taxons intolérants à la pollution organique* (cote de tolérance < 4) – *nbtaxint*
39. % de taxons tolérants à la pollution organique* (cote de tolérance > 6) – *%taxtol*
40. % d'organismes tolérants à la pollution organique* (cote de tolérance > 6) – *%tol*
41. % de taxons intolérants à la pollution organique* (cote de tolérance < 4) – *%taxinto*
42. % d'organismes intolérants à la pollution organique* (cote de tolérance < 4) – *%intol*
43. Indice biotique d'Hilsenhoff – *HBI*
44. Abondance – *Abond*

* Dans le présent document, l'expression « pollution organique » se rapporte à l'enrichissement par la matière organique et par les nutriments. Les cotes de tolérance déterminées pour le niveau d'identification au genre sont tirées de Bode et collab. (2002 et 1996) et sont complétées au besoin, surtout pour le niveau d'identification à la famille, par Hilsenhoff (1988).

Annexe 3 Liste de taxons

PHYLUM	CLASSE	ORDRE	FAMILLE	Sous-famille	GENRE ou (TRIBU)	Présence 2014	Présence 2016	
ARTHROPODA	INSECTA	Ephemeroptera	Baetidae		<i>Baetis</i>		x	
					<i>Centroptilum</i>	x		
						<i>Plauditus</i>		x
			Caenidae		<i>Caenis</i>	x	x	
				Ephemerellidae		<i>Drunella</i>		x
					<i>Ephemerella</i>	x	x	
					<i>Eurylophella</i>	x	x	
			Ephemeridae		<i>Ephemera</i> ¹		x	
				Siphonuridae		<i>Siphonurus</i>	x	x
			Trichoptera		Brachycentrydae		<i>Micrasema</i>	
				<i>Phylocentropus</i> ¹		x	x	
		Dipseudopsidae			<i>Cheumatopsyche</i>		x	
					<i>Hydropsyche</i>		x	
		Hydroptylidae			<i>Agraylea</i>		x	
					<i>Hydroptila</i>	x		
					<i>Leucotrichia</i>		x	
					<i>Stactobiella</i>		x	
		Leptoceridae			<i>Mystacides</i>	x	x	
					<i>Oecetis</i>	x	x	
		Limnephilidae			<i>Hydatophylax</i>	x		
					<i>Limnephilus</i>		x	
					<i>Platycentropus</i>		x	
					<i>Neureclipsis</i>	x		
			Psychomyiidae		<i>Psychomyia</i>		x	
		Plecoptera	Capnidae					x
								x
					<i>Pteronarcys</i>		x	
		Diptera	Ceratopogonidae		<i>Bezzia/Palpomyia</i> ¹	x	x	
					<i>Probezzia</i> ¹		x	
					<i>Cerapotogon</i> ^{1,2}		x	
					<i>Culicoides</i> ¹		x	
					<i>Dasyhelea</i>		x	
	<i>Mallochohelea</i> ¹		x	x				
Chironomidae	Chironominae			(Chironomini) ¹	x	x		
				(Tanytarsini) ¹	x	x		
			Diamesinae		x			
			Orthoclaadiinae ¹	x	x			
			Prodiamesinae		x			
	Tanypodinae		(non Pentaneurini)*	x	x			
	Tanypodinae		(Pentaneurini)	x	x			
	Dolichopodidae ¹					x		
Empididae			<i>Clinocera</i>		x			
		<i>Dolichocephala</i>		x				
		<i>Hemerodromia</i> ¹		x				
	Muscidae	-		x				
	Syrphidae ¹	-		x				
	Tabanidae		<i>Chrysops</i> ¹	x				
	Tipulidae		<i>Antocha</i>	x	x			

Annexe 3 Liste de taxons (suite)

