



RAPPORT FINAL

ÉVALUATION DES BESOINS DE RECHERCHE SUR LES Puits ORPHELINS ET ABANDONNÉS

N. Utting et N. Heshka
RESSOURCES NATURELLES CANADA, CanmetÉNERGIE à Devon

NOVEMBRE 2019

RESSOURCES NATURELLES CANADA
RAPPORT DE DIVISION CDEV-2019-0096-RT

AVIS DE NON-RESPONSABILITÉ

Le présent rapport et son contenu, le projet pour lequel il est soumis et les conclusions et recommandations qui en découlent ne reflètent pas nécessairement les opinions du gouvernement du Canada ni de ses employés, représentants ou agents.

DROIT D'AUTEUR

Le présent rapport a été créé alors que ses auteurs travaillaient pour le compte du centre de recherche CanmetÉNERGIE de Ressources naturelles Canada situé à Devon. Par conséquent, Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de Ressources naturelles Canada (« Sa Majesté »), est l'unique détentrice du droit d'auteur du présent rapport. Comme Ressources naturelles Canada est un ministère du gouvernement fédéral, le droit d'auteur de la Couronne s'applique à tout matériel protégé par droit d'auteur créé par un fonctionnaire fédéral. En vertu de la législation canadienne, le droit d'auteur de la Couronne ne peut être cédé sans décret.

RÉSUMÉ

Le présent rapport examine et aborde des sujets de recherche potentiels relativement à l'abandon de puits de pétrole et de gaz, appelés puits orphelins. Les puits orphelins présentent un intérêt et une importance puisqu'on en retrouve des centaines de milliers d'un bout à l'autre du Canada. La responsabilité de ces sites incombe aux provinces et territoires où ils se trouvent. Les enjeux entourant la remise en état des sites de puits orphelins et la possibilité que des contaminants pénètrent dans le sol et les eaux souterraines de ces sites revêtent une importance particulière pour le centre CanmetÉNERGIE de Devon. Le présent rapport porte essentiellement sur des contaminants précis, notamment les hydrocarbures, le sel, les herbicides et les agents de stérilisation, et fait un survol de l'information et des recherches actuelles à propos de l'assainissement de tels sites. L'information contenue dans ce rapport sera utilisée pour mettre au point de nouvelles propositions et activités de recherche au centre CanmetÉNERGIE afin d'améliorer les méthodes d'évaluation des risques et les techniques d'assainissement des sites où l'on retrouve des puits orphelins. Le principal objectif des besoins de recherche relevés se rapporte à la compréhension de la contamination des sols et des eaux souterraines et à la façon de remédier à cette contamination.

TABLE DES MATIÈRES

AVIS DE NON-RESPONSABILITÉ.....	i
DROIT D’AUTEUR.....	i
RÉSUMÉ	ii
DÉFINITIONS.....	1
1.0 INTRODUCTION	2
1.1. ACTIVITÉS SUR LE SITE DU PUIIS	4
2.0 ABANDON DU PUIIS.....	5
3.0 ÉVALUATION DES SITES DE PUIIS ABANDONNÉS	7
4.0 CONTAMINANTS D’INTÉRÊT.....	8
4.1. SALINISATION.....	8
4.2. HYDROCARBURES	10
4.3. RÉSIDUS DE FORAGE.....	11
4.4. HERBICIDES ET AGENTS DE STÉRILISATION	12
5.0 MÉTHODES D’ASSAINISSEMENT.....	12
5.1. EXCAVATION DU SOL	14
5.2. LESSIVAGE ET LAVAGE DES SOLS	14
5.3. OXYDATION CHIMIQUE <i>IN SITU</i>	15
5.4. BIORESTAURATION.....	15
5.5. EXTRACTION DES VAPEURS DU SOL ET TRAITEMENT THERMIQUE.....	16
5.6. ATTÉNUATION NATURELLE CONTRÔLÉE.....	16
6.0 REMISE EN ÉTAT ET FERMETURE DU SITE	16
7.0 BESOINS DE RECHERCHE SOULEVÉS PAR D’AUTRES ORGANISMES.....	17
8.0 RÉSUMÉ ET RECOMMANDATIONS	20

9.0 ACKNOWLEDGEMENTS.....22

10.0 REFERENCES22

TABLEAUX

Tableau 1 – Résumé de certains besoins de recherche relevés par la PTAC (d’après
PTAC, 2019).....19

FIGURES

Figure 1 – Diagramme schématique des différences entre un puits opérationnel et un
puits abandonné sur un site n’ayant pas fait l’objet d’une remise en état.....6

DÉFINITIONS

La terminologie employée dans le présent rapport est conforme à celle utilisée par le gouvernement de l'Alberta en ce qui concerne les puits orphelins et abandonnés (GA, 2017) :

Puits abandonné : Puits qui a été scellé avec un bouchon provisoire et du ciment sous la surface du sol et qui est muni d'un bouchon d'aération. Cette définition s'applique, quel que soit le propriétaire du puits. Un puits abandonné peut être orphelin ou non (voir la définition ci-dessous).

Bouchon provisoire : Bouchon métallique utilisé pour sceller un puits de forage.

Puits inactif : Puits dans lequel aucun pétrole ou gaz n'a été produit depuis au moins un an. La production peut avoir cessé pour des raisons économiques ou parce que le réservoir a été vidé. Le puits peut être exploité à nouveau ou non.

Orphelin : Qualifie un puits ou une installation n'ayant pas de propriétaire privé.

Remise en état : Processus consistant à remettre le sol et la végétation d'un site où se trouve un puits dans des conditions similaires à celles qui existaient avant la tenue des travaux.

Assainissement : Processus consistant à assainir les eaux et les sols contaminés. Un site doit être décontaminé jusqu'à ce qu'il satisfasse aux lignes directrices réglementaires qui s'appliquent.

1.0 INTRODUCTION

On retrouve des centaines de milliers de puits de pétrole et de gaz d'un océan à l'autre. Bon nombre de ces puits sont situés dans le bassin sédimentaire de l'Ouest canadien, soit en Alberta, en Colombie-Britannique, en Saskatchewan, au Manitoba, dans les Territoires du Nord-Ouest et au Yukon. Toutefois, des projets d'exploration pétrolière ont eu lieu dans chaque province et territoire à un moment donné (ACPP, 2018). La profondeur de ces puits varie de plusieurs centaines de mètres à des milliers de mètres, selon la raison d'être du puits et le ou les réservoirs cibles. Les puits peuvent produire du gaz naturel, des liquides de gaz naturel, du pétrole, de l'eau ou une combinaison de ces liquides. Quelle que soit sa profondeur, lorsqu'un puits n'est plus viable sur le plan économique et que l'exploitant décide de l'abandonner, il convient de retirer tout équipement du site, d'abandonner le trou de forage, d'assainir le sol et de remettre le site en état (AER, 2014; AER, 2018c). L'abandon d'un puits comprend le scellage du trou de forage avec un bouchon provisoire et du ciment ainsi que la coupe du tubage de puits sous la surface du sol (GA, 2017). En Alberta, on qualifie d'inactif tout puits qui n'a rien produit depuis 12 mois. Un puits peut devenir inactif s'il devient non rentable, soit parce que la ressource a été épuisée, soit parce que la valeur de la ressource a chuté et que l'extraction du produit coûte plus cher qu'il ne peut être vendu. En Alberta, on recense environ 180 000 puits actifs, 83 000 puits inactifs et 69 000 puits abandonnés (GA, 2018). L'assainissement du site du puits implique la décontamination du sol et de l'eau, s'il y a lieu, et la remise en état vise à remettre les terres touchées dans un état productif.

En 2014, le prix du pétrole a considérablement baissé et, au cours des quatre dernières années, de nombreuses sociétés pétrolières et gazières ont fait faillite. Les puits que ces sociétés possédaient sont appelés puits orphelins, car ils n'ont plus de propriétaire. En date de janvier 2019, 3 127 puits orphelins devaient faire l'objet du processus d'abandon en Alberta (OWA, 2019). Que les puits abandonnés appartiennent à une entreprise ou soient orphelins, tous les sites touchés doivent être assainis et remis en état. Le coût du nettoyage de ces puits est élevé, avec un total des passifs variant de milliards à des dizaines de milliards de dollars (CBC, 2019; FP, 2017).

