Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux (PASCF)

Document d'orientation sur la gestion des liquides légers en phase non aqueuse (LLPNA) dans les sites contaminés fédéraux

Version 1.0

Environnement et Changement climatique Canada
Environment and Climate Change Canada
Canada

N° de cat. : En14-504/2022F-PDF
ISBN : 978-0-660-45783-3
EC22020

À moins d'avis contraire, il est interdit de reproduire le contenu de cette publication, en totalité ou en partie, à des fins de diffusion commerciale sans avoir obtenu au préalable la permission écrite de l'administrateur du droit d'auteur d'Environnement et Changement climatique Canada. Si vous souhaitez obtenir du gouvernement du Canada les droits de reproduction du contenu à des fins commerciales, veuillez demander l'affranchissement du droit d'auteur de la Couronne en communiquant avec :

Environnement et Changement climatique Canada
Centre de renseignements à la population
12e étage, édifice Fontaine
200, boulevard Sacré-Cœur
Gatineau (Québec) K1A 0H3
Téléphone : 819-938-3860
Ligne sans frais : 1-800-668-6767 (au Canada seulement)
Courriel : enviroinfo@ec.gc.ca

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre de l'Environnement et du Changement climatique, 2022

Also available in English

Table des matières

Liste des tableaux iv
Liste des figures iv
Abréviations v
1 Introduction 1
2 Évaluation, catégorisation et classification du site (Étapes 1 à 6 du CD) 5
3 Élaboration ou mise à jour d'un modèle conceptuel du site contenant des LLPNA (Étapes 3 et 5 du CD) 9
3.1 Historique des rejets/assainissements de LLPNA 3
3.2 Stabilité du panache LLPNA 4
3.3 Panaches de phases dissoute et gazeuse 2
3.3.1 Impacts de la phase dissoute 2
3.3.2 Impacts de la phase gazeuse 2
3.3.3 Évaluation du risque d'exposition associé aux panaches de phases dissoute et gazeuse 3
3.3.4 Évaluation de la stabilité des panaches de phase dissoute 4
3.4 Comprendre le potentiel d'appauvrissement naturel de la zone source et d'atténuation naturelle du LLPNA 5
4 Élaboration d'une stratégie d'assainissement/de gestion des risques (A/GR) (Étape 7 du CD) 6
4.1 Facteurs d'assainissement et de gestion des risques 9
4.2 Analyse et sélection des options d'assainissement et de gestion des risques 10
4.3 Considérations relatives à la durabilité 10
4.4 Objectifs de l'assainissement et de la gestion des risques 11
5 Mise en œuvre de la stratégie d'assainissement/de gestion des risques (A/GR) (Étape 8 du CD) 12
6 Échantillonnage de confirmation (Étape 9 du CD) 13
7 Suivi à long terme (Étape 10 du CD) 13
8 Fermeture du site 14
9 Références 15
10 Annexes 19
Annexe A Principes de base des LLPNA 19
Annexe B Liste de contrôle de gestion d'un site contenant des LLPNA 44

Liste des tableaux

Tableau 1 Guide général de catégorisation des sites contenant des LLPNA 8

Tableau 2 Liste de contrôle de gestion d'un site contenant des LLPNA.....3

Tableau 3 Considérations potentielles concernant la caractérisation et la gestion d'un site contenant des LLPNA.....8

Tableau 4 Exigences potentielles en matière de données de caractérisation pour un site contenant des LLPNA.....2

Tableau 5 Matrice de stratégie de gestion des sites contenant des LLPNA 9

Liste des figures

Figure 1 Étapes de conception et de mise en œuvre d'un plan d'action d'A/GR pour les sites contenant des LLPNA.....4

Abréviations

A/GR	Assainissement ou gestion des risques
AGA	Approche de gestion adaptative
AN	Atténuation naturelle
ANS	Atténuation naturelle surveillée
ANZS	Appauvrissement naturel de la zone source
AOA	Analyse des options en assainissement
API	American Petroleum Institute
ASTM	ASTM International
CCME	Conseil canadien des ministres de l'environnement
CD	Cadre décisionnel du PASCF
CO_2	Dioxyde de carbone
CRC CARE	Cooperative Research Centre for Contamination Assessment and Remediation of the Environment (Australie)
DPI	Détecteur à photo-ionisation
ÉDP	Éléments de preuve
FIL	Fluorescence induite par laser
GTGLC	Groupe de travail sur la gestion des lieux contaminés
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HCP	Hydrocarbures pétroliers
HCPT	Hydrocarbures pétroliers totaux
ITRC	Interstate Technology and Regulatory Council
LIE	Limite inférieure d'explosivité
LDPNA	Liquide dense en phase non aqueuse (ou liquide immiscible dense [LID])
LLPNA	Liquide léger en phase non aqueuse (ou liquide immiscible léger [LIL])
MCS	Modèle conceptuel du site
MCSL	Modèle conceptuel du site contenant des LLPNA
MDN	Ministère de la Défense nationale
MDRL	Modèle de distribution et de récupération des LLPNA
MIP	Sonde d'interface à membrane (« membrane interface probe » en anglais)
NCPS	Niveaux cibles propres à un site
PAA	Plan d'action d'assainissement
PASCF	Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux
PGR	Plan de gestion des risques
RCRA	Resource Conservation and Recovery Act (États-Unis d'Amérique)
SLT	Suivi à long terme
SNCLC	Système national de classification des lieux contaminés
SPAC	Services publics et Approvisionnement Canada
SuRF-UK	United Kingdom's Sustainable Remediation Forum
US EPA	United States Environmental Protection Agency

1 Introduction

Créé en 2005, le Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux (PASCF) est un programme fédéral ayant comme objectif de réduire les risques pour la santé humaine et l'environnement que présentent les sites contaminés fédéraux connus ainsi que les passifs financiers fédéraux connexes. Pour atteindre cet objectif, le PASCF fournit des conseils, outils et ressources aux ministères, organismes fédéraux et les sociétés d'État consolidées (appelés collectivement « gardiens ») pour s'assurer que les sites contaminés fédéraux sont gérés de manière cohérente et scientifiquement valable à l'échelle nationale. Le Cadre décisionnel (CD) du PASCF est une feuille de route en 10 étapes qui décrit les activités, les exigences et les décisions clés à prendre pour une gestion efficace des sites contaminés fédéraux au Canada. Le CD ainsi que d'autres ressources liées au PASCF se trouvent sur le site Web du PASCF.

Ce document d'orientation traite de la gestion des liquides légers en phase non aqueuse (LLPNA) dans les sites fédéraux contaminés tout au long des 10 étapes du CD. Un certain nombre de sites contaminés fédéraux contenant des contaminants d'hydrocarbures pétroliers (HCP) sous forme de LLPNA ont été identifiés, et ne peuvent pas être facilement assainis. La gestion de ces LLPNA nécessitent donc une analyse plus complète afin d'établir des approches appropriées d'assainissement ou de gestion des risques (A/GR). Un LLPNA est un contaminant des eaux souterraines qui n'est pas soluble dans l'eau et a une densité inférieure à celle de l'eau, contrairement à un liquide dense en phase non aqueuse (LDPNA) qui a une densité plus élevée que l'eau. Une fois qu'un LLPNA s'infiltre dans le sol, il s'arrêtera à la hauteur de la nappe phréatique car le LLPNA est moins dense que l'eau.

La science et la gestion de sites contenant des LLPNA ont évolué au fil du temps. Le présent document d'orientation vise à offrir aux gardiens responsables de sites contaminés fédéraux une approche objective, simplifiée et fondée sur les risques pour une gestion efficace des sites contenant des LLPNA. L'objectif de ce document d'orientation est d'offrir une approche cohérente pour traiter les sites touchés par les LLPNA.

Les outils et les procédures décrits dans ce document d'orientation sur les LLPNA sont conformes à la philosophie fondée sur le risque sur laquelle repose le programme du PASCF. Ce document d'orientation sur les LLPNA est également harmonisé avec l'approche fédérale de gestion des sites contaminés établie par le PASCF dans son cadre décisionnel (CD) (PASCF, 2018). Le CD fournit des conseils sur les décisions clés à prendre à chaque étape du processus fédéral. En plus d'appuyer les efforts des gardiens et de leurs consultants, l'intention du présent document est d'améliorer la cohérence nationale en matière de gestion des sites contaminés fédéraux. En effet, les principes de gestion des sites contaminés par des LLPNA devraient être les mêmes, peu importe la taille et la complexité du site ou son emplacement au Canada. Néanmoins, ce document d'orientation n'est pas un manuel normatif ni une discussion détaillée sur tous les détails techniques susceptibles d'être pertinents sur un site spécifique. Dans tous les cas, les gestionnaires de sites contaminés fédéraux sont tenus de veiller à ce que la gestion des sites soit conforme aux exigences énoncées dans les lois fédérales et leurs règlements, qui comprennent, sans s'y limiter :

- La *Loi sur les pêches* (LP);
- La *Loi canadienne sur la protection de l'environnement* (LCPE);
- La *Loi sur l'évaluation d'impact* (LEI);
- La *Loi sur les espèces en péril* (LEP); et
- La *Loi sur la convention concernant les oiseaux migrateurs* (LCOM).

Ce document d'orientation fournira aux gardiens et aux autres utilisateurs des outils de planification d'assainissement et de gestion des risques (A/GR) concernant la gestion des sites contenant des LLPNA, y compris sur l'utilisation d'approches actives ou passives, les exigences de données pour la prise de décision et les éléments à prendre en compte pour la gestion des risques. Ces outils sont pour la plupart alignés sur les Étapes 7 à 9 du CD, mais comprennent également les exigences de données préliminaires qui peuvent être remplies aux Étapes 3 ou 5 du CD (N.B. dans ce document, les termes « Étape du CD » et « Étape » sont utilisés de manière interchangeable et se réfèrent spécifiquement aux étapes du CD). L'un des principaux objectifs est d'aider à évaluer les voies d'exposition potentielles associées à la présence de LLPNA dans un modèle conceptuel détaillé du site contenant des LLPNA (MCSL), un sujet traité en grande partie dans la section 3 – Élaboration ou mise à jour d'un modèle conceptuel du site contenant des LLPNA (Étapes 3 et 5 du CD). Le MCSL documente et affiche les éléments essentiels d'un site contenant des LLPNA et est d'une importance centrale, que le site soit géré via un assainissement actif ou des approches passives. La section 3 fournit des directives relatives aux éléments de preuve (ÉDP) nécessaires pour développer ou mettre à jour un MCSL techniquement correct et fiable. Des sites plus complexes peuvent nécessiter des MCSL plus approfondis. Les ÉDP utilisés pour créer le MCSL sont des éléments de base importants sur lesquels les décisions clés sont prises lors de l'élaboration et de la mise en œuvre de la stratégie d'A/GR au cours des Étapes 7 et 8 du CD.

Ce document d'orientation sur les LLPNA n'émet aucune hypothèse quant à l'étape la plus élevée du CD franchie par un gardien, et il n'est pas rare que les approches d'A/GR déjà élaborées soient réexaminées lors du processus de gestion du site en raison de la disponibilité de nouvelles informations. Par exemple, la découverte d'autres panaches de LLPNA ou une meilleure compréhension de leur comportement peut nécessiter une mise à jour du MCSL, une collecte de données supplémentaires et éventuellement une réévaluation de la stratégie d'A/GR.

La mise en œuvre d'approches actives (p. ex. l'extraction sous vide multi-phase) et passives (p. ex. l'appauvrissement naturel de la zone source [ANZS] ou l'atténuation naturelle surveillée [ANS]) de gestion des sites contenant des LLPNA doit prendre en compte une série de facteurs techniques et non techniques (se référer à la section 4). Les gardiens doivent parfois également prendre en compte des considérations spécifiques au site (et souvent non techniques) lors de la formulation d'une stratégie et d'un plan d'action d'A/GR (p. ex. faire preuve d'efforts de récupération du LLPNA afin de faciliter la cession de la propriété). En fin de compte, les gardiens sont responsables de toutes les décisions de gestion du site.

Ce document d'orientation sur les LLPNA est centré principalement sur le comportement et les facteurs d'assainissement potentiels associés au panache LLPNA. Il traite également des mécanismes de réduction de la masse du panache LLPNA (c.-à-d. l'ANZS). Il devrait être lu conjointement avec les

ressources suivantes du PASCF, qui fournissent des informations plus détaillées sur l'atténuation naturelle (AN) de la phase dissoute et les expositions potentielles associées à la phase dissoute et aux panaches de vapeur :

- *Document d'orientation sur l'atténuation naturelle surveillée pour l'assainissement des sols et des eaux souterraines, Version 1.0* (PASCF, 2021a);
- *L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie VII : Guide d'orientation pour l'évaluation de l'intrusion de vapeurs du sol sur les sites contaminés* (Santé Canada, 2010d); et
- *Sommaire du document d'orientation sur la planification du suivi à long terme du PASCF* (PASCF, 2013a).

La Figure 1 présente une version abrégée du processus en 10 étapes décrit dans le CD (PASCF, 2018) en mettant l'accent sur les détails requis pour la conception et la mise en œuvre d'un plan d'action d'A/GR pour les sites contenant des LLPNA (Étapes 7 et 8 du CD). Les sections du présent document, répertoriées ci-dessous, suivent la séquence d'étapes illustrée à la Figure 1.

- Section 1 Introduction;
- Section 2 Évaluation, catégorisation et classification du site (Étapes 1 à 6 du CD);
- Section 3 Élaboration ou mise à jour d'un modèle conceptuel du site contenant des LLPNA (Étapes 3 et 5 du CD);
- Section 4 Élaboration d'une stratégie d'assainissement/de gestion des risques (A/GR) (Étape 7 du CD);
- Section 5 Mise en œuvre de la stratégie d'assainissement/de gestion des risques (A/GR) (Étape 8 du CD);
- Section 6 Échantillonnage de confirmation (Étape 9 du CD);
- Section 7 Suivi à long terme (Étape 10 du CD) le cas échéant; et
- Section 8 Fermeture du site (considérations).

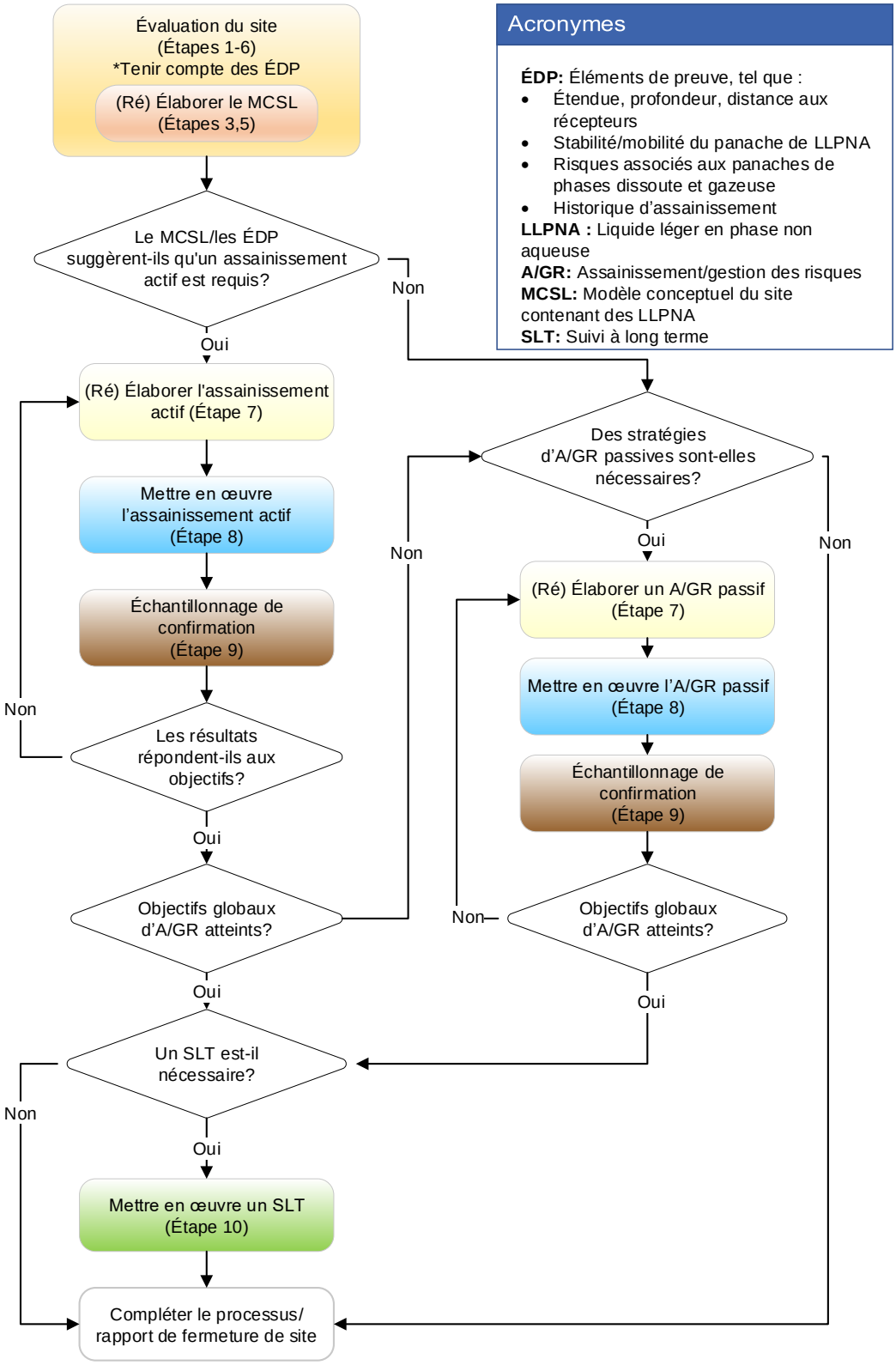


Figure 1 Étapes de conception et de mise en œuvre d'un plan d'action d'A/GR pour les sites contenant des LLPNA

Une courte présentation des principes de comportement des LLPNA est fournie à l'Annexe A; elle s'appuie sur les références techniques disponibles (en anglais seulement), notamment :

- *Evaluating LNAPL Remedial Technologies for Achieving Project Goals* (ITRC, 2009a);
- *ASTM E2531-06, Standard Guide for Development of Conceptual Site Models and Remediation Strategies for Light Nonaqueous-Phase Liquids Released to the Subsurface* (ASTM, 2006); et
- *A Practitioner's Guide for the Analysis, Management and Remediation of LNAPL* (CRC CARE, 2015).

2 Évaluation, catégorisation et classification du site (Étapes 1 à 6 du CD)

Une compréhension préliminaire des conditions du site et des expositions potentielles basées sur les informations existantes aidera à déterminer les besoins potentiels en matière d'étude du site et fournira une indication initiale des stratégies d'assainissement ou de gestion des risques (A/GR) possibles. Les besoins potentiels en données et les scénarios d'exposition seront très variables et spécifiques au site, dépendant principalement de facteurs tels que les propriétés physiques du LLPNA et de la subsurface, la durée de résidence du LLPNA dans le sous-sol et la proximité des récepteurs. Les différentes activités de cette section font partie des Étapes 1 à 6 du CD.

Le

Tableau 1 fournit un guide généralisé de la catégorisation des sites contenant des LLPNA, qui peut être utilisé à des fins de planification initiale (pour les sites sans investigation significative et/ou sans historique d'assainissement) et peut être revu si nécessaire. Ce tableau fournit seulement un guide général : un jugement professionnel sera donc nécessaire à chaque étape pour confirmer que les besoins potentiels en matière de données et les scénarios d'exposition ont bien été identifiés. Pour cette raison, une approche prudente de la catégorisation des sites doit être adoptée, en prenant en compte le risque[1] le plus élevé indiqué par l'une ou l'autre des catégories jusqu'à ce qu'il existe suffisamment de preuves pour déterminer que ce n'est pas le cas, et ce avec un haut niveau de confiance. Par exemple, il serait prudent de supposer initialement que le risque du site est élevé, avec un type de LLPNA potentiellement hautement volatil, ou lorsque des récepteurs peuvent raisonnablement être menacés, même si les autres considérations du

[1] Le risque désigne à la fois la migration/l'instabilité possibles des LLPNA et les expositions inacceptables possibles liées à la présence de LLPNA et/ou tout impact lié à la phase dissoute ou gazeuse.

Tableau 1 indiquent un scénario moins risqué. La catégorisation du site se fait également à l'appui de l'utilisation du Système national de classification des lieux contaminés (SNCLC) mis en œuvre à l'Étape 6 suite à des travaux d'évaluation détaillée du site.

Tableau 1 Guide général de catégorisation des sites contenant des LLPNA

Considérations	Niveau I (risque faible)	Niveau II (risque modéré)	Niveau III (risque élevé)
Type de LLPNA	LLPNA à faible volatilité (p. ex. huiles lourdes, mazout no 6, bunker C)	LLPNA plus volatil (p. ex. carburant diesel)	LLPNA très volatil (p. ex. essence)
Étendue des impacts	Impacts sur le site uniquement	Impacts à proximité des limites du site	Impacts s'étendant hors site
Complexité de la subsurface	Stratigraphie simple	Hétérogénéité importante	Subsurface très complexe (stratigraphie et infrastructure)
Proximité des récepteurs	Aucun récepteur affecté	Les récepteurs sensibles pourraient être affectés à l'avenir	Les récepteurs sensibles sont actuellement affectés ou peuvent l'être dans le futur

Remarques : Ce tableau fournit seulement un guide général. Un jugement professionnel sera donc nécessaire à chaque étape pour confirmer que les besoins potentiels en données spécifiques au site ainsi que les scénarios d'exposition ont bien été identifiés.

La *Loi sur les pêches* (plus précisément, les articles pertinents liés à la protection de l'habitat, aux dispositions relatives à la prévention de la pollution et à l'avis de rejet) s'applique à l'A/GR associés aux sites contenant des LLPNA compte tenu du risque de transport des contaminants dans un plan d'eau de surface à partir de résurgences des eaux souterraines. Étant donné que la stratégie de gestion du site fait l'objet d'une évaluation conformément à l'article 82 de la *Loi sur l'évaluation d'impact*, d'autres lois et règlements fédéraux peuvent également être considérés, tels que la *Loi sur la convention concernant les oiseaux migrateurs* et la *Loi sur les espèces en péril*. En outre, les documents suivants pourraient être largement applicables aux sites contenant des LLPNA :

- *Approche fédérale en matière de lieux contaminés* (GTGLC, 1999);
- *Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux (PASCF) Cadre décisionnel, Version 3.1* (PASCF, 2018);
- *Cadre d'évaluation et de gestion des sites aquatiques contaminés, conformément au Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux (PASCF), version 2.1, 2021* (PASCF, 2021b);
- *L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada* (Santé Canada, 2010a, 2010b, 2010c, 2010d, 2021a et 2021b);
- *Document d'orientation sur l'évaluation du risque écotoxicologique du PASCF* et les modules connexes (PASCF, 2012);
- *Document d'orientation sur l'évaluation du risque écotoxicologique* (CCME, 2020);
- *Guide sur la caractérisation environnementale des sites dans le cadre de l'évaluation des risques pour l'environnement et la santé humaine, Volume 1, Orientations* (CCME, 2016);
- *Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des vapeurs des sols en vue de prévenir leur inhalation par l'humain* (CCME, 2014);
- *Document d'orientation sur l'atténuation naturelle surveillée pour l'assainissement des sols et des eaux souterraines, Version 1.0* (PASCF, 2021a);
- *Document d'orientation sur la planification du suivi à long terme du PASCF* (PASCF, 2013b);

- *Modèle et guide d'orientation pour le rapport de fermeture de site du PASCF, Version 2.0* (PASCF, 2022a, b); et
- *Directives supplémentaires sur la mise en œuvre du standard pancanadien relatif aux hydrocarbures pétroliers dans le sol des sites contaminés fédéraux* (PASCF, 2022c).