PHYLUM	CLASSE	ORDRE	FAMILLE	Sous-famille	GENRE ou (TRIBU)	Présence 2014	Présence 2016	
ARTHROPODA	INSECTA	Coleoptera	Chrysomelidae		-		x	
			Curculionidae		-		x	
			Dytiscidae		<i>Agabus</i>		x	
					<i>Liodessus</i>		x	
			Elmidae		<i>Dubiraphia</i>	x	x	
					<i>Stenelmis</i>	x		
			Hydrophilidae		<i>Berosus</i>		x	
			Psephenidae		<i>Psephenus</i>		x	
			Staphylinidae ¹				x	
			Odonata	Gomphidae		<i>Gomphus</i> ¹	x	x
						<i>Ophiogomphus</i> ¹	x	
				Macromiidae		<i>Macromia</i>		x
				Coenagrionodae		<i>Enallagma</i>	x	
				Hemiptera	Corixidae			
	Lepidoptera	Crambidae				x		
ARTHROPODA	CRUSTACEA	Amphipoda	Gammaridae		<i>Gammarus</i>	x	x	
		Cladocera	-			x	x	
		Copepoda	-			x	x	
		Isopoda	Asellidae		<i>Caecidota</i>	x	x	
		Ostracoda	-			x	x	
ARTHROPODA	ARACHNOIDEA	Acari	-			x	x	
MOLLUSCA	PELECYPODA	Eulamellibranchia	Sphaeriidae		<i>Pisidium</i>	x	x	
MOLLUSCA	GASTROPODA	Limnophila	Ancylidae		<i>Ferrissia</i>	x	x	
			Lymnaeidae		<i>Fossaria</i>	x		
					<i>Stagnicola</i>	x		
			Physidae		<i>Physa</i>	x	x	
			Planorbidae			x	x	
MOLLUSCA	GASTROPODA	Mesogastropoda	Hydrobiidae		<i>Amnicola</i>	x	x	
			Viviparidae		<i>Campeloma</i>	x		
ANNELLIDA	HIRUDINEA					x		
ANNELLIDA	OLIGOCHAETA					x	x	
NEMATODA						x	x	
NEMERTEA							x	
PLATYHELMINTHES						x	x	
TARDIGRADA							x	

* N'est pas une tribu, regroupe tous les Tanypodinae qui ne sont pas des Pentaneurini

¹ Insecte fouisseur selon Merritt et collab., 2008

² Insecte fouisseur à la sous-famille (Ceratopogoninae), non classé au genre par Merritt et collab., 2008

Annexe 4 Variables de communauté calculées par échantillon

Échantillon	nbtax	nbtaxEph	nbtaxPlé	nbtaxTri	nbtaxOdo	nbtaxEPT	nbtaxPOET	nbtaxchiro	nbtaxpélé	nbtaxgas
14_24A	6	0	0	0	0	0	0	1	1	2
14_24B	8	1	0	0	0	1	1	2	1	2
14_24C	6	0	0	1	0	1	1	1	1	0
16_24A	11	3	0	0	1	3	4	3	0	1
16_24B	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16_24C	12	1	0	1	1	2	3	3	0	1
14_121A	10	1	0	0	0	1	1	4	1	2
14_121B	12	0	0	1	0	1	1	4	1	2
14_121C	12	1	0	0	0	1	1	3	1	4
16_121A	24	2	1	2	0	5	5	5	1	2
16_121B	25	4	0	2	0	6	6	5	1	2
16_121C	26	4	1	1	1	6	7	5	1	2
14_282A	13	1	0	0	0	1	1	3	0	1
14_282B	17	1	0	0	0	1	1	3	1	2
14_282C	21	2	0	2	0	4	4	3	1	3
16_282A	21	1	0	1	1	2	3	4	1	1
16_282B	22	0	0	1	0	1	1	4	1	2
16_282C	25	0	0	2	1	2	3	4	1	2
14_48-49A	10	0	0	0	0	0	0	2	1	2
14_48-49B	11	0	0	1	0	1	1	1	1	4
14_48-49C	12	0	0	1	0	1	1	2	1	3
16_48-49A	18	1	0	0	0	1	1	5	1	1
16_48-49B	17	1	0	1	0	2	2	5	1	1
16_48-49C	17	1	0	1	0	2	2	4	1	1
14_6AA	12	0	0	0	0	0	0	3	1	3
14_6AB	18	0	0	2	1	2	3	4	1	4
14_6AC	11	0	0	0	0	0	0	3	1	1
16_6AA	22	5	0	0	0	5	5	6	1	1
16_6AB	15	2	0	2	0	4	4	4	1	1
16_6AC	16	1	1	0	0	2	2	5	1	1
14_DR41A	11	1	0	0	0	1	1	3	1	2
14_DR41B	9	1	0	0	0	1	1	2	1	1
14_DR41C	10	0	0	0	0	0	0	3	1	3
16_DR41A	19	2	0	1	1	3	4	4	1	3
16_DR41B	24	2	0	2	1	4	5	4	1	2
16_DR41C	23	2	0	2	0	4	4	4	1	3
14_DR42A	10	1	0	0	0	1	1	2	1	1
14_DR42B	12	3	0	0	1	3	4	2	1	2
14_DR42C	9	0	0	0	1	0	1	1	1	2
16_DR42A	21	1	0	2	0	3	3	5	1	2
16_DR42B	28	1	0	2	1	3	4	4	1	3
16_DR42C	28	2	0	4	2	6	8	4	1	3
14_DR49A	9	0	0	0	0	0	0	3	1	2
14_DR49B	11	0	0	0	1	0	1	3	1	2
14_DR49C	8	1	0	0	1	1	2	1	0	1
16_DR49A	17	2	0	0	0	2	2	5	1	1
16_DR49B	25	2	0	3	0	5	5	4	1	4
16_DR49C	26	0	0	4	1	4	5	4	1	2

