



GESTION DES EAUX DE SURFACE

ET DES EAUX SOUTERRAINES DANS L'INDUSTRIE DES SABLES BITUMINEUX

GEORGE DIXON, UNIVERSITÉ DE WATERLOO

Publié mars 2015



Réseau
canadien
de l'eau

GESTION DES EAUX DE SURFACE ET DES EAUX SOUTERRAINES DANS L'INDUSTRIE DES SABLES BITUMINEUX

GEORGE DIXON, UNIVERSITÉ DE WATERLOO

Publié mars 2015

CONTEXTE

L'eau joue un rôle central dans l'exploitation minière à ciel ouvert dans les sables bitumineux du Canada. De vastes quantités d'eau de la rivière Athabasca sont utilisées et recyclées pour des procédés comme l'extraction du bitume (une forme de pétrole brut lourd et visqueux) qui se trouve dans le sable. L'extraction du bitume et les procédés de valorisation génèrent des eaux usées (connues sous le nom d'eaux de procédé) qui contiennent des niveaux élevés de constituants toxiques pour les organismes aquatiques : des acides naphthéniques (AN), des sels, des composés aromatiques polycycliques, des métaux et d'autres matières toxiques.

Puisque les eaux de procédé sont toxiques pour les organismes aquatiques, elles ne peuvent être déversées en toute sécurité dans la rivière Athabasca. Elles doivent être entreposées temporairement sur les lieux dans des puits de mines épuisées ou dans des bassins de résidus. Une fois les opérations minières terminées, le site sera remis en état au moyen de stratégies pour zones sèches et humides. Les stratégies pour zones humides comprennent le stockage de l'eau de procédé ou des résidus de façon à créer des milieux humides peu profonds dans des zones désignées et des lacs de kettle dans des mines épuisées. À terme, ce réseau de lacs et de zones humides remis en état sera relié au bassin hydrologique.

La compréhension de la nature chimique et des effets des AN est l'un des principaux défis de la gestion des eaux usées produites par l'exploitation des sables bitumineux. On craint que les AN présents dans les eaux de procédé nuisent à la santé environnementale des milieux aquatiques remis en état ou encore se retrouvent dans la rivière Athabasca. Les efforts insuffisants de surveillance passés, réalisés au moyen de méthodes analytiques désuètes et inexactes, ont produit peu de données qui permettraient de faire des évaluations scientifiques en matière de sécurité et de risque.

L'équipe multidisciplinaire de ce projet de recherche, financé en partie par le Réseau canadien de l'eau, a conçu et mis en œuvre une large gamme de projets visant à combler les lacunes dans les connaissances relatives à la chimie des AN et au devenir et aux effets de ces composés dans l'environnement aquatique. Les projets ont été menés en laboratoire ou sur le terrain en vue d'aborder les enjeux environnementaux associés au stockage des eaux usées (p. ex., les bassins de résidus des sables bitumineux) ou à l'utilisation des eaux usées dans les efforts de remise en état (p. ex., les zones humides et bassins expérimentaux construits dans les années 1980 et 1990).

La recherche effectuée couvre une vaste gamme de questions afférentes à la gestion des eaux usées dans les sables bitumineux, de l'évaluation environnementale à la remédiation. Les exemples suivants illustrent certaines de ces études, les résultats et l'importance de ces résultats pour la gestion des eaux usées et pour les organismes de réglementation (tableau 1).

