

Code de Bonne Pratique 4

Atténuation stimulée des HCOV dans le sol en conditions anaérobique

Bruxelles Environnement

Contenu

1.	Introduction	4
2.	Description de la technique et des principes technologiques mis en œuvre	6
2.1.	HCOV dans le sol et l'eau souterraine.....	6
2.2.	Dégradation biologique des HCOV en conditions anaérobies.....	6
2.2.1.	Ethènes substitués	7
2.2.2.	Ethanes substitués	9
2.2.3.	Méthanes substitués	9
2.3.	Méthodes du traitement in situ en milieu anaérobie des HCOV	9
2.3.1.	Différents types de source de carbone (donneurs d'électrons).....	9
2.3.2.	Méthodes d'apport des sources de carbone (donneurs d'électrons).....	10
3.	Description des variantes	12
3.1.	Apport de source de carbone avec pompage de l'eau souterraine en aval.....	12
3.2.	Constitution d'une barrière aval de traitement par établissement d'un rideau de points d'injection directe	12
3.3.	Utilisation d'agents tensio-actifs	12
3.4.	Combinaison de l'atténuation stimulée en milieu anaérobie et aérobie.....	13
3.5.	Inoculation du sol par des souches bactériennes (bio-augmentation).....	13
4.	Objectifs poursuivis : panache versus noyau	15
5.	Polluants et situations les plus favorables (notions qualitatives)	16
6.	Examen a priori de la faisabilité technique	18
6.1	Choix d'une source de carbone (donneur d'électrons) si nécessaire.....	18
6.2	Caractéristiques limites du sol à traiter.....	18
6.2.1	Caractéristiques physiques du sol.....	18
6.2.2	Propriétés physico-chimiques du sol	19
6.2.3	Populations microbiennes et garniture enzymatique présentes dans le sol	22
6.3	Caractéristiques limites du site à assainir ou à gérer	22
7.	Examen spécifique de la faisabilité du traitement.....	24
7.1.	Paramètres du polluant, du sol et du site à mesurer	24
7.2.	Nécessité d'essais préalables au laboratoire.....	28
7.3.	Nécessité d'un test pilote et caractéristiques minimales de ce test.....	28
7.3.1.	Méthode « Push-Pull ».....	28
7.3.2.	Apport dans le sol avec observation dans le sol à petite échelle.....	29
8.	Description d'une installation type.....	31
8.1.	Infiltration active ou passive.....	31
8.2.	Infiltration (active ou passive) avec pompage et recirculation éventuelle	31
8.3.	Injection directe sous pression (direct push)	32
8.4.	Combinaison de l'atténuation stimulée en milieu anaérobie et aérobie.....	32
8.5.	Schéma conceptuel.....	33
9.	Descriptif de l'installation qui sera mise en place	34
10.	Limitation des incidences du projet sur l'environnement: odeurs, bruits, poussières	35
10.1.	Points à prendre en compte	35
10.2.	Risques liés à la nature dangereuse ou toxique des additifs utilisés	35
10.3.	Nuisances pour la qualité de l'air (en cas de pompage des gaz du sol)	36
10.4.	Risques d'incendie et explosion	36
10.5.	Risques de dissémination des polluants dans la nappe d'eau souterraine	36
10.6.	Nuisances acoustiques.....	37
10.7.	Risques pour les installations de captage voisines.....	37
10.8.	Conformités aux cadres légaux existants.....	37
11.	Supervision du traitement.....	39
11.1	Mesures de surveillance : dispositif type	39
11.1.1.	Infiltration active ou passive et injection directe	39

11.1.2.	Infiltration (active ou passive) avec pompage en aval avec éventuellement infiltration après traitement	39
11.1.3.	Combinaison de l'atténuation stimulée en conditions anaérobies et aérobies avec extraction des gaz de la zone insaturée en cas d'injection d'air dans le sol.....	40
11.2.	Mesures de supervision : paramètres de supervision du traitement et fréquences.....	41
12.	Rapportage, optimisation et mesures correctives.....	44
12.1	Rapportage.....	44
12.2	Mesures correctives et optimisation	45
13.	Mesures de validation et schéma décisionnel arrêt-prolongation du traitement	47
14.	Monitoring à long terme éventuel : dispositif et type de mesures.....	49
15.	Recommandation en matière de santé, sécurité et organisation.....	51
15.1	Check-liste succincte pour les entrepreneurs	51
15.2	Check-list succincte pour les experts en pollution du sol	54
16.	Sources bibliographiques.....	55

1. Introduction

La technique d'intervention s'intitule « Atténuation stimulée des HCOV dans le sol en conditions anaérobies.