Pendant la durée de vie d'un puits, diverses répercussions peuvent se faire sentir sur les eaux et les sols environnants. Des fluides de forage, notamment de l'eau saline et des

hydrocarbures provenant du puits, peuvent être libérés dans l'environnement. Un déversement peut être rapide, lors de la survenue d'un accident, ou graduel, s'il se produit au fil du temps. Dans le cas où le sol ou les eaux souterraines d'un site seraient contaminés, le site devra être assaini jusqu'à ce qu'il soit conforme aux lignes directrices provinciales en la matière (AEP, 2016a; AEP, 2016b). Après l'abandon d'un puits, l'on doit soumettre le site à une analyse de contamination. S'il y a contamination du sol, celui-ci devra être assaini afin de se conformer aux exigences réglementaires. Les sources courantes de contamination sur les sites de puits orphelins comprennent les sels, les hydrocarbures, les herbicides et les agents de stérilisation. Diverses méthodes peuvent être employées pour éliminer ces contaminants. L'une des méthodes d'assainissement les plus courantes est l'excavation du sol et la mise en décharge. Bien que cette méthode soit rapide et efficace, elle peut être très coûteuse et signifie que le sol contaminé doit être stocké ailleurs, dans une décharge appropriée. Il existe toutes sortes d'autres types de méthodes qui peuvent être utilisées pour assainir les sols et les eaux souterraines contaminés, selon la situation et le type de contaminant, notamment : le lessivage et le lavage des sols, l'oxydation chimique *in situ*, la biorestauration, l'extraction des vapeurs du sol (volatilisation) et le traitement thermique. Une fois qu'un site de puits a été assaini, il peut être remis en état avec de la végétation.

L'objectif de cette analyse documentaire était d'évaluer l'état d'avancement de la recherche relativement à l'abandon, à l'assainissement et à la remise en état des sites de puits de pétrole et de gaz, ainsi qu'à la caractérisation des contaminants. Bien qu'il s'agisse d'un enjeu potentiel pour de nombreuses régions du Canada, cette analyse porte essentiellement sur la situation en Alberta.

Il convient de noter que les objectifs de ce rapport sont axés sur les aspects techniques et scientifiques de ces questions et non sur les aspects législatifs liés à l'appartenance du site, à la responsabilité et à la réglementation. De plus, un nombre limité de renseignements publiés portant sur les défis particuliers que présentent les sites de puits a été recensé dans le cadre de la rédaction de ce rapport.

1.1. ACTIVITÉS SUR LE SITE DU PUIITS

Au cours de la vie d'un puits, il existe de nombreuses phases d'activités (ACPP, 2014). Des travaux de prospection sismique peuvent avoir été effectués avant la sélection d'un site de puits. Une fois un site sélectionné, les activités réalisées sur le site comprennent les suivantes :

1. **Préparation du site de puits** : Cela peut comprendre la construction de routes d'accès, l'accès au site, l'excavation du site, la confection d'une plateforme d'exploitation et le forage d'un trou pilote.
2. **Forage et évaluation des ressources souterraines** : Le puits est foré et diverses méthodes géologiques et géophysiques sont utilisées pour évaluer le potentiel de ressources de la formation.
3. **Complétion et optimisation du puits** : À cette étape, les installations de forage sont retirées, puis le tubage de production est inséré dans le puits et perforé à la profondeur désirée. La formation peut également être stimulée au moyen de techniques de fracturation hydraulique à ce stade-ci afin d'accroître la perméabilité pour permettre l'écoulement des hydrocarbures.
4. **Production et entretien** : Il s'agit de la principale période d'exploitation d'un puits, consistant en la production de pétrole ou de gaz.
5. **Fermeture et remise en état du site** : Lorsque le puits n'est plus opérationnel, il convient de le soumettre au processus d'abandon, d'assainir le sol et de remettre le site en état.

Certaines de ces activités auront une plus grande incidence sur le sol, l'eau et le biote que d'autres. Pendant la préparation du site, la végétation peut être rasée et, dans certains cas, une plateforme d'exploitation peut être construite.

Pendant les phases de forage, d'évaluation des ressources et de complétion et d'optimisation du puits, un vaste éventail d'activités ont lieu sur le site. Sur un site de forage, une large gamme de matériaux pourraient potentiellement constituer des sources de contamination. Les déblais de forage constituent un bon exemple, car ils pourraient être contaminés par des additifs chimiques utilisés pour la fracturation ou par des formations quelconques avec lesquelles ils sont entrés en contact. Les puits sont généralement stimulés au moyen de techniques de

fracturation hydraulique, dans le cadre desquelles de l'eau et une variété d'additifs sont injectés dans le trou de forage pour provoquer des fractures dans la formation cible (ou le réservoir), ce qui entraîne une production accrue de pétrole et de gaz en raison de la plus grande perméabilité artificiellement créée par les fractures provoquées dans le matériau géologique. Après la fracturation, la pression induite diminue et l'eau injectée, ainsi que les eaux et les matières solides et gazeuses de la formation émergent de celle-ci sous forme de reflux. Au fil du temps, cette eau, appelée eau extraite, retourne dans la formation. Le reflux et l'eau extraite peuvent contenir une teneur élevée en ions dissous, des produits chimiques résiduels des procédés de fracturation hydraulique et une variété de composés organiques naturels et introduits. Le déversement de ces liquides risque d'entraîner des conséquences sur le sol et les eaux souterraines (Drollette et coll., 2015; Funk et coll., 2019).

Les phases de production et d'entretien sont également marquées par le risque de déversement d'eau extraite et d'hydrocarbures. Sur certains sites, des herbicides et des agents de stérilisation ont été utilisés pour contrôler la végétation pendant la période d'extraction active des ressources. Il est possible que ces substances demeurent dans les sols et les sédiments à proximité du puits ou de la plateforme d'exploitation (AER, 2018a). Bien qu'il existe une variété de méthodes pouvant être employées pour assainir les sols contaminés, il n'est pas rare que des matières soient excavées et emportées ailleurs (Bernesky, 2013). Une fois le sol contaminé retiré du site, ce dernier doit être remis en état. Les processus pour l'identification des contaminants sont décrits à la section 4.

2.0 ABANDON DU PUIITS

Un puits est considéré comme abandonné une fois qu'il a été démantelé de manière définitive, c'est-à-dire que les zones de production ont été condamnées et que le puits a été sectionné, puis couvert environ 2 m sous la surface du sol (GA, 2017). L'objectif est de sceller définitivement le puits afin d'empêcher la migration des liquides entre différentes zones du sous-sol ou de la surface. La première étape pour sceller un trou de forage consiste à retirer tout équipement de fond (p. ex., tubage de production, pompes de fond et garnitures d'étanchéité) (AIE, 2018). Une fois que tout l'équipement a été retiré, le puits de forage doit être nettoyé pour éliminer le tartre et les autres débris. Le puits peut ensuite être bouché pour prévenir la migration

des liquides et des gaz (Figure 1). Un bouchon provisoire, retenu en place au moyen de ciment, est fréquemment utilisé pour sceller un puits (AER, 2019a). En Alberta, l'épaisseur de ce bouchon dépend de la profondeur du puits. Il varie entre une épaisseur minimale de 30 m pour les puits de plus de 1 500 m de profondeur et une épaisseur minimale de 60 m pour les puits de moins de 1 500 m de profondeur (AER, 2018c). Diverses technologies différentes sont utilisées pour boucher un puits, notamment la méthode du bouchon équilibré, la méthode de cimentation par compression, la méthode par cuiller de cimentation et la méthode des deux bouchons (AIE, 2018). Une fois toutes les zones scellées, le puits est rempli d'eau douce pour assurer son intégrité à long terme. Par la suite, le haut du puits est sectionné sous la surface du sol et un bouchon d'aération est installé.

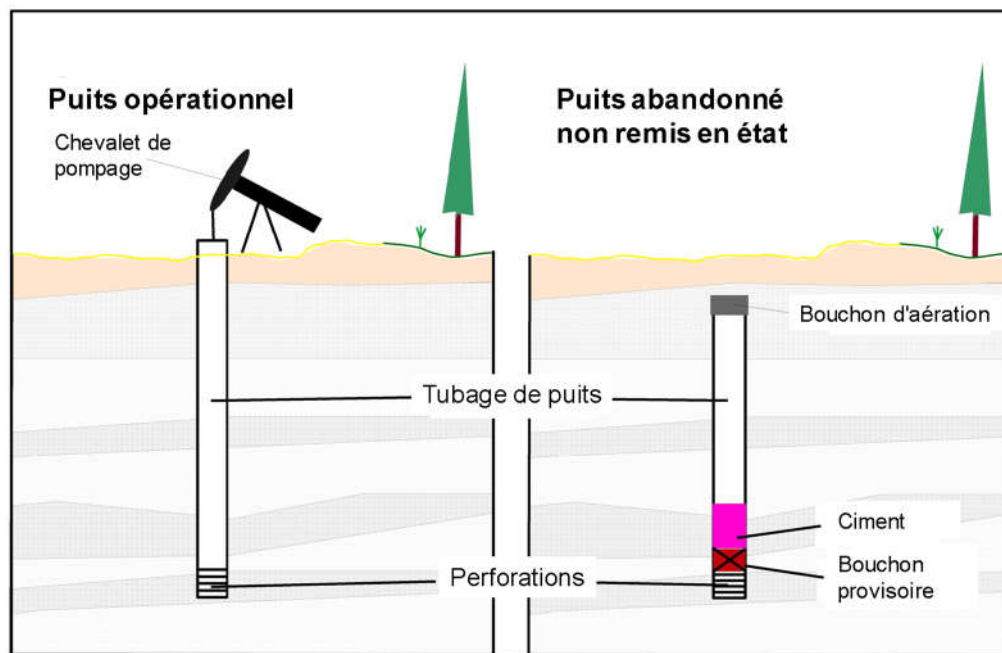


Figure 1 – Diagramme schématisant des différences entre un puits opérationnel et un puits abandonné sur un site n'ayant pas fait l'objet d'une remise en état