De plus, plusieurs directives et règlements provinciaux peuvent s'appliquer dans certaines situations, par exemple lorsque des contaminants ont migré (ou ont potentiellement migré) hors du site, ou lorsque la cession de la propriété est un objectif du site. Les juridictions provinciales peuvent aussi avoir autorité sur l'utilisation bénéfique des ressources en eau souterraine. Les groupes autochtones, les groupes communautaires et les municipalités peuvent également avoir un rôle à jouer dans la gestion des sites contaminés. Chacune de ces considérations peut ainsi façonner le processus d'évaluation du site et la stratégie d'A/GR finale.

3 Élaboration ou mise à jour d'un modèle conceptuel du site contenant des LLPNA (Étapes 3 et 5 du CD)

Le modèle conceptuel du site contenant des LLPNA (MCSL) constitue la base d'une prise de décision efficace dans la gestion des sites contaminés par des LLPNA, et a été décrit par diverses organisations telles que l'ASTM (2006), l'ITRC (2009a) ainsi que le CRC CARE (2015) plus récemment. L'étendue de l'élaboration du MCSL dépendra des objectifs de la stratégie d'A/GR, de la complexité du site et de l'ampleur des problèmes potentiels. Les sites contenant des LLPNA présentant un potentiel minimal de migration et de menace pour les récepteurs peuvent nécessiter seulement un MCSL relativement simple pour répondre de manière adéquate aux préoccupations de gestion du site. À l'inverse, les sites plus complexes touchés par les LLPNA peuvent nécessiter un nombre de données beaucoup plus important et sophistiqués obtenues sur des périodes plus longues, afin de valider le MCSL et toute stratégie de gestion de site basée sur ce dernier.

La gestion efficace d'un site contenant des LLPNA peut comprendre une approche par étapes et itérative, qui peut évoluer à chaque fois qu'apparaissent de nouvelles informations susceptibles de remettre en cause les conclusions ou les hypothèses précédentes (p. ex. le rendement du plan d'action d'A/GR, les modifications de l'utilisation des terrains, etc.). Selon le site, le MCSL peut être développé et mis à jour jusqu'à pouvoir conclure qu'il contient toutes les informations nécessaires pour concevoir une stratégie et un plan d'action d'A/GR robustes et applicables. Ce processus de mise à jour itératif fait partie intégrante de la conception de la stratégie d'A/GR à l'Étape 7.

Le MCSL est généralement élaboré à l'Étape 3 (programme d'essai initial). Il peut être mis à jour ou développé à l'Étape 5 si certaines des informations nécessaires à l'élaboration d'une stratégie d'A/GR appropriée font défaut. Le MCSL devra peut-être être mis à jour si la stratégie d'A/GR est remise en cause (p. ex. si la stratégie d'origine est jugée inefficace lors de l'Étape 8 du CD – Mise en œuvre de la stratégie d'A/GR, ou lors de la surveillance du rendement dans le cas de la gestion du LLPNA et du panache associé). L'élaboration d'un MCSL à l'Étape 3 ou à l'Étape 5 implique l'examen de divers ensembles de données. Les ensembles de données peuvent continuer à s'accroître à l'Étape 7 à mesure que la stratégie d'A/GR est élaborée et que des informations supplémentaires sur le site, provenant de

rapports tels que les évaluations des risques pour l'environnement et la santé humaine spécifiques au site, sont disponibles.

Remarque : Ce document d'orientation met l'accent sur les LLPNA dans les eaux souterraines; cependant, les sites comportant des LLPNA peuvent contenir d'autres contaminants qui présentent leurs propres risques potentiels. Si d'autres contaminants sont présents dans les sols et/ou les eaux souterraines, un MCS élargi incluant ces autres contaminants serait requis.

Une liste de contrôle est fournie dans le

Tableau 2 et est organisée autour de la collecte d'ÉDP/de données relatifs aux éléments centraux d'un MCSL. L'utilisation de la liste de contrôle permet également de compiler les données/ÉDP déjà disponibles pour un site donné contenant des LLPNA, fournissant ainsi un outil d'évaluation rapide des lacunes potentielles en matière de données dans le MCSL. Le

Tableau 3 fournit plus de détails sur les méthodes d'évaluation et les mesures possibles associées aux considérations fondamentales de caractérisation et de gestion du site contenant les LLPNA. En outre, les outils énumérés ci-après peuvent aider au processus d'élaboration du MCSL et offrir une approche hiérarchisée qui est cohérente avec la catégorisation des sites présentée dans le

Tableau 1 :

- Tableau C-1 du document *Evaluating LNAPL Remedial Technologies for Achieving Project Goals* (ITRC, 2009a; en anglais seulement);
- Tableau 4.1 du document *ASTM E2531-06, Standard Guide for Development of Conceptual Site Models and Remediation Strategies for Light Nonaqueous Phase Liquids Released to the Subsurface* (ASTM, 2006; en anglais seulement).

Les lignes directrices/outils provenant d'autres juridictions restent utiles même lorsque les régimes de règlementation diffèrent, car la science des LLPNA n'est pas spécifique au lieu ou à la juridiction.

Tableau 2 Liste de contrôle de gestion d'un site contenant des LLPNA

	Question	Réponse / Commentaire	
1	**Objectifs du site et cadre règlementaire**		
1.A	Les objectifs du site sont-ils bien définis?	O Oui	
		O Non	Faire participer les intervenants et établir des objectifs.
1.B	Les exigences règlementaires sont-elles bien comprises?	O Oui	
		O Non	Déterminer les exigences/critères appropriés.
2	**Historique des rejets de LLPNA[2] et propriétés**		
2.A	La source du LLPNA est-elle connue? (indiquer si le volume et/ou la pression du rejet sont élevés)	O Oui	
		O Non	Déterminez si le gouvernement fédéral est responsable. Envisager un examen historique plus complet (ÉES de phase 1 élargie).
2.B	Y a-t-il une possibilité que le rejet soit toujours en cours?	O Oui	Prendre des mesures immédiates pour arrêter le rejet.
		O Non	
2.C	Y a-t-il une menace imminente liée au rejet qui justifie une atténuation immédiate ou une intervention d'urgence?	O Oui	Activer l'intervention d'urgence ou mettre en œuvre les mesures d'atténuation.
		O Non	
2.D	Les types de LLPNA sont-ils connus?	O Oui	
		O Non	Voir le Tableau 3 pour les options de développement du MCSL.
2.E	La date du rejet/l'âge approximatif du LLPNA sont-ils connus?	O Oui	
		O Non	Voir le

[2] L'admissibilité au financement du PASCF pour l'assainissement peut être influencée par l'historique des rejets, en particulier si la contamination a résulté d'activités antérieures ou postérieures au 1er avril 1998. La *Directive du PASCF sur l'admissibilité des sites et des coûts de la phase IV – Version 1.0* (PASCF, 2021c) comprend des informations supplémentaires sur les critères d'admissibilité de base et les exceptions pertinentes.

	Question	Réponse / Commentaire	
			Tableau 3 pour les options de développement du MCSL.
2.F	La densité/densité relative et la viscosité du LLPNA sont-elles connues?	○ Oui	
		○ Non	Voir le Tableau 3 pour les options de développement du MCSL.
3	**Panache LLPNA**		
3.A	L'étendue surfacique et la distribution verticale du panache LLPNA ont-elles été définies?	○ Oui	
		○ Non	
		Indiquer les techniques utilisées : ○ Analyse visuelle/olfactive du sol ○ Analyse du sol au détecteur à photo-ionisation (DPI) ○ Analyse du sol au colorant hydrophobique ○ Analyse du sol à la lumière UV ○ Échantillonnage traditionnel du sol et analyse en laboratoire ○ Photographie de carottes de sol/test pétrophysique ○ Données des puits de surveillance (jaugeage, échantillonnage) ○ Résistivité électrique ○ Fluorescence induite par laser (FIL) * Voir le Tableau 3 pour en savoir plus sur les options de développement du MCSL.	
3.B	Le panache LLPNA est-il stable dans son étendue globale?	○ Oui	
		○ Non	
		Éléments de preuve : ○ Âge du LLPNA ○ Surveillance des puits d'observation	

	Question	Réponse / Commentaire
		○ Tendances de la phase dissoute ○ Un ou plusieurs éléments de preuve de la mobilité du LLPNA à la périphérie du panache LLPNA ○ Indicateurs d'atténuation naturelle ○ Estimations critiques de la pression hydrostatique du LLPNA à la périphérie du LLPNA * Voir le Tableau 3 pour en savoir plus sur les options de développement du MCSL.
3.C	Existe-t-il des zones de LLPNA potentiellement mobile au sein du panache LLPNA?	○ Oui
		○ Non
		Indiquer les éléments de preuve disponibles : ○ Âge du LLPNA ○ Détermination de la saturation et/ou de la saturation résiduelle du LLPNA (essais pétrophysiques de carottes du sol) ○ Estimations de la transmissivité du LLPNA ○ Performance du système de récupération du LLPNA ○ Détermination de la saturation et/ou de la saturation résiduelle du LLPNA (conversion des HPT, modélisation analytique) * Voir le Tableau 3 pour en savoir plus sur les options de développement du MCSL.
3.D	L'atténuation naturelle du panache LLPNA a-t-elle été évaluée?	○ Oui
		○ Non
		Indiquer les éléments de preuve disponibles : ○ Données du sol (bactéries capables de dégrader le pétrole) ○ Données des gaz du sol (profils de concentration des gaz du sol, dioxyde de carbone, méthane) ○ Indicateurs d'atténuation naturelle de la phase dissoute

	Question	Réponse / Commentaire	
		* Voir le Tableau 3 pour en savoir plus sur les options de développement du MCSL.	
4	**Phases dissoute et gazeuse**		
4.A	Un panache de phase dissoute associé a-t-il été délimité?	○ Oui	
		○ Non	
		Indiquer les éléments de preuve disponibles : ○ Échantillonnage du puits de surveillance ○ Sonde d'interface à membrane (MIP) * Voir le Tableau 3 pour en savoir plus sur les options de développement du MCSL.	
4.B	La stabilité du panache de la phase dissoute a-t-elle été évaluée?	○ Oui	
		○ Non	
		Indiquer les éléments de preuve disponibles : ○ Analyse des tendances des données de surveillance des eaux souterraines dans le temps ○ Distribution spatiale des données de surveillance des eaux souterraines ○ Paramètres géochimiques (O_2 dissous, NO_3^-, SO_4^{2-}, fer ferreux (Fe^{2+}), manganèse (Mn^{2+}), CO_2 et CH_4) * Voir le Tableau 3 pour en savoir plus sur les options de développement du MCSL.	
4.C	L'atténuation naturelle de la phase dissoute a-t-elle été évaluée?	○ Oui	
		○ Non	
		Indiquer les éléments de preuve disponibles : ○ Données du sol (p. ex. bactéries capables de dégrader le pétrole)	

	Question	Réponse / Commentaire	
		○ Analyse des tendances des données de surveillance des eaux souterraines dans le temps ○ Distribution spatiale des données de surveillance des eaux souterraines par rapport à l'étendue du panache LLPNA ○ Indicateurs d'atténuation naturelle de la phase dissoute (réduction spatiale/temporelle des concentrations constituantes, accepteurs terminaux d'électrons, paramètres géochimiques) * Voir le Tableau 3 pour en savoir plus sur les options de développement du MCSL.	
4.D	Les impacts potentiels de la phase gazeuse ont-ils été évalués (y compris le méthane)?	○ Oui	
		○ Non	Voir le Tableau 3 pour les options de développement du MCSL.
5	**Expositions potentielles**		
5.A	Identifiez les récepteurs potentiels et détaillez toute information pertinente sur l'utilisation des terrains (p. ex. sources d'eau potable, groupes d'âge, utilisations/activités du site)	○ Santé humaine :	
		○ Écologique :	
		Indiquer les éléments de preuve disponibles ○ Détermination de l'exposition et des effets	
5.B	Y a-t-il eu un dépassement des critères de risques?	○ Oui	Confirmer la pertinence des voies.
		○ Non	
5.C	Les voies respectives sont-elles complètes ou potentiellement complètes à l'avenir?	○ Oui	
		○ Non	

Tableau 3 Considérations potentielles concernant la caractérisation et la gestion d'un site contenant des LLPNA

	Considérations/paramètres potentiels	Méthodes d'évaluation potentielles	Discussion
Délimitation/caractérisation du panache LLPNA	1. Géométrie du panache LLPNA : étendues horizontales/verticales, position par rapport à la nappe phréatique 2. Intensité relative des impacts (zones les plus contaminées)	1. Installation de puits/sondages, fluorescence induite par laser (FIL), résistivité 2. Échantillonnage du sol (HPT, saturation du LLPNA), échantillonnage des eaux souterraines, FIL, résistivité	
Géologie/Hydrogéologie	1. Stratigraphie générale 2. Types de sols touchés 3. Gradients hydrauliques 4. Gradient du LLPNA 5. Conductivité hydraulique	1,2. Examen sur le terrain des forages de sol, analyse granulométrique en laboratoire 3,4. Mesure du niveau d'eau dans les puits 5. Essais d'injection, essais de pompage, essais en laboratoire	
Propriétés physiques/chimiques du LLPNA	1. Viscosité du LLPNA 2. Densité relative du LLPNA 3. Type/âge du LLPNA 4. Composition chimique du LLPNA	1,2. Tests des propriétés physiques en laboratoire 3. Tests diagnostiques en laboratoire 4. Tests d'analyse chimique en laboratoire	
Impacts de la phase dissoute et de la phase gazeuse	1. Concentrations des composants du LLPNA dans les eaux souterraines 2. Concentrations de gaz des composants du LLPNA et du méthane dans le sol 3. Explosivité du gaz du sol	1. Échantillonnage des eaux souterraines/tests en laboratoire 2. Échantillonnage du gaz du sol/tests en laboratoire 3. Examen sur le terrain des échantillons en tête de puits et/ou de gaz du sol à l'aide d'un appareil	1. Concentrez-vous sur les puits sans LLPNA. L'avantage possible à échantillonner les eaux souterraines sous le LLPNA doit être évalué par rapport au risque d'obtenir des échantillons contaminés par le LLPNA (la présence de

	Considérations/paramètres potentiels	Méthodes d'évaluation potentielles	Discussion
		portable de mesure de la limite inférieure d'explosivité (LIE)	LLPNA peut ne pas être facilement apparente dans un échantillonnage d'eau souterraine). 2. Le besoin d'échantillonnage des gaz du sol et la liste des paramètres potentiels peuvent être examinés en fonction de la volatilité du LLPNA et/ou des composants spécifiques (p. ex., le test des composants avec la constante de la loi d'Henry > 1 e^{-5} atm·m^3/mol et pression de vapeur > 0,05 torr) et/ou les distances de séparation entre les sources de vapeur potentielles et les récepteurs.
Mobilité du LLPNA	1. Âge du panache LLPNA 2. Concentration de HPT dans le sol 3. Saturations et saturations résiduelles du LLPNA 4. Transmissivité du LLPNA 5. Performance du système de récupération 6. Tendances de la phase dissoute Remarque. La détermination de la mobilité implique généralement	1. Comparaison avec la valeur C_{res} appropriée ou conversion des concentrations de HPT en saturations et comparaison avec les valeurs de saturation résiduelles typiques (voir ASTM E2531-06) 2/3. Prélèvement d'échantillonnages de carottes de sol et essais pétrophysiques en laboratoire (p. ex. test de saturation en fluide des pores, test de poussée d'eau)	1. Un LLPNA plus ancien est moins susceptible d'être mobile 2,3. Les saturations de LLPNA dépassant les niveaux résiduels fournissent un élément de preuve de la mobilité des LLPNA 4. Une transmissivité du LLPNA > 0,1 m^2/jour fournit un élément de preuve de la

	Considérations/paramètres potentiels	Méthodes d'évaluation potentielles	Discussion
	une méthode fondée sur le poids de la preuve, avec plusieurs éléments de preuve pris en compte (en raison de la complexité de l'écoulement multi-phase souterrain et des limites techniques des méthodes d'évaluation potentielles).	4. Essais de prélèvement de phase libre sur le terrain du LLPNA, essais de pompage, essais de traçage sur le terrain (voir ASTM E2856-11) 5. Tracés de la récupération cumulée/du taux de récupération du système de récupération de LLPNA, analyse de la courbe de diminution 6. Tendances de la concentration des eaux souterraines des paramètres du LLPNA	mobilité du LLPNA (ASTM, 2013c). 5. Une faible performance du système de récupération peut fournir une preuve solide que le LLPNA restant est à des niveaux résiduels/immobiles (si le système a été mis en œuvre et est utilisé efficacement) 6. Les tendances de la phase dissoute fournissent une indication de l'état du panache LLPNA (p. ex. des tendances stables de la phase dissoute = LLPNA stable)
Stabilité/migration du LLPNA	1. Propagation et migration du panache LLPNA Remarque : La migration du LLPNA diffère de la considération de mobilité du LLPNA ci-dessus, dans la mesure où seul est considéré le potentiel de mobilité du LLPNA autour de la périphérie d'un panache LLPNA (c.-à-d. sa capacité à migrer dans des zones qui ne sont pas déjà touchées).	1. Une ou plusieurs sources de données de la mobilité du LLPNA indiquent une mobilité potentielle le long du périmètre du panache LLPNA. 2. Les observations de LLPNA dans des puits d'observation installés dans un sol propre 3. Estimer la pression hydrostatique critique de LLPNA (pression de déplacement à l'entrée des pores) à la périphérie du LLPNA	1. Un dépassement de la pression hydrostatique critique de LLPNA (pression de déplacement à l'entrée des pores) à la périphérie du LLPNA représente un potentiel de propagation/migration du panache LLPNA

	Considérations/paramètres potentiels	Méthodes d'évaluation potentielles	Discussion
Atténuation naturelle	1. Tendances temporelles de la concentration des eaux souterraines (composants du LLPNA) 2. Distribution spatiale de la concentration dans les eaux souterraines (composants du LLPNA) 3. Présence d'accepteurs finaux d'électrons dans l'eau souterraine, paramètres géochimiques 4. Analyse des gaz du sol, profils 5. Degré de dégradation du LLPNA	1. Analyse statistique des tendances pour confirmer la tendance stable ou à la baisse 2. Évaluer le gradient de concentration à partir de la région source 3. Échantillonnage des gaz du sol pour détecter l'oxygène, le dioxyde de carbone, le méthane en différents points, latéralement et verticalement 4. Échantillonnage de piège à dioxyde de carbone près de la surface avec analyse d'isotopes stables pour confirmer l'origine du carbone, mesures du dioxyde de carbone dans une chambre de flux 5. Tests diagnostiques du LLPNA	1. Des tendances stables ou en diminution spécifiques au lieu dans le temps indiquent une atténuation naturelle 2. Des concentrations décroissantes avec la distance par rapport à la source témoignent d'une atténuation naturelle 3. Les mesures du dioxyde de carbone pétrogénique permettent de quantifier les pertes naturelles en termes de volume de LLPNA dégradé par unité de surface et par unité de temps
Facteurs d'assainissement potentiels	1. Expositions inacceptables pour la santé humaine ou l'environnement (problèmes de composition) 2. Mobilité/migration du LLPNA (problèmes de saturation) 3. Facteurs non techniques, tels des considérations esthétiques (p. ex. visuels, olfactifs), règlementaires ou autres (p. ex. condition de transaction immobilière)	1. Va de la comparaison des données existantes du site aux critères génériques, en passant par l'évaluation quantitative des risques pour la santé humaine et l'environnement (selon la complexité du site et l'ampleur des risques potentiels). 2. Voir les sources de données et les approches relatives à la mobilité et à la migration du LLPNA ci-dessus	

	Considérations/paramètres potentiels	Méthodes d'évaluation potentielles	Discussion
		3. Examiner les facteurs non techniques afin d'établir les objectifs d'A/GR	

Remarques :

– Le tableau C-1 du document de règlementation technique de l'ITRC intitulé *Evaluating LNAPL Remedial Technologies for Achieving Project Goals* [Évaluation des technologies d'assainissement des LLPNA pour atteindre les objectifs du projet; disponible en anglais seulement] (ITRC, 2009a) fournit davantage de détails sur les composants du MCSL et présente une approche à trois niveaux du développement du MCSL basée sur des niveaux croissants de complexité du site.

– Le tableau 4.1 de la norme ASTM E2531-6 (ASTM, 2006) fournit des informations détaillées sur les méthodes de collecte et l'applicabilité des données des sites contenant des LLPNA.

Une courte discussion sur les facteurs à considérer lors de l'évaluation des divers éléments du MCSL, ainsi que des détails sur la collecte des données sont fournis dans le reste de cette section. Des suggestions sur les exigences minimales en matière de données pouvant être associées à chaque type de site contenant des LLPNA (risque faible [niveau I], risque modéré [niveau II] et risque élevé [niveau III]), comme exposé dans le

Tableau 1) sont fournies dans le Tableau 4. La sélection et la pondération des ÉDP seront spécifiques à chaque site et incomberont aux gardiens.

L'évaluation de chacun des ÉDP suivants est une exigence afin de déterminer si la stratégie d'A/GR de l'Étape 7 prévoit des solutions actives ou passives (ou une combinaison des deux).

Tableau 4 Exigences potentielles en matière de données de caractérisation pour un site contenant des LLPNA

Item	Niveau I (risque faible)	Niveau II (risque modéré)	Niveau III (risque élevé)
Délimitation	Délimitation utilisant des techniques typiques d'échantillonnage des sols, d'échantillonnage des eaux souterraines et/ou de jaugeage des puits	Des moyens plus sophistiqués peuvent être nécessaires, mettant davantage l'accent sur les phases dissoute et gazeuse	Des moyens plus sophistiqués susceptibles d'être requis, avec une évaluation détaillée des phases dissoute et gazeuse
Évaluation du risque	Comparaison avec des critères génériques, analyse des voies de base	Une évaluation quantitative spécifique à chaque site des risques pour l'environnement et la santé humaine, accompagnée d'une évaluation plus détaillée des voies, peut être nécessaire	Une évaluation quantitative spécifique à chaque site des risques pour l'environnement et la santé humaine, accompagnée d'une évaluation plus détaillée des voies, est probablement nécessaire
Évaluation de la mobilité	Estimation de la transmissivité du LLPNA	Peut nécessiter plusieurs sources de données à un nombre de lieux représentatif	Cela nécessitera davantage de sources de données développées avec une plus grande densité de données (couverture surfacique étendue)

Période d'évaluation/de surveillance	Au moins 2 ans de surveillance pour confirmer la stabilité des concentrations de contaminants, de l'étendue du panache, etc.	Le MCSL peut nécessiter des données couvrant une période de 3 à 5 ans	Le MCSL peut nécessiter 5 à 10 ans de données

Remarques :

– Le **Error! Not a valid result for table.** et le

Tableau 3 fournissent plus de détails sur les techniques d'évaluation et les mesures potentielles.

– Les calendriers de développement du MCSL/de surveillance du site sont fournis à titre d'exemple uniquement et le jugement professionnel déterminera en grande partie les besoins en données appropriés et les périodes de surveillance correspondantes sur une base spécifique à chaque site.

3.1 Historique des rejets/assainissements de LLPNA

L'historique des rejets et de l'assainissement des LLPNA (si un assainissement actif a été entrepris) peut fournir des informations cruciales sur l'état probable du panache des LLPNA et des panaches associés en phases dissoute et gazeuse. Les points suivants peuvent être utiles pour évaluer la complexité du site, le potentiel de migration des LLPNA ou d'expositions inacceptables, et les stratégies d'A/GR possibles :

- Les rejets plus récents ont plus de chances d'avoir une fraction mobile plus importante et présentent donc un risque accru de migration ou de propagation de LLPNA dans des zones non touchées. À l'inverse, les panaches LLPNA plus anciens sont plus susceptibles d'être stables, avec un potentiel de migration moindre. En outre, dans les anciens panaches LLPNA, la fraction mobile potentielle devrait représenter une petite partie du panache global des LLPNA.
- Si un panache LLPNA est stable depuis un certain temps (c.-à-d. le LLPNA ne migre plus/ne s'étend pas dans les zones non touchées), il est probable que les propagations et les concentrations du panache de phases dissoute et/ou gazeuse aient atteint un point d'équilibre et soient stables. De même, la démonstration d'une étendue stable du panache en phase dissoute (c.-à-d. qu'il n'y a aucune preuve d'expansion du ou des panaches ou de tendances à la hausse des concentrations) est généralement interprétée comme une preuve solide que la même chose vaut pour la source du panache LLPNA (ITRC, 2018).
- Des volumes importants et/ou des rejets à haute pression (p. ex. des pipelines) entraînent normalement une augmentation des saturations en LLPNA, un potentiel de mobilité plus élevé et une migration/propagation plus étendue (verticalement et latéralement).
- Les efforts d'assainissement des LLPNA qui enlèvent/dissipent la pression hydrostatique de LLPNA (excavation, extraction) peuvent avoir un effet stabilisant significatif sur un panache LLPNA. Toutefois, cela est généralement davantage applicable aux rejets plus récents, où un plus grand potentiel de migration existe, par opposition aux anciens panaches LLPNA qui se sont peut-être déjà stabilisés.