Annexe 4 Variables de communauté calculées par échantillon (suite)

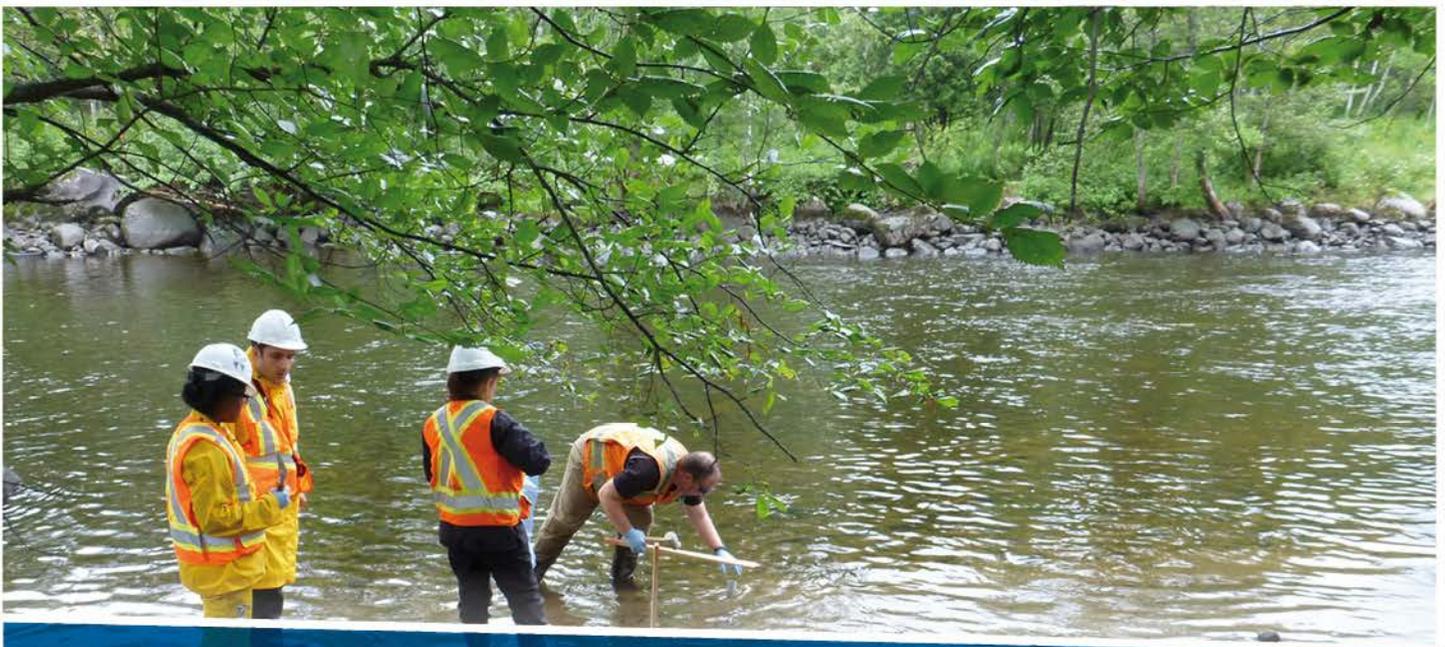
Échantillon	nbtaxdip	NbtaxinsF	%ephe	%plec	%trich	%EPT	%inse	%insF/ins	%dipt	%chiro	%chirni	%tany
14_24A	1	1	0	0	0	0	3,9	100,0	3,9	3,9	3,9	0,0
14_24B	2	2	0,1	0	0	0,1	11,6	98,8	11,5	11,5	10,8	0,0
14_24C	2	2	0	0	0,2	0,2	3,7	94,1	3,5	3,2	3,2	0,0
16_24A	3	2	3,6	0	0	3,6	18,2	70,0	13,6	13,6	2,7	0,0
16_24B	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
16_24C	3	1	2,4	0	2,4	4,9	41,5	58,8	31,7	31,7	0,0	0,0
14_121A	4	3	0,6	0	0	0,6	32	96,5	31,5	31,5	21,3	6,2
14_121B	5	3	0	0	0,2	0,2	70,1	97,4	69,9	69,7	65,5	0,8
14_121C	3	2	0,1	0	0	0,1	46,7	99,0	46,5	46,5	46,0	0,0
16_121A	9	4	0,6	0,1	0,3	0,9	54,6	93,1	53,6	53,2	32,5	2,6
16_121B	8	3	0,5	0	0,2	0,7	28,8	92,0	28,0	27,7	12,0	0,9
16_121C	9	5	0,7	0,1	0,2	0,9	19,2	80,8	18,0	17,5	8,9	1,0
14_282A	5	4	0,2	0	0	0,2	93,7	88,8	90,5	88,5	80,0	1,2
14_282B	5	5	2,7	0	0	2,7	46,2	84,9	39,2	34,7	32,0	0,8
14_282C	6	5	0,8	0	0,8	1,6	49,3	52,1	43,6	42,5	23,4	0,8
16_282A	7	6	0,1	0	0,1	0,2	41	96,4	40,0	39,5	33,8	4,2
16_282B	6	5	0	0	0,1	0,1	40,4	97,3	39,7	39,4	35,4	3,2
16_282C	9	6	0	0	0,6	0,6	44,5	89,0	40,7	39,9	36,5	2,2
14_48-49A	3	3	0	0	0	0	8,1	100,0	8,1	7,9	7,7	0,0
14_48-49B	2	2	0	0	0,8	0,8	4,8	83,3	4,0	1,6	1,6	0,0
14_48-49C	2	1	0	0	0,5	0,5	18,3	76,3	17,8	17,8	13,9	0,0
16_48-49A	7	4	0,2	0	0	0,2	30,2	96,6	29,8	29,5	10,1	0,6