Si le processus d'abandon n'est pas mené à bien, il est possible que le pétrole ou le gaz migre entre les formations de réservoir ou même vers les eaux souterraines. Si un puits en cours d'exploitation présente une fuite grave ($> 300 \text{ m}^3$ de gaz/jour), il convient de le réparer dans un délai de 90 jours, tandis que les petites fuites moins importantes doivent être colmatées avant l'abandon du puits (AER, 2003). La définition d'une fuite grave est précisée dans la directive provisoire ID 2003-01 (AER, 2003). Après l'abandon du puits, l'assainissement et la remise en

état du site, ce dernier peut à nouveau servir à son usage antérieur. Dans certains cas, des maisons ont été construites au-dessus de puits abandonnés. Si le processus d'abandon a bien été suivi, il se peut qu'aucun problème ne survienne. Toutefois, dans certains cas, le puits peut commencer à fuir, ce qui représente un risque pour la sécurité (Wingrove, 2010).

3.0 ÉVALUATION DES SITES DE PUIITS ABANDONNÉS

Une entreprise est tenue de résoudre tout problème de contamination possiblement attribuable aux activités menées sur le site du puits. Pour déterminer les exigences en matière de remise en état des installations de pétrole et de gaz abandonnées, le site doit faire l'objet d'une étude d'impact sur l'environnement réalisée en diverses étapes. Les étapes sont composées des phases 1, 2 et 3 ci-dessous. Après la phase 3, le site peut être remis en état (AE, 2001).

Phase 1 : La première étape de l'étude comprend la collecte de renseignements sur les activités menées sur le site qui pourraient avoir entraîné une contamination. Elle comprend également une visite des lieux pour déceler toute preuve visuelle de contamination potentielle et repérer les sources possibles de cette contamination. Les sources potentielles de contamination comprennent les fosses de brûlage, les têtes de puits, les résidus de forage dans les puisards, les réservoirs de stockage, etc. Les contaminants courants comprennent les sels, les métaux, les hydrocarbures extractibles, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), le benzène, le toluène, l'éthylbenzène et le xylène (BTEX), les herbicides, le méthanol, le glycol, etc. (AE, 2001). L'objectif de la phase 1 de l'étude consiste à examiner les lieux et à déterminer s'il est nécessaire d'amorcer la phase 2 de l'étude, laquelle est plus détaillée.

Phase 2 : La deuxième phase de l'étude d'impact sur l'environnement est déterminée en fonction des résultats de la phase 1. Cette phase peut comprendre l'échantillonnage du sol et de l'eau pour confirmer la présence ou l'absence de répercussions environnementales néfastes sur ceux-ci (AE, 2001). En Alberta, les résultats de la phase 2 de l'étude sont ensuite comparés aux lignes directrices de niveau 1 en matière d'assainissement de l'Alberta (AE, 2001). Dans la plupart des cas, les lignes directrices de niveau 1 s'appliquent. Des certains cas, l'on dispose d'une plus grande quantité de renseignements propres au site, les lignes directrices de niveau 2 sont alors suivies ou une approche visant

à contrôler l'exposition est adoptée. Le contrôle de l'exposition consiste à effectuer une surveillance continue afin de faire le suivi des risques.

Phase 3 : La troisième phase de l'étude d'impact sur l'environnement comprend la façon de résoudre le problème de contamination précédemment repéré, la réalisation d'une évaluation des risques, l'exécution des travaux d'assainissement et la confirmation que les efforts d'assainissement ont entraîné les résultats escomptés (AE, 2001). Une fois la phase 3 terminée, une attestation d'assainissement peut être délivrée. Une fois le site remis en état, une attestation de remise en état sera délivrée. En Alberta, l'Alberta Energy Regulator effectue des vérifications sur les sites ayant reçu une attestation de remise en état. Depuis 2014, 133 vérifications ont été réalisées et le taux de passage est de 84 % (AER, 2019b).

4.0 CONTAMINANTS D'INTÉRÊT

Selon les activités menées sur un site de puits, lesquelles sont décrites à la section 1.1, il existe une variété de contaminants qui peuvent être détectés pendant la phase 2 de l'évaluation du site. Comme nous l'avons précédemment mentionné, ces contaminants peuvent comprendre les sels, les hydrocarbures, les métaux et les agents de stérilisation (AE, 2001). Le document *Phase 1 Environmental Site Assessment Guideline for Upstream Oil and Gas Sites* [Lignes directrices pour la phase 1 de l'évaluation environnementale des sites où l'on retrouve des installations pétrolières et gazières en amont] de l'Alberta énumère les contaminants courants associés à différentes activités menées sur un site de puits (AE, 2001). Dans cette section, nous aborderons les technologies d'assainissement potentielles associées à ces contaminants. Bon nombre de ces contaminants, tels que les métaux et les hydrocarbures, se trouvent également dans d'autres sites contaminés.

4.1. SALINISATION

La contamination par le sel représente possiblement la forme de contamination la plus problématique sur les sites de puits abandonnés et peut poser un défi de taille pour l'assainissement de ces sites (Evans et Pollard, 2019; Johnson, 2019). Le pétrole et le gaz sont généralement produits à partir de formations situées à des centaines, voire des milliers, de mètres

sous terre. Les eaux que l'on retrouve dans les formations situées à de telles profondeurs sont généralement salines et contiennent une teneur élevée en ions dissous (Connolly et coll., 1990; Hitchon et coll., 1995). Les concentrations de sodium et de chlorure sont habituellement élevées dans ces eaux. En cas de déversement de ces eaux, les sols et les eaux souterraines risquent de se voir contaminer par la présence de sel. Il convient de noter que la salinité de ces eaux extraites déversées peut être plusieurs fois supérieure à celle de l'eau de l'océan. L'excès de sel dans le sol peut avoir de nombreuses conséquences sur l'environnement, notamment la dégradation des propriétés physiques du sol, l'inhibition de la croissance des plantes et la dégradation de la qualité des eaux souterraines (Greenberg et coll., 2007; Hamid et coll., 2007). Les plantes sont peut-être les plus touchées par l'augmentation de la salinité, car il est plus difficile pour elles d'absorber de l'eau et des nutriments en présence d'une forte salinité (Qadir et coll., 2003). En outre, la salinité accrue complique grandement la repousse de la végétation dans le secteur, ce qui entraîne un sol dénudé ainsi qu'une érosion du sol.

Il existe un risque d'échange d'ions sodium (Na^+) avec des ions calcium (Ca^{2+}) sorbés aux particules du sol. Dans un tel cas, les ions sodium (Na^+) mobiles risquent de diminuer et les sols seront dégradés par la substitution du calcium (Ca^{2+}) et du magnésium (Mg^{2+}) présents dans les sols argileux. L'ion chlorure (Cl^-) constitue généralement un traceur conservateur. Bien que l'ion chlorure (Cl^-) puisse pénétrer dans l'eau par la dissolution de chlorure de sodium (NaCl) et, dans une certaine mesure, les retombées atmosphériques, il n'est pas consommé par les réactions biologiques ou chimiques (Appelo et Postma, 1999). L'ion chlorure (Cl^-) a une solubilité élevée, ce qui signifie qu'il est l'un des derniers ions qui seront précipités hors de la solution (Prothero et Schwab, 1996). Des expériences en colonne au moyen de traceurs radioactifs ont montré qu'en général l'ion chlorure (Cl^-) n'est pas retardé lorsque le pH est supérieur à 6 (Appelo et Postma, 1999). Certaines études ont suggéré que l'ion chlorure (Cl^-) se comporterait de façon non conservatrice dans les écosystèmes forestiers (Svensson et coll., 2012; Viers et coll., 2001). McCarter et ses collaborateurs (2018) ont étudié le potentiel de sorption des ions chlorure (Cl^-) dans la tourbe. Les résultats obtenus suggèrent qu'il pourrait y avoir eu une sorption mineure, mais elle a été jugée négligeable par rapport aux concentrations globales.

Le Subsoil Salinity Tool [outil de salinité du sous-sol] est un modèle informatique qui peut être utilisé pour déterminer les lignes directrices de niveau 2 en matière d'assainissement des sols de l'Alberta à suivre en présence de sels, y compris de chlorures, sous la zone racinaire

(ESRD, 2014). Si le chlorure se comporte de façon non conservatrice, ce modèle peut être trop prudent, ce qui signifie que le sol peut être assaini alors qu'il ne présente pas de risque environnemental. Différentes répercussions environnementales peuvent alors survenir des travaux d'assainissement du sol.