- Les efforts de récupération hydraulique ou plus agressifs de LLPNA, qui ont été efficacement mis en œuvre et investis, mais qui sont incapables de récupérer le LLPNA, peuvent fournir des preuves utiles d'un potentiel de mobilité et de migration minimal .

Ces points sont largement applicables aux sites contenant des LLPNA. Cependant, il convient de noter qu'avec une complexité accrue du site, moins de certitude est associée aux hypothèses initiales, et il y a un plus grand besoin de développer plusieurs ÉDP spécifiques au site.

3.2 Stabilité du panache LLPNA

Les besoins potentiels en données énumérées dans le

Tableau 2 pour le panache du LLPNA, visent principalement à établir l'étendue verticale et surfacique des impacts du LLPNA, ainsi qu'à évaluer la mobilité et la stabilité du LLPNA. La délimitation de l'étendue d'un panache LLPNA, en particulier d'un panache LLPNA plus ancien, peut être extrêmement difficile et peut impliquer davantage que la simple mesure et/ou le simple échantillonnage de puits de surveillance pour en détecter la présence. Pour tout panache LLPNA, ce qui est observé dans les puits ne reflètera que la partie au-dessus des niveaux de saturation résiduelle sur la nappe phréatique (c.-à-d. la fraction potentiellement mobile/récupérable). Avec des panaches LLPNA plus anciens, cela représenter a le plus souvent une fraction relativement faible du panache global du LLPNA. On peut de plus s'attendre à ce qu'une partie importante du LLPNA se trouve à de faibles saturations et/ou en dessous de la nappe phréatique (voir l'Annexe A pour plus de détails). Par conséquent, il faudra possiblement utiliser des méthodes supplémentaires pour détecter le LLPNA dans la subsurface : des méthodes directes comme la fluorescence induite par laser (FIL)[3], différents types d'échantillonnage du sol, ou des méthodes indirectes comme la comparaison des concentrations des composants des eaux souterraines par rapport aux valeurs de solubilité réelles du constituant pétrolier visé.

Les sites contenant des LLPNA, en particulier les sites anciens préoccupant les gardiens fédéraux, impliquent souvent des LLPNA présents dans les sols depuis de nombreuses années, qui se sont peut-être déjà stabilisés et pourraient ne pas migrer à l'avenir, à moins que de nouveaux rejets ou d'autres activités ne génèrent suffisamment de pression hydrostatique du LLPNA pour stimuler la migration. L'évaluation de la stabilité du LLPNA aidera à vérifier si ces conditions existent.

Le

[3] La technologie FIL est applicable seulement à certaines conditions géologiques.

Tableau 2 et le

Tableau 3 fournissent des indications sur les besoins potentiels en données et les méthodes d'évaluation pour le panache LLPNA. Des critères d'analyse utiles pour détecter la présence de LLPNA résiduel, basés sur les types de données préexistantes de nombreux sites contenant des LLPNA, sont également fournis par Lahvis et al. (2013). Comme indiqué précédemment, la sophistication et la quantité de données requises augmenteront avec l'accroissement de la complexité du site et le potentiel de risque. Cette collecte de données doit être planifiée dans le cadre du programme d'essai détaillé (Étape 5), ou ultérieurement lorsque le besoin de données supplémentaires est identifié dans l'analyse des lacunes effectuée dans le cadre du processus de conception à l'Étape 7.

3.3 Panaches de phases dissoute et gazeuse

Cette section traite des éléments clés concernant les phases dissoute et gazeuse, qui comprennent la délimitation, l'évaluation des expositions potentielles et l'évaluation de la stabilité.

3.3.1 Impacts de la phase dissoute

Les impacts de la phase dissoute sont généralement évalués à l'aide d'échantillons d'eau souterraine provenant de puits de surveillance et en analysant les constituants des produits pétroliers en fonction du type et de la composition du LLPNA. Il est important de bien délimiter les impacts de la phase dissoute afin de déterminer la probabilité que la substance atteigne les eaux de surface. Des informations détaillées sur la composition chimique des différents types de LLPNA se trouvent dans *Volume 2: Composition of petroleum mixtures* (Volume 2 : Composition des mélanges de pétrole; disponible en anglais seulement; Potter et Simmons, 1998), qui peuvent aider au développement de listes d'analytes. Ces informations peuvent également être utiles pour déterminer si un composant donné dans les eaux souterraines, détecté sur un site, est susceptible d'être associé au LLPNA. Des sites plus complexes peuvent nécessiter des moyens plus sophistiqués d'évaluation/de délimitation des eaux souterraines (p. ex. sonde d'interface à membrane [MIP], systèmes d'échantillonnage d'eau souterraine in situ à poussée directe) ou incorporer des puits de surveillance à plusieurs niveaux et/ou avec des intervalles d'échantillonnage distincts. La compréhension des régimes d'écoulement des eaux souterraines et l'identification des voies préférentielles d'écoulement sera cruciale pour évaluer le transport des contaminants en phase dissoute et les expositions potentielles. Des techniques plus sophistiquées utilisant des outils de profilage hydraulique peuvent être utiles à cet égard.

3.3.2 Impacts de la phase gazeuse

Les principales préoccupations concernant les impacts de la phase gazeuse sont la volatilisation directe des composants du LLPNA ou du méthane résultant de la dégradation anaérobique (méthanogénèse) pouvant entraîner une exposition chronique des récepteurs, ou des

problèmes plus graves d'accumulation dans les structures (toxicité aiguë, inflammabilité, potentiel d'explosion). Le

Tableau 3 fournit des valeurs d'analyse généralisées pour les pressions de vapeur des composants et les constantes de la loi de Henry qui peuvent aider à évaluer la probabilité qu'un LLPNA donné puisse entraîner des problèmes de vapeur et/ou dresser une liste des analytes potentiels des gaz du sol. Des lignes directrices pour le dépistage de problèmes potentiels d'intrusion de vapeur de LLPNA, et l'évaluation réelle des impacts, sont discutées en détail dans de nombreux documents, y compris :

- *L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie VII : Guide d'orientation pour l'évaluation de l'intrusion de vapeurs du sol sur les sites contaminés* (Santé Canada, 2010d);
- Le *protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des vapeurs des sols en vue de prévenir leur inhalation par l'humain* (CCME, 2014);
- Le *guide sur la caractérisation environnementale des sites dans le cadre de l'évaluation des risques pour l'environnement et la santé humaine, Volumes 1 à 3* (CCME, 2016);
- *Technical Guide for Addressing Petroleum Vapor Intrusion at Leaking Underground Storage Tank Sites* (US EPA, 2015);
- *Petroleum Vapor Intrusion: Fundamentals of Screening, Investigation, and Management* (ITRC, 2014); et
- *Vapour Intrusion Screening at Petroleum UST Sites* (Lahvis et al., 2013).

Dans le contexte des sites contaminés fédéraux canadiens où l'évaluation de l'intrusion de vapeur sert à évaluer des risques pour la santé humaine, il est nécessaire de consulter le guide d'orientation de Santé Canada intitulé *L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie VII : Guide d'orientation pour l'évaluation de l'intrusion de vapeurs du sol sur les sites contaminés* (Santé Canada, 2010d).

3.3.3 Évaluation du risque d'exposition associé aux panaches de phases dissoute et gazeuse

Un aspect important du MCSL est la documentation des voies d'exposition susceptibles d'être actives dans différents milieux, reflétant des scénarios de risque possibles du panache LLPNA, du panache de phases dissoute et gazeuse. Une évaluation approfondie des voies d'exposition applicables par rapport à l'utilisation actuelle et future des terrains est cruciale pour la mise en œuvre efficace d'une stratégie d'A/GR. Il existe de nombreuses sources d'orientation sur ce sujet, potentiellement utiles pour l'élaboration de cette composante du MCSL, notamment les références déjà citées (p. ex. CCME, 2016; Santé Canada, 2010b et 2010d; ASTM, 2006; ITRC, 2009a; CRC CARE, 2015).

Les recommandations de l'US EPA (2015) et de l'ITRC (2014) sur les intrusions de vapeurs de pétrole ont considérablement changé, en particulier en ce qui concerne les distances de séparation recommandées pour les sources potentielles de LLPNA et de vapeurs dissoutes. Traditionnellement, la norme a été d'établir des distances de séparation basées sur la modélisation du transport de vapeur sans tenir

compte de la biodégradation, ce qui est significatif étant donné que les vapeurs de pétrole sont facilement biodégradables. Les recommandations des directives plus récentes (US EPA, 2015; ITRC, 2014) reposent sur l'examen des données réelles sur les gaz des sols provenant de centaines de sites et ont réduit les distances de séparation requises par rapport à celles utilisées par le passé.

3.3.4 Évaluation de la stabilité des panaches de phase dissoute

Il est important d'évaluer si un panache de phase dissoute a atteint un état d'équilibre et s'est stabilisé, tant en étendue qu'en concentrations de composants de HCP, pour évaluer si des récepteurs peuvent être touchés (voir aussi la section 3.3.3) et déterminer la stabilité du panache LLPNA associé (voir aussi la section 3.2). La pratique généralement acceptée consiste à effectuer un échantillonnage trimestriel sur une période de deux ans (c.-à-d. huit évènements de surveillance) pour évaluer la stabilité des panaches de phase dissoute. Plus de données et des périodes de surveillance plus longues peuvent être nécessaires sur des sites plus complexes ou lorsque les résultats de la surveillance initiale n'indiquent pas de tendances statistiquement significatives, qu'elles soient stables ou en diminution.

Les méthodes des tests statistiques sont discutées en détail dans les directives unifiées de l'US EPA, *Statistical Analysis of Groundwater Monitoring Data at RCRA Facilities* [Analyse statistique des données de surveillance des eaux souterraines dans les installations soumises à la loi RCRA, en anglais seulement] (US EPA, 2009). Un logiciel statistique complet de l'US EPA, *Statistical Software ProUCL 5.0.00 for Environmental Applications for Data Sets with and without Nondetect Observations* [Applications environnementales pour les ensembles de données avec et sans observations de non-détection; en anglais seulement] (US EPA, 2013; voir https://www.epa.gov/land-research/proucl-software/), peut être utilisé pour effectuer les différents tests statistiques requis lors de l'analyse des tendances pour déterminer la stabilité. La plupart des documents d'orientation sur l'ANS comprennent une discussion détaillée des techniques statistiques. Quelques exemples sont fournis ci-dessous :

- *Monitored Natural Attenuation Technical Guidance, Site Remediation Program* (New Jersey Department of Environmental Protection, 2012);
- *Contaminated Sites Statistical Applications Guidance Document No. 12-4 – Distribution Models* (British Columbia Ministry of Environment, 2001); et
- *Statistical Analysis of Groundwater Monitoring Data at RCRA Facilities, Unified Guidance*. EPA 530-R-09-007. (US EPA, 2009).

L'approche historique consistant à analyser les tendances des données sur les eaux souterraines puits par puits peut produire des résultats confondants à de nombreux sites, qui ne reflètent pas de manière adéquate les changements temporels à l'échelle du panache sur le lieu/l'étendue de la masse de produits pétroliers en phase dissoute ou gazeuse. Des approches alternatives basées sur l'évaluation de la modification de la taille ou de l'emplacement des centres de masse des composants en phase dissoute dans le temps, telles que la méthode proposée par Ricker (2008), peuvent s'avérer utiles sur de nombreux sites, en particulier ceux présentant des impacts ou des configurations de LLPNA plus complexes.

3.4 Comprendre le potentiel d'appauvrissement naturel de la zone source et d'atténuation naturelle du LLPNA

Les hydrocarbures pétroliers sont facilement biodégradables et un certain niveau de biodégradation naturelle se produit sur la plupart des sites contenant des LLPNA. L'élaboration du MCSL peut donc impliquer l'évaluation des mécanismes d'ANZS/d'AN qui réduisent la masse de LLPNA dans la subsurface. La dissolution et la volatilisation des contaminants du panache LLPNA sont les principaux mécanismes par lesquels les panaches LLPNA sont naturellement réduits et ils représentent les principales voies qui peuvent conduire à un risque inacceptable d'exposition dans le temps (ITRC, 2009b).

Si l'ANZS/l'AN est une approche d'A/GR potentielle pour la gestion d'un site contenant des LLPNA, le gardien devra alors recueillir des données pertinentes de l'atténuation naturelle dès le début afin de déterminer si cette approche est réalisable. La confirmation de l'activité et/ou de l'efficacité des processus d'ANZS/d'AN est un élément clé d'une gestion du LLPNA basée sur les risques; cela peut fournir des informations précieuses, car les processus d'atténuation naturelle aident à stabiliser et à limiter l'étendue des panaches LLPNA et des panaches de phases dissoute et gazeuse. Consultez le *Document d'orientation sur l'atténuation naturelle surveillée pour l'assainissement des sols et des eaux souterraines, Version 1.0* (PASCF, 2021a) pour obtenir des directives supplémentaires sur l'ANS.

L'élaboration d'estimations de taux d'ANZS/d'AN peut également être utile pour évaluer les options d'A/GR qui permettront de comparer les approches passives telles que l'ANZS/l'ANS aux résultats attendus des solutions d'assainissement actives (c.-à-d. de pondérer de manière réaliste les risques environnementaux, les coûts financiers et les avantages des options envisagées).

L'évaluation des pertes naturelles d'un panache LLPNA est une partie particulièrement importante de l'évaluation globale de l'ANZS/l'AN, car la grande majorité de la biodégradation des LLPNA aura probablement lieu dans la zone non-saturée. La dégradation de la phase dissoute qui peut être quantifiable par la surveillance traditionnelle de l'AN constitue en réalité une infime fraction de l'atténuation naturelle globale (ITRC, 2009b; Molins et al., 2010). L'évaluation de l'ANZS des panaches LLPNA dans la zone vadose basée sur les niveaux de dioxyde de carbone (CO_2) gazeux dans le sol est une technique de plus en plus répandue, permettant une quantification directe de la biodégradation naturelle du LLPNA en termes de volume dégradé par unité de surface. Cela peut être réalisé via un échantillonnage des gaz du sol ou par la quantification des flux/taux de CO_2 proches de la surface à l'aide de pièges passifs ou d'une chambre de flux (le CO_2 étant le sous-produit final de la dégradation des hydrocarbures pétroliers). Les différentes techniques de mesure et d'estimation de l'ANZS/l'AN sont résumées ci-dessous :

- Méthode du gradient : implique l'utilisation de capteurs de gaz installés à différentes profondeurs dans le sol pour mesurer la distribution verticale des concentrations des composants gazeux des hydrocarbures pétroliers, afin d'estimer les taux d'atténuation (ITRC, 2009b).
- Pièges passifs : des pièges remplis d'adsorbant à l'état solide installés près de la surface sont utilisés pour échantillonner passivement le CO_2 sur une période de temps généralement de l'ordre de 2 à 4 semaines. Des analyses en laboratoire ultérieures permettent de quantifier les

taux d'ANZS. La méthode du piège permet de corriger les taux estimés pour le CO_2 ambiant (naturel, non lié au pétrole) via l'analyse des isotopes stables (McCoy et al., 2014).

- Chambre de flux : une chambre de flux (p. ex. LI COR LI 8100) permet une mesure directe rapide des taux de CO_2 avec des corrections de référence effectuées via un échantillonnage à des emplacements de référence/non touchés ou via des pièges (Sihota et Mayer, 2012).

L'AN de la phase dissoute est un concept bien établi et de nombreux documents d'orientation (p. ex. PASCF, 2021a) traitent des différentes facettes de l'évaluation de l'AN (c.-à-d. indicateurs de l'AN, ÉDP, directives d'élaboration du plan de surveillance). L'évaluation de la partie concernant la phase dissoute de l'AN pour le développement du MCSL a lieu au cours de l'Étape 5 et/ou au cours de la gestion adaptative à l'Étape 7. Une approche cohérente en ce qui concerne les ÉDP fondamentaux suivants pour l'AN devrait être envisagée :

- ÉDP primaire (direct) : Diminution de la concentration dans les eaux souterraines dans le temps dans certains puits et diminution des concentrations avec la distance par rapport à la source (reflète la combinaison d'une dispersion, d'une advection, d'une dilution et d'une biodégradation);
- ÉDP secondaire (indirect) : Détection et/ou changements observés dans les accepteurs terminaux d'électrons et les paramètres géochimiques dans la zone touchée (accent mis sur la biodégradation).

4 Élaboration d'une stratégie d'assainissement/de gestion des risques (A/GR) (Étape 7 du CD)

L'élaboration d'une stratégie d'A/GR commence par la sélection des objectifs d'A/GR en utilisant des lignes directrices génériques (standards pancanadiens relatifs aux hydrocarbures pétroliers [SP-HCP] du CCME), désignées Niveau 1, ou en établissant des niveaux cibles propres à un site (NCPS) normalement élaborés par le biais d'un processus d'évaluation des risques (désignés Niveau 3). Les SP-HCP se fondent sur la science de l'évaluation des risques et peuvent être appliqués à n'importe quel des trois « Niveaux » : Niveau 1 – valeurs numériques génériques; Niveau 2 – ajustements aux valeurs du Niveau 1 fondés sur des informations propres au site; Niveau 3 – évaluation des risques propres au site. Le même niveau élevé de protection de l'environnement et de la santé humaine est requis aux trois niveaux (CCME, 2008).

Les objectifs d'A/GR devraient être établis le plus tôt possible afin d'impliquer les parties prenantes et de faciliter l'établissement à la fois de la portée des travaux supplémentaires d'investigation sur le site, et des options potentielles pour l'A/GR – qui s'appuieront fortement sur les résultats de l'évaluation des risques. Les objectifs d'A/GR seront généralement liés à des milieux spécifiques, à l'utilisation des terrains, aux récepteurs, aux considérations des intervenants et aux lignes directrices – génériques ou spécifiques au site – associées. Les objectifs d'A/GR sélectionnés mèneront à leur tour à l'examen de stratégies techniques d'A/GR spécifiques permettant d'atteindre des concentrations spécifiques d'eau souterraine et d'atténuer le potentiel d'exposition par contact direct qui représente le risque le plus

sévère pour les sources de LLPNA. Une fois qu'une stratégie d'A/GR a été sélectionnée dans le cadre de ce processus d'analyse des options en assainissement (AOA) (voir l'annexe B du CD pour des orientations supplémentaires), une stratégie d'A/GR est ensuite élaborée (aussi appelée plan d'action d'assainissement [PAA]).

Les objectifs techniques d'A/GR sont fréquemment répartis en deux catégories générales pour tout site contenant des LLPNA: compositionnel et basé sur la saturation (ITRC, 2018).

Les préoccupations relatives à la composition sont liées au risque « traditionnel » basé sur la concentration et associé aux expositions aux eaux souterraines (phase dissoute), par contact direct (panache du LNAPL) ou aux gaz du sol (phase vapeur). Les préoccupations liées à la composition représentent donc des préoccupations où un changement dans la chimie du LLPNA peut être avantageux pour limiter la dissolution ou la volatilisation des constituants du pétrole, et l'exposition ultérieure. L'évaluation du risque d'exposition dans différents milieux sur un site contenant des LLPNA peut souvent se fonder sur des comparaisons avec des standards génériques sur la qualité environnementale, mais peut également impliquer des NCPS générés par une évaluation quantitative des risques. Le développement de NCPS n'est pas évoqué ici en détail, car il existe un nombre considérable d'orientations concernant l'évaluation des risques pour l'environnement et la santé humaine, y compris les orientations du PASCF (se référer à la section 2). Dans tous les cas cependant, il est important de considérer la composition du panache du LLPNA et son potentiel d'impacts directs ou même indirects sur un plan d'eau de surface conformément à la *Loi sur les pêches* (paragraphe 36(3)).

Le risque basé sur la saturation est principalement lié au potentiel de migration du LLPNA vers des zones auparavant non touchées, et peut être atténué en réduisant les saturations en LLPNA. Les techniques d'A/GR basées sur la saturation sont donc fondées sur la récupération ou le contrôle des masses de LLPNA, et non sur l'assainissement passif. La récupération des masses de LLPNA impliquera le plus souvent une récupération hydraulique (p. ex. pompage, pompage sous vide), tandis que le contrôle des masses emploiera généralement des barrières physiques (p. ex. palplanches, parois moulées) pour empêcher la propagation/migration du LLPNA dans des zones non touchées. La récupération et/ou le contrôle des masses peuvent être appropriés lorsque le LLPNA migre ou pose un risque réaliste de migration. Ces considérations seront donc plus applicables aux rejets récents et beaucoup moins pertinentes pour les panaches de LLPNA plus anciens ou historiques tels que ceux retrouvés normalement sur les sites du PASCF. Les panaches de LLPNA plus anciens seront généralement stables, avec des fractions potentiellement mobiles ou récupérables qui sont faibles (c.-à-d. que la plupart des LLPNA seront présents sous forme de résidus irrécupérables).

Les objectifs d'A/GR non techniques, tels que démontrer l'effort de récupération du LLPNA pour faciliter la cession des propriétés ou les considérations de durabilité (se référer à la section 4.3), peuvent être plus complexes à résoudre. Ils seront limités par ce qui pourrait être techniquement réalisable sur un site donné contenant des LLPNA. L'engagement précoce et les interactions avec les intervenants afin d'expliquer les complexités (sort, transport, exposition) vis-à-vis la gestion des LLPNA permettront d'obtenir les meilleurs résultats en termes d'objectifs d'A/GR réalisables, et de se conformer aux lois et règlements applicables (comme la *Loi sur les pêches*).

Une version adaptée du processus en 10 étapes (Figure 1) illustre le processus d'établissement d'une stratégie d'A/GR appropriée pour les LLPNA (Étape 7). Cette étape commence par la mise en place d'objectifs d'A/GR et d'un plan d'action basés sur un MCSL bien élaboré. Le Tableau 5 est un exemple de matrice pouvant être utilisée conjointement avec la Figure 1 pour déterminer la stratégie d'A/GR appropriée en fonction des situations qu'il est possible de rencontrer sur les sites contenant des LLPNA.

Avant d'élaborer une stratégie d'A/GR sur de tels sites, l'accent doit être mis sur l'élaboration du MCSL et sur la confirmation de ses déterminations initiales concernant la stabilité des contaminants et les risques potentiels. Il est important de comprendre la distinction entre les LLPNA en migration, les LLPNA mobiles et les LLPNA résiduels (se référer aux définitions à l'Annexe A) afin d'établir des objectifs d'A/GR appropriés. Pour chacune de ces trois conditions, les propriétés physiques du LLPNA, les propriétés de l'aquifère, la saturation du LLPNA (y compris la perméabilité relative du LLPNA), les conditions hydrauliques du LLPNA (p. ex. la pression hydrostatique du LLPNA) et l'ANZS affectent la capacité d'un panache de LLPNA à se disperser ou d'un LLPNA à s'écouler dans un puits (ITRC, 2018).