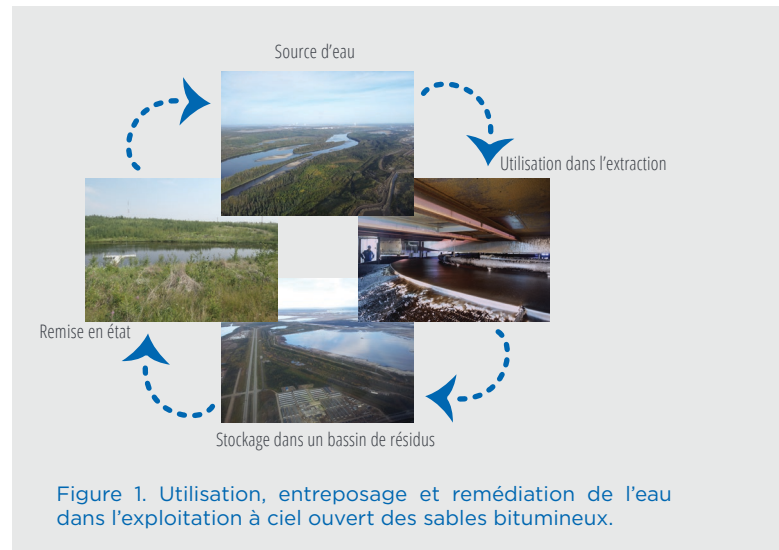


Figure 1. Utilisation, entreposage et remédiation de l'eau dans l'exploitation à ciel ouvert des sables bitumineux.

Tableau 1. Questions de recherche

CATÉGORIE DE RECHERCHE	QUESTIONS DE RECHERCHE
Concentration et composition	Quels composés se trouvent dans la fraction extractible aux acides de l'eau de procédé des sables bitumineux?
Toxicologie liée aux poissons	Quels sont les effets de l'eau de procédé sur les étapes délicates de la vie des poissons, comme la reproduction?
Fonction écosystémique	Quels sont les effets de l'eau de procédé et des résidus sur les divers groupes fonctionnels du réseau trophique et les flux de carbone?
Transport et devenir dans l'eau souterraine	L'eau de procédé s'infiltrait-elle dans l'eau souterraine à partir des bassins de résidus?
Les AN se biodégradent-ils dans l'eau souterraine?	What techniques can be applied to remediate process-affected water?
Options de remédiation	Quelles techniques peut-on appliquer pour assainir l'eau de procédé?

CONCENTRATION ET COMPOSITION DE L'EAU DE PROCÉDÉ

QUELS COMPOSÉS SE TROUVENT DANS LA FRACTION EXTRACTIBLE AUX ACIDES DE L'EAU DE PROCÉDÉ DES SABLES BITUMINEUX?

Les composés organiques présents dans l'eau de procédé des sables bitumineux peuvent être séparés en une fraction acide et une fraction basique-neutre. On sait que la fraction extractible aux acides cause une toxicité aiguë.

< 50% des composés dans l'eau de procédé des sables bitumineux sont des acides naphthéniques

Au cours des dernières décennies, on pensait que la fraction extractible aux acides comprenait principalement des AN classiques, et on disposait de peu de méthodes analytiques pour déterminer la composition chimique de cette fraction. L'utilisation de la spectrométrie de masse, de l'ionisation par électronébulisation, de transformées de Fourier et de la résonance cyclotronique ionique (ESI-FT-ICR MS) pour analyser la fraction extractible aux acides des bassins de résidus des sables bitumineux et d'autres échantillons d'eau a permis aux chercheurs d'établir que les AN classiques et les oxy-AN (des AN qui ont subi une oxydation modérée) représentent moins de 50 % des nombreux composés qui se trouvent dans les fractions extractibles aux acides.

Ces résultats ont mené au développement d'une large gamme de techniques d'analyse améliorées qui pourraient éventuellement remplacer les méthodes existantes. Il est essentiel de pouvoir mieux mesurer la composition et la concentration des matières organiques extractibles aux acides présentes dans l'environnement et déterminer la toxicité des concentrations connues si l'on souhaite évaluer les risques environnementaux et protéger la vie aquatique dans les systèmes naturels et remis en état. Un consensus quant aux meilleures méthodes d'analyse de ce mélange complexe fournira des données cohérentes et fiables sur la concentration et la composition des matières organiques extractibles aux acides et permettra d'améliorer les pratiques de surveillance et de réglementation.

TOXICOLOGIE LIÉE AUX POISSONS

QUELS SONT LES EFFETS DE L'EAU DE PROCÉDÉ SUR LES ÉTAPES DÉLICATES DE LA VIE DES POISSONS, COMME LA REPRODUCTION?