4.2. HYDROCARBURES

Il existe un large éventail de contaminants d'hydrocarbures qui peuvent être présents sur un site de puits de pétrole et de gaz abandonnés, lesquels peuvent être attribuables soit à la mise en valeur des ressources soit à un déversement ou à une fuite involontaire. Il s'agit notamment des alcools (méthanol, glycol), des hydrocarbures extractibles, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), du benzène, du toluène, de l'éthylbenzène et du xylène (BTEX) et des hydrocarbures purgeables.

Les alcools sont des composés organiques contenant un ou plusieurs groupes d'ions d'hydroxyle (OH^-). Ils peuvent être utilisés comme additifs de forage afin de stabiliser la solution ou comme agent « antigel » (FracFocus, 2016). Certaines molécules organiques contenant des groupes alcooliques peuvent agir comme des agents de surface, ce qui peut augmenter la solubilité d'autres matières organiques présentes dans l'eau. Certains alcools sont eux-mêmes des contaminants, dont le plus simple est le méthanol (AEP, 2016). Les alcools en général peuvent également revêtir une certaine importance, car ils peuvent influencer sur la façon dont les autres contaminants sont transportés (Bouchard, 1998; Rao et coll., 1991).

Les hydrocarbures purgeables et extractibles ne se distinguent que par leur masse moléculaire et leur nombre de carbones. Ils sont ainsi nommés par les techniques utilisées pour les analyser dans des matrices environnementales telles que le sol (USDHHS, 1999). Le nombre de carbones des hydrocarbures purgeables se situent principalement dans la gamme C_6 à C_{10-12} et celui des hydrocarbures extractibles se situe généralement dans la gamme C_{8-12} à C_{24-26} et supérieure. À des fins d'analyse, les hydrocarbures sont couramment divisés en quatre fractions, soit F1 à F4, où F1 correspond à la gamme C_6 - C_{10} ; F2, à la gamme C_{10} à C_{16} ; F3, à la gamme C_{16} à C_{34} ; et F4 se compose d'hydrocarbures dont le nombre de carbones est d'au moins 35 (C_{35+}). Les hydrocarbures purgeables sont analysés au moyen de la chromatographie gazeuse par purge et piégeage, tandis que les hydrocarbures extractibles sont extraits et concentrés à partir d'échantillons à l'aide de solvants. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

correspondent aux hydrocarbures ayant au moins deux noyaux aromatiques et peuvent être classés sous ces catégories, selon leur nombre de carbones. La présence de tels hydrocarbures sur les sites de puits comporte certains risques, notamment des effets néfastes pour la vie végétale et animale locale, ainsi qu'un danger potentiel pour la santé humaine (Abdel-Shafy et Mansour, 2016; API, 2001; ATSDR, 2013). De plus, il convient de noter que des métaux peuvent être présents en quantités infimes dans les mélanges d'hydrocarbures. Leurs effets sur l'environnement sont persistants et, dans certains cas, leur mobilité est mal comprise (Dong et coll., 2013; El-Tokhi et Mostafa, 2001; Mulligan et coll., 1999).

BTEX est le nom donné à une classe particulière d'hydrocarbures qui se distinguent par leur grande solubilité et leur toxicité pour les humains et les animaux. Ils sont polaires, volatils et peuvent facilement voyager dans les eaux souterraines (Mitra et Roy, 2011; Yang et coll., 2017). Le BTEX constitue également un polluant atmosphérique courant qui peut être utilisé comme indicateur de la qualité de l'air.

L'une des répercussions de la contamination des sols par les hydrocarbures est l'apparition de sols hydrophobes (Roy et coll., 1999). Les hydrocarbures peuvent recouvrir les particules du sol, les rendant ainsi imperméables à l'eau, ce qui signifie que le sol ne peut pas retenir l'eau nécessaire à la croissance de la végétation. Les sols hydrophobes peuvent être un problème sur les sites de puits abandonnés (Polet, 2007).

4.3. RÉSIDUS DE FORAGE

Pendant la phase de forage, des résidus de forage, qui sont un mélange de déblais, de boue de forage, de fluides de formation et d'additifs de forage, seront produits (AER, 2016). Selon la composition de la boue de forage, elle peut être éliminée par différents moyens. En outre, les résidus en soi peuvent grandement varier, ce qui ajoute une couche de complexité supplémentaire pour un assainissement approprié. Dans certains cas, les résidus peuvent être épandus par aspersion sur les terres ou déversés sur des terres forestières, tandis que d'autres résidus doivent faire l'objet d'un traitement ou être éliminés au fond d'un trou de forage ou dans une décharge. Pendant les évaluations environnementales des sites de puits visant à vérifier la conformité des procédures de fermeture, l'on examine la façon dont les résidus de forage ont été éliminés. Les résidus de forage peuvent constituer une source de contamination sur les sites

abandonnés et une attention particulière devrait être portée sur les boues contenant du chlorure de potassium et les émulsions inverses (boue de forage à base de pétrole).

Les résidus de forage sont parfois éliminés dans une fosse ou un puisard. De nos jours, la réglementation restreint l'utilisation de puisards pour éliminer des résidus de forage non hydrocarbonés dans les sols argileux (Halla, 2007). La réglementation moderne exige la caractérisation de certains paramètres des matières déposées dans des puisards, notamment le pH, les hydrocarbures pétroliers totaux, le BTEX, etc. (GA, 2012). Par le passé, des fosses de brûlage étaient utilisées pour stocker, brûler et éliminer les résidus des champs de pétrole et les hydrocarbures pétroliers (Cheng et coll., 2004). En Alberta, les fosses de brûlage ont été interdites en 1996 en raison de leurs conséquences potentielles sur l'environnement. Il existe cependant de nombreux puisards au Canada et l'on ignore dans quelle mesure les anciens puisards ou ceux dont la gestion est inadéquate représentent un problème.

4.4. HERBICIDES ET AGENTS DE STÉRILISATION

Une variété d'herbicides et d'agents de stérilisation du sol sont utilisés sur les sites de puits. Ils sont utilisés pour freiner la croissance de mauvaises herbes nuisibles et réduire la couverture végétale afin de minimiser le risque de feu de forêt (WCES, 2019). Lors d'une utilisation répétée, il est possible que les sites de puits soient contaminés par des herbicides et des agents de stérilisation utilisés sur place, par exemple : le dicamba, l'atrazine, le bromacil, le diuron, le linuron, la simazine et le tébuthiuron (AE, 2001; Rakewich et Bakker, 2017). InnoTech Alberta a étudié les besoins en matière de recherche pour l'assainissement et la remise en état des sols contaminés par des résidus d'agents de stérilisation (InnoTech Alberta, 2018).

5.0 MÉTHODES D'ASSAINISSEMENT

Il existe de nombreuses méthodes d'assainissement différentes qui peuvent être employées pour décontaminer les sites de puits abandonnés. Cependant, le nombre d'analyses documentaires qui portent sur des études de cas menées sur des sites de puits abandonnés est limité. La méthode d'assainissement appropriée dépend du type de contaminants et de la quantité, des caractéristiques du site (p. ex., géologie, hydrologie, hydrogéologie et hydrogéochimie), des récepteurs locaux et de l'endroit où le contaminant se trouve dans le sol ou

les eaux souterraines. Une méthode d'assainissement peut se révéler efficace dans un scénario donné et inefficace dans un autre. La contamination peut également être causée par le déversement de résidus supplémentaires sur le site, dont des substances telles que les éthoxylates d'acides gras, les amines d'acides gras, les produits lubrifiants et les fluides hydrauliques usagés, le carburant, le béton non durci et les débris métalliques. L'assainissement peut être compliqué par un manque de marquage distinct sur les sites, ce qui rend le repérage difficile. Dans cette section, nous décrivons certaines méthodes qui peuvent être utiles pour assainir les eaux souterraines et les sols contaminés.

Les méthodes d'assainissement du sol et des eaux souterraines peuvent être séparées en deux grandes catégories, les traitements *in situ* et *ex situ*. Les traitements *in situ* ont lieu directement sur le sol du site, alors que les traitements *ex situ* nécessitent l'excavation du sol ou l'aspiration de l'eau au moyen d'une pompe afin d'être soumis au traitement. Les méthodes *ex situ* comprennent l'excavation, l'élimination ou les traitements, comme le lessivage et le lavage (FRTR, 2007). Les traitements *ex situ* se traduisent par une plus grande certitude et uniformité quant à l'efficacité du traitement, mais impliquent généralement la gestion d'une grande quantité de matière. En outre, ils posent certains défis pour contenir la contamination.