Tableau 5 Matrice de stratégie de gestion des sites contenant des LLPNA

Scénarios potentiels de comportement du LLPNA				Exigences de gestion de site potentielles	
Scénario	**Risque compositionnel?[1] (risque de la phase dissoute ou de la phase gazeuse)**	**LLPNA instable/migrant? (LLPNA mobile autour de la périphérie du panache LLPNA)**	**LLPNA mobile? (dans le panache LLPNA stable - qui ne migre pas)**	**Changement de composition et/ou contrôle requis?**	**Réduction de la saturation[2] (récupération du LLPNA) et/ou confinement requis?**
1	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
2	Oui	Non	Oui	Oui	Évaluer les avantages environnementaux nets/les facteurs non techniques[3]
3	Oui	Non	Non	Oui	Non
4	Non	Oui	Oui	Non	Oui
5	Non	Non	Oui	Non	Évaluer les avantages environnementaux nets/les facteurs non techniques[3]
6	Non	Non	Non	Non	Non

* Adapté de MDN, 2013.

1. Les risques compositionnels sont les risques liés à la concentration associés aux expositions aux eaux souterraines (phase dissoute), aux contacts directs (corps en LLPNA) ou aux gaz du sol (phase vapeur).
2. Le risque lié à la saturation est principalement lié au potentiel de migration du LLPNA dans des zones précédemment non impactées et peut être atténué en réduisant la saturation des LLPNA.
3. L'avantage net est basé sur des facteurs tels que la capacité à récupérer de manière rentable un LLPNA non migrant (c'est-à-dire qu'un produit est raisonnablement facile à récupérer en termes de volumes vs coûts/efforts). Les facteurs non techniques comprennent des facteurs tels que la tolérance au risque du ministère, la règlementation, les préoccupations des parties prenantes, etc.

4.1 Facteurs d'assainissement et de gestion des risques

Les facteurs d'A/GR sont des facteurs techniques, non techniques et règlementaires ou des conditions spécifiques au site qui jouent un rôle décisif dans la décision de la stratégie d'A/GR et, en outre, des approches qui ne conviennent pas à la stratégie d'A/GR. Le succès de tout processus d'élaboration de la stratégie d'A/GR pour les LLPNA repose sur une détermination fondée sur des preuves des facteurs

techniques, non techniques et règlementaires pouvant exister, et de leur importance relative. Les objectifs d'A/GR doivent être directement liés aux facteurs d'A/GR. Plus d'information sur le choix d'objectifs d'A/GR est présentée à la section 4.4. Comme indiqué précédemment, les objectifs techniques d'A/GR sont répartis en deux catégories générales pour tout site donné contenant des LLPNA, c'est-à-dire basés sur la composition et la saturation (ITRC, 2009b et MDN, 2013).

Au-delà des considérations techniques, des facteurs non techniques, tels que les conditions de transaction immobilière ou les exigences réglementaires, peuvent être les principaux moteurs et nécessiter le développement d'une stratégie d'A/GR qui ne serait pas autrement appropriée d'un point de vue strictement technique (p. ex. l'excavation ou la récupération active du LLPNA alors qu'il est stable/ne migre pas). Dans ces cas, il est conseillé de prendre en compte l'empreinte environnementale potentielle et le risque associé aux activités d'assainissement lors de l'élaboration de la stratégie de d'A/GR afin d'évaluer les impacts potentiels des activités de d'A/GR, lesquelles ne seraient pas autrement nécessaires d'un point de vue technique.

4.2 Analyse et sélection des options d'assainissement et de gestion des risques

Une analyse des options d'A/GR potentielles doit être effectuée en entreprenant une analyse des options en assainissement (AOA), qui peut prendre en compte à la fois des techniques actives et passives. Les options d'A/GR doivent prendre en compte les problèmes de composition et de saturation du LLPNA décrits ci-dessus, et peuvent comprendre un assainissement actif (p. ex. excavation, récupération du LLPNA, oxydation chimique in situ, etc.), passif (p. ex. ANZS, ANS), des contrôles (techniques et/ou institutionnels, tels que des restrictions sur l'utilisation des terrains), ou une combinaison de ces éléments. Généralement, différentes technologies et stratégies pourront être utilisées pour atteindre un objectif d'A/GR donné sur un site contenant des LLPNA.

L'élaboration d'une AOA est décrite dans le document du CD à l'Étape 7 et à l'annexe A (PASCF, 2018). L'applicabilité, les avantages et les inconvénients des options d'assainissement spécifiques aux sites contenant des LLPNA sont évoqués en détail dans les documents suivants :

- ITRC (2009a);
- CRC CARE (2015); et
- PASCF (2013b).

4.3 Considérations relatives à la durabilité

Des critères alternatifs tels que des considérations de durabilité peuvent être utiles dans les scénarios suivants :

- Les coûts et les avantages de deux options d'A/GR tout aussi intéressantes sont à l'étude;

- La stratégie d'A/GR implique à la fois des options passives telles que l'ANZS/l'ANS et des options actives, qui permettent toutes deux d'atteindre les objectifs d'A/GR;
- La réduction de l'empreinte écologique de l'utilisation des techniques d'A/GR actives est également un objectif; et
- La stratégie d'A/GR est dictée par des facteurs non techniques et, par conséquent, des activités à faible empreinte carbone/écologique sont plus souhaitables.

Lors de l'évaluation des options d'A/GR potentielles, privilégiez une approche qui aura des bénéfices environnementaux nets. Pour chaque option, tenez compte des impacts positifs et négatifs associés à une variété de facteurs (p. ex. l'utilisation des ressources, les émissions environnementales et le risque lié à l'assainissement) et documentez ces résultats de manière objective et impartiale. Les activités impliquant une empreinte carbone/écologique importante et/ou un risque d'assainissement significatif pour l'écologie locale, les travailleurs effectuant l'assainissement et/ou les communautés environnantes doivent généralement être considérées comme moins souhaitables, en particulier lorsque la stratégie d'A/GR est dictée par des facteurs non techniques.

Les documents suivants offrent des conseils sur l'incorporation de concepts d'assainissement écologique et durable dans la planification de l'A/GR et l'évaluation de l'empreinte écologique des systèmes d'assainissement :

1) L'annexe A du *Cadre décisionnel du PASCF* (PASCF, 2018)
2) *E2893-13: Standard Guide for Greener Cleanups* (ASTM, 2013a)
3) *E2876-13: Standard Guide for Integrating Sustainable Objectives into Cleanup* (ASTM, 2013b)
4) *Methodology for Understanding and Reducing a Project's Environmental Footprint, EPA 542-R-12-002* (US EPA, 2012)
5) *Green and Sustainable Remediation: A Practical Framework, GSR-2* (ITRC, 2011)
6) *A Framework for Assessing the Sustainability of Soil and Groundwater Remediation* (SuRF-UK, 2010)
7) *Outil d'analyse en développement durable, version 1.2* (SPAC, sans date; https://oadd-uat.tpsgc.gc.ca/index.aspx?lang=fra)
8) *Guide d'orientation pour la sélection de technologies de décontamination [GOST], version 1.1* (SPAC, sans date; https://gost.tpsgc-pwgsc.gc.ca/index.aspx?lang=fra).

4.4 Objectifs de l'assainissement et de la gestion des risques

Les objectifs d'A/GR sont des niveaux mesurables où les risques pour la santé humaine et l'environnement sont jugés acceptables. Ils sont évoqués en détail par ITRC (2009a), US EPA (2005), CRC CARE (2015) et Johnston (2010).

Les objectifs d'A/GR pour les techniques de modification de la composition sont assez simples, en ce sens qu'ils impliquent généralement d'atteindre un ou plusieurs critères de risques spécifiques aux

milieux. En outre, les objectifs basés sur la saturation seront vraisemblablement seulement applicables sur les sites du PASCF où se trouvent d'anciens panaches LLPNA en présence d'un facteur non technique. Dans les cas où les gardiens souhaitent procéder à la récupération du LLPNA pour des raisons non techniques, les gardiens sont encouragés à rechercher des objectifs pratiques basés sur la science, notamment :

- La réduction des saturations de LLPNA à des niveaux résiduels de terrain[4] et
- Les données de performance de récupération de LLPNA présentant une tendance asymptotique et/ou obtention d'un taux de récupération minimal prédéterminé.

Avant de mettre en œuvre la stratégie d'A/GR, un plan de surveillance de l'A/GR doit être élaboré. Le plan de surveillance d'A/GR doit être détaillé pour fournir des objectifs clairs et suivre facilement les progrès du site par rapport au plan, en reconnaissant qu'il peut être nécessaire d'ajuster le plan d'action du MCSL et/ou d'A/GR si des résultats inattendus sont observés durant la mise en œuvre à l' Étape 8. En d'autres termes, il convient de s'appuyer sur une approche de gestion adaptative (AGA).

5 Mise en œuvre de la stratégie d'assainissement/de gestion des risques (A/GR) (Étape 8 du CD)

La mise en œuvre de la stratégie d'A/GR pour les LLPNA élaborée à l' Étape 7, qu'il s'agisse d'approches actives ou passives (ou d'une combinaison des deux), repose sur le MCSL et sur les décisions prises en réponse aux facteurs d'A/GR pour atteindre les objectifs d'A/GR. Cette stratégie prend en compte les contraintes physiques du site (c.-à-d. la proximité des contaminants avec la surface et les récepteurs potentiels) et d'autres facteurs de risque.

Les résultats de la surveillance des eaux souterraines issus de la mise en œuvre du plan de surveillance de l'A/GR doivent être clairement documentés. Un plan de surveillance complet peut être élaboré en s'inspirant du *Document d'orientation sur la planification du suivi à long terme du PASCF* (PASCF, 2013b) qui fournit une approche scientifiquement défendable pour l'élaboration d'un programme de surveillance.

[4] Ceux-ci peuvent être déduits des estimations de transmissivité du LLPNA, de la performance du système d'assainissement et/ou directement mesurés via l'échantillonnage du sol et l'analyse pétrophysique en laboratoire ultérieure des hydrocarbures pétroliers totaux/HPT ou des carottes de sol.

6 Échantillonnage de confirmation (Étape 9 du CD)

L'échantillonnage de confirmation est réalisé à l'étape 9 du DMF et consiste à confirmer l'atteinte des objectifs d'A/GR suite à la mise en œuvre de la stratégie d'A/GR. Le MCSL doit également être examiné à ce stade pour confirmer qu'il est toujours représentatif des conditions du site. La conception du plan d'échantillonnage de confirmation, y compris les paramètres à surveiller, la fréquence d'échantillonnage et la durée de l'échantillonnage, dépendent de la stratégie d'A/GR mise en œuvre et des objectifs de la stratégie d'A/GR. L'échantillonnage de confirmation doit être conçu pour vérifier que les ÉDP indiquent que le panache LLPNA est stable. Comme indiqué précédemment, la pratique courante veut que le programme d'échantillonnage de confirmation comporte une surveillance trimestrielle au minimum, sur une période de deux ans.

L'échantillonnage de confirmation pourrait révéler que les objectifs de la stratégie d'A/GR n'ont pas été atteints. Si tel est le cas, il faudrait retourner à l'Étape 7 du CD pour réviser la stratégie d'A/GR. Si l'échantillonnage de confirmation confirme que les objectifs d'A/GR ont été atteints, il peut être nécessaire d'élaborer un programme de suivi à long terme.

7 Suivi à long terme (Étape 10 du CD)

Une fois que l'échantillonnage de confirmation (Étape 9) a démontré la réalisation des objectifs d'A/GR, un suivi à long terme (SLT; Étape 10) peut être mise en œuvre. Le SLT peut être exigé pour vérifier que les hypothèses entourant les conditions du site et le MCSL global ne changent pas. Un suivi à long terme est généralement requis aux sites où l'A/GR implique des approches – autres que des mesures correctives directes – qui réduisent la probabilité, l'intensité, la fréquence ou la durée de l'exposition à la contamination. Les sites peuvent être fermés lorsque le SLT démontre que les contrôles techniques ont fonctionné correctement, qu'aucune action n'a été déclenchée et qu'il n'est pas prévu que cela change. Des orientations spécifiques sur la nécessité et les composantes potentielles d'un plan de suivi à long terme sont fournies dans le *Document d'orientation sur la planification du suivi à long terme du PASCF* (PASCF, 2013b).

On s'attend à ce que le SLT se produise pendant une durée scientifiquement établie, tel que spécifié dans le plan d'action d'assainissement (PAA) ou le plan de gestion des risques (PGR), sur la base d'un jugement professionnel. Les coûts du SLT doivent être inclus dans le passif d'assainissement pour cette durée scientifiquement établie, mais ne doivent pas être inclus dans le passif à long terme. Toute surveillance supplémentaire, au-delà de la période du SLT scientifiquement établie, ferait généralement partie du programme environnemental régulier du gardien pour la gestion du site et ne serait pas éligible au financement du PASCF (PASCF, 2021c).

8 Fermeture du site

Selon le Conseil du Trésor, la fermeture d'un site peut être envisagée lorsqu'aucune mesure future n'est requise et qu'aucune autre responsabilité n'existe. Elle peut avoir lieu après l'atteinte des objectifs d'A/GR à l'Étape 9, ou éventuellement après l'achèvement d'un plan de SLT (Étape 10), le cas échéant. Le gardien est donc chargé de déterminer que la contamination du site ne présente pas de risque inacceptable pour la santé humaine et l'environnement. Des recommandations spécifiques sur l'exécution de la fermeture du site sont fournies dans le modèle et le guide d'orientation pour le rapport de fermeture de site du PASCF, version 2.0 (PASCF, 2022a, b) et dans le *Document d'orientation sur la planification du suivi à long terme du PASCF* (PASCF, 2013b).

Voici quelques considérations liées à la fermeture d'un site contenant des LLPNA :

- Les objectifs d'A/GR impliquant la mise en œuvre de techniques d'A/GR actives ont été atteints;
- Plusieurs ÉDP indiquent que le panache du LLPNA est stable et/ou qu'un A/GR passif approprié (contrôles techniques) sont en place pour empêcher une migration et/ou une exposition supplémentaires;
- Au moins deux années de données trimestrielles indiquent que les panaches de la phase dissoute et/ou de la phase gazeuse sont stables ou diminuent (après l'assainissement, si des méthodes d'assainissement actif sont utilisées); et
- Le cas échéant, ajouter une clause restrictive ou autres instruments juridiques pour signaler la contamination résiduelle et toute restriction à l'utilisation future du bien dans le cadre de la gestion des biens immobiliers du ministère responsable pour le site.

La satisfaction des trois premiers points ci-dessus peut constituer une preuve suffisante de la décision de gestion du risque à long terme sur le site. La présence continue du LLPNA restera malgré tout une préoccupation opérationnelle pour le ministère dans sa gestion du bien immobilier. Bien que le SLT puisse ne pas être requis, une certaine forme de contrôle de la diligence raisonnable et/ou de supervision de la gestion restera probablement une exigence pendant la durée de vie du bien. Un changement connu des conditions nécessiterait de réévaluer les stratégies d'A/GR actives et/ou passives conformément à la Figure 1.

9 Références

ASTM International [ASTM]. (2006). *ASTM E2531-06, Standard Guide for Development of Conceptual Site Models and Remediation Strategies for Light Nonaqueous-Phase Liquids Released to the Subsurface*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, www.astm.org.

ASTM International [ASTM]. (2013a). *E2893-13: Standard Guide for Greener Cleanups*. West Conshohocken, s.n., 2013.

ASTM International [ASTM]. (2013b). *E2876-13: Standard Guide for Integrating Sustainable Objectives into Cleanup*. West Conshohocken, s.n., 2013.

ASTM International [ASTM]. (2013c). *E2856-13: Standard Guide for Estimation of LNAPL Transmissivity*. West Conshohocken, Committee ASTM E50 on Environmental Assessment, Risk Management and Corrective Action, 2013.

British Columbia Ministry of Environment. (2001). *Contaminated Sites Statistical Applications Guidance Document No. 12-4 – Distribution Models*.

Conseil canadien des ministres de l'environnement [CCME]. (2008). *Standard pancanadien relatif aux hydrocarbures pétroliers dans le sol : guide d'utilisation*.

Conseil canadien des ministres de l'environnement [CCME]. (2014). *Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des vapeurs des sols en vue de prévenir leur inhalation par l'humain*. PN 1532, ISBN 978-1-77202-014-4 PDF.

Conseil canadien des ministres de l'environnement [CCME]. (2016). *Guide sur la caractérisation environnementale des sites dans le cadre de l'évaluation des risques pour l'environnement et la santé humaine, Volume 1, Orientations*. PN 1552, ISBN 978-1-77202-027-4 PDF.

Conseil canadien des ministres de l'environnement [CCME]. (2020). *Document d'orientation sur l'évaluation du risque écotoxicologique*. CCME, Winnipeg.

CRC for Contamination Assessment and Remediation of the Environment [CRC CARE]. (2015). *A practitioner's guide for the analysis, management and remediation of LNAPL*. CRC CARE Technical Report no. 34, CRC (Cooperative Research Centre) for Contamination Assessment and Remediation of the Environment, Adelaide, Australia.

Groupe de travail sur la gestion des lieux contaminés [GTGLC]. (1999). *Approche fédérale en matière de lieux contaminés*. Préparé par Dillon Consulting Limited, Ottawa (Ontario), Novembre 1999.

Interstate Technology & Regulatory Council [ITRC]. (2009a). *Evaluating LNAPL Remedial Technologies for Achieving Project Goals*. LNAPL-2, Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, LNAPLs Team. www.itrcweb.org.

Interstate Technology & Regulatory Council [ITRC]. (2009b). *Evaluating Natural Source Zone Depletion at Sites with LNAPL*. LNAPL-1, Washington, Équipe LLPNA.

Interstate Technology & Regulatory Council [ITRC]. (2011). *Green and Sustainable Remediation: A Practical Framework*. GSR-2.

Interstate Technology & Regulatory Council [ITRC]. (2014). *Petroleum Vapor Intrusion: Fundamentals of Screening, Investigation, and Management*. PVI-1.

Interstate Technology & Regulatory Council [ITRC]. (2018). *LNAPL Site Management: LCSM Evolution, Decision Process, and Remedial Technologies* (LNAPL-3).

Johnston, C. D. (2010). *Selecting and Assessing Strategies for Remediating LNAPL in Soil and Aquifers*. Adelaide, rapport technique du CRC CARE, no 18.

Lahvis, M.A., Hers, I. Davis, R.V., Wright, J., & DeVaull, G.E. (2013). *Vapor Intrusion Screening at Petroleum UST Sites*. Groundwater Monitoring & Remediation, 33(2), 53-67.

McCoy, K., Zimbron, J., Sale, T., & Lyverse, M. (2014). *Measurement of Natural Losses of LNAPL Using CO_2 Traps*. Ground Water, 53(4), 658-67.

Ministère de la Défense nationale [MDN]. (2013). *A Management Framework for LNAPL Sites at 5 Wing Goose Bay*.

Molins, S., Mayer, K.U., Amos, R.T., & Bekins, B.A. (2010). *Vadose zone attenuation of organic compounds at a crude oil spill site — Interactions between biogeochemical reactions and multicomponent gas transport*. Journal of Contaminant Hydrology, volume 112, issues 1–4, pages 15-29.

New Jersey Department of Environmental Protection. (2012). *Monitored Natural Attenuation Technical Guidance*. Site Remediation Program.

Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux [PASCF]. (2012). *Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux (PASCF) : Document d'orientation sur l'évaluation du risque écotoxicologique*. Ottawa, Sa Majesté la Reine du Chef du Canada.

Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux [PASCF]. (2013a). *Sommaire du document d'orientation sur la planification du suivi à long terme du PASCF*. Ottawa, Sa Majesté la Reine du Chef du Canada.

Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux [PASCF]. (2013b). *Document d'orientation sur la planification du suivi à long terme du PASCF*. Ottawa, Sa Majesté la Reine du Chef du Canada.

Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux [PASCF]. (2018). *Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux (PASCF) – Cadre décisionnel, Version 3.1*. Ottawa, Sa Majesté la Reine du Chef du Canada.

Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux [PASCF]. (2021a). *Document d'orientation sur l'atténuation naturelle surveillée pour l'assainissement des sols et des eaux souterraines, Version 1.0*. Ottawa, Sa Majesté la Reine du chef du Canada.

Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux [PASCF]. (2021b). *Cadre d'évaluation et de gestion des sites aquatiques contaminés, conformément au Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux (PASCF), version 2.1, 2021*. Ottawa, Sa Majesté la Reine du chef du Canada.

Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux [PASCF]. (2021c). *Directive du PASCF sur l'admissibilité des sites et des coûts de la phase IV, Version 1.0*.

Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux [PASCF]. (2022a). Guide d'orientation pour le rapport de fermeture de site, Version 2.0.

Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux [PASCF]. (2022b). Modèle de rapport de fermeture de site, Version 2.0.

Plan d'action pour les sites contaminés fédéraux [PASCF]. (2022c). *Directives supplémentaires sur la mise en œuvre du standard pancanadien relatif aux hydrocarbures pétroliers dans le sol des sites contaminés fédéraux*.

Potter, T.L., & Simmons, K.E. (1998). *Volume 2: Composition of petroleum mixtures*. Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series, Amherst Scientific Publishers, Amherst, MA.

Ricker, J.A. (2008). *A Practical Method to Evaluate Ground Water Contaminant Plume Stability*. Groundwater Monitoring & Remediation, 28(4), 85-94.

Santé Canada. (2010a). *L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie III : Le guide sur l'examen par les pairs des évaluations des risques pour la santé humaine des sites contaminés fédéraux au Canada, version 2.0*. Ottawa, Sa Majesté la Reine du chef du Canada.

Santé Canada. (2010b). *L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie V : L'évaluation quantitative détaillée des risques pour la santé humaine associés aux substances chimiques ($ÉQDR_{Chim}$)*. Ottawa, Sa Majesté la Reine du chef du Canada.

Santé Canada. (2010c). *L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie VI : L'évaluation quantitative détaillée des risques radiologiques pour la santé humaine ($ÉQDR_{RAD}$)*. Ottawa, Sa Majesté la Reine du chef du Canada.

Santé Canada. (2010d). *L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie VII : Guide d'orientation pour l'évaluation de l'intrusion de vapeurs du sol sur les sites contaminés*. Ottawa, Sa Majesté la Reine du chef du Canada.

Santé Canada. (2021a). *L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada : l'évaluation quantitative préliminaire des risques (ÉQPR) pour la santé humaine, Version 3.0*. Ottawa, Sa Majesté la Reine du chef du Canada.

Santé Canada. (2021b). *L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada : Valeurs toxicologiques de référence (VTR), Version 3.0*. Ottawa, Sa Majesté la Reine du chef du Canada.

Services publics et Approvisionnement Canada [SPAC]. (Sans date). *Guide d'orientation pour la sélection de technologies de décontamination [GOST], version 1.1*. https://gost.tpsgc-pwgsc.gc.ca/index.aspx?lang=fra.

Services publics et Approvisionnement Canada [SPAC]. (Sans date). *Outil d'analyse en développement durable, version 1.2*. https://oadd-uat.tpsgc.gc.ca/index.aspx?lang=fra.

Sihota, N.J. & Mayer, K.U. (2012). *Characterizing Vadose Zone Hydrocarbon Biodegradation Using Carbon Dioxide Effluxes, Isotopes, and Reactive Transport Modeling*. Vadose Zone Journal 11(4).

United Kingdom's Sustainable Remediation Forum [SuRF-UK]. (2010). *A Framework for Assessing the Sustainability of Soil and Groundwater Remediation*.

United States Environmental Protection Agency [US EPA]. (2005). *A Decision-Making Framework for Cleanup of Sites Impacted with Light Non-Aqueous Phase Liquids (LNAPL)*. Remediation Technologies Development Forum, NAPL Cleanup Alliance, Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA 542-R-04-011.

United States Environmental Protection Agency [US EPA]. (2009). *Statistical Analysis of Groundwater Monitoring Data at RCRA Facilities, Unified Guidance*. Office of Resource Conservation and Recovery, EPA 530-R-09-007.

United States Environmental Protection Agency [US EPA]. (2012). *Methodology for Understanding and Reducing a Project's Environmental Footprint*. Office of Solid Waste and Emergency Response, Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, EPA 542-R-12-002.

United States Environmental Protection Agency [US EPA]. (2013). *Statistical Software ProUCL 5.0.00 for Environmental Applications for Data Sets with and without Nondetect Observations*.