Les mesures de la santé des poissons (survie, croissance et reproduction) sont de précieux indicateurs qui permettent d'évaluer le risque environnemental lié à la remise en état des sables bitumineux. Bien que la toxicité aiguë (mortelle) puisse reculer après une période de vieillissement prolongée dans les systèmes remis en état, les effets sublétaux sur la croissance et la reproduction des poissons peuvent devenir un problème chronique et entraîner le déclin des populations de poissons.

Afin d'évaluer les effets de l'eau de procédé vieillie des sables bitumineux sur la reproduction des poissons, des têtes-de-boule ont été exposées à différents flux d'eau de procédé vieillie provenant d'une gamme de sites expérimentaux de sables bitumineux remis en état dans des conditions de laboratoire. On a souvent noté des réductions dans les taux de stéroïdes sexuels, dans les caractères sexuels secondaires mâles, dans les taux moyens de fécondité (nombre d'œufs par femelle par jour) ou dans le nombre de fraies, selon la source et la qualité de l'eau de procédé vieillie (figure 2).

D'après la qualité de l'eau du mélange complexe de constituants trouvés dans l'eau de procédé, on a déterminé que des concentrations d'AN dépassant 25 mg/L et une conductivité supérieure à 2 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ne conviendraient pas à la reproduction des poissons.

En raison du mélange complexe de constituants qui se trouvent dans l'eau de procédé, il est difficile de cerner les seuls effets des AN et de les séparer de ceux des sels, par exemple. Par conséquent, les chercheurs ont extrait les AN de l'eau de procédé et ont exposé ces extraits à des populations de têtes-de-boule afin d'établir leur impact sur la reproduction des poissons.

Les chercheurs ont constaté une baisse de la production d'œufs et l'apparition de caractères sexuels secondaires mâles et de niveaux de stéroïdes sexuels à des concentrations de 10 mg/L dans l'extrait d'AN.

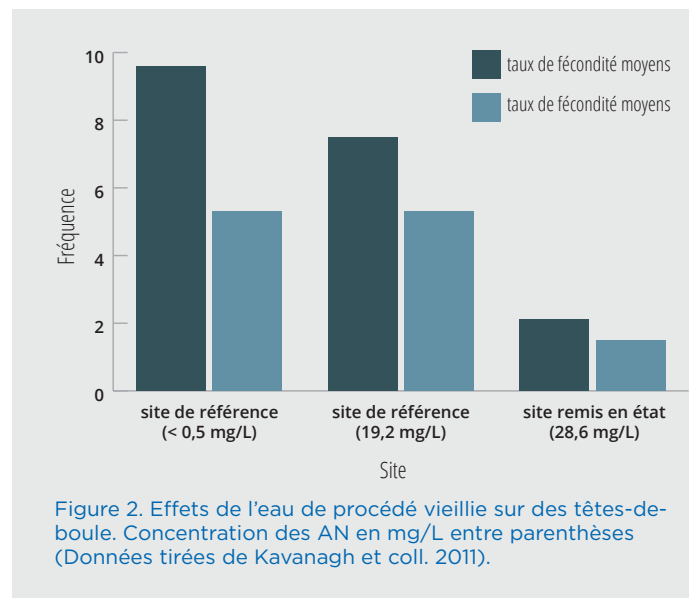


Figure 2. Effets de l'eau de procédé vieillie sur des têtes-de-boule. Concentration des AN en mg/L entre parenthèses (Données tirées de Kavanagh et coll. 2011).

Les acides naphthéniques en concentrations supérieures à 25 mg/L et dont la conductivité dépasse 2 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nuisent à la reproduction des poissons.

Certains de ces effets étaient réduits en présence de sel (NaHCO_3) à des concentrations semblables à celle de l'eau de procédé des sables bitumineux. Selon d'autres études sur des têtes-de-boule à l'état larvaire, une concentration de 700 mg/L de NaHCO_3 diminue les effets aigus et chroniques de l'extrait d'AN.

Les résultats de cette étude ont des incidences importantes pour les futurs efforts de remise en état à grande échelle (p. ex., les lacs de kettle). Les connaissances découlant de ces études aident à définir les concentrations limites d'AN et de sel posant un danger pour les populations de poissons et soulignent le besoin de réduire les concentrations d'AN dans les eaux remédiées. Cette information a contribué à l'élaboration du End Pit Lakes Guidance Document en 2012 (Document d'orientation pour les lacs de kettle).