Comme leur nom l'indique, les traitements *in situ* sont effectués sur place. L'avantage du traitement *in situ* est qu'il peut être administré directement sur le sol sans qu'il soit nécessaire d'excaver de matières, ce qui entraîne des économies de coûts (FRTR, 2007). L'inconvénient des méthodes *in situ* est qu'elles prennent généralement plus de temps à mettre en œuvre et que leur efficacité peut varier. Les méthodes *in situ* peuvent tirer parti des processus de dégradation naturelle du sol ou de l'eau, ce qui entraîne une diminution de la concentration d'un contaminant (Brandy et Well, 2008). Les contaminants organiques peuvent également quitter le système et le sol en se volatilisant dans l'atmosphère. Les contaminants peuvent devenir non biodisponibles s'ils sont adsorbés par de l'argile, des oxydes et des matières organiques; ils peuvent également faire l'objet d'une dégradation chimique ou d'une biodégradation. Le traitement physique des sols comprend des techniques telles que l'extraction des vapeurs du sol (volatilisation), l'extraction multiphase et la désorption thermique (Jierui, 2018). Le traitement chimique du sol peut impliquer l'utilisation d'oxydants. Les oxydants sont utilisés pour entrer en réaction avec les contaminants du sol afin de créer des composés plus bénins qui ont une incidence moindre sur

l'environnement. Les produits finaux que l'on souhaite obtenir avec un tel traitement sont l'eau et le dioxyde de carbone (Jierui, 2018).

La Federal Remediation Technology Roundtable des États-Unis met à la disposition du public une matrice d'examen des technologies d'assainissement afin de faciliter la sélection d'une technologie appropriée (FRTR, 2007). Certaines de ces méthodes d'assainissement sont abordées plus en détail ci-dessous. Comme il existe de nombreuses méthodes, il n'était pas possible de toutes les aborder dans le cadre du présent survol. La sélection d'une méthode d'assainissement nécessite de trouver l'équilibre entre les effets chimiques de la contamination et les éventuels problèmes environnementaux causés par une perturbation physique ou chimique du sol.

5.1. EXCAVATION DU SOL

Une méthode courante d'assainissement d'un site est l'excavation du sol, également connue sous le nom de « travaux d'excavation et d'élimination » (EEBR, 2019). Le sol contaminé est excavé d'un site, puis transporté ailleurs. Cette technique est relativement rapide et élimine le contaminant du site, ce qui signifie qu'elle permet de se conformer à la réglementation qui s'applique. Bien que cette méthode soit efficace, elle signifie que la matière contaminée doit être transportée et stockée dans une installation appropriée (COMCO, 2019). Le contaminant demeure, mais la matière a été déplacée et déversée dans une décharge appropriée. Cette méthode d'assainissement nécessite également le transport de grands volumes de sol contaminé hors du site et de nouvelles matières non contaminées vers le site. Cela peut signifier que de nombreux chargements de terre sont transportés, entraînant ainsi d'autres répercussions environnementales et sociales, notamment la consommation de carburant et des émissions de CO₂. En raison des inconvénients associés au traitement par travaux d'excavation et d'élimination, une utilisation accrue d'autres méthodes d'assainissement serait souhaitable, en particulier dans les environnements difficiles à remettre en état, tels que les prairies ou les tourbières (Johnson, 2019).

5.2. LESSIVAGE ET LAVAGE DES SOLS

Le lessivage et le lavage des sols sont des traitements courants pour les sites pétroliers et gaziers (Jierui, 2018). Le lavage du sol permet de réduire le volume de la matière contaminée grâce à la séparation granulométrique ou de dissoudre le contaminant dans la solution aqueuse

(FRTR, 2007). Par exemple, le lavage est souvent effectué avec une solution comprenant du calcium et du magnésium (le calcium peut être ajouté sous forme de gypse) (Jierui, 2018). Il en résulte alors un échange d'ions de sodium et d'ions de calcium ou de magnésium afin d'aider à éliminer les ions qui se retrouvent en quantité excessive dans le sol.

5.3. OXYDATION CHIMIQUE *IN SITU*

L'oxydation chimique *in situ* peut être utilisée pour traiter le sol et les eaux souterraines. La méthode consiste à utiliser un oxydant tel que le permanganate, le persulfate, le peroxyde ou l'ozone pour oxyder les contaminants organiques (ITARC, 2005). La méthode peut être appliquée à une variété de contaminants, dont certains couramment observés sur les sites de puits abandonnés, notamment : le benzène, le toluène, l'éthylbenzène et le xylène (BTEX); les hydrocarbures pétroliers totaux; les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP); et les pesticides biologiques (insecticides et herbicides). L'oxydation chimique *in situ* a été mise à l'essai dans le cadre d'une étude de cas menée dans une ancienne station de compression de pétrole et de gaz, où les eaux souterraines étaient contaminées par le bromacil et le dicamba, deux herbicides, ainsi que par des hydrocarbures pétroliers résiduels (Rakewich et Bakker, 2017). La méthode a semblé permettre l'élimination des hydrocarbures pétroliers résiduels, mais n'a pas éliminé le bromacil. Puis, une certaine diminution de la concentration de dicamba a été observée.

5.4. BIORESTAURATION

La dépollution biologique, ou biorestauration, est une technique qui utilise des microorganismes et des plantes pour consommer ou transformer des contaminants en d'autres produits chimiques (Brandy et Well, 2008). Dans certains cas, les bactéries indigènes du sol ou de l'eau dégradent un contaminant. Dans d'autres cas, on ajoute une nouvelle souche de bactéries reconnue pour sa consommation du contaminant en question. Par exemple, l'on a découvert qu'une certaine souche bactérienne consommait du perchloroéthène et pouvait être ajoutée à l'eau pour provoquer sa biodégradation, bien que les sous-produits du chlorure de vinyle soient également des agents cancérigènes connus pour les humains (ATSADR, 2011; Ellis et Anderson, 1997). Par ailleurs, il est possible d'ajouter d'autres produits, comme des engrais, pour accélérer la biodégradation. Une autre forme de biorestauration est la phytoremédiation, où les plantes et les communautés fongiques et bactériennes associées sont utilisées pour dégrader

les contaminants ou les bioaccumuler. Au moment de la rédaction du présent rapport, la biorestauration sous forme d'excavation et d'aération du sol en vue d'accroître la biodégradation est une méthode d'assainissement qui serait utilisée par les experts-conseils en environnement (Luther, 2019). Toutefois, comme les fortes concentrations de sel sont courantes sur les sites de puits abandonnés, l'efficacité de la biodégradation pourrait être limitée (Jierui, 2018).

5.5. EXTRACTION DES VAPEURS DU SOL ET TRAITEMENT THERMIQUE

L'extraction des vapeurs du sol est une méthode d'extraction *in situ* des contaminants volatils. Une pression négative est appliquée au sol pour augmenter la volatilité des composés organiques volatils. Cette méthode ne permet pas d'éliminer les composés non volatils (FRTR, 2007). Une autre méthode *in situ* est le traitement thermique, qui peut être utilisé pour augmenter la volatilité et accélérer la dégradation des contaminants. La désorption thermique a été utilisée pour traiter les sols contaminés par le tébuthiuron, un herbicide (Lin, 2009).

5.6. ATTÉNUATION NATURELLE CONTRÔLÉE

En fait, l'atténuation naturelle contrôlée n'est pas une technologie d'assainissement, mais plutôt une méthode de surveillance d'un site pendant que les concentrations diminuent grâce à des processus naturels. Les concentrations de contaminants et l'étendue de la contamination sont mesurées au fil du temps. Cette approche est basée sur l'hypothèse que les concentrations diminueront sans intervention artificielle. Dans certains cas, l'atténuation naturelle suffit pour contenir la contamination (Chiu et coll., 2013); toutefois, dans d'autres cas, l'atténuation naturelle ne permet pas de faire diminuer les concentrations jusqu'aux niveaux recommandés dans les lignes directrices (Choi et Lee, 2011).

6.0 REMISE EN ÉTAT ET FERMETURE DU SITE

Après avoir été assaini, un site doit être remis en état. La remise en état d'un site consiste à remettre le sol en place, à restaurer le réseau hydrographique du site et à le revégétaliser. Une fois le site remis en état, le sol doit posséder les bonnes propriétés (lesquelles doivent être en quantité suffisante), puis la végétation doit être de quantité et de qualité appropriées (AER, 2019c). La remise en état peut comprendre certains problèmes, dont la difficulté à faire pousser les espèces de plantes désirées et les mauvaises herbes et, dans certains cas, la présence de sols hydrophobes (Polet, 2007).

L'Alberta Energy Regulator encourage la « fermeture par zone », une méthode selon laquelle plusieurs exploitants peuvent travailler ensemble pour fermer une zone entière (AER, 2018b). Les exploitants pourraient ainsi économiser jusqu'à 40 % sur les coûts. La réalisation de travaux similaires sur plusieurs sites en même temps est à l'origine de ces économies.