16_48-49B	7	4	0,4	0	0,4	0,7	37,8	90,0	37,8	36	3,8	0,3
16_48-49C	5	3	0,4	0	0,4	0,9	48,9	95,4	47,3	48	4,9	0,4
14_6AA	4	3	0	0	0	0	29,4	95,6	29,4	29,3	27,5	0,0
14_6AB	5	5	0	0	0,5	0,5	24,6	96,9	24,0	23,9	23,5	0,1
14_6AC	4	3	0	0	0	0	12	96,3	12,0	11,9	11,1	0,0
16_6AA	7	3	2,7	0	0	2,7	33	86,1	30,1	30,1	13,3	1,7
16_6AB	5	3	0,8	0	1,2	2,1	33,3	91,3	31,3	30,8	17,5	0,0
16_6AC	5	3	0,4	0,4	0	0,8	38,9	95,8	38,1	38,1	5,3	2,4
14_DR41A	3	2	1,4	0	0	1,4	9,5	57,1	8,1	8,1	1,4	0,0
14_DR41B	3	1	1,6	0	0	1,6	7,8	40,0	6,3	6,2	3,1	0,0
14_DR41C	4	2	0	0	0	0	9	53,8	9,0	9	2,8	0,0
16_DR41A	6	5	7,6	0	0,8	8,4	26,1	54,8	16,8	15,1	4,2	4,2
16_DR41B	6	7	2	0	1,2	3,3	20	55,1	15,1	12,7	2,4	4,5
16_DR41C	7	5	1,3	0	1,3	2,5	14,2	61,5	11,6	11,1	5,6	1,6
14_DR42A	2	1	0,3	0	0	0,3	1,6	20,0	0,6	0,6	0,3	0,0
14_DR42B	2	1	0,7	0	0	0,7	1,2	14,3	0,3	0,3	0,2	0,0
14_DR42C	2	0	0	0	0	0	1,1	0,0	0,9	0,9	0,0	0,0
16_DR42A	8	5	0,9	0	1,2	2,1	37	75,0	34,0	32,8	21,8	0,6
16_DR42B	8	7	0,6	0	2,4	3	28	72,8	23,2	22,6	14,3	1,1
16_DR42C	6	6	3,2	0	1,9	5,1	19,4	50,0	12,4	11,6	4,3	0,8
14_DR49A	4	3	0	0	0	0	1,3	75,0	1,3	1	0,3	0,0
14_DR49B	3	3	0	0	0	0	1,3	62,5	1,0	1	0,3	0,0
14_DR49C	1	1	0,9	0	0	0,9	2,3	20,0	0,9	0,9	0,0	0,0
16_DR49A	7	5	1,3	0	0	1,3	20,6	85,5	18,3	17,6	13,6	1,7
16_DR49B	9	7	4,6	0	0,7	5,3	30,1	67,6	24,3	21,5	13,9	1,5
16_DR49C	10	10	0	0	1,1	1,1	54,6	91,1	50,9	46,7	43,2	0,8