United States Environmental Protection Agency [US EPA]. (2015). *Technical Guide for Addressing Petroleum Vapor Intrusion At Leaking Underground Storage Tank Sites*. EPA 510-R-15-001.

10 Annexes

Annexe A Principes de base des LLPNA

GLOSSAIRE

C_{sat} : la limite théorique de la capacité d'un sol à retenir ou à contenir efficacement un composant (ou un mélange) chimique dans les phases adsorbée, dissoute et gazeuse. Il est supposé que les concentrations totales du sol dépassant la valeur C_{sat} correspondante d'un composant (ou d'un mélange) chimique indiquent généralement la présence de LLPNA. Les valeurs C_{sat} publiées auront une utilisation limitée sur les sites contenant des LLPNA en raison de la nature spécifique au site de la composition de LLPNA et de la difficulté à déterminer des valeurs C_{sat} appropriées pour des mélanges pétroliers complexes composés de centaines de constituants chimiques individuels.

Condition confinée : un état de la subsurface où les fluides interstitiels sont sous pression à tous les points de référence ou à tous les niveaux altimétriques. Lors d'une condition confinée, l'épaisseur du LLPNA dans le puits varie directement avec le niveau de la surface piézométrique. Par conséquent, une augmentation du niveau de la surface piézométrique entraîne une augmentation de l'épaisseur du LLPNA dans le puits et inversement. Le LLPNA dans la porosité secondaire (fractures, fissures, couches) des sols à texture fine (limons et argiles) et dans les milieux de roches fracturées est souvent présent dans des conditions confinées. Les conditions confinées peuvent produire des épaisseurs de LLPNA dans le puits qui surreprésentent la quantité de LLPNA dans la formation.

Condition non confinée : une condition de subsurface ayant des caractéristiques de fluide liées à la pression identiques ou similaires à un aquifère non confiné ou à une nappe phréatique. Le LLPNA dans la porosité primaire des sols granulaires (sables et graviers) dans une nappe phréatique/surface phréatique est considéré comme étant dans une condition non confinée. Dans des conditions non confinées, l'épaisseur du LLPNA dans le puits varie de façon inverse avec le niveau de la nappe phréatique. Par conséquent, une augmentation du niveau de la nappe phréatique peut souvent conduire à une diminution de l'épaisseur du LLPNA dans le puits, et inversement.

Conductivité du LLPNA : terme hydrogéologique permettant de décrire la capacité d'un LLPNA à se déplacer dans la subsurface. La conductivité du LLPNA tient compte de la perméabilité relative du LLPNA, de la conductivité hydraulique et des densités et des viscosités des fluides (eau et LLPNA). La conductivité du LLPNA est fonction de, et varie directement avec, sa perméabilité relative. Par conséquent, une augmentation de la perméabilité relative du LLPNA entraîne une augmentation de la conductivité du LLPNA et vice versa.

Fluide mouillant : le fluide qui recouvre de manière préférentielle les grains ou les particules du sol dans un système de fluide multi-phase. Dans un système air-eau-LLPNA (c.-à-d. un panache LLPNA), l'eau agit typiquement comme fluide mouillant tandis que l'air et le LLPNA agissent comme des fluides non

mouillants. Le fluide mouillant est typiquement le fluide prédominant présent dans un système de fluide multi-phase.

Fluide non mouillant : fluide qui ne recouvre pas de manière préférentielle les grains ou les particules du sol dans un système de fluide multi-phase, mais occupe plutôt le centre des plus grands pores du sol. Dans un système air-eau-LLPNA (c.-à-d. un panache LLPNA), l'air (principalement dans la partie insaturée de la zone contaminée) et le LLPNA (principalement dans la partie saturée de la zone contaminée) sont généralement des fluides non mouillants.

Fluorescence induite par laser (FIL) : une technologie de délimitation des LLPNA en temps réel, qui utilise les longueurs d'onde ultraviolettes pour provoquer la fluorescence des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) présents dans les LLPNA. La FIL est utilisée sur le terrain grâce à des techniques de poussée directe pour délimiter les impacts des LLPNA dans la subsurface, latéralement et verticalement (au-dessus et au-dessous de la nappe phréatique). La FIL indique aussi l'intensité des impacts sur un panache LLPNA et les types de LLPNA rencontrés.

Forces résistives du sol : forces qui empêchent le mouvement du LLPNA dans un milieu poreux saturé d'eau. Ces forces, basées sur les principes de pression de déplacement à l'entrée des pores, tiennent compte de l'angle de contact ou de la mouillabilité des fluides (LLPNA et eau), de la tension interfaciale entre les fluides et de la taille des pores dans le sol. Le mouvement du LLPNA ne se produit que si la pression de déplacement est suffisante pour surmonter les forces résistives du sol.

LLPNA : liquide léger en phase non aqueuse. Les LLPNA sont des fluides immiscibles moins denses que l'eau qui peuvent être composés d'un produit chimique ou d'un solvant pur ou d'un mélange complexe de produits chimiques, tels que des carburants à base de pétrole. Le terme « LLPNA » désigne le plus souvent des mélanges à base de pétrole/des carburants immiscibles (c.-à-d. essence, kérosène, diesel, pétrole brut, etc.).

Migration du LLPNA : une description de la propagation du <u>périmètre</u> d'un panache LLPNA instable dans certaines ou dans toutes les directions (c.-à-d. l'empreinte globale du panache ou de la périphérie qui continue de s'étendre). Tout LLPNA migrant est mobile, mais pas tous les LLPNA mobiles ne migrent. Un LLPNA mobile peut être présent à l'intérieur d'un panache LLPNA qui ne migre pas. Un panache LLPNA qui ne migre pas est également appelé « stable »; à l'inverse, un panache LLPNA migrant est « instable ».

Mobilité du LLPNA : description de la possibilité qu'a le LLPNA de se déplacer en tout point d'un panache LLPNA. Le LLPNA peut être mobile lorsque le LLPNA est continu à une saturation supérieure à la saturation résiduelle. Étant donné que la saturation résiduelle du LLPNA dans un panache LLPNA varie de la zone vadose à la zone saturée, la mobilité du LLPNA variera également dans le temps en raison des fluctuations naturelles du niveau de la nappe phréatique. La présence de LLPNA mobile dans un panache LLPNA ne signifie pas nécessairement que le panache LLPNA dans son ensemble est instable ou migrant.

Panache LLPNA : la zone de fluide multi-phase contenant des LLPNA affectant la subsurface. Un panache LLPNA est composé de trois fluides : air, LLPNA et eau. En règle générale, un panache LLPNA est principalement composé d'eau, avec une quantité moindre de LLPNA et une plus faible quantité d'air.

Paramètres de van Genuchten : paramètres d'ajustement des courbes qui décrivent la façon dont l'eau s'écoule d'un sol donné en réaction à des conditions de pression croissantes. Ces paramètres servent d'intrants critiques pour les simulations de modélisation des LLPNA.

Perméabilité relative du LLPNA : mesure de la capacité du milieu poreux (sol) à permettre le mouvement du LLPNA dans la subsurface en présence d'eau. La perméabilité relative du LLPNA est fonction de, et varie directement avec, la saturation du LLPNA. Par conséquent, une augmentation de la saturation du LLPNA entraîne une augmentation de la perméabilité relative du LLPNA et vice versa. Par exemple, la concentration résiduelle de LLPNA dans la zone vadose est plus élevée dans les sols à grains fins que dans les sols à gros grains.

Pression capillaire : Différence de pression entre la phase non mouillante (à savoir le LLPNA) et la phase mouillante (à savoir les eaux souterraines) dans un système à plusieurs phases tel qu'un système LLPNA-eau souterraine. En règle générale, l'eau est le fluide de mouillage dans la zone saturée, en contact direct avec le sol, et occupe les pores les plus petits. Le LLPNA doit déplacer l'eau (et les gaz) dans un espace poreux avant de pouvoir migrer. Pour que cela se produise, il doit avoir une pression hydrostatique et vaincre la pression capillaire exercée par l'eau dans l'espace interstitiel. La migration du LLPNA ne peut se produire qu'en présence pression hydrostatique suffisante (et de pression capillaire) pour permettre la migration.

Pression de déplacement à l'entrée des pores : pression de seuil nécessaire pour qu'un fluide pénètre dans un milieu poreux occupé par un autre fluide, déplaçant ainsi le fluide initialement présent. Les pressions de déplacement à l'entrée des pores peuvent expliquer que l'air déplace les eaux souterraines, que le LLPNA déplace les eaux souterraines, que l'air déplace le LLPNA, etc. Dans un sol saturé en eau, la pression capillaire doit être égale à ou dépasser la pression de déplacement à l'entrée des pores pour que le LLPNA se meuve et déplace l'eau.

Pression hydrostatique du LLPNA : les conditions de pression du LLPNA en tout point d'un panache LLPNA créées par les conditions de rejet. La pression hydrostatique peut provenir de la colonne verticale du LLPNA en raison de l'accumulation dans la nappe phréatique ou à proximité de celle-ci à partir d'une source de surface ou proche de la surface (p. ex. un réservoir) ou d'autres conditions de pression au moment du rejet (p. ex. les conditions de pression d'un rejet de pipeline souterrain). Plus la pression hydrostatique est élevée, plus le LLPNA pénètre dans la nappe phréatique (verticalement et latéralement) et se propage. Une fois la pression hydrostatique dissipée (c.-à-d. que la source du rejet a pris fin), le LLPNA cesse de migrer peu après et se stabilise.

Saturation du LLPNA : pourcentage de l'espace interstitiel du sol occupé par le LLPNA. La saturation du LLPNA à un point donné dans la subsurface sera proportionnelle à la pression capillaire à ce point (c.-à-d. que plus la pression capillaire est élevée, plus la saturation du LLPNA résultante est élevée). La pression capillaire varie dans la zone touchée, donc la saturation du LLPNA varie en conséquence. Plus le volume des pores du sol est important, plus le sol est capable de contenir des LLPNA et plus la saturation du LLPNA est élevée – et inversement.

Saturation résiduelle du LLPNA : niveau ou seuil de saturation en dessous duquel le LLPNA ne s'écoule pas dans des conditions hydrauliques normales. Le LLPNA présent à des saturations inférieures ou égales

aux niveaux de saturation résiduelle (c.-à-d. dans la plage résiduelle) sera généralement considéré comme immobile. D'un point de vue conceptuel, la saturation résiduelle du LLPNA représente le seuil de saturation où le LLPNA, en raison de sa saturation relativement faible, commence à se morceler ou à devenir discontinu sous forme de gouttelettes, de trainées, de ganglions, etc. À mesure que le LLPNA approche son point de saturation ou qu'il est réduit au niveau de saturation résiduelle, autant la perméabilité relative que la conductivité du LLPNA approchent de zéro. Plus le LLPNA sature initialement l'espace interstitiel du sol lors d'un rejet, plus la saturation résiduelle est élevée (jusqu'à un maximum théorique). Par conséquent, la saturation résiduelle du LLPNA varie également de manière continue dans un panache LLPNA.

Solubilité réelle : différente de la solubilité en phase pure, la solubilité réelle décrit la capacité d'un composant chimique à se dissoudre dans l'eau en présence d'autres composants dans le mélange. Il s'agit d'une considération particulièrement importante pour les LLPNA, qui sont des mélanges de pétrole complexes. La solubilité réelle est fonction de la fraction molaire du composant dans le mélange et est généralement inférieure de plusieurs ordres de grandeur à la solubilité en phase pure correspondante du composant. Des concentrations d'eau souterraine supérieures à la solubilité réelle d'un composant pétrolier peuvent indiquer la présence de LLPNA à proximité d'un puits de surveillance.

Stabilité du LLPNA : description du potentiel de mouvement ou de propagation du périmètre ou de l'empreinte d'un panache LLPNA dans le temps. Un panache LLPNA en mouvement ou en propagation (c.-à-d. l'empreinte du panache LLPNA s'accroît) est considéré comme instable ou migrant. À l'inverse, un panache LLPNA qui ne se déplace pas ou ne s'étend pas dans le temps est considéré comme stable et non migrant. Les panaches LLPNA stables contiennent souvent des zones localisées de LLPNA mobile, l'empreinte globale restant inchangée dans le temps.

Tensions interfaciales : les tensions ou les forces d'attraction entre deux fluides le long de leur interface de contact. La tension interfaciale entre le LLPNA et l'eau dans la subsurface tend à limiter la capacité du LLPNA à se déplacer.

Vitesse du LLPNA : la vitesse et la direction à laquelle le LLPNA peut se déplacer, selon les principes de débit de la loi de Darcy. La vitesse du LLPNA est basée sur les propriétés du milieu poreux et des fluides (eau et LLPNA), les saturations des fluides interstitiels et le gradient du LLPNA. La vitesse du LLPNA ne s'applique que dans un panache LLPNA continu dont la saturation est supérieure au niveau résiduel. Il n'existe pas de vitesse ou de mouvement du LLPNA dans un panache LLPNA non-continu où sa saturation est inférieure aux niveaux résiduels. En outre, il n'y a aucune vitesse ni aucun mouvement de LLPNA à l'extérieur d'un panache LLPNA stable.

PRINCIPES FONDAMENTAUX DU COMPORTEMENT DU LLPNA

Cette section traite du comportement du LLPNA au niveau de la nappe phréatique (c.-à-d. une condition non confinée) et inclut la zone de sol touchée à la verticale, appelée typiquement la zone contaminée. La zone contaminée est l'endroit où du LLPNA potentiellement mobile peut résider sur un site où la source de contamination a cessé depuis un certain temps (c.-à-d. aucune source actuelle). Le comportement du LLPNA dans la zone vadose ou non saturée (au-dessus de la zone contaminée) n'est

pas abordé ici car le LLPNA dans ces zones (en particulier des sites de rejets anciens) est souvent présent à de faibles saturations, et ne pose généralement pas de problème de migration supplémentaire potentielle de LLPNA dans la nappe phréatique.

Dynamique de rejet du LLPNA et création d'un système de fluide multi-phase

Lors d'un rejet, le LLPNA s'enfonce verticalement dans le sol sous l'influence de la gravité et, si une pression hydrostatique de LLPNA suffisante est ainsi créée, il rencontre la nappe phréatique. Pendant le mouvement descendant du LLPNA vers la nappe phréatique, la présence de couches confinantes et/ou d'autres hétérogénéités en subsurface peuvent entraîner une propagation latérale exagérée et irrégulière et/ou le perchage du LLPNA avant de rencontrer la nappe phréatique. Une fois la nappe phréatique atteinte, le LLPNA s'enfonce verticalement et latéralement (y compris dans le sens du gradient ascendant) dans la nappe phréatique, déplaçant une quantité d'eau proportionnelle à la force motrice de la colonne verticale de LLPNA (ou la pression hydrostatique du LLPNA) créée par le rejet. Le déplacement des eaux souterraines continuera à se produire tant que la force descendante produite par la pression hydrostatique du LLPNA ou la pression du rejet du LLPNA dépassera la force ascendante produite par la résistance de la matrice du sol et la force de flottabilité résultant de la différence de densité entre le LLPNA et l'eau souterraine. Une fois le rejet terminé, l'empreinte du LLPNA au niveau de la nappe phréatique continuera de s'étendre pendant une période relativement courte et finira par s'arrêter une fois que la pression hydrostatique du LLPNA se sera dissipée. Le LLPNA cesse finalement de s'étendre car la force motrice (pression hydrostatique) responsable de la migration du LLPNA ne suffit plus à vaincre les forces de résistance nécessaires pour déplacer les eaux souterraines des pores du sol non touché. Lorsque le panache LLPNA atteint cet état, il est alors dit stable ou non migrant. Un schéma conceptuel d'un panache LLPNA stable est fourni à la Figure A.1.

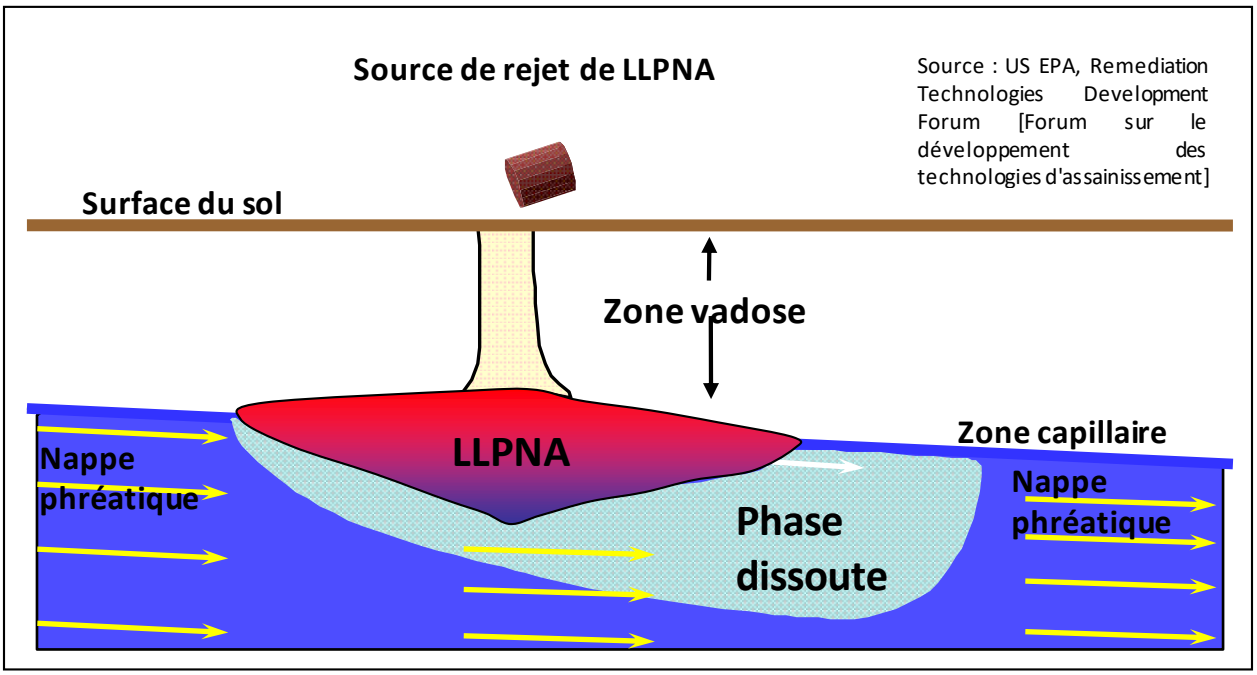
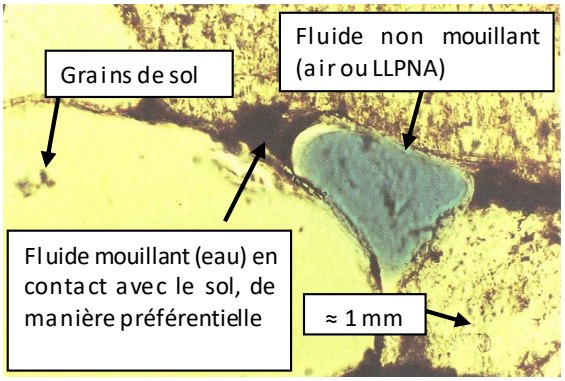


Figure A.1 Scénario typique de rejet de LLPNA avec un panache LLPNA dans la nappe phréatique

Le concept de LLPNA pénétrant verticalement dans la zone saturée (c.-à-d. sous la nappe phréatique) contredit les croyances antérieures selon lesquelles le LLPNA « flotte » comme une crêpe (remplissant 100 % de l'espace interstitiel dans la zone touchée par le LLPNA au-dessus de la nappe phréatique) en raison de sa moindre densité que l'eau, sans qu'aucune partie du LLPNA ne pénètre dans la zone saturée. Les études récentes sur les LLPNA et des preuves empiriques significatives ont uniformément démontré que certains LLPNA (et souvent la majorité des LLPNA sur un site donné) sont généralement submergés sous la surface théorique de la nappe phréatique. De plus, le LLPNA ne déplace pas toutes les eaux souterraines de l'espace interstitiel du sol, mais plutôt une partie de l'eau souterraine qui occupe l'espace des plus grands pores du sol seulement. Par conséquent, un panache LLPNA typique est constitué de LLPNA remplissant beaucoup moins d'espace dans les pores du sol, dans une distribution plus variable et discontinue, que l'hypothèse historique basée sur la conceptualisation des « crêpes ». Le panache LLPNA au niveau de la nappe phréatique ne comprend pas une seule phase fluide (LLPNA) mais plutôt plusieurs fluides, avec à la fois du LLPNA et de l'eau. La partie supérieure du panache LLPNA comprend souvent une troisième phase fluide : l'air. Par conséquent, le terme « panache LLPNA » représente les limites spatiales des impacts du LLPNA, au sein desquelles existe un système de fluide multi-phase constitué de LLPNA, d'eau et/ou d'air en proportions variées. En outre, en raison de la nature multi-phase de l'occurrence de LLPNA dans la subsurface, il est généralement incorrect de dire que le LLPNA flotte dans la nappe phréatique. Il est plus juste de voir le panache LLPNA comme une zone contaminée où l'espace interstitiel contient des quantités variables de LLPNA, d'eau souterraine et/ou d'air au-dessus et au-dessous du niveau statique de la nappe phréatique. D'une manière générale, l'étendue spatiale occupée par un panache LLPNA est principalement composée d'eau, suivie par une quantité moindre de LLPNA, la plus petite fraction de l'espace interstitiel étant occupée par de l'air. La Figure A.2 est une représentation, à l'échelle des pores, du LLPNA et de l'eau coexistant dans l'espace interstitiel du sol.

- Le LLPNA coexiste avec l'eau dans le réseau interstitiel
- Le degré de saturation dépend de la lithologie et des propriétés du fluide
- Le LLPNA remplit partiellement l'espace interstitiel de l'aquifère



Source : US EPA, Remediation Technologies Development Forum [Forum sur le développement des technologies d'assainissement]

Figure A.2 Photomicrographie de distribution de LLPNA et d'eau dans l'espace interstitiel du sol

Le LLPNA dans la nappe phréatique nécessite une pression pour se déplacer. Contrairement aux eaux souterraines (y compris les composants en phase dissoute), qui forment un système continu avec une vitesse d'écoulement basée sur des gradients hydrauliques, le LLPNA, étant un fluide non mouillant, requiert une pression pour passer à travers les pores du sol et déplacer l'eau interstitielle existante. Plus précisément, le LLPNA requiert une pression de déplacement suffisante pour surmonter les forces résistives du sol et permettre le déplacement continu des eaux souterraines. Dans un système de fluide multi-phase (LLPNA/eau), la pression capillaire (également appelée surpression) est la différence entre la pression dans la phase non mouillante (LLPNA) et la pression dans la phase mouillante (eau souterraine). La pression nécessaire pour vaincre les forces résistives lorsqu'un LLPNA non mouillant pénètre dans un milieu saturé d'eau est appelée pression de déplacement à l'entrée des pores (Mercer et Cohen, 1990). Autrement dit, si une pression de déplacement suffisante agit sur le LLPNA, ce dernier pourra pénétrer dans un espace interstitiel donné en expulsant une partie de l'eau souterraine. Une fois que la pression de déplacement à l'entrée des pores est atteinte ou dépassée, le LLPNA continuera à s'étendre dans le sens vertical et radial jusqu'à ce que la pression hydrostatique du LLPNA soit insuffisante pour continuer à déplacer l'eau. La pression hydrostatique du LLPNA deviendra généralement insuffisante pour déplacer l'eau et pénétrer dans l'espace interstitiel non touché peu après la fin du rejet du LLPNA. Par conséquent, peu après la fin du rejet du LLPNA, le panache LLPNA se stabilise finalement (c.-à-d. l'étendue spatiale n'est plus en mouvement ou en propagation).

Étant donné que le principal mécanisme de propagation du LLPNA est la pression hydrostatique du rejet (pendant le rejet et jusqu'à la stabilisation du panache LLPNA), le gradient de l'eau souterraine n'influencera que la direction de propagation du LLPNA, n'entraînant généralement pas de propagation ni de migration supplémentaire du LLPNA une fois la stabilisation réalisée.