7.0 BESOINS DE RECHERCHE SOULEVÉS PAR D'AUTRES ORGANISMES

Dans le présent rapport, nous nous sommes concentrés sur les pratiques relatives aux sites de puits, leur potentiel de contamination et les méthodes d'assainissement de certains contaminants. Bon nombre des problèmes associés à l'abandon, à l'assainissement et à la remise en état des sites de puits abandonnés sont reliés à la législation, aux règlements et aux questions de logistique. Par exemple, un site se trouvant dans une région éloignée peut être difficile d'accès; par conséquent, y accéder peut être coûteux.

Par ailleurs, d'autres organismes ont relevé des points à améliorer relatifs aux processus réglementaires visant l'abandon, l'assainissement ou la remise en état de ces sites, ainsi que la nécessité d'obtenir une meilleure compréhension technique de ces sujets. En 2018, l'organisme InnoTech Alberta a tenu un atelier intitulé « *Harnessing the Innovation System to Support Efficient Upstream Oil and Gas Wellsite Assessment, Remediation and Reclamation* » [Exploiter le système d'innovation afin d'assurer l'évaluation, l'assainissement et la remise en état efficaces de sites où l'on retrouve des installations pétrolières et gazières en amont], lequel se concentrait sur la recherche de moyens visant à optimiser l'abandon, l'assainissement et la remise en état de puits (Levy et coll., 2018). Plusieurs des problèmes cernés dans le cadre de cet atelier étaient liés à des questions législatives ou pratico-logistiques.

Le résumé de l'atelier est accessible au public et nous avons résumé dans la présente section certains des problèmes soulevés (Levy et coll., 2018). De nombreux intervenants participent aux processus d'abandon, d'assainissement et de remise en état, y compris le propriétaire du puits, le propriétaire foncier, les entrepreneurs et la province. Le travail de remise en état d'un site peut être très coûteux, mais il est possible de réaliser des économies substantielles en remettant en état plusieurs sites au même moment (fermeture par zone) comme indiqué ci-dessus; cependant, il revient souvent aux entreprises de travailler en collaboration. En

outre, la production de rapports conformes aux règlements peut être associée à de courts délais et l'accès aux sites peut être limité en raison de considérations saisonnières. D'autres enjeux soulevés concernent les entreprises qui choisissent le plus bas soumissionnaire pour effectuer les évaluations des phases 1 et 2, car certains renseignements peuvent leur échapper. De plus, des données historiques sur les sites pourraient faire défaut, plus particulièrement dans les cas où le site a eu plusieurs propriétaires. D'ailleurs, certaines sociétés peuvent vendre des puits plus anciens à d'autres entreprises qui sont moins enclines à les abandonner, à les assainir et à les remettre en état. De même, les solutions de rechange à l'excavation du sol sont souvent considérées comme n'étant pas rentables. Au stade de la remise en état, les défis sur le plan législatif portent sur la répétition des motifs permettant de justifier l'administration de traitements non routiniers.

Dans certains cas, relever ces défis nécessite de nouveaux renseignements techniques ou l'emploi d'une nouvelle technologie. Cependant, bon nombre de ces problèmes pourraient être résolus par la modification de la réglementation et des directives et une collaboration accrue.

La Petroleum Technology Alliance Canada (PTAC) a cerné une gamme de domaines pour lesquels une meilleure connaissance technique serait nécessaire (PTAC, 2019). Les lacunes répertoriées par la PTAC portent sur des thèmes auxquels l'organisation accorde une certaine importance et pour lesquels elle pourrait éventuellement fournir un financement. Ces lacunes sont regroupées sous trois grands thèmes : les lignes directrices, les directives, les politiques et les critères réglementaires; l'évaluation des risques; et les avancées concernant les technologies utilisées pour la remise en état et l'assainissement des sites. Bon nombre des besoins de recherche soulevés par la PTAC concernent les connaissances nécessaires à l'élaboration de lignes directrices fondées sur les risques, notamment des renseignements sur les concentrations de fond des contaminants et leur biodisponibilité. La PTAC a également mentionné des méthodes d'assainissement améliorées comme étant un besoin de recherche. Les besoins de recherche soulevés par la PTCA sont résumés dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Résumé de certains besoins de recherche relevés par la PTAC (d'après PTAC, 2019)

<p>Lignes directrices, directives, politiques et critères réglementaires</p> <ul style="list-style-type: none"> • Matières organiques <ul style="list-style-type: none"> ○ Compréhension du niveau de protection approprié des différentes voies d'exposition ○ Méthodes d'évaluation du devenir et du transport ○ Clarté concernant les hypothèses des lignes directrices de l'Alberta • Matières inorganiques <ul style="list-style-type: none"> ○ Base de données sur la teneur de fond en métaux et en sels des sols ○ Mécanismes concernant le devenir et le transport ○ Lignes directrices fondées sur le risque relatives à l'assainissement de certains métaux • Autres <ul style="list-style-type: none"> ○ Compréhension des calculs de la phase 1 de l'évaluation environnementale des sites concernant les résidus de forage ○ Critères de remise en état fondés sur les résultats
<p>Évaluation du risque</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de la compréhension de la biodisponibilité des contaminants afin de déterminer les indicateurs de résultat fondés sur le risque en matière d'assainissement • Méthodes de dépistage sur le terrain permettant d'accélérer les analyses de sites • Outils (<i>p. ex.</i>, logiciels et modèles) permettant de calculer les lignes directrices de niveau 2 en matière d'assainissement
<p>Progrès technologiques relatifs à la remise en état et à l'assainissement</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amélioration des méthodes d'évaluation des risques et d'assainissement des hydrocarbures pétroliers se trouvant dans un substrat rocheux fracturé • Méthodes d'assainissement des hydrocarbures pétroliers, des sels et des métaux dans les milieux humides

- Méthodes d'assainissement des hydrocarbures pétroliers et des sels se trouvant dans les eaux souterraines (*in situ* et *ex situ*)
- Technologies pour les calendriers d'exécution à plus long terme de l'assainissement

8.0 RÉSUMÉ ET RECOMMANDATIONS

Les sels, les hydrocarbures et les herbicides sont les principaux contaminants trouvés sur les sites de puits abandonnés. Ces contaminants ne sont pas uniques aux sites pétroliers et gaziers. Les sols et les eaux souterraines peuvent être contaminés par des sels issus de la salinisation progressive du sol (RE CARE, 2018), le sel de voirie et l'invasion d'eau salée (GC, 2017). La contamination par les hydrocarbures peut résulter des fuites des réservoirs de stockage situés dans les résidences ou les stations-service, ou de déversements survenant lors du transport d'hydrocarbures (Freeze et Cherry, 1979). En outre, la contamination par les herbicides peut être associée à l'agriculture.

Bien que la plupart des contaminants présents sur les sites des puits abandonnés sont similaires à ceux qui se trouvent dans d'autres sites contaminés, il existe certaines différences. La prévalence de la pollution saline dans les puits abandonnés peut réduire les options d'assainissement. Par exemple, la biorestauration peut permettre de retirer les hydrocarbures d'un site donné, mais n'en retirera pas les sels. Par ailleurs, l'emplacement de puits abandonnés dans des sites éloignés, ce qui nécessite le transport de matériaux et d'équipements, représente une autre difficulté. Certains sites ne sont accessibles qu'en hiver lorsque le sol est gelé. De plus, le transport de matériel par camion peut être très coûteux.

Nous avons résumé les besoins de recherche que nous avons soulevés. La liste suivante ne se veut pas exhaustive; elle constitue plutôt un résumé général des sujets potentiels de recherche poussée. Toute nouvelle recherche devra combiner la géologie, la chimie et l'ingénierie afin de créer une approche multidisciplinaire à multiples facettes qui assure une compréhension globale de la problématique de recherche et des moyens de la résoudre.

Sels : La pollution saline des sols pourrait être le problème principal des sites de puits abandonnés. Bien que la pollution saline semble être un problème simple, il faut surmonter

de nombreux obstacles afin d'améliorer la compréhension de la contamination souterraine et des différentes méthodes d'assainissement. Voici certaines questions à considérer :

- Quelles sont les concentrations en sel de l'eau interstitielle comparativement aux éléments lixiviables au moyen de processus naturels?
- Outils efficaces pour prévoir comment les sels pénétreront dans la subsurface.
- Méthodes efficaces pour assainir les sols pollués par des sels et définition des méthodes optimales selon les différents types de sels.

Hydrocarbures : Plusieurs sites de puits de pétrole et de gaz abandonnés sont contaminés avec des hydrocarbures. Les lignes directrices relatives à l'assainissement du sol reposent sur les sols à grains grossiers ou à grains fins (AE, 2001). Bien que la taille des grains fournit un bon indicateur initial, d'autres propriétés, comme la minéralogie, ont une incidence considérable sur la lixivabilité des hydrocarbures en raison de leur sorption sur différentes particules du sol. Des essais visant à démontrer les différences de lixivabilité des hydrocarbures dans différents sols peuvent être utilisés afin d'étayer les lignes directrices portant sur les risques et plutôt que les concentrations uniquement. Le fait d'examiner la persistance et la lixivabilité des hydrocarbures en fonction de leur taille, leur structure et leur origine peut également être utile afin de mieux définir l'option d'assainissement requise.