FONCTION ÉCOSYSTÉMIQUE

QUELS SONT LES EFFETS DE L'EAU DE PROCÉDÉ ET DES RÉSIDUS SUR LES MAILLONS DE LA CHAÎNE ALIMENTAIRE ET SUR LES FLUX DE CARBONE?

Les zones humides fournissent d'importants services écosystémiques, comme le stockage du carbone, la rétention et l'assainissement de l'eau et la diversité biologique. Des études antérieures ont cerné de nombreux types d'invertébrés et de plantes aquatiques qui colonisent les zones humides expérimentales de remise en état des sables bitumineux, mais on en sait peu sur le fonctionnement de ces zones humides désignées pour la remise en état. En vue de combler ces lacunes dans les connaissances, les chercheurs ont examiné divers groupes fonctionnels importants du réseau trophique (invertébrés benthiques, végétaux, etc.) et processus (production microbienne, production primaire, etc.) dans les zones humides désignées pour la remise en état, soit des éléments clés pour évaluer les flux de carbone dans des écosystèmes fonctionnels.

Les chercheurs ont échantillonné des zones humides âgées de 2 à 20 ans pour déterminer si le vieillissement pouvait réduire les effets de l'eau de procédé et des résidus sur différents groupes fonctionnels biologiques. Par comparaison avec les zones humides contaminées (par les sables bitumineux) plus jeunes (≤ 7 ans), les zones contaminées plus vieilles (> 8 ans) avaient tendance à ressembler davantage aux zones humides de référence sur le plan de la biomasse pour bon nombre des groupes fonctionnels du réseau trophique. Cependant, l'effet de l'âge n'était pas statistiquement significatif, et il restait plusieurs différences importantes. Par comparaison avec les zones humides de référence, les zones humides contaminées par les sables bitumineux affichaient une biomasse de plantes aquatiques submergées plus faible, une biomasse et une diversité d'invertébrés prédateurs moindres, ainsi qu'une production microbienne plus faible. Le processus naturel de vieillissement, au cours d'une période de 20 ans, dans les zones humides affectées par les sables bitumineux n'avait pas pleinement rétabli la fonction écosystémique à des niveaux équivalents à celui des zones humides de référence.

La cooccurrence d'une salinité élevée et de la présence d'AN dans les zones humides contaminées par les sables bitumineux signifie qu'il est difficile d'associer la toxicité observée dans ces zones à des constituants particuliers. Les chercheurs ont observé un certain degré de dégradation des AN dans les zones humides vieillies, mais il restait une salinité résiduelle. Or, le sel constitue lui aussi un important régulateur de la composition de la communauté des plantes aquatiques et possiblement de la production de carbone. Les efforts de remise en état des zones humides devraient prendre en considération les types de déchets utilisés dans les processus de remise en état et les effets de ces matières sur les niveaux de salinité durant les périodes sèches et humides et, partant, sur le développement des plantes aquatiques.

Le niveau de fonction écosystémique dans les zones humides affectées par les sables bitumineux n'est pas équivalent au niveau des zones humides de référence.