En bref, le mouvement du LLPNA n'est généralement pas causé par des gradients hydrauliques horizontaux (ASTM, 2006). Il est également important de noter que la composante radiale typique de la propagation du LLPNA peut entraîner une propagation significative vers l'amont et transversale.

Les concepts d'écoulement des milieux poreux qui s'appliquent aux systèmes d'eau souterraine (équations des débits de la loi de Darcy, etc.) s'appliquent également aux panaches LLPNA, avec deux différences distinctes. Premièrement, la conductivité du LLPNA (par opposition à la conductivité de l'eau ou hydraulique) comprend un aspect de perméabilité relative qui tient compte de l'influence négative des eaux souterraines sur la capacité du LLPNA à s'écouler, et des différences de densité et de viscosité entre le LLPNA et les eaux souterraines. Deuxièmement, le débit de Darcy dans un panache LLPNA ne s'applique que dans les cas où celui-ci est continu. Par conséquent, dans toutes les zones de LLPNA discontinues à l'intérieur d'un panache LLPNA ou à l'extérieur d'un panache LLPNA stable, il n'y a pas d'écoulement ou de mouvement du LLPNA.

Saturation du LLPNA

La saturation du LLPNA est définie comme le pourcentage de l'espace interstitiel occupé par le LLPNA. Comme évoqué précédemment, le LLPNA ne flotte pas sur la nappe phréatique comme une crêpe, mais coexiste plutôt avec l'air et les eaux souterraines à différents niveaux de saturation dans la zone de sol touchée, à la fois au-dessus et au-dessous de la nappe phréatique. Cela est dû au fait que le niveau de

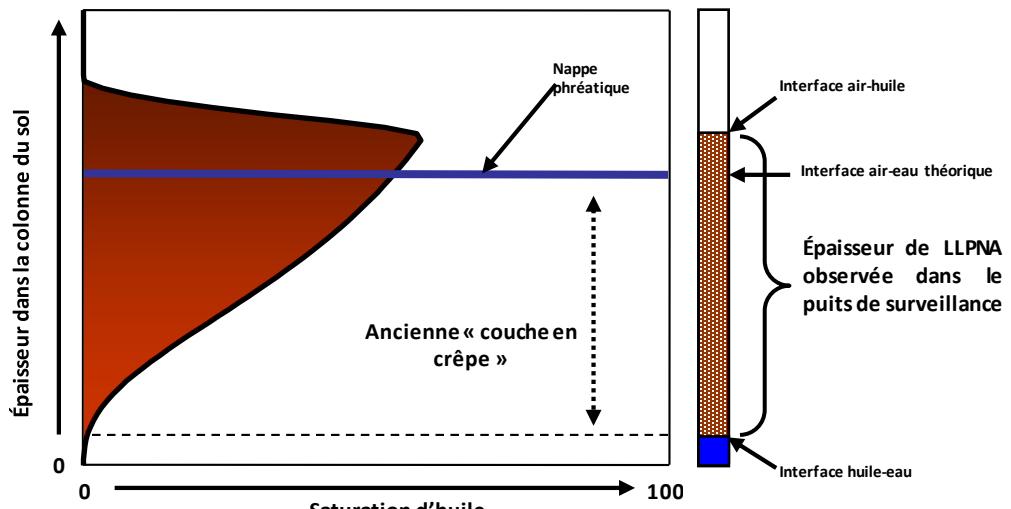
saturation d'un LLPNA donné à un point donné dans la subsurface sera proportionnel à la pression capillaire à ce point (c.-à-d. plus la pression de déplacement est importante, plus est importante la saturation du LLPNA). Sachant que la pression de déplacement varie dans toute la zone touchée, la saturation du LLPNA variera également en conséquence.

La géologie joue un rôle extrêmement important en ce qui concerne la saturation (et la mobilité) du LLPNA. Plus les pores du sol dans la porosité primaire de la matrice du sol sont grands, plus la capacité du sol à retenir le LLPNA est grande, plus grande est la capacité du LLPNA à se déplacer facilement et plus faible est la pression nécessaire pour déplacer l'eau et pénétrer dans l'espace interstitiel du sol. Les sols granulaires, tels que les sables et les graviers, ont de grands pores, par rapport aux limons et aux argiles, et peuvent retenir le LLPNA à des saturations allant de 40 à 60 % (bien que les saturations maximales rencontrées sur le terrain soient généralement de 20 à 30 %). Inversement, les limons et les argiles, qui présentent des pores extrêmement petits par rapport aux sables et aux graviers, ne permettent généralement que des saturations de LLPNA de l'ordre de 5 à 15 %. Les pores de sol plus petits limitent non seulement la quantité de saturation du LLPNA, mais également le débit ou le mouvement du LLPNA.

Les principes de porosité des sols pour la saturation et les mouvements du LLPNA dans les sols de morts-terrains peuvent également s'appliquer à certains types de substrats rocheux compétents (c.-à-d. un substratum ne présentant pas de porosité secondaire sous forme de fractures). Par exemple, un grès compétent permettra au LLPNA de se comporter de la même manière que dans un sol sableux présentant une taille de grains/pores similaire.

La porosité secondaire joue également un rôle extrêmement important sur les sites contenant des LLPNA. Les sols à texture fine, tels que le limon et l'argile, sont souvent constitués d'une porosité secondaire pouvant comprendre des macro-pores tels que des fractures, des fissures, des couches de sable, etc. Il en va de même pour un substratum fracturé. De nombreux sites contiendront des infrastructures souterraines généralement associées à des utilitaires qui constitueront des macro-pores artificiels. Le mouvement du LLPNA dans la porosité secondaire peut se produire à des taux de plusieurs ordres de grandeur supérieurs au mouvement observé dans la porosité primaire. Cela est principalement dû au fait que les macro-pores ont des tailles de pores beaucoup plus grandes que la porosité primaire, où la pression de déplacement de l'entrée des pores correspondante est beaucoup plus faible. En d'autres termes, le LLPNA peut déplacer l'eau et se déplacer dans les macro-pores beaucoup plus facilement et dans une plus grande mesure que dans la porosité primaire d'un sol à grain fin ou d'une matrice rocheuse. Par conséquent, le potentiel de déplacement du LLPNA dans la porosité secondaire doit être pris en compte lorsque les impacts du LLPNA sont présents dans un sol à texture fine, dans un substratum fracturé ou lorsque l'infrastructure souterraine coïncide avec l'emplacement d'un panache LLPNA.

Des profils de saturation de LLPNA théoriques (dans le profil vertical) peuvent être générés à l'aide de modèles analytiques des LLPNA, tels que le modèle de distribution et de récupération des LLPNA (MDRL) de l'American Petroleum Institute (API). La Figure A.3 présente un profil de saturation théorique, utilisé pour illustrer la variation typique de la saturation du LLPNA au-dessus et au-dessous de la nappe phréatique théorique dans un sol granulaire homogène, avec des fluides interstitiels à l'équilibre vertical.



Source : US EPA, Remediation Technologies Development Forum [Forum sur le développement des technologies d'assainissement]

Figure A.3 Profil de saturation du LLPNA théorique utilisant les principes de la pression capillaire

Le profil de saturation du LLPNA théorique sur la Figure A.3 est basé sur l'épaisseur de LLPNA dans le puits, identifié dans le puits de surveillance adjacent au profil. Notez que le profil de saturation commence dans la zone capillaire, au-dessus de l'interface air/LLPNA dans le puits, et continue jusqu'à l'interface LLPNA/eau de manière non linéaire. Notez également que le degré de saturation du LLPNA le plus élevé se produit approximativement à l'interface air/LLPNA dans le puits adjacent. Ce type de profil de saturation est également appelé courbe de prédiction de la pression capillaire et repose sur les hypothèses critiques suivantes : (1) les fluides (eau et LLPNA) sont en équilibre vertical (c.-à-d. ils ne fluctuent pas de haut en bas); et (2) la formation du sol est homogène. Ces hypothèses sont requises pour que le profil de saturation du LLPNA représente et corresponde avec précision à l'épaisseur du LLPNA dans le puits. La Figure A. 4 illustre la représentation conceptuelle des saturations de fluide à l'échelle des pores dans un panache LLPNA, sur la base des principes de la pression capillaire. La Figure A.5 montre comment les profils de saturation du LLPNA peuvent être représentés sur un panache LLPNA. On notera que les épaisseurs de LLPNA dans le puits ne seront souvent pas représentatives du profil de saturation du LLPNA dans le sol adjacent.

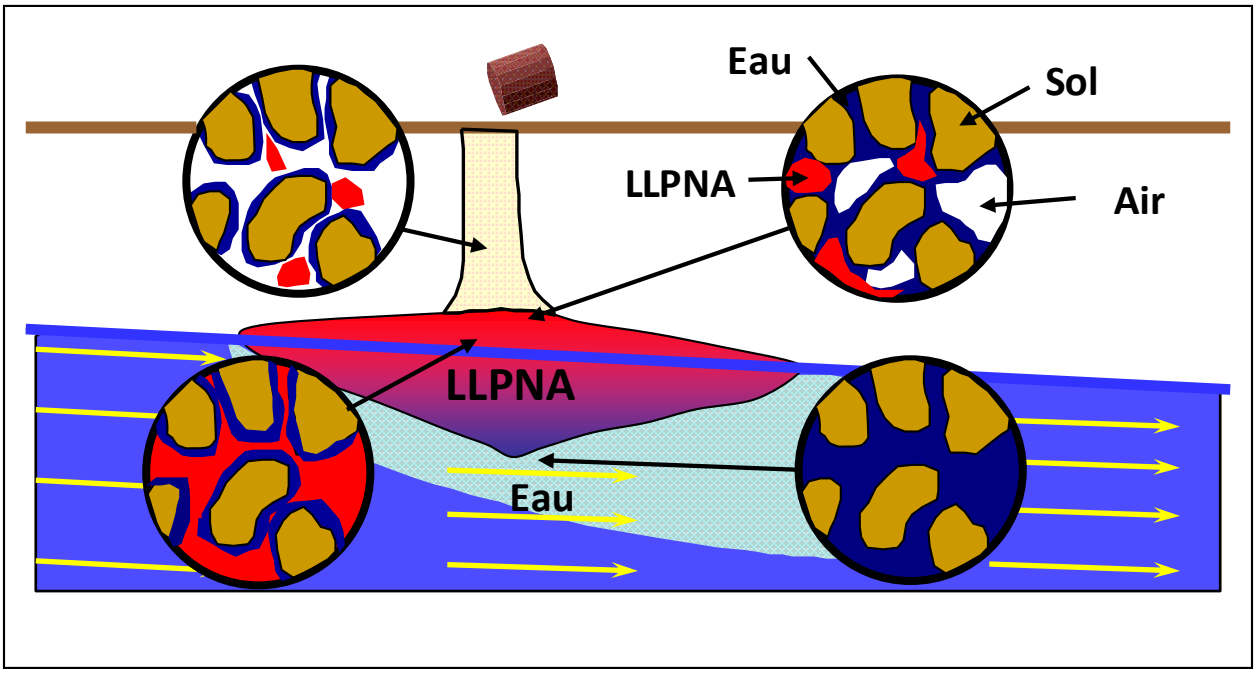


Figure A.4 Distribution des différentes phases de fluides dans un panache LLPNA typique

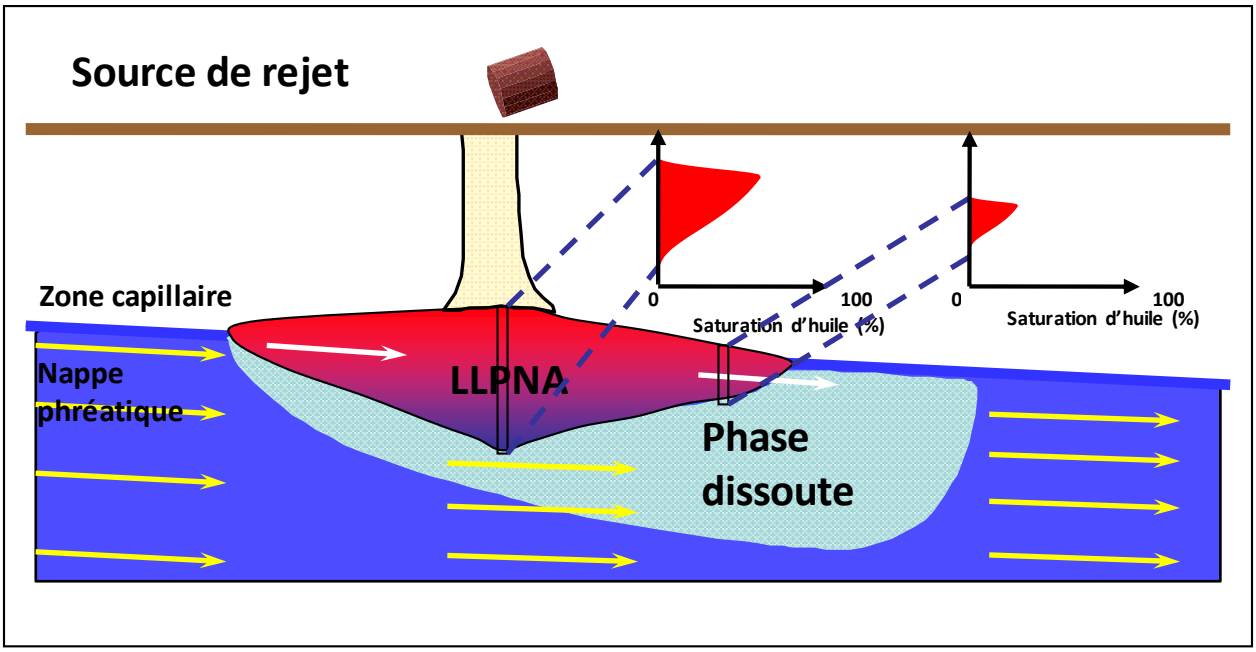


Figure A.5 Modifications du profil de saturation du LLPNA en fonction de l'emplacement dans le panache LLPNA

Comme nous l'avons vu précédemment, la géologie joue un rôle extrêmement important en ce qui concerne la saturation du LLPNA. La Figure A.6 illustre la différence entre les profils de saturation du

LLPNA pour différents types de sol (liée aux différences de taille des pores du sol). La Figure A.7 illustre la façon dont les profils de saturation diffèrent pour un sol donné avec des épaisseurs de LLPNA variables.

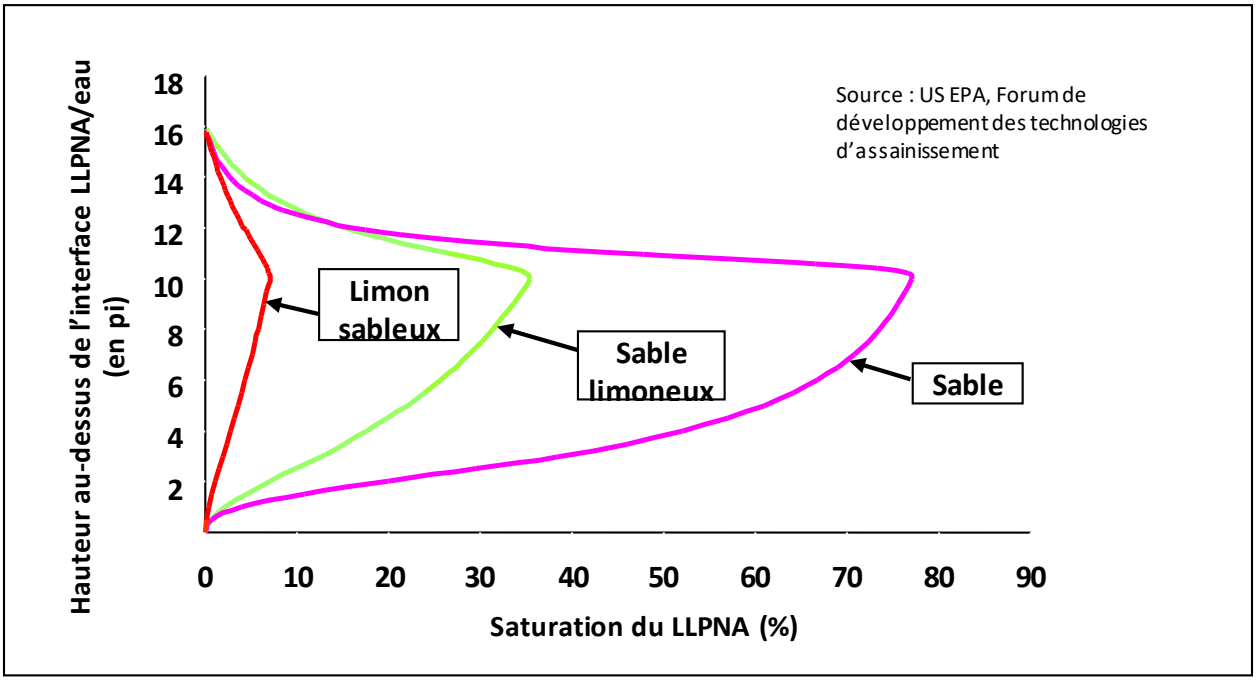


Figure A.6 **Profils de saturation du LLPNA dans différents types de sol pour une épaisseur de LLPNA donnée dans le puits**

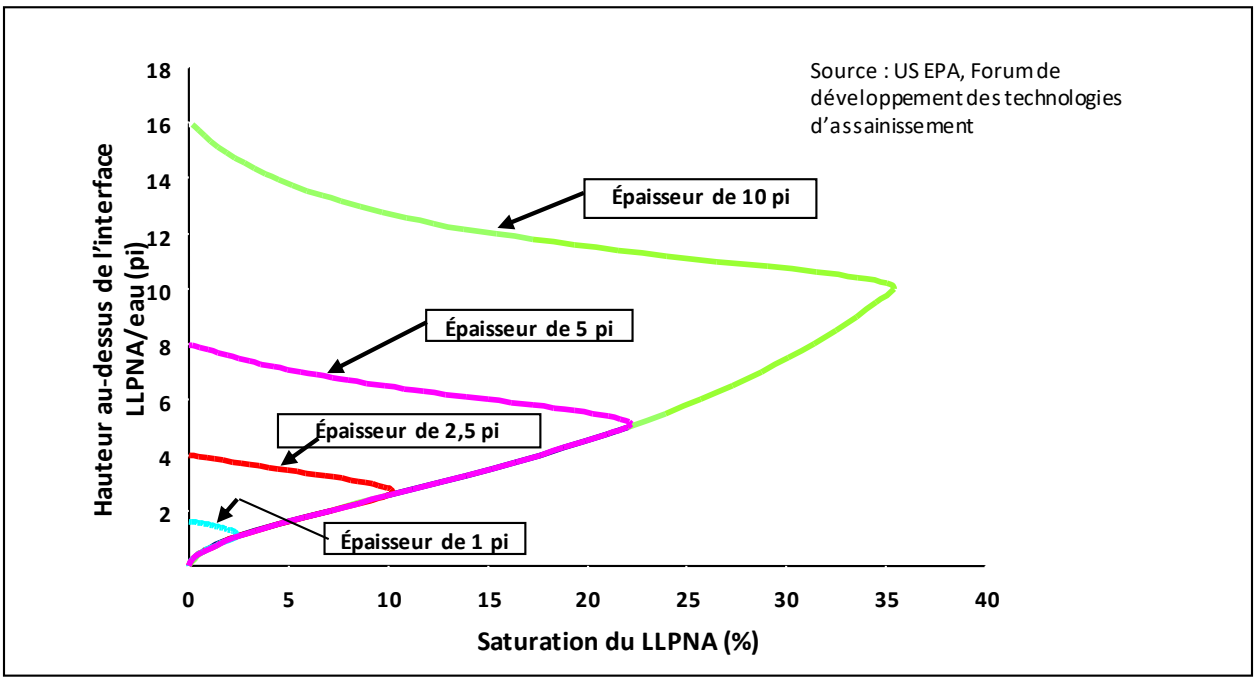


Figure A.7 **Profils de saturation de LLPNA pour un sol donné avec des épaisseurs variables de LLPNA dans le puits**

Tel que mentionné précédemment, les prévisions de pression capillaire pour les profils de saturation de LLPNA sont basées sur des hypothèses, qui sont utiles d'un point de vue théorique pour illustrer le modèle multi-phase de l'occurrence et du comportement du LLPNA. Toutefois, ces hypothèses ne seront pas satisfaites sur de nombreux sites environnementaux, et les données sur l'épaisseur du LLPNA dans le puits ne fourniront généralement pas une description précise de l'étendue verticale du panache LLPNA dans le sol adjacent. Lorsque des voies préférentielles et/ou d'autres hétérogénéités de la subsurface existent, les saturations de LLPNA peuvent varier considérablement dans une zone touchée et seront difficiles ou impossibles à prévoir.

Les saturations de LLPNA peuvent être déterminées et/ou mesurées par plusieurs méthodes :

1. Les concentrations dans les sols d'hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) peuvent être converties en saturations de LLPNA à l'aide du calcul suivant (ASTM, 2006) :

$$S_o = \frac{[TPH]}{10^6} \cdot \frac{\rho_{fb}}{\rho_o} \cdot \Theta^{-1}$$

   Où :

   S_o = Saturation de LLPNA (fraction de l'espace interstitiel remplie de LLPNA)

   [*TPH*] = Concentration d'hydrocarbures pétroliers totaux dans le sol (mg/kg)

   ρ_{fb} = densité apparente du sol

   ρ_o = LLPNA/densité de l'huile

   Θ^{-1} = porosité totale du sol

2. Des échantillons de carottes de sol saturés de LLPNA peuvent être prélevés et testés dans certains laboratoires pétrophysiques spécialisés pour déterminer directement les saturations de LLPNA (p. ex. la méthode d'extraction de Dean Stark); et/ou

3. Plusieurs outils disponibles auprès de l'API peuvent être utilisés pour estimer les saturations de LLPNA en fonction des observations d'épaisseur de LLPNA et des propriétés physiques du sol et du LLPNA (p. ex. le MDRL de l'API).

La méthode 3 est largement utilisée, mais généralement moins fiable que les méthodes 1 et 2, car elle dépend principalement des observations de l'épaisseur de LLPNA. Comme évoqué précédemment, les conditions de la plupart des sites environnementaux (c.-à-d. les fluctuations de la nappe phréatique, les hétérogénéités de la subsurface, etc.) rendent difficile ou impossible toute corrélation précise entre les épaisseurs de LLPNA et l'intervalle réellement touché dans la formation de sol adjacente.

Les saturations de LLPNA sont dynamiques et évolueront dans le temps, car le LLPNA déplace initialement l'eau (lors de sa migration verticale et latérale après un rejet) et est ensuite déplacé lorsque la nappe phréatique monte et que l'eau remplit une partie de l'espace interstitiel (API, 2004). Ce processus de redistribution verticale du LLPNA avec les fluctuations de la nappe phréatique est communément appelé « beurrage ». Les saturations de LLPNA devraient continuer de changer jusqu'à ce que le LLPNA devienne suffisamment discontinu, de telle sorte que toutes les saturations sont alors égales ou inférieures aux niveaux de saturation résiduelle de LLPNA. Une discussion sur la saturation résiduelle de LLPNA se trouve ci-dessous.

Saturation résiduelle du LLPNA

La saturation résiduelle du LLPNA est définie comme le niveau de saturation de LLPNA ou le seuil en dessous duquel le LLPNA ne s'écoulera pas dans des conditions hydrauliques normales. Par conséquent, le LLPNA présent à des saturations inférieures ou égales aux niveaux de saturation résiduelle sera généralement considéré comme immobile et irrécupérable. D'un point de vue conceptuel, la saturation résiduelle du LLPNA représente le seuil de saturation où le LLPNA, en raison de sa saturation relativement faible, commence à se morceler ou à devenir discontinu sous forme de gouttelettes, de trainées, de ganglions, etc. On peut également dire que la saturation résiduelle de LLPNA représente la quantité de LLPNA piégée par les forces capillaires dans le réseau de pores et qui ne présente pas de mobilité hydraulique (Beckett, 2005). Étant donné que les LLPNA dans la zone vadose sont soumises à des forces capillaires plus importantes dans les sols à texture fine, la saturation résiduelle des LLPNA dans cette zone sera supérieure à celle des sols à grain grossier, plus drainables. À mesure que le LLPNA approche son point de saturation ou qu'il est réduit au niveau de saturation résiduelle, autant la perméabilité relative que la conductivité du LLPNA approchent de zéro. La Figure A.8 fournit une illustration à la fois conceptuelle et à l'échelle des pores du LLPNA à sa saturation résiduelle à la périphérie d'un panache LLPNA.