Agents de stérilisation : Le bromacil, un agent de stérilisation, est utilisé afin de maîtriser la végétation dans les sites de puits. Bien que cet agent peut se dégrader dans le sol (EXTOXNET, 1993), certaines études ont révélé qu'il peut persister dans les sols et l'eau (Hebb et Wheeler, 1978; Rakewich et Bakker, 2017). Des méthodes améliorées en matière d'assainissement des sols et de l'eau affectés par le bromacil et d'autres agents de stérilisation (Drozdowski, 2018) seraient utiles. L'exploration d'autres solutions de maîtrise de la végétation ne reposant pas sur des agents de stérilisation constitue un autre domaine de recherche possible.

Assainissement : Les sites sont généralement assainis grâce à l'excavation du sol. Cette méthode est coûteuse et a des répercussions sur l'environnement des sites, car une grande quantité de matériel est transportée vers le site, ou déplacée de celui-ci. L'apport de terre doit

provenir d'un autre site; par conséquent, la conservation des sols constitue également une source de préoccupation. Il est souhaitable de trouver d'autres méthodes écologiques pour assainir les sites de puits de pétrole et de gaz contaminés.

Puisards : Au Canada, de nombreux puisards comprennent des résidus provenant du forage de pétrole et de gaz. On ne connaît pas avec certitude les problèmes présentés par les puisards. Des études supplémentaires sont requises pour mieux comprendre les difficultés liées aux puisards. Voici certaines questions à considérer : Quels sont les éléments requis afin de caractériser les puisards? Existe-t-il des caractéristiques permettant de déterminer si un puisard sera problématique ou non?

9.0 REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent reconnaître la contribution du Programme de recherche et de développement énergétiques (PRDE), une initiative interministérielle du gouvernement du Canada. Nous tenons également à remercier ceux qui ont accepté de s'entretenir avec nous dans le cadre de la rédaction du présent rapport, soit Arnold Janz, Dallas Johnson (Ph. D.), Daniel Pollard, Catherine Evans, Sheila Luther et Simone Levy notamment. Nous voulons aussi remercier les réviseurs du présent rapport pour leurs commentaires.

10.0 RÉFÉRENCES

- Abdel-Shafy HI, Mansour MSM (2016) A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25:107-123.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSADR) (2011). Agency for Toxic Substances and Disease Registry Vinyl Chloride. En ligne : <https://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubstance.asp?toxid=51>. Consulté le 11 octobre 2019.
- Alberta Energy Regulator (AER) (2003). ID 2003-01: 1) Isolation Packer Testing, Reporting, and Repair Requirements; 2) Surface Casing Venting Flow/Gas Migration Testing, Reporting, and Repair Requirements; 3) Casing Failure Reporting and Repair Requirements <https://www.aer.ca/regulating-development/rules-and-directives/interim-directives/id-2003-01.html>. Consulté le 10 décembre 2019.

- Alberta Energy Regulator (AER) (2014). Closure - Abandonment, Reclamation and Remediation: Fact Sheet
- Alberta Energy Regulator (AER) (2016). Directive 50: Drilling Waste Management
- Alberta Energy Regulator (AER) (2018a). Application Submission Requirements and Guidance for Reclamation Certificates for Well Sites and Associated Facilities (Specified Enactment Direction 002).
- Alberta Energy Regulator (AER) (2018b). Area-Based Closure. En ligne : <https://www.aer.ca/regulating-development/project-closure/liability-management-programs-and-processes/area-based-closure.html>. Consulté le 17 avril 2019.
- Alberta Energy Regulator (AER) (2018c). Well Abandonment Directive 20.
- Alberta Energy Regulator (AER) (2019a). How are wells abandoned? En ligne : <https://www.aer.ca/regulating-development/project-closure/suspension-and-abandonment/how-are-wells-abandoned.html>. Consulté le 10 décembre 2019.
- Alberta Energy Regulator (AER) (2019b). Demande de renseignements envoyée à l'AER à l'aide de son adresse principale. Réponse reçue le 26 avril 2019.
- Alberta Energy Regulator (AER) (2019c). Reclamation Process and Criteria for Oil and Gas Sites. En ligne : <https://www.aer.ca/regulating-development/project-closure/reclamation/oil-and-gas-site-reclamation-requirements/reclamation-process-and-criteria-for-oil-and-gas-sites.html>. Consulté le 15 avril 2019.
- Ministère de l'Environnement et des Parcs de l'Alberta (Alberta Environment and Parks; AEP) (2016a). Alberta Tier 1 Soil and Groundwater Remediation Guidelines. Edmonton.
- Ministère de l'Environnement et des Parcs de l'Alberta (Alberta Environment and Parks; AEP) (2016b). Alberta Tier 2 Soil and Groundwater Remediation Guidelines. Edmonton.
- Publication API (API) (2001). Frequently Asked Questions About TPH Analytical Methods for Crude Oil. Publication API n° 4709.
- Appelo CAJ, Postma D (1999). Geochemistry, groundwater and pollution. A.A. Balkema, Brookfield (Vermont), États-Unis.
- Bernesky R (2013). In-Situ Remediation Strategies as Sustainable Alternatives to Traditional Options. Stantec.
- Bouchard DC (1998). Sorption kinetics of PAHs in methanol–water systems. *Journal of Contaminant Hydrology*, 34:107-120.
- Brandy NC, Well RR (2008). Soils and chemical pollution. Dans : « The nature and properties of soils ». Éditeur : Anthony VR.
- Association canadienne des producteurs pétroliers (ACPP) (2014). What to expect when you're expecting a well [À quoi s'attendre lors de l'attente d'un puits].
- Association canadienne des producteurs pétroliers (ACPP) (2018). Extraction du pétrole. En ligne : <https://www.capp.ca/fr/petrole/extraction-du-petrole/>. Consulté le 10 décembre 2019.

- Canadian Broadcasting Corporation (CBC) (2019). \$260B liability figure for abandoned energy infrastructure an 'error in judgment': AER. En ligne : <https://www.cbc.ca/news/canada/edmonton/alberta-energy-regulator-liability-figure-error-1.4888532>. Consulté le 4 février 2019.
- Cheng G, Guigard SE, Roy J (2004). Extraction and Biorecalcitrant petroleum hydrocarbons from contaminated soil using supercritical fluid extraction (SFE).
- Chiu HY, Hong A, Lin SL, Surampalli RY, Kao CM (2013). Application of natural attenuation for the control of petroleum hydrocarbon plume: Mechanisms and effectiveness evaluation. *Journal of Hydrology*, 505:126-137. En ligne : doi : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.027>
- Choi H-M, Lee J-Y (2011) Groundwater contamination and natural attenuation capacity at a petroleum spilled facility in Korea. *Journal of Environmental Sciences*, 23:1650-1659. En ligne : doi : [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60568-2](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60568-2)
- COMCO Canada (COMCO) (2019). Contaminated Soil Remediation <https://www.comcocalcanada.com/environmental-services/contaminated-soil-remediation/>. Consulté le 8 avril 2019.
- Connolly CA, Walter LM, Baadsgaard H, Longstaffe FJ (1990). Origin and evolution of formation waters, Alberta Basin, Western Canada sedimentary Basin. I. Chemistry. *Applied Geochemistry*, 5:375-395. En ligne : doi:[https://doi.org/10.1016/0883-2927\(90\)90016-X](https://doi.org/10.1016/0883-2927(90)90016-X)
- Dong Z-Y, Huang W-H, Xing D-F, Zhang H-F (2013) Remediation of soil co-contaminated with petroleum and heavy metals by the integration of electrokinetics and biostimulation. *Journal of Hazardous Materials*, 260:399-408
- Drollette BD et coll. (2015). Elevated levels of diesel range organic compounds in groundwater near Marcellus gas operations are derived from surface activities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112:13184-13189
- Drozdowski B (2018). Managing Sterilant Impacted Lands in Alberta. Article présenté dans le cadre du Exova/Element Alliance 2018 Environmental Seminar – Edmonton Edition
- Environmental and Energy Business Resources (EEBR) (2019). Remediation Technologies. En ligne : <http://www.vironbusiness.com/pollute/remtech>. Consulté le 13 novembre 2019.
- El-Tokhi MM, Mostafa YM (2001). Heavy Metals and Petroleum Hydrocarbon Contamination of Bottom Sediments of El Sukhna Area, Gulf of Suez, Egypt. *Petroleum Science and Technology*, 19:481-494. En ligne : doi:10.1081/LFT-100105268
- Ellis L, Anderson S (1997). Tetrachloroethene Pathway Map (Anaerobic). En ligne : http://eawag-bbd.ethz.ch/tce2/tce2_map.html. Consulté le 11 octobre 2019.
- Ministère de l'Environnement de l'Alberta (Alberta Environment; AE) (2001). Phase 1 Environmental Side Assessment Guideline for Upstream Oil and Gas Sites.
- Ministère de l'Environnement et du Développement durable des ressources de l'Alberta (Environment and Sustainable Resource Development; ESRD) (2014). Contaminated Sites Management: Subsoil Salinity Tool