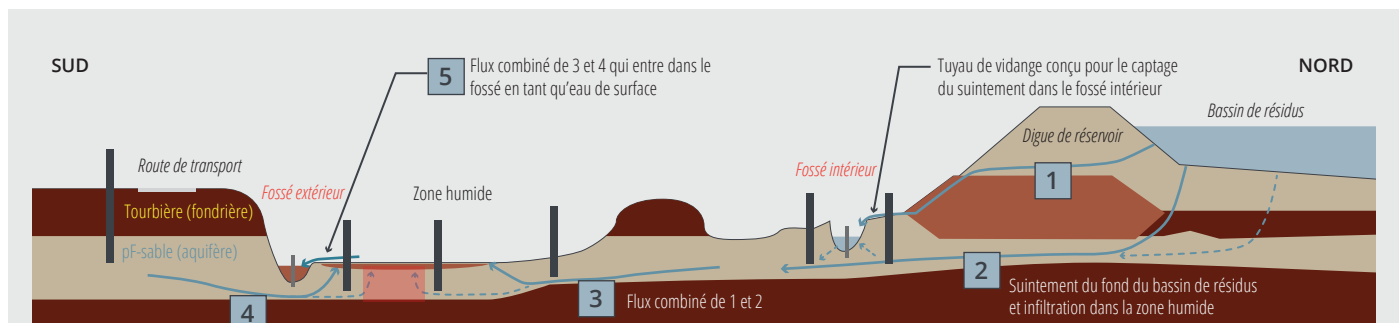


Figure 3. Voies d'écoulement potentielles de l'eau souterraine et de l'eau de surface dans un système de collecte du suintement provenant d'un bassin de résidus (modifié de Yasuda et coll., 2010).

Les résultats de cette étude ont d'importantes incidences pour les efforts de remise en état des zones humides. Les connaissances que nous avons acquises concernant les effets à long terme sur la fonction écosystémique dans les zones humides contaminées par les sables bitumineux contribuent au développement de documents d'orientation pour les futurs efforts de remise en état des zones humides.

TRANSPORT ET DEVENIR DE L'EAU DE PROCÉDÉ DANS LES EAUX SOUTERRAINES

L'EAU DE PROCÉDÉ S'INFILTRÉ-T-ELLE DANS L'EAU SOUTERRAINE À PARTIR DES BASSINS DE RÉSIDUS?

Un des risques associés à l'entreposage de l'eau de procédé des sables bitumineux dans des bassins de résidus concerne l'infiltration possible de ces eaux contaminées dans l'eau souterraine puis leur retour dans l'eau de surface. Il est important de repérer les voies d'écoulement menant de l'eau souterraine à l'eau de surface, en raison des effets potentiels de l'eau de procédé sur les organismes aquatiques qui vivent dans ces milieux récepteurs.

Les chercheurs ont utilisé des mesures de traceurs chimiques et de conditions hydrauliques, ainsi que des outils comme des modèles de l'eau souterraine, pour détecter les voies d'écoulement potentielles de l'eau de procédé provenant d'un bassin de résidus (figure 3).

LES ACIDES NAPHTÉNIQUES SE BIODÉGRADENT-ILS DANS L'EAU SOUTERRAINE?

Bien que des études antérieures en laboratoire et sur l'eau de surface aient montré que les AN se dégradent partiellement dans l'eau de procédé, peu d'études ont examiné l'eau du sous-sol, dans laquelle des conditions anaérobies sont plus courantes.

Les chercheurs n'ont constaté aucune biodégradation significative des AN dans un panache légèrement anaérobie au sein d'un aquifère sablonneux peu profond, malgré une période de résidence de plus de 20 ans. En l'absence de biodégradation des AN dans l'eau souterraine, tout flux d'eau souterraine vers l'eau de surface pourrait avoir des effets négatifs sur le biote de ces milieux récepteurs.

La compréhension du transport et du devenir de l'eau de procédé dans ces réseaux a stimulé la recherche sur différentes options de traitement (p. ex., l'oxydation chimique in situ, des barrières réactives dans les aquifères, des zones humides dans les zones de décharge), en vue d'appuyer la gestion à long terme des eaux contaminées dans les panaches d'eau souterraine. La hausse de la salinité dans les panaches d'eau souterraine et l'effet potentiellement négatif sur la végétation aquatique constituent des préoccupations sérieuses en raison des pratiques de recyclage de l'eau et de l'utilisation de minerais contenant des eaux interstitielles salines.

Les acides naphthéniques ne se biodégradent pas dans l'eau souterraine. Par conséquent, il se peut qu'on doive gérer et traiter l'eau souterraine potentiellement contaminée par le suintement de résidus, afin de protéger les milieux comportant des eaux de surface.

OPTIONS DE REMÉDIATION

QUELLES TECHNIQUES PEUT-ON UTILISER POUR REMÉDIER L'EAU DE PROCÉDÉ?