Par HCOV on entend les composés organiques aliphatiques chlorés volatils:

- éthènes substitués : tétrachloroéthène (PCE), trichloroéthène (TCE), dichloroéthènes (DCE dont les isomères cis, trans, et 1,1), le chlorure de vinyle (VC) ;
- les éthanes substitués : trichloroéthane (TCA), DCA (dont les isomères 1,1 et 1,2), le chloroéthane (CA) ;
- les méthanes substitués : tétrachlorométhane (CT ou tétrachlorure de carbone), trichlorométhane (CF ou chloroforme), dichlorométhane (DCM) et chlorométhane (MC).

Elle vise principalement la prise en charge d'une pollution du sol et des eaux souterraines par la mise en place de conditions favorables à la dégradation biologique des HCOV par les micro-organismes du sol. Cette biodégradation étant plus effective et rapide en conditions anaérobies (pour les congénères fortement chlorés du moins), cette technique implique l'établissement de conditions réductrices dans le sol. L'objectif visé est la dégradation complète des HCOV pour donner naissance à des produits de réaction inoffensifs et naturellement présents dans le sol : CO₂, CH₄, C₂H₄ et Cl⁻. Elle peut être appliquée aussi bien dans les couches saturées que non saturées du sol, dans la mesure où les composés polluants sont disponibles pour les microorganismes du sol. La biodisponibilité des HCOV sous forme dissoute dans l'eau souterraine étant bien plus élevée que celle des HCOV présents dans les autres phases du sol (phase solide, phase gazeuse, phase libre), c'est surtout dans la nappe d'eau souterraine que les processus de biodégradation prendront place. La technique d'intervention est utilisée pour traiter les zones sources de pollution où les teneurs en polluants sont élevées et également les panaches de pollution où les pollutions sont diluées.

Les solvants chlorés présents sous forme de phase libre, plongeante (DNALP) ou piégée dans les pores du sol sont réfractaires à ce mode de traitement étant donné leur faible biodisponibilité. L'élimination de cette phase (par excavation, extraction des vapeurs du sol, pump and treat...) doit être opérée en préalable à la mise en œuvre de l'atténuation stimulée, sans quoi le temps de traitement peut être très long par suite de la libération progressive de polluants à partir de la phase de produit pur.

Le principe de cette technique faisant appel à des processus biologiques, par définition complexes, la faisabilité technique du traitement mérite une attention particulière.

Remarque

L'ordonnance du 5 mars 2009 relative à la gestion et à l'assainissement des sols pollués et ses arrêtés d'exécution stipulent dans plusieurs articles le respect des codes de bonnes pratiques. En ce qui concerne les codes de bonnes pratiques relatifs au traitement, l'expert en pollution du sol agréé peut, dans certains cas, par exemple sur proposition de l'entrepreneur en assainissement, déroger aux dispositions reprises dans les codes de bonnes pratiques, moyennant une argumentation dûment fondée. Dans ce cas, Bruxelles Environnement se réserve à tout moment le droit de demander des informations complémentaires ou de demander des investigations de terrains supplémentaires, sur base des dispositions reprises dans les codes de bonne pratique, s'il le juge nécessaire et pertinent.

Nous précisons que ce code est d'application pour tous travaux impliquant un traitement par assainissement ou par gestion de risque, y compris les traitements de minime importance, les traitements de durée limitée, les mesures de suivi et les mesures d'urgence .