- Evans C, Pollard D (2019). Communication personnelle : Réunion avec Catherine Evans, M.Sc., chimiste professionnelle (spécialiste en évaluation des risques, direction Closure and Liability, Alberta Energy Regulator) et Daniel Pollard, géoscientifique professionnel (hydrogéologie des contaminants, direction Closure and Liability, Alberta Energy Regulator)
- EXTOXNET (1993). Pesticide Information Profile: Bromacil. En ligne : <http://pmep.cce.cornell.edu/profiles/extoxnet/24d-captan/bromacil-ext.html>. Consulté le 10 avril 2019
- FracFocus (2016). FracFocus – Enregistrement de divulgation chimique. BC Oil and Gas Commission. En ligne : <http://fracfocus.ca/fr/chemical-use/what-chemicals-are-used>. Consulté le 1^{er} juin 2016
- Freeze AR, Cherry J (1979). Groundwater.
- Financial Post (FP) (2017). Alberta faces \$8.6B bill to clean up old oil wells. Here's how it can avoid it: C.D. Howe. En ligne : <https://business.financialpost.com/commodities/energy/alberta-faces-8-6b-bill-to-clean-up-old-oil-wells-heres-how-it-can-avoid-it-c-d-howe>. Consulté le 4 février 2019
- FRTR (2007). Remediation Technologies Screening Matrix. En ligne : https://frtr.gov/matriX2/top_page.html. Consulté le 11 avril 2019.
- Funk SP et coll. (2019). Assessment of impacts of diphenyl phosphate on groundwater and near-surface environments: Sorption and toxicity. *Journal of Contaminant Hydrology*. En ligne : doi:10.1016/j.jconhyd.2019.01.002
- Gouvernement de l'Alberta (GA) (2012). Industrial Sump and Pit Wastes.
- Gouvernement de l'Alberta (GA) (2017). Review of old wells to protect Albertans, environment. En ligne : <https://www.alberta.ca/release.cfm?xID=4688680C061E7-B956-4216-F3B0C81A4E6D479A>.
- Gouvernement de l'Alberta (GA) (2018). Upstream Oil and Gas Liability and Orphan Well Inventory. En ligne : <https://www.alberta.ca/upstream-oil-and-gas-liability-and-orphan-well-inventory.aspx>. Consulté le 4 février 2019.
- Gouvernement du Canada (GC) (2017). Contamination des eaux souterraines. En ligne : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/pollution-causes-effets/contamination-souterraines.html>. Consulté le 12 avril 2019.
- Greenberg BM et coll. Field and Laboratory Tests of a Multi-Process Phytoremediation System for Decontamination of Petroleum and Salt Impacted Soils. Dans : Proceedings of the Ninth International In Situ and On-Site Remediation Symposium, 2007. Batelle Press.
- Halla S (2007). Update on Directive 50: Drilling Waste Management.
- Hamid HRA, Kassim WMS, El Hishir A, El-Jawashi SAS (2007). Risk assessment and remediation suggestion of impacted soil by produced water associated with oil production. *Environ Monit Assess*, 145:95-102

- Hebb EA, Wheeler WB (1978). Bromacil in Lakeland Soil Ground Water. *Journal of Environmental Quality*, 7:598-601. En ligne :
doi:10.2134/jeq1978.00472425000700040026x
- Hitchon B, Bachu S, Underschultz JR, Yuan LP (1995). Industrial Mineral Potential of Alberta Formation Waters.
- Interstate Technology and Regulatory Council (ITARC) (2005). Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater.
- InnotechAlberta (2018) Soil Sterilant Remediation: Workshop Invitation. En ligne :
<https://aia.in1touch.org/document/3668/Soil%20Sterilant%20Workshop%20Invitation.pdf>. Consulté le 8 octobre 2019.
- Agence internationale de l'énergie (AIE), Programme de RD sur les émissions de gaz à effet de serre (2008). Well plugging and abandonment techniques. Dans « Long Term Integrity of CO2 Storage – Well Abandonment ». En ligne :
<https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/98891/long-term-integrity-co2-storage-well-abandonment.pdf>. Consulté le 10 décembre 2019
- Jierui (2018). Evaluation and Remediation of Potential Environmental Contaminants in Alberta Oil and Gas Well Sites. Université de la Colombie-Britannique
- Johnson D (2019). Appel téléphonique avec Dallas Johnston (Ph. D.), directeur du programme Land and Biodiversity, Alberta Innovates (10 décembre 2018).
- Levy S, Weber M, Laughton S (2018). Harnessing the Innovation System to Support Efficient Upstream Oil and Gas Well-site Assessment, Remediation and Reclamation. Edmonton.
- Lin F (2009). Remediation Options and Treatment for Tebuthiuron at an Upstream Oil and Gas Site. Dans : RemTech 2009, Banff, Canada, 2009.
- Luther S (2019). Communication personnelle avec Sheila Luther, M.Sc., agronome, agronome pédologue en chef, Matrix Solutions Inc.
- McCarter CPR, Weber TKD, Price JS (2018). Competitive transport processes of chloride, sodium, potassium, and ammonium in fen peat. *Journal of Contaminant Hydrology*, 217:17-31. En ligne : doi : <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2018.08.004>
- Mitra S, Roy P (2011). BTEX: A Serious Ground-water Contaminant Research. *Journal of Environmental Sciences*, 5:394-398
- Mulligan CN, Yong RN, Gibbs BF (1999) On the use of biosurfactants for the removal of heavy metals from oil-contaminated soil. *Environmental Progress*, 18:50-54. En ligne :
doi:10.1002/ep.670180120
- OWA (2019). Orphan Well Association. En ligne : <http://www.orphanwell.ca/about/orphan-inventory/>. Consulté le 4 février 2019
- Polet M (2007). Energy and the reclamation and remediation challenge in Alberta, Canada. Dans : Khare A (éd), Energy Management and the Environment: Challenges and the future.
- Agency for Toxic Substances & Disease Registry (ATSDR) (2013). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): What Health Effects Are Associated With PAH Exposure? En

ligne : <https://www.atsdr.cdc.gov/csem/csem.asp?csem=13&po=11>. Consulté le 24 février 2019

- Prothero DR, Schwab F (1996) *Sedimentary Geology*. W. H. Freeman and Company
- Petroleum Technology Alliance Canada (PTAC) (2019). 2019 Remediation and Reclamation Policy Issues and Knowledge Gaps. En ligne : <https://auprf.ptac.org/soil-and-groundwater-policy-issues-and-knowledge-gaps/?print=pdf>. Consulté le 11 octobre 2019
- Qadir M, Steffens D, Yan F, Schubert S (2003). Sodium Removal From A Calcareous Saline-Sodic Soil Through Leaching and Plant Uptake During Phytoremediation, *Land Degredation & Development* 14:301-307
- Rakewich B, Bakker N (2017). Those Stubborn Sterilants – Environmental Management of Sites Impacted with Bromacil, Dicamba and Tebuthiuron in Alberta. Article présenté dans le cadre du Remediation Technology Symposium 2017, Banff
- Rao PSC, Lee LS, Wood AL (1991). Solubility, Sorption and Transport of Hydrophobic Organic Chemicals in Complex mixtures. *US EPA*
- RECARE (2018) What is salinization? En ligne : <https://www.recare-hub.eu/soil-threats/salinization>. Consulté le 12 avril 2018
- Roy JL, McGill WB, Rawluk MD (1999). Petroleum residues as water-repellent substances in weathered nonwetable oil-contaminated soils. *Revue canadienne de la science du sol*, 79:367-380. En ligne : doi:10.4141/S97-040
- West Country Energy Services (WCES) (2019). Frequently Asked Questions: Vegetation Management. En ligne : <https://westcountry.ca/faq> (consulté le 8 février 2019).
- Svensson T, Lovett GM, Likens GE (2012). Is chloride a conservative ion in forest ecosystems? *Biogeochemistry*, 107:125-134. En ligne : doi:10.1007/s10533-010-9538-y
- U.S. Department of Health and Human Services (USDHHS) (1999). Overview of Total Petroleum Hydrocarbons
- Viers J, Dupre B, Braun J-J, Freydier R, Greenberg S, Ngoupayou JN, Nkamdjou LS (2001). Evidence for Non-Conservative Behaviour of Chlorine in Humid Tropical Environments. *Aquatic Geochemistry*, 7:127-154. En ligne : doi:10.1023/a:1017930106507
- Wingrove G (2010). Abandoned oil wells jeopardize Alberta homes.
- Yang C et coll. (2017). Chemical Fingerprints of Crude Oils and Petroleum Products. *Oil Spill Science and Technology*, chapitre 4