Selon des évaluations réalisées sur le terrain et en laboratoire sur la vie aquatique dans de l'eau de procédé vieillie provenant de bassins de remise en état et de zones humides expérimentaux, la biodégradation in situ qui se produit avec le temps n'est pas suffisante pour éliminer la toxicité chronique, bien qu'il n'y ait plus de signes de toxicité aiguë.

On estime que la toxicité chronique est causée par des AN persistants qui ne sont pas facilement dégradés par les populations microbiennes naturelles. L'utilisation de méthodes avancées de traitement par oxydation (ozonation) en vue d'éliminer les AN persistants et de méthodes analytiques avancées (chromatographie en phase liquide à rendement ultra élevé / spectrométrie de masse à haute résolution; UPLC-HRMS) pour détecter une vaste gamme d'AN parents et oxydés a permis aux chercheurs d'accélérer l'élimination des AN de l'eau de procédé des sables bitumineux.

D'après des tests bactériens de la toxicité (Microtox), la combinaison d'une ozonation modérée de l'eau de procédé des sables bitumineux, suivie d'une inoculation et d'une dégradation par des microbes indigènes, semble être une approche prometteuse pour faciliter l'élimination des AN et la réduction de la toxicité. Il faudra effectuer des tests additionnels au moyen d'une suite de biotes aquatiques pour évaluer les effets des produits de dégradation sur ce mélange complexe.

L'ozonation modérée suivie d'une dégradation microbienne accélère l'élimination des acides naphthéniques.

Les résultats de cette étude et d'autres études connexes offrent des technologies potentielles pour aborder l'enjeu de la toxicité chronique qui, pour l'instant, demeure un problème dans les sables bitumineux réhabilités même après plusieurs décennies de vieillissement. L'adoption de méthodes de traitement avant la remise en état afin de réduire la toxicité attribuable aux matières organiques extractibles aux acides améliorera la qualité de l'eau et la durabilité des écosystèmes aquatiques dans les futures zones humides remises en état et dans les lacs de kettle.

POUR PLUS D'INFORMATION, VEUILLEZ CONTACTER GEORGE DIXON, UNIVERSITÉ DE WATERLOO, À DGDIXON@UWATERLOO.CA

RAPPORT PRODUIT PAR ANDREA FARWELL, UNIVERSITÉ DE WATERLOO

ÉQUIPE DE RECHERCHE

GEORGE DIXON, département de biologie, Université de Waterloo

JIM BARKER, département des sciences de la terre, Université de Waterloo

PHIL FEDORAK, département des sciences biologiques, Université de l'Alberta

JONATHAN MARTIN, département de médecine de laboratoire et de pathologie, Université de l'Alberta

JAN CIBOROWSKI, département des sciences biologiques, Université de Waterloo

NIELS BOLS, département de biologie, Université de Waterloo

LUCILLA LEE, département de biologie, Université Wilfred Laurier

BARBARA BUTLER, département biologie, Université de Waterloo

GLEN VAN DER KRAAK, Collège des sciences biologiques, Université de Guelph

ULRICH MAYER, département des sciences de la terre et des océans, Université de Colombie-Britannique

CARL MENDOZA, département des sciences de la terre et de l'atmosphère, Université de l'Alberta

DAVID RUDOLPH, Institut de recherche sur les eaux souterraines, Sciences de la terre, Université de Waterloo

CAROL PTACEK, département des sciences de la terre, Université de Waterloo

NEIL THOMSON, département de génie civil, Université de Waterloo

KEVIN DEVITO, département des sciences biologiques, Université de l'Alberta

JONATHAN PRICE, Géographie, Université de Waterloo

JAMES SMITH, École de géographie et des sciences de la terre, Université de McMaster

KEVIN BIGGAR, Génie civil et environnemental, Université de l'Alberta

KRISTIN SCHIRMER, département de toxicologie cellulaire, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung-UFZ

MOHAMED GAMAL EL-DIN, département de génie civil et environnemental, Université de l'Alberta

JOHN GIBSON, hydrologie isotopique, Institut national de recherche sur les eaux

JEAN BIRKS, Gestion intégrée des ressources, Alberta Research Council

MICHAEL POWER, département de biologie, Université de Waterloo

PARTENAIRES ET AUTRES BAILLEURS DE FONDS

CANADIAN NATURAL RESOURCES LTD

SUNCOR ENERGY INC.