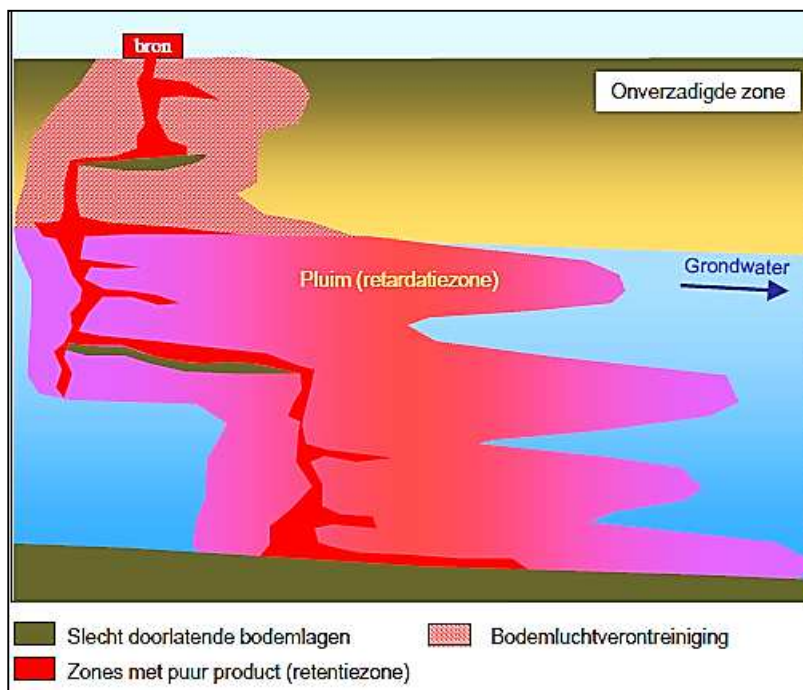
2. Description de la technique et des principes technologiques mis en œuvre

2.1. HCOV dans le sol et l'eau souterraine

Une fois dans le sol, les HCOV se distribuent entre les différentes phases du sol comme indiqué schématiquement dans la **figure 1** :

- Adsorbés sur la phase solide du sol (surfaces organiques et minérales) tant dans les couches saturées que les couches insaturées ;
- Sous forme de vapeur dans la phase gazeuse du sol, principalement dans les couches insaturées ;
- Sous forme dissoute dans l'eau souterraine (nappe et eau porale) et circulant par convection dans la couche aquifère. Ce mouvement est tributaire des phénomènes de retard suite à l'adsorption sur les particules du sol ;
- Sous forme de phase libre : mobile, dans la nappe ou reposant sur le toit d'une formation imperméable, immobile lorsque piégée dans les pores du sol (produit résiduel).

Figure 1 : représentation schématique des différentes formes d'HCOV présentes dans le sol (extrait de (Code van goedepraktijk in situ anaërobiebioremediatie van VOCL's, OVAM 2007)



L'estimation de la charge polluante d'un sol doit donc prendre en compte la somme des quantités présentes dans les différentes phases énumérées ci-dessus tant dans les couches saturées qu'insaturées du sol.

2.2. Dégradation biologique des HCOV en conditions anaérobies

En règle générale, les HCOV dans le sol sont relativement stables. Cependant, en conditions anaérobies ils peuvent être biodégradés par halo-respiration, lorsqu'ils jouent le rôle d'accepteurs d'électrons. Différentes catégories de bactéries peuvent être responsables de cette dégradation : bactéries méthanogènes, sulfidogènes, homoacétogènes, ...