Annexe 4 Variables de communauté calculées par échantillon (suite)

Échantillon	%chirnea	%ortho	%tanyp	%penta	%crus	%isop	%olig	%moll	%péléc	%gast	%amni	%taxdom
14_24A	3,9	0,0	0,0	0,0	0	0	82,4	3,9	0,5	3,4	0,0	82,4
14_24B	10,8	0,7	0,0	0,0	0	0	82,1	2,2	1,9	0,3	0,1	82,1
14_24C	3,2	0,0	0,0	0,0	0	0	83,8	1,3	1,3	0	0,0	83,8
16_24A	2,7	10,0	0,0	0,9	0,9	0	76,4	0,9	0	0,9	0,9	76,4
16_24B	0,0	0,0	0,0	0,0	25	0	50	0	0	0	0,0	50
16_24C	0,0	24,4	0,0	2,4	2,4	0	36,6	2,4	0	2,4	2,4	36,6
14_121A	27,5	3,4	0,0	0,6	0	0	42,1	23,6	3,7	19,9	19,4	42,1
14_121B	66,3	2,0	1,4	0,0	0,2	0	27,5	1,6	0,6	1	0,2	69,7
14_121C	46,0	0,1	0,3	0,0	0,1	0	50,4	2,6	1	1,6	1,1	50,4
16_121A	35,1	15,6	0,1	1,8	1	0,1	36,3	4,7	3,7	1	0,9	53,2
16_121B	12,9	13,6	0,1	0,9	1,2	0,1	55,9	9,2	7,3	2	1,9	55,9
16_121C	9,9	5,4	0,7	1,5	1,2	0,2	66,3	9,2	7,2	2,1	1,8	66,3
14_282A	81,2	0,0	7,3	0,0	3,9	0,5	1	0,7	0	0,7	0,7	88,5
14_282B	32,8	1,9	0,0	0,0	4,3	0,5	27,4	17,7	16,7	1,1	0,8	34,7
14_282C	24,1	0,0	18,1	0,3	14,7	0,5	17,6	14,4	12,6	1,8	0,8	42,5
16_282A	37,9	1,0	0,5	0,1	35,1	2	18,4	4,1	4	0,1	0,1	39,5
16_282B	38,6	0,4	0,4	0,0	40,2	1,2	14,8	3,6	3,2	0,4	0,3	39,4
16_282C	38,7	0,5	0,2	0,6	40,4	9	5,5	6,1	1,9	4,2	3,0	39,9
14_48-49A	7,7	0,2	0,0	0,0	0,6	0	87,2	3,3	3	0,3	0,0	87,2
14_48-49B	1,6	0,0	0,0	0,0	0,8	0	72,2	18,3	1,6	16,7	1,6	72,2
14_48-49C	13,9	0,0	3,8	0,0	10,1	0	44,2	25,5	3,8	21,6	2,9	44,2
16_48-49A	10,7	18,2	0,2	0,2	3,1	0	49,8	9,5	8,5	1	1,0	49,8
16_48-49B	4,2	30,1	0,0	1,7	1,4	0	27,6	22,3	15,2	7,1	7,0	36
16_48-49C	5,3	40,7	0,4	0,9	3,9	0	29,3	3,9	3,1	0,9	0,9	48