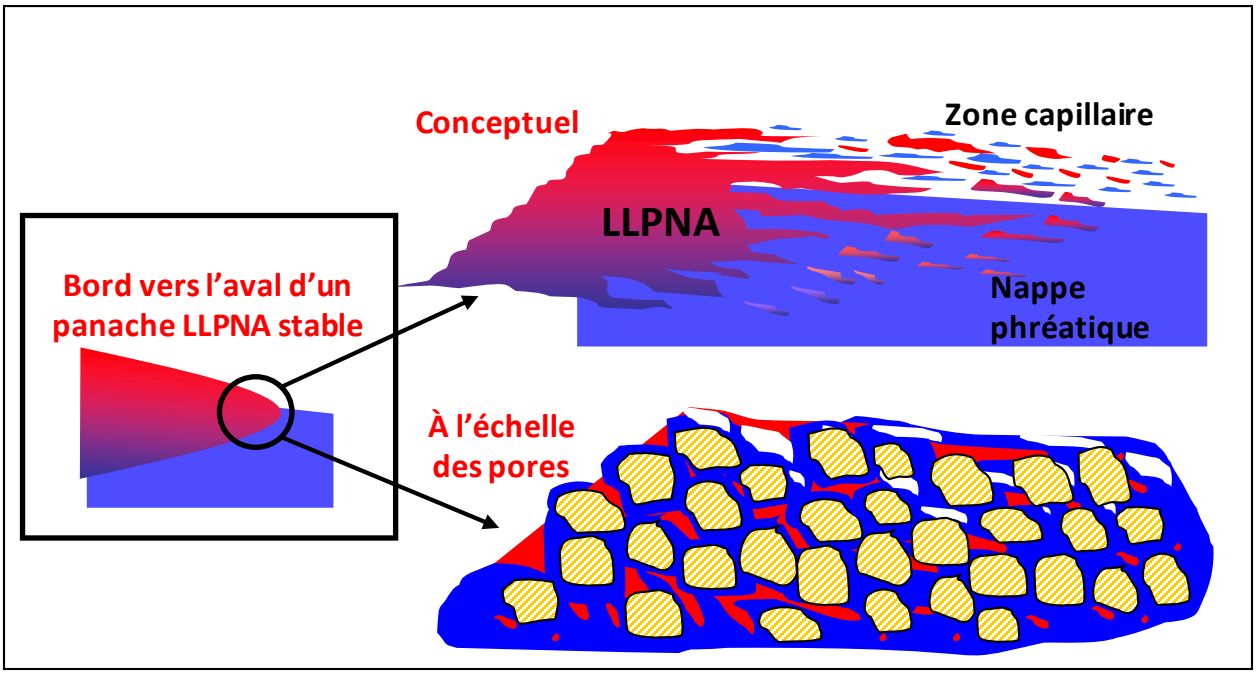


Figure A.8 Conceptualisation du LLPNA résiduel discontinu à la périphérie du panache LLPNA

Plus la saturation initiale en tout point d'un panache LLPNA est importante, plus la saturation résiduelle à ce point l'est également (Johnston et Adamski, 2005). En d'autres termes, plus le LLPNA entre initialement dans un espace interstitiel, plus celui-ci sera piégé et ne pourra plus sortir dudit espace interstitiel. Par conséquent, un panache LLPNA dans son ensemble sera composé de différentes saturations initiales et des différentes valeurs de saturation résiduelle correspondantes, en fonction du point de référence ou de l'emplacement dans le panache (voir la Figure A.9).

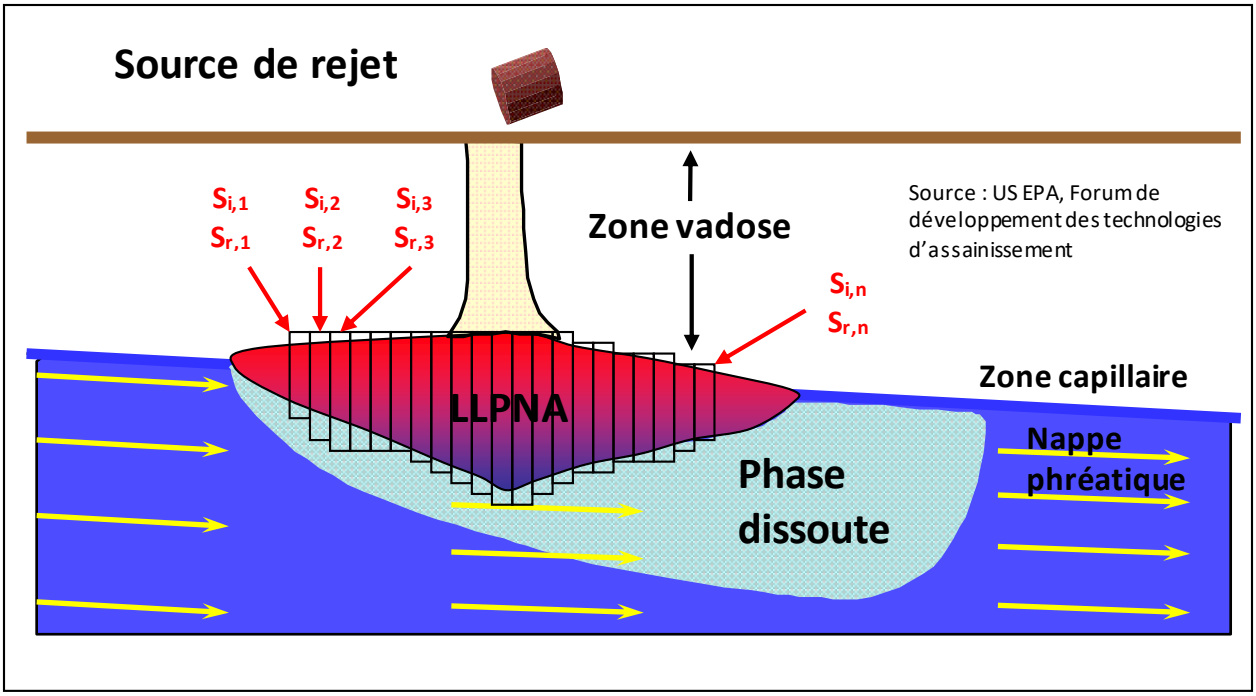


Figure A.9 Saturation résiduelle de LLPNA en fonction de la saturation initiale

Les saturations en LLPNA résiduel peuvent être déterminées en prélevant des échantillons de sol intact sur un site (maintenus à l'état congelé pour empêcher le drainage du fluide interstitiel) et en les soumettant à l'une des méthodes de laboratoire suivantes :

1. Test de pression capillaire de drainage/d'imbibition de l'huile/de l'eau : En utilisant la méthode d'ajout connu (par centrifugation), du LLPNA est ajouté à un sous-échantillon de carotte de sol jusqu'à saturation maximale, puis de l'eau est injectée sous pression pour drainer autant de LLPNA que possible. Le LLPNA restant, quel qu'il soit, constitue la saturation résiduelle de LLPNA.

2. Test de mobilité des produits libres par centrifugation à 1 000 fois la force de gravité (Brady et Kunkel, 2005) : effectué en prélevant un sous-échantillon de carotte de sol tel que reçu (sans ajout connu de LLPNA) et en le faisant tourner dans une centrifugeuse à 1 000 fois la force de gravité (environ 40 à 50 psi appliqués à l'échantillon) pendant 1 heure. Le LLPNA restant dans l'échantillon après la centrifugation représente la saturation résiduelle de LLPNA.

3. Test de poussée d'eau/d'inondation : Implique l'injection de plusieurs volumes de pores d'eau (généralement 10 à 15) dans un sous-échantillon provenant d'une carotte de sol à 25 psi de pression. La saturation résiduelle de LLPNA est représentée par le LLPNA restant dans l'échantillon après la poussée d'eau.

Les méthodes 1 et 2 présentent toutes deux certains aspects dans l'exécution du test pouvant entraîner des résultats de saturation résiduelle indûment biaisés. Pour la méthode 1, il ne faut pas oublier que la saturation résiduelle de LLPNA est fonction de la saturation initiale de LLPNA (c.-à-d. plus le LLPNA occupe initialement l'espace interstitiel, plus la saturation résiduelle est élevée). L'ajout connu initial de

LLPNA dans l'échantillon dans la méthode 1 peut donc produire un résultat de saturation résiduelle biaisé à la hausse par rapport à ce qui serait représentatif d'un échantillon sans ajout connu. Avec la méthode 2, la pression appliquée au cours de l'essai est tellement élevée qu'elle dépasse largement les conditions de pression produites par les conditions hydrauliques typiques de la plupart des sites. En outre, la pression élevée utilisée dans la méthode 2 conduit plus souvent à la compression ou à l'affaissement de la matrice du sol pendant le test. Lorsque cela se produit, il se peut que l'on ne soit pas en mesure de déterminer si le LLPNA rejeté de l'échantillon au cours du test est le résultat du gradient appliqué ou de la compression de la matrice du sol « pressant » le LLPNA hors de l'échantillon. Dans les deux cas, les résultats de la méthode 2 sont susceptibles de produire un résultat de saturation résiduelle biaisé à la baisse et non représentatif des conditions réelles du site, pouvant mener à conclure qu'une quantité beaucoup plus importante de LLPNA est mobile ou récupérable qu'elle ne l'est en réalité. La méthode 3 implique également une pression appliquée susceptible d'être supérieure aux conditions d'un site environnemental typique; toutefois, la pression étant beaucoup plus faible que la méthode 2, et la méthode n'impliquant aucun ajout connu de LLPNA comme dans la méthode 1, cette méthode devrait produire les résultats les plus représentatifs.

Il est important de noter que la saturation résiduelle pour un LLPNA et un type de sol donnés à un endroit donné dans le panache LLPNA varie considérablement entre les zones insaturées (vadose) et saturées. De manière générale, les saturations résiduelles de LLPNA dans la zone vadose sont beaucoup plus faibles que les saturations résiduelles correspondantes dans la zone saturée. Cela est vrai du fait de la différence de densités et de tensions interfaciales entre une paire air/LLPNA et une paire LLPNA/eau. Le LLPNA dans la zone vadose possède une capacité beaucoup plus importante de drainage et d'écoulement dans un puits de surveillance sous la force de gravité, par opposition au LLPNA submergé sous la nappe phréatique. En d'autres termes, il faut beaucoup moins de pression au LLPNA pour pousser l'air et pénétrer dans les pores que celle nécessaire pour en faire de même avec les eaux souterraines. Cela joue également un rôle dans l'apparition et la disparition du LLPNA dans les puits, résultant des fluctuations du niveau de la nappe phréatique. Les saturations résiduelles typiques de LLPNA dans les zones vadoses et saturées pour des types de sols donnés sont indiquées au Tableau A.1 ci-dessous (ITRC, 2009b) :

Tableau A.1 Valeurs de saturation résiduelles de LLPNA représentatives pour les zones vadoses et saturées

Type de sol	Saturation résiduelle (vadose)	Saturation résiduelle (saturée)
Sable	3 %	25 %
Limon sableux	5 %	22 %
Limon	7 %	18 %
Limon boueux	7 %	16 %
Argile sableuse	7 %	10 %

Argile limoneuse	4 %	6 %

Notez que la saturation résiduelle « saturée » du LLPNA dans un matériau à grain grossier (sable) est beaucoup plus élevée que la saturation résiduelle « saturée » correspondante dans un limon ou une argile. Comme nous l'avons évoqué précédemment, cela est dû au fait qu'un sol à grains grossiers possède une capacité beaucoup plus grande à retenir le LLPNA (du fait de ses pores plus larges) qu'un sol à texture fine. Par conséquent, les saturations de LLPNA et les saturations résiduelles correspondantes dans un sol à grains grossiers dans la zone saturée sont généralement beaucoup plus élevées que les saturations de LLPNA et les saturations résiduelles dans un sol à texture fine. Comme indiqué précédemment, la porosité secondaire peut contrôler l'écoulement de LLPNA dans les sols à grains plus fins. Par conséquent, ces valeurs typiques peuvent s'appliquer ou non en présence de cette condition. Remarque: La saturation résiduelle dans la zone vadose est supérieure dans les sols fins comparativement aux sols grossiers en raison de la pression capillaire.

Mobilité du LLPNA

La mobilité du LLPNA est généralement liée à sa capacité à se déplacer dans un sens localisé en tout point d'un panache LLPNA. La mobilité du LLPNA peut être fortement influencée par la fluctuation de la nappe phréatique et dépend des différentes propriétés du LLPNA (densité, viscosité, tension interfaciale) et des propriétés du sol (types de sol et caractéristiques de drainage) et est souvent caractérisée en termes de saturations du LLPNA (en tout point d'un panache LLPNA) et des saturations résiduelles correspondantes. Les saturations de LLPNA qui dépassent les niveaux de saturation résiduelle indiquent un potentiel de mobilité; toutefois, cela n'indique pas nécessairement que le panache LLPNA dans son ensemble est instable ou migrant (ASTM, 2006; ITRC, 2009b).

Les fluctuations saisonnières de la nappe phréatique ont un impact direct sur la mobilité du LLPNA. Une nappe phréatique qui monte et descend crée une zone de beurrage où le LLPNA mobile et continu se propage verticalement et devient discontinu lorsque l'eau et le LLPNA entrent en concurrence pour pénétrer dans les pores. En supposant l'absence d'une source continue, cette interaction entre l'eau et le LLPNA emprisonnera progressivement le LLPNA en gouttelettes immobiles et discontinues dans la matrice du sol au fil du temps (API, 2004). Par conséquent, pendant la saison de montée des nappes phréatiques, une partie ou la totalité du LLPNA dans la zone de beurrage (dans un environnement non confiné) peut être submergée ou piégée sous la nappe phréatique. Il en résulte que le LLPNA immergé perd une grande partie de sa capacité à s'écouler dans la matrice du sol et/ou dans un puits de surveillance (du fait d'une saturation résiduelle plus élevée dans la zone saturée). Dans certaines situations, l'intégralité du LLPNA dans un puits peut « disparaître » avec la montée du niveau de la nappe phréatique.

Il est fréquent que le LLPNA disparaisse et réapparaisse dans les puits de surveillance en réaction aux fluctuations du niveau de la nappe phréatique. Lors d'une condition de montée de la nappe phréatique, la réaction ou l'augmentation du LLPNA est retardée par les forces de flottabilité qui tentent de déplacer le LLPNA vers le haut à travers la résistance présentée par la formation du sol (Oostrom et al., 2006). Ce

retard est dû à la résistance au mouvement de LLPNA opposée par la matrice du sol et au fait que l'eau souterraine est moins visqueuse que le LLPNA et peut donc se déplacer plus facilement dans le sol que ce dernier. Toutefois, le LLPNA dans un puits ne rencontre pas la résistance au mouvement ascendant du LLPNA dans le sol. Il montera donc au-dessus de l'eau dans le puits plus rapidement que le LLPNA dans la matrice du sol. Cela crée un gradient de LLPNA dans le sens du puits vers le sol, entraînant l'écoulement du LLPNA hors du puits et, dans certains cas, la disparition de l'intégralité du LLPNA dans le puits. Inversement, pendant la saison de baisse des nappes phréatiques, une plus grande partie du LLPNA présent dans la zone de beurrage est exposée, ce qui lui permet de s'écouler par gravité du sol nouvellement insaturé, dans le sol et/ou dans un puits de surveillance (du fait d'une saturation résiduelle plus faible dans la zone insaturée). Ceci explique la réapparition du LLPNA ou l'augmentation de l'épaisseur du LLPNA dans les puits lors de la saison de baisse des nappes phréatiques.

La montée et la baisse de la nappe phréatique ont une influence directe sur la mobilité inhérente du LLPNA dans un panache LLPNA, mais une augmentation localisée de la mobilité signalée par l'augmentation de l'épaisseur de LLPNA n'indique pas nécessairement qu'un panache LLPNA est instable ou migrant. De plus, dans les sites qui n'ont pas de sources actuelles, les changements d'épaisseur du LLPNA corrélés aux fluctuations du niveau de la nappe phréatique sont plus probablement dus à la redistribution verticale localisée du LLPNA plutôt que représentatifs d'une mobilité latérale significative (ITRC, 2009a).

Comme suggéré ci-dessus, l'épaisseur de LLPNA dans un puits de surveillance varie de façon inverse avec le niveau de la nappe phréatique dans une condition ou un environnement non confiné. Par conséquent, une hausse du niveau de la nappe phréatique entraîne une diminution de l'épaisseur de LLPNA dans le puits. Inversement, une baisse du niveau de la nappe phréatique entraîne une augmentation de l'épaisseur de LLPNA dans le puits. Dans un environnement confiné (y compris un LLPNA présent dans la porosité secondaire des limons, des argiles et des roches fracturées possibles), l'épaisseur du LLPNA tend à varier directement avec le niveau de la surface piézométrique. Par conséquent, une augmentation du niveau de la surface piézométrique entraîne une augmentation de l'épaisseur du LLPNA dans le puits et vice versa.

STABILITÉ ET EXPOSITIONS POTENTIELLES AU LLPNA

Stabilité du LLPNA

La stabilité du LLPNA se rapporte à la capacité ou à l'incapacité d'un panache LLPNA à migrer (c.-à-d. la périphérie ou l'étendue d'un panache LLPNA est en propagation/en progression dans le temps). Si la périphérie d'un panache LLPNA croît ou se déplace dans le temps, le panache est généralement appelé migrant ou instable. Si le panache LLPNA reste essentiellement de la même taille et au même endroit dans le temps (c.-à-d. s'il présente la même empreinte globale dans le temps), le panache est appelé stable ou non migrant. De manière générale, la plupart des panaches LLPNA historiques—où la source du rejet a pris fin—sont stables. Les panaches LLPNA sont autolimitatifs dans l'espace à moins d'être continuellement alimentés par un rejet continu, distinguant ainsi les LLPNA des panaches dissous et gazeux qui peuvent migrer sur des distances importantes (API, 2004). Généralement, une fois que le

rejet de LLPNA a pris fin, il cessera ultimement de se déplacer lorsque les forces résistives dans les sols saturés atteindront l'équilibre avec la pression hydrostatique du LLPNA en cours de dissipation (API, 2002; Huntley et Beckett, 2001). Souvent, les facteurs suivants se combinent pour produire un panache stable qui ne se propage pas ou ne migre pas (US EPA, 2005) :

- Propriétés fluides du LLPNA
- Perméabilité relative du LLPNA
- Conductivité des milieux poreux
- Gradient hydraulique
- Pression d'entrée de déplacement dans la gorge des pores
- Fluctuation de la nappe phréatique

Pour l'ensemble d'un panache LLPNA, on trouvera souvent que le LLPNA possède une certaine mobilité localisée dans les parties intérieures du panache, où les saturations sont les plus élevées (et les épaisseurs de LLPNA dans le puits peuvent être importantes), et immobiles dans les zones extérieures du panache où la saturation diminue jusqu'à son niveau résiduel. Ainsi, le panache global reste stable malgré la présence de zones localisées où le LLPNA peut être suffisamment mobile pour être observé dans les puits et récupéré. Dans le cas d'un LLPNA stabilisé depuis un certain temps, la fraction potentiellement mobile représentée par le LLPNA observé dans les puits constituera très probablement une fraction très réduite de l'ensemble du panache LLPNA.

La Figure A.10 présente un dessin conceptuel d'un panache LLPNA qui continue à s'étendre ou à migrer. Le panache en propagation est représenté à la périphérie par des flèches « force » en gras, indiquant que le LLPNA exerce une pression ou présente une pression hydrostatique suffisante pour continuer à déplacer les eaux souterraines. Inversement, la Figure A.11 montre un panache LLPNA stable avec des flèches « force » en équilibre avec la force résistive du sol et des eaux souterraines.

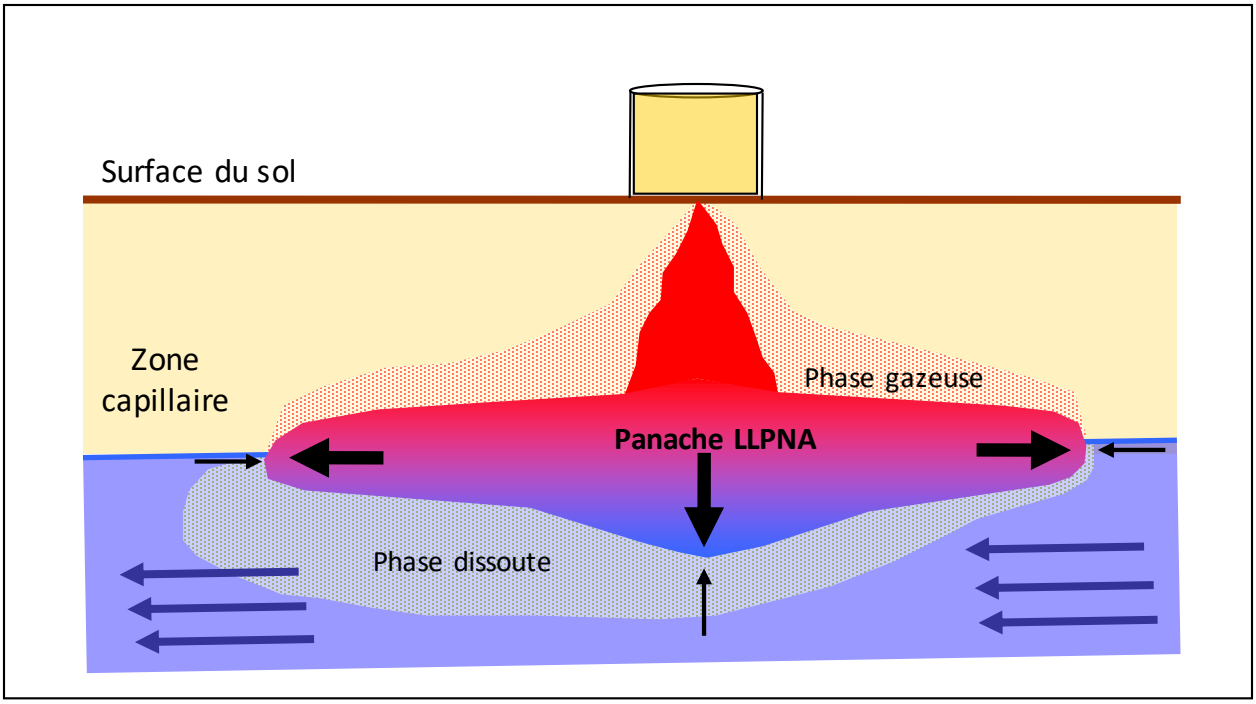


Figure A.10 **Propagation/migration du panache LLPNA (les grosses flèches de force/pression dans le panache indiquent une migration continue du panache LLPNA dans toutes les directions)**

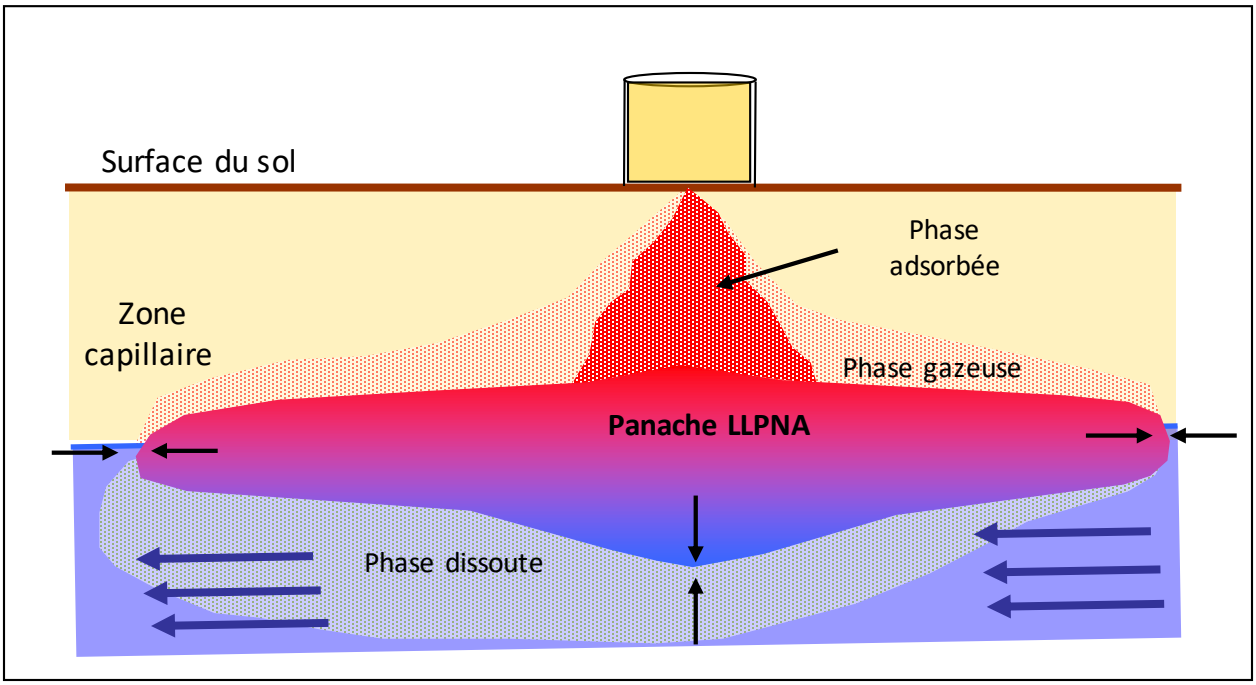


Figure A.11 **Panache de LLPNA stable/non migrant (les flèches à l'intérieur et à l'extérieur du panache LLPNA indiquent que les forces/pressions opposées sont à l'équilibre)**

Les fluctuations de la nappe phréatique dans un panache LLPNA stable peuvent causer un LLPNA immobile à se déplacer dans un sens très localisé et s'écouler ou drainer dans un puits de surveillance immédiatement adjacent. Toutefois, même en cas de drainage, de redistribution verticale ou de beurrage limité du LLPNA, le panache LLPNA peut toujours être stable et ne pas migrer. Par conséquent, sur un site présentant un panache LLPNA stable (c.-à-d. sans rejet de LLPNA continu), la disparition du LLPNA dans un puits de surveillance pendant des mois et/ou des années, suivie de sa réapparition, ne signifie pas nécessairement que le LLPNA migre.