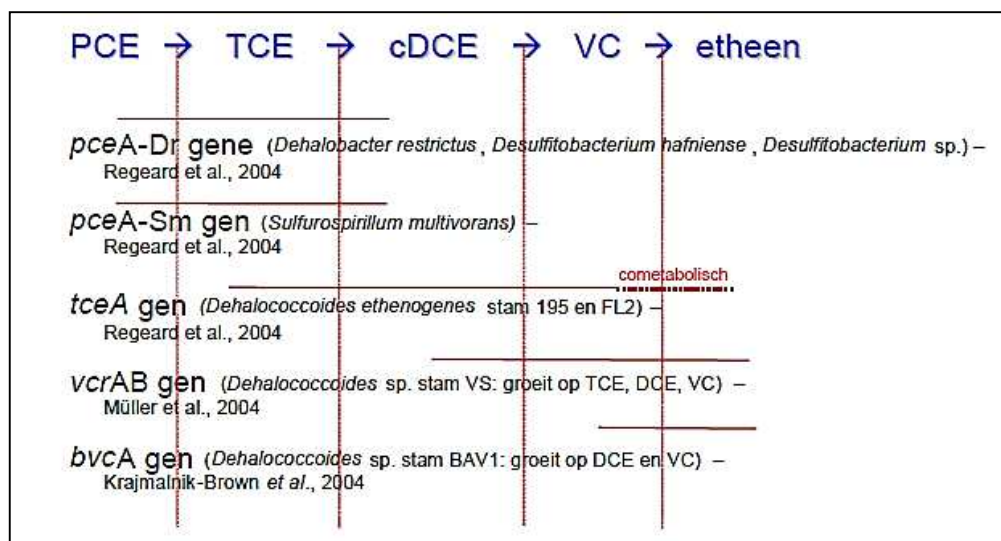
2.2.1. Ethènes substitués

En conditions anaérobies idéales, les éthènes substitués sont dégradés par halo-respiration selon la séquence suivante : PCE → TCE → cisDCE → CV → éthène. L'isomère cis du DCE étant formé de manière préférentielle.

Dans de nombreux cas cependant on observe que le processus s'arrête au stade cisDCE et CV qui s'accumulent dans le sol (phénomène de stagnation). Une telle situation est préoccupante dans la mesure où ces deux composés intermédiaires sont plus mobiles dans le sol et entraînent d'avantage de risque pour la santé que les composés d'origine, en raison de leurs propriétés cancérogènes..

La possibilité de poursuivre in-situ la biodégradation des HCOV jusqu'aux stades ultimes (éthène et ensuite éthane) est liée à la présence dans le sol de populations microbiennes possédant les gènes et donc les enzymes assurant l'exécution de l'ensemble des différentes phases du processus. La **figure 2** indique les gènes (et donc les enzymes) permettant de réaliser les différentes étapes de la halo-respiration ainsi que les types de microorganismes responsables de ces transformations.

Figure 2 : aperçu des différents gènes codant pour les enzymes déhalogénases nécessaires à la biodégradation des différents HCOV, extrait de (Code van goede praktijk in situ anaërobiebioremediatie van VOCL's, OVAM 2007)



Cette figure montre que les dernières étapes de la biodégradation concernant le cisDCE et le CV reposent sur la présence d'un nombre plus limité de types de microorganismes, ce qui rend cette étape en conditions d'anaérobie plus aléatoire. De plus, ces dernières étapes nécessitent la présence de conditions anaérobies strictes dans le sol.

Par contre, la biodégradation du CV s'effectue aisément et rapidement en conditions aérobies (à l'aide d'enzyme oxygénases) par un grand nombre de types de microorganismes.

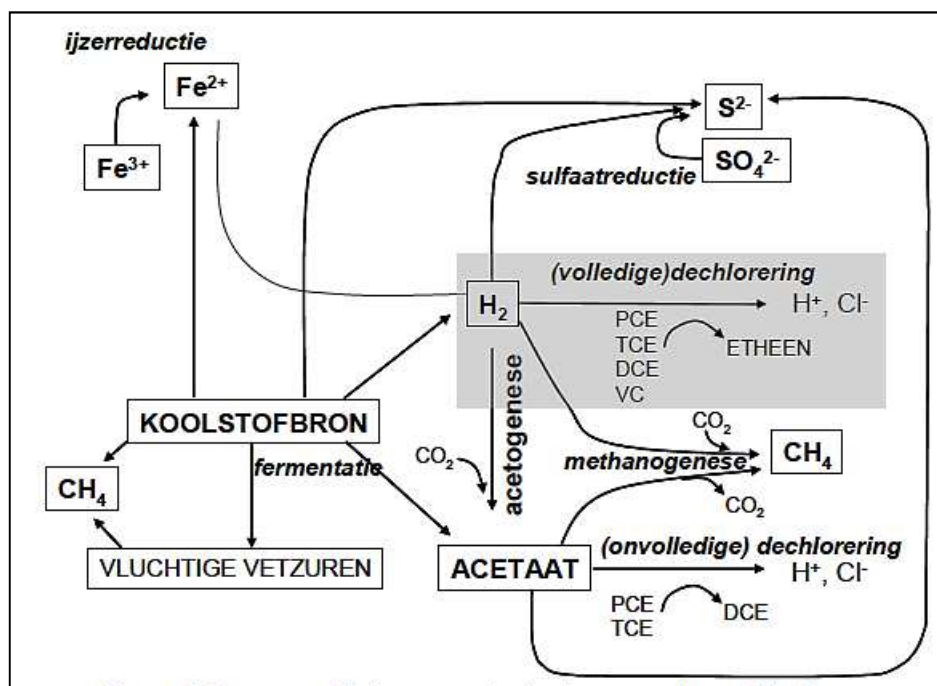
C'est pourquoi, lorsque les conditions le permettent, il est envisageable d'effectuer la biodégradation en deux étapes successives : la halo-respiration en conditions anaérobies jusqu'au stade cisDCE et CV et ensuite l'oxydation des composés intermédiaires en conditions aérobies. En