14_6AA	27,5	0,5	1,3	0,0	0,6	0	68,2	1,2	0,7	0,5	0,1	68,2
14_6AB	23,5	0,2	0,2	0,0	0,7	0	65,5	8,1	2,2	5,9	5,0	65,5
14_6AC	11,1	0,4	0,5	0,0	0,3	0	85,1	0,7	0,6	0,1	0,0	85,1
16_6AA	15,0	13,3	0,2	0,6	1,5	0	50,1	2,5	1,1	1,3	1,3	50,1
16_6AB	17,5	12,5	0,0	0,4	0,4	0	55,8	4,6	4,2	0,4	0,4	55,8
16_6AC	7,7	29,6	0,0	0,0	0,8	0	28,3	6,1	2,4	3,6	3,6	38,1
14_DR41A	1,4	4,1	0,0	2,7	1,4	0	63,5	16,2	1,4	14,9	13,5	63,5
14_DR41B	3,1	0,0	1,6	1,6	4,7	0	59,4	14,1	3,1	10,9	10,9	59,4
14_DR41C	2,8	2,1	0,7	3,4	2,1	0	59,3	20	5,5	14,5	12,4	59,3
16_DR41A	8,4	3,4	2,5	0,8	18,5	5	37	16	10,1	5,9	3,4	37
16_DR41B	6,9	0,8	4,9	0,0	21,2	1,6	34,7	20,4	18,4	2	1,6	34,7
16_DR41C	7,3	0,9	2,4	0,5	39,6	3,6	26,5	11,3	6,4	4,9	4,5	26,5
14_DR42A	0,3	0,0	0,3	0,0	0,3	0	62,7	28,9	6,2	22,7	22,7	62,7
14_DR42B	0,2	0,0	0,0	0,2	0,2	0	69,8	26,6	2,5	24,1	23,8	69,8
14_DR42C	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	0	67,6	29,2	2,3	26,9	26,4	67,6
16_DR42A	22,4	4,2	4,2	1,8	6	0,3	35,8	19,1	16,1	3	2,7	35,8
16_DR42B	15,4	4,1	1,5	1,7	12,8	1,1	29,1	12,4	10	2,4	1,9	29,1
16_DR42C	5,1	3,8	2,7	0,0	16,7	0,3	39,4	17	12,9	4	3,5	39,4
14_DR49A	0,3	0,3	0,3	0,0	0	0	87,2	8,2	3,3	4,9	4,3	87,2
14_DR49B	0,3	0,3	0,0	0,3	0	0	79	17,8	3,9	13,9	13,8	79
14_DR49C	0,0	0,0	0,0	0,9	0	0	68,2	27,1	0	27,1	27,1	68,2
16_DR49A	15,3	1,3	0,3	0,3	13,6	1,7	44,9	15,9	5,6	10,3	10,3	44,9
16_DR49B	15,5	2,0	2,9	1,1	6,9	4,2	54	7,1	3,8	3,3	2,7	54
16_DR49C	44,1	0,7	2,0	0,0	9,2	3,8	28,1	6,3	4,9	1,4	1,3	46,7

Annexe 4 Variables de communauté calculées par échantillon (suite)