SYNCRUDE CANADA LTD.

ALBIAN SANDS ENERGY INC. (maintenant connu sous Shell Canada Énergie)

ALBERTA RESEARCH COUNCIL (maintenant connu sous Alberta Innovates Technology Futures)

TOTAL E & P CANADA LTD.

ENVIRONNEMENT CANADA

HATFIELD CONSULTANTS

IMPERIAL OIL LTD.

CONSEIL DE RECHERCHES EN SCIENCES NATURELLES ET EN GÉNIE DU CANADA

FONDATION CANADIENNE POUR L'INNOVATION

ALBERTA SCIENCE AND RESEARCH INVESTMENTS PROGRAM

ALBERTA WATER RESEARCH INSTITUTE

SCHOOL OF ENERGY AND THE ENVIRONMENT (Université de l'Alberta)

RÉFÉRENCES

END PIT LAKES GUIDANCE DOCUMENT, CUMULATIVE ENVIRONMENTAL MANAGEMENT ASSOCIATION, 2012. Disponible à : <http://cemaonline.ca>

GREWER, D.M., R.F. YOUNG, R.M. WHITTAL, P.M. FEDORAK. « Naphthenic acids and other acid-extractables in water samples from Alberta: what is being measured? », *Science of the Total Environment*, 2010, vol. 408, p. 5997-6010.

KAVANAGH, R.J., R.A. FRANK, B.K. BURNISON, R.F. YOUNG, P.M. FEDORAK, K.R. SOLOMON, G. VAN DER KRAAK. « Fathead minnow (*Pimephales promelas*) reproduction is impaired when exposed to a naphthenic acid extract », *Aquatic Toxicology*, 2012, vol. 116-117, p. 34-42.

KAVANAGH, R.J., R.A. FRANK, K.D. OAKES, M.R. SERVOS, R.F. YOUNG, P.M. FEDORAK, M.D. MACKINNON, K.R. SOLOMON, D.G. DIXON, G. VAN DER KRAAK. « Fathead minnow (*Pimephales promelas*) reproduction is impaired in aged oil sands process-affected waters », *Aquatic Toxicology*, 2011, vol. 101, p. 214-220.

KOVALENKO, K.E., J.J.H. CIBOROWSKI, C. DALY, D.G. DIXON, A.J. FARWELL, A.L. FOOTE, K.R. FREDERICK, J.M. GARDNER COSTA, K. KENNEDY, K. LIBER, M.C. ROY, C.A. SLAMA, J.E.G. SMITS. « Food web structure in oil sands reclaimed wetlands », *Ecological Applications*, 2013, vol. 23, n° 5, p. 1048-1060.

MARTIN, J.W., T. BARRI, X. HAN, P.M. FEDORAK, M. GAMAL EL-DIN, L. PEREZ, A.C. SCOTT, J.T. JIANG. « Ozonation of oil sands process-affected water accelerates microbial bioremediation », *Environmental Science and Technology*, 2010, vol. 44, n° 21, p. 8350-8356.

OIFFER, A. A. L., J.F. BARKER, F.M. GERVAIS, K.U. MAYER, C.J. PTACEK, D.L. RUDOLPH. « A detailed field-based evaluation of naphthenic acid mobility in groundwater », *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009, vol. 108, p. 89-106.

YASUDA, N., N.R. THOMSON, J.F. BARKER. « Performance evaluation of a tailings pond seepage collection system », *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, vol. 47, p. 1305-1315

CRÉDITS PHOTOS

ANTHONY BAUER POUR IMAGE DE COUVERTURE ET PHOTOS SUR P. 1 ÉTIQUETÉS "SOURCE D'EAU", "REMISE EN ÉTAT", ET "STOCKAGÉ DANS UN BASSIN DE RÉSIDUS".

SUNCOR ENERGY INC. POUR PHOTO SUR P. 1 ÉTIQUETÉS "UTILISATION DANS L'EXTRACTION".