fonction de l'inertie rédox du sol (présence de fer, manganèse réduits, de sulfures, ...) cette modification du milieu peut être plus ou moins aisée, par aération du sol par exemple. Lorsque le traitement vise la décontamination d'un panache de pollution, le changement en conditions aérobies peut être réalisé en aval hydrogéologique du premier lieu de traitement.

La stimulation de l'activité microbienne responsable de la halorespiration en conditions anaérobies s'effectue principalement par addition au sol d'une source de carbone agissant comme donneur d'électrons.

La **figure 3**, ci-après, montre de manière schématique les différents processus pouvant prendre place après injection d'une source de carbone dans le sol.

Figure 3 : aperçu des différents processus pouvant prendre place dans le sol après addition d'une source de carbone, extrait de (Code van goede praktijk in situ anaërobiebioremediatie van VOCL's, OVAM 2007)



On remarque que plusieurs processus microbiens peuvent entrer en compétition avec la flore responsable de la halorespiration (cadre gris de la **figure 3**). Dans ce schéma, on remarque que :

- La flore acétotrophe (tels que *Desulfitobacterium* sp.) utilisant l'acétate comme donneur d'électron primaire est capable d'effectuer la première étape de la halorespiration allant jusqu'au stade cisDCE mais non les étapes ultérieures. Lorsque de fortes quantités d'acétates sont produites (par addition de mélasse et sa fermentation dans le sol, par exemple), cette flore peut concurrencer les bactéries capables d'effectuer la déhalogénéation complète ;
- La déhalogénéation complète est principalement le fait de consortiums bactériens contenant le *Dehalococcoides* sp. qui utilisent l' H_2 comme donneur d'électron. L' H_2 peut provenir de la fermentation de lactate dans le sol ou d'additif spécifiques à libération lente ;
- En cas d'apport excédentaire de sources de carbone, trop de H_2 est produit, ce qui stimule l'activité de la flore méthanogène, défavorisant ainsi l'activité des organismes responsables de la halorespiration. A cet égard, les propionates et butyrates dont la fermentation prend place si les pressions partielles de l'air du sol en $H_2 < 10^{-3,5}$ et $10^{-4,4}$ atm respectivement sont donc plus indiqués comme donneurs d'électron que l'éthanol et le lactate dont la fermentation se produit en présence de pressions partielles en H_2 supérieures de 2 à 3 ordres de grandeur ;

- La flore responsable de la réduction des sulfates peut également entrer en compétition pour l'H₂ en qualité de donneur d'électron. Des teneurs en sulfate peu élevées (<100 mg/l) sont donc favorables à une déchloration complète et rapide.

2.2.2. Ethanes substitués

En conditions anaérobies, les éthanes substitués sont dégradés par halorespiration selon la séquence suivante : TCA → DCA → CA → éthane.

Les enzymes responsables de ces différentes étapes de la halorespiration ne sont pas encore identifiés.

2.2.3. Méthanes substitués

Différents mécanismes seraient responsables de la dégradation de ces composés :

- Une dégradation séquentielle CT → CF → DCM → MC → par déchlorationhydrogénolytique avec un apport de 2 e⁻ et 1 H⁺ et libération d'un Cl⁻ par étape ;