Échantillon	%taxdeuxdo	nbtaxtol	nbtaxint	%taxtol	%tol	%taxinto	%intol	HBI	abond
14_24A	92,2	3	0	50	88,8	0	0	7,68	205
14_24B	93,5	4	1	50	93,1	12,5	0,1	7,81	741
14_24C	95	2	1	33,3	87	16,7	0,2	7,62	462
16_24A	90	2	3	18,2	79,1	27,3	3,6	7,23	110
16_24B	75	1	0	33,3	50	0	0	6,75	4
16_24C	68,3	1	3	8,3	36,6	25	9,8	5,9	41
14_121A	73,6	3	1	30	64	10	0,6	7	356
14_121B	97,2	4	2	33,3	94,5	16,7	0,4	7,83	495
14_121C	96,9	5	1	41,7	97,1	8,3	0,1	7,92	1438
16_121A	89,5	6	5	25	69,6	20,8	1,6	7,12	1084
16_121B	83,6	6	6	24	68,6	24	0,9	7,13	1211
16_121C	83,8	6	5	23,1	76,6	19,2	0,8	7,37	1062
14_282A	92	5	0	38,5	89,5	0	0	7,71	410
14_282B	62,1	4	1	23,5	61	5,9	2,7	7,04	372
14_282C	60,1	4	1	19	59,8	4,8	0,5	6,95	381
16_282A	63,4	8	0	38,1	82,9	0	0	7,63	1223
16_282B	72,5	9	0	40,9	88	0	0	7,74	1187
16_282C	63,1	9	2	36	78,1	8	0,5	7,48	636
14_48-49A	95,2	5	0	50	95,7	0	0	7,9	869
14_48-49B	85,7	6	0	54,5	90,5	0	0	7,76	126
14_48-49C	62	7	0	58,3	88,9	0	0	7,69	208
16_48-49A	79,3	5	1	27,8	62,4	5,6	0,2	6,98	484
16_48-49B	63,6	3	2	17,6	32,5	11,8	1,1	6,15	283
16_48-49C	77,3	4	1	23,5	38,9	5,9	0,4	6,24	229
14_6AA	97,4	6	0	50	97,3	0	0	7,92	1011
14_6AB	89,4	5	1	27,8	89,8	5,6	0,1	7,73	1308
14_6AC	97,1	5	0	45,5	96,8	0	0	7,91	1331
16_6AA	80,2	5	3	22,7	65	13,6	1,7	6,96	525
16_6AB	86,7	3	1	20	73,8	6,7	0,4	7,26	240
16_6AC	66,4	4	2	25	34,4	12,5	0,8	6,11	247
14_DR41A	77	5	0	45,5	68,9	0	0	7,11	74
14_DR41B	73,4	5	0	55,6	70,3	0	0	7,12	64
14_DR41C	71,7	4	0	40	66,2	0	0	7,08	145
16_DR41A	52,1	6	0	31,6	61,3	0	0	6,97	119
16_DR41B	53,1	8	2	33,3	50,2	8,3	0,8	6,85	245
16_DR41C	50,9	8	0	34,8	50,2	0	0	6,82	550
14_DR42A	85,4	6	0	60	64,6	0	0	7	308
14_DR42B	93,6	6	2	50	71	16,7	0,3	7,14	593
14_DR42C	94	5	0	55,6	69,2	0	0	7,1	435
16_DR42A	68,7	4	1	19	63,6	4,8	0,3	7,09	335
16_DR42B	51,8	9	0	32,1	57,3	0	0	6,85	539
16_DR42C	52,3	7	1	25	53,6	3,6	0,5	6,8	371
14_DR49A	91,4	4	0	44,4	88,5	0	0	7,69	304
14_DR49B	92,8	2	0	18,2	79,4	0	0	7,43	596
14_DR49C	95,3	1	1	12,5	68,2	12,5	0,9	7,03	214
16_DR49A	62,5	7	1	41,2	62,8	5,9	0,3	7,07	301
16_DR49B	75,4	8	2	32	77,9	8	0,7	7,36	452
16_DR49C	74,8	8	0	30,8	81,6	0	0	7,56	718



**Développement durable,
Environnement et Lutte
contre les changements
climatiques**

Québec 