Bien que le sort et le risque associés aux contaminants dans le panache de la phase dissoute revêtent souvent une importance règlementaire primordiale, l'évaluation des paramètres de mesure de la stabilité (et la capacité de récupération connexe) du panache LLPNA est également essentielle, car directement liée à la stabilité du panache de la phase dissoute. Une partie d'un panache LLPNA demeurera toujours en tant que résidu immobile et irrécupérable (à l'exclusion des options d'excavation), fournissant ainsi une limite fondamentale à la fraction d'un panache LLPNA qui pourrait contribuer à l'instabilité. Les estimations de la limite supérieure des fractions de LLPNA récupérables sans excavation ont été estimées entre 40 à 60 % (API, 2004). Toutefois, ce niveau de récupération ne sera vraisemblablement atteint qu'avec des rejets relativement récents, où les saturations et le potentiel de récupération des LLPNA sont les plus élevés.

Expositions potentielles

Un rejet de LLPNA est présenté de manière conceptuelle à la Figure A.12, illustré par des scénarios d'exposition potentielle. Le degré de risque pour la santé humaine et/ou l'environnement que peut poser un panache LLPNA dépendra fortement du type de LLPNA concerné, du temps qu'il a passé dans le sol et de la proximité et de la sensibilité des environnements récepteurs. Le niveau de risque potentiel posé par le panache de la phase dissoute résultant de la présence d'un panache LLPNA constituera un facteur majeur dans la prise de décision du propriétaire du site quant à savoir si des approches d'assainissement actives ou passives peuvent être privilégiées.

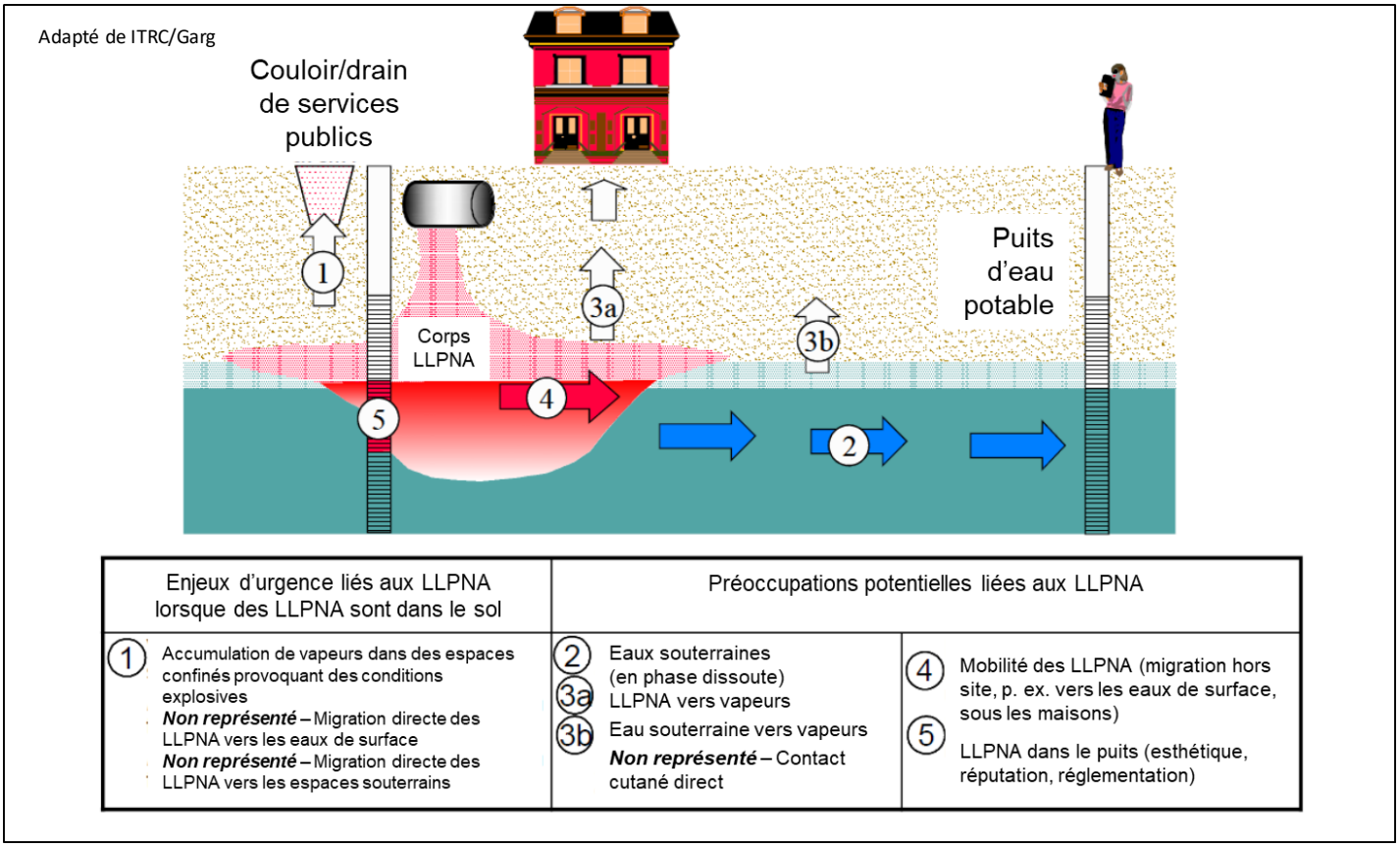


Figure A.12 Rejet conceptuel et expositions potentielles

Le risque d'exposition potentielle varie considérablement selon le type de LLPNA : les types plus lourds, tels que les huiles, représentent généralement des risques potentiels bien moindres que les carburants plus légers, tels que l'essence contenant des composants plus volatiles et solubles. Le risque potentiel associé à un LLPNA donné se réduit également avec le temps (appauvrissement naturel de la zone source). Les processus d'ANZS réduisent progressivement la volatilité et les taux de dissolution des composants. Par conséquent, les anciens LLPNA dégradés représentent généralement des risques potentiels moindres que les nouveaux rejets. Pour cette raison, les panaches LLPNA plus anciens dégradés et/ou plus lourds produisent souvent des niveaux d'impacts des phases dissoute et/ou gazeuse bien inférieurs aux niveaux d'analyse typiques basés sur le risque. On notera également que les LLPNA à base d'essence peuvent contenir des additifs qui seront importants dans l'évaluation des expositions potentielles (p. ex. des composés oxygénés, du 2-méthoxy-2-méthylpropane). La Figure A.13 donne un aperçu des propriétés de différents types de LLPNA.

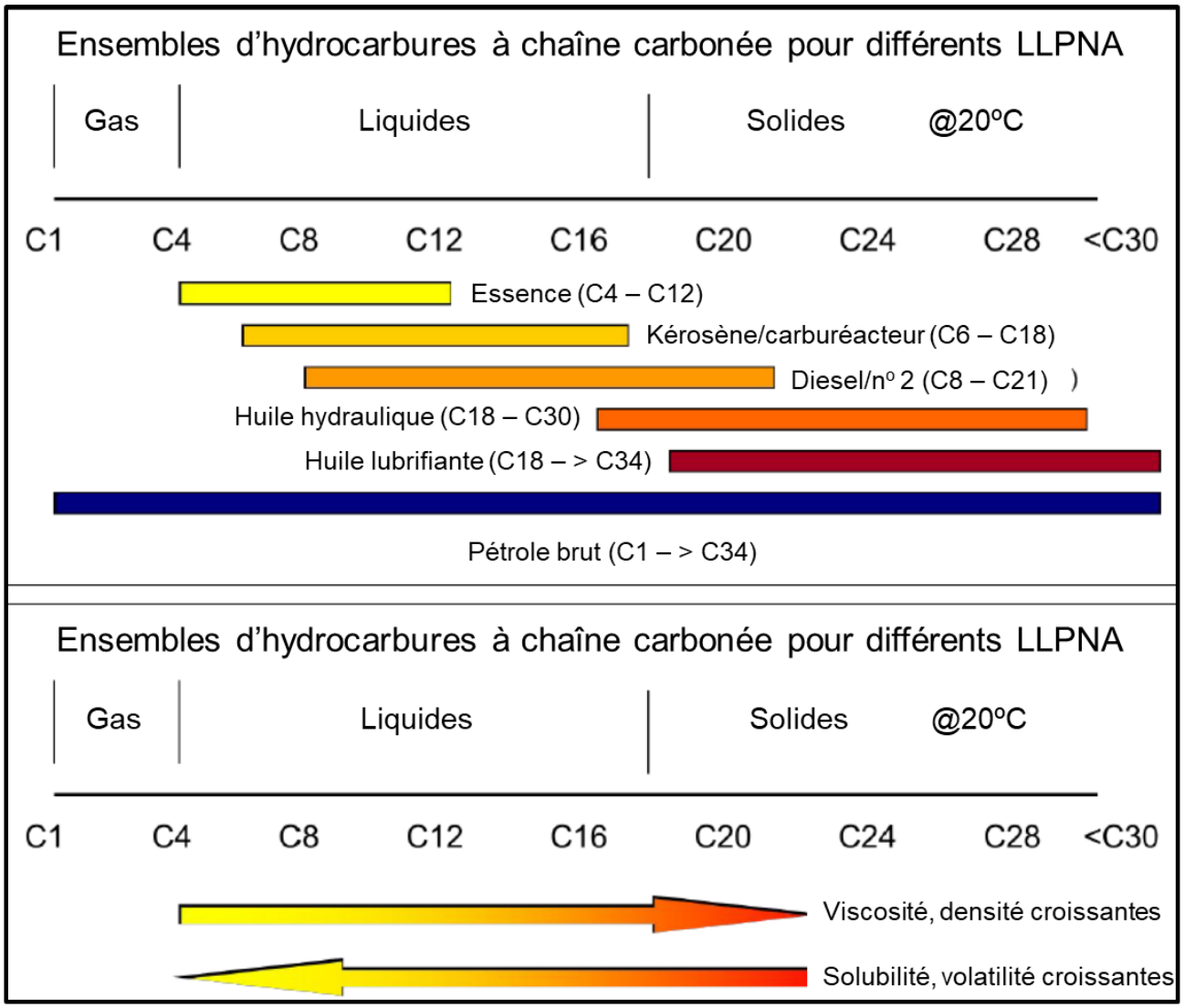


Figure A.13 Propriétés de différents types de LLPNA

Références

American Petroleum Institute [API]. (2000). *Non-aqueous phase liquid (NAPL) mobility limits in soil*. Soil and Groundwater Research Bulletin, no 9.

American Petroleum Institute [API]. (2002). *Evaluating Hydrocarbon Removal from Source Zones and its Effect on Dissolved Plume Longevity and Magnitude*. Publications API, no 4715.

American Petroleum Institute [API]. (2003). *Models for Design of Free-Product Recovery Systems for Petroleum Hydrocarbon Liquids*. Publications API, no 4729.

American Petroleum Institute [API]. (2004). *API Interactive LNAPL Guide, Version 2.0*. Washington, American Petroleum Institute.

ASTM International [ASTM]. (2006). *ASTM E2531-06, Standard Guide for Development of Conceptual Site Models and Remediation Strategies for Light Nonaqueous Phase Liquids Released to the Subsurface*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, www.astm.org.

Beckett, G.D. (2005). *Pro Tools for LNAPL Decision Making*. Un atelier présenté par l'American Petroleum Institute, le 17 août 2005, Costa Mesa, Californie.

Brady, M.M., & Kunkel, L.A. (2005). *A screening method for determining free product mobility*. Présenté à la Conférence « Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water : Prevention, Assessment, and Remediation », Costa Mesa, Californie, 18-19 août 2005.

Huntley, D., & Beckett, G.D. (2001). Ev*aluating hydrocarbon removal from source zones: tools to access concentration reduction*. Soumis pour revue auprès de l'API.

Interstate Technology & Regulatory Council [ITRC]. (2009a). *Evaluating LNAPL Remedial Technologies for Achieving Project Goals*. LNAPL-2. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Équipe LLPNA. www.itrcweb.org.

Interstate Technology & Regulatory Council [ITRC]. (2009b). *Part 1, An improved understanding of LNAPL behaviour in the subsurface – state of science vs. state of practice*. Formation en ligne 1 (IBT-1).

Johnson, J.A., & Ling, M. (2005). *Evaluating the reliability of LNAPL thickness measurements and the conditions that produce non representative values*. Actes de la conférence « Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Assessment, and Remediation », Costa Mesa, Californie, 18-19 août 2005.

Johnston, C.D., & Adamski, M. (2005). *Relationship between initial and residual LNAPL saturation for different soil types*. Actes de la conférence « Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Assessment, and Remediation », Costa Mesa, Californie, 18-19 août 2005.

Mercer, J.W., & Cohen, R.M. (1990). *A review of immiscible fluids in the subsurface: properties, models, characterization and remediation*. J. Contaminant Hydrology.6: 107 163.

Oostrom, M., Hoftsee, C., & Weistsma, T.W. (2006). Be*haviour of Viscous LNAPL Under Variable Water Table Conditions*. Soil & Sediment Contamination. 15: 543 564.

Potter, T.L., & Simmons, K.E. (1998). *Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series Volume 2: Composition of Petroleum Mixtures*. Amherst, Amherst Scientific Publishers.

Sale, T. et al. (2007). *Measurement of LNAPL Flow Using Single Well Tracer Dilution Techniques*. Ground Water. 45(5): 569 578.

Thomas, D.H., & Delfino, J.J. (1991). *A gas chromatographic/chemical indicator approach to assessing ground water contamination by petroleum products*. Ground Water Monitoring Review 11(4): 90 100.

United States Environmental Protection Agency [US EPA]. (2005). *A Decision-Making Framework for Cleanup of Sites Impacted with Light Non-Aqueous Phase Liquids (LNAPL)*. Remediation Technologies Development Forum, NAPL Cleanup Alliance, Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA 542-R-04-011.

Annexe B Liste de contrôle de gestion d'un site contenant des LLPNA

Tableau B.1 Liste de contrôle de gestion d'un site contenant des LLPNA

	Question	Réponse / Commentaire	
1	**Objectifs du site et cadre règlementaire**		
1.A	Les objectifs du site sont-ils bien définis?	O Oui	
		O Non	Faire participer les intervenants et établir des objectifs.
1.B	Les exigences règlementaires sont-elles bien comprises?	O Oui	
		O Non	Déterminer les exigences/critères appropriés.
2	**Historique des rejets de LLPNA[5] et propriétés**		
2.A	La source du LLPNA est-elle connue? (indiquer si le volume et/ou la pression du rejet sont élevés)	O Oui	
		O Non	Déterminez si le gouvernement fédéral est responsable. Envisager un examen historique plus complet (ÉES de phase 1 élargie).
2.B	Y a-t-il une possibilité que le rejet soit toujours en cours?	O Oui	Prendre des mesures immédiates pour arrêter le rejet.
		O Non	
2.C	Y a-t-il une menace imminente liée au rejet qui justifie une atténuation immédiate ou une intervention d'urgence?	O Oui	Activer l'intervention d'urgence ou mettre en œuvre les mesures d'atténuation.
		O Non	
2.D	Les types de LLPNA sont-ils connus?	O Oui	
		O Non	Voir le Tableau 3 pour les options de développement du MCSL.

[5] L'admissibilité au financement du PASCF pour l'assainissement peut être influencée par l'historique des rejets, en particulier si la contamination a résulté d'activités antérieures ou postérieures au 1er avril 1998. La *Directive du PASCF sur l'admissibilité des sites et des coûts de la phase IV – Version 1.0* (PASCF, 2021c) comprend des informations supplémentaires sur les critères d'admissibilité de base et les exceptions pertinentes.

	Question	Réponse / Commentaire	
2.E	La date du rejet/l'âge approximatif du LLPNA sont-ils connus?	○ Oui	
		○ Non	Voir le Tableau 3 pour les options de développement du MCSL.
2.F	La densité/densité relative et la viscosité du LLPNA sont-elles connues?	○ Oui	
		○ Non	Voir le Tableau 3 pour les options de développement du MCSL.
3	**Panache LLPNA**		
3.A	L'étendue surfacique et la distribution verticale du panache LLPNA ont-elles été définies?	○ Oui	
		○ Non	
		Indiquer les techniques utilisées : ○ Analyse visuelle/olfactive du sol ○ Analyse du sol au détecteur à photo-ionisation (DPI) ○ Analyse du sol au colorant hydrophobique ○ Analyse du sol à la lumière UV ○ Échantillonnage traditionnel du sol et analyse en laboratoire ○ Photographie de carottes de sol/test pétrophysique ○ Données des puits de surveillance (jaugeage, échantillonnage) ○ Résistivité électrique ○ Fluorescence induite par laser (FIL) * Voir le Tableau 3 pour en savoir plus sur les options de développement du MCSL.	
3.B	Le panache LLPNA est-il stable dans son étendue globale?	○ Oui	
		○ Non	
		Éléments de preuve :	

	Question	Réponse / Commentaire
		○ Âge du LLPNA ○ Surveillance des puits d'observation ○ Tendances de la phase dissoute ○ Un ou plusieurs éléments de preuve de la mobilité du LLPNA à la périphérie du panache LLPNA ○ Indicateurs d'atténuation naturelle ○ Estimations critiques de la pression hydrostatique du LLPNA à la périphérie du LLPNA * Voir le Tableau 3 pour en savoir plus sur les options de développement du MCSL.
3.C	Existe-t-il des zones de LLPNA potentiellement mobile au sein du panache LLPNA?	○ Oui
		○ Non
		Indiquer les éléments de preuve disponibles : ○ Âge du LLPNA ○ Détermination de la saturation et/ou de la saturation résiduelle du LLPNA (essais pétrophysiques de carottes du sol) ○ Estimations de la transmissivité du LLPNA ○ Performance du système de récupération du LLPNA ○ Détermination de la saturation et/ou de la saturation résiduelle du LLPNA (conversion des HPT, modélisation analytique) * Voir le Tableau 3 pour en savoir plus sur les options de développement du MCSL.
3.D	L'atténuation naturelle du panache LLPNA a-t-elle été évaluée?	○ Oui
		○ Non
		Indiquer les éléments de preuve disponibles : ○ Données du sol (bactéries capables de dégrader le pétrole)

	Question	Réponse / Commentaire	
		○ Données des gaz du sol (profils de concentration des gaz du sol, dioxyde de carbone, méthane) ○ Indicateurs d'atténuation naturelle de la phase dissoute * Voir le Tableau 3 pour en savoir plus sur les options de développement du MCSL.	
4	**Phases dissoute et gazeuse**		
4.A	Un panache de phase dissoute associé a-t-il été délimité?	○ Oui	
		○ Non	
		Indiquer les éléments de preuve disponibles : ○ Échantillonnage du puits de surveillance ○ Sonde d'interface à membrane (MIP) * Voir le Tableau 3 pour en savoir plus sur les options de développement du MCSL.	
4.B	La stabilité du panache de la phase dissoute a-t-elle été évaluée?	○ Oui	
		○ Non	
		Indiquer les éléments de preuve disponibles : ○ Analyse des tendances des données de surveillance des eaux souterraines dans le temps ○ Distribution spatiale des données de surveillance des eaux souterraines ○ Paramètres géochimiques (O_2 dissous, NO_3^-, SO_4^{2-}, fer ferreux (Fe^{2+}), manganèse (Mn^{2+}), CO_2 et CH_4) * Voir le Tableau 3 pour en savoir plus sur les options de développement du MCSL.	
4.C	L'atténuation naturelle de la phase dissoute a-t-elle été évaluée?	○ Oui	
		○ Non	

	Question	Réponse / Commentaire	
		Indiquer les éléments de preuve disponibles : ○ Données du sol (p. ex. bactéries capables de dégrader le pétrole) ○ Analyse des tendances des données de surveillance des eaux souterraines dans le temps ○ Distribution spatiale des données de surveillance des eaux souterraines par rapport à l'étendue du panache LLPNA ○ Indicateurs d'atténuation naturelle de la phase dissoute (réduction spatiale/temporelle des concentrations constituantes, accepteurs terminaux d'électrons, paramètres géochimiques) * Voir le Tableau 3 pour en savoir plus sur les options de développement du MCSL.	
4.D	Les impacts potentiels de la phase gazeuse ont-ils été évalués (y compris le méthane)?	○ Oui	
		○ Non	Voir le Tableau 3 pour les options de développement du MCSL.
5	**Expositions potentielles**		
5.A	Identifiez les récepteurs potentiels et détaillez toute information pertinente sur l'utilisation des terrains (p. ex. sources d'eau potable, groupes d'âge, utilisations/activités du site)	○ Santé humaine :	
		○ Écologique :	
		Indiquer les éléments de preuve disponibles ○ Détermination de l'exposition et des effets	
5.B	Y a-t-il eu un dépassement des critères de risques?	○ Oui	Confirmer la pertinence des voies.
		○ Non	
5.C	Les voies respectives sont-elles complètes ou potentiellement complètes à l'avenir?	○ Oui	
		○ Non	

Pour des renseignements supplémentaires:

Secrétariat du PASCF
Division des sites contaminés
Environnement et Changement climatique Canada
17e étage, Place Vincent Massey
351, boul. St-Joseph
Gatineau, QC, K1A 0H3
Courriel : fcsap.pascf@ec.gc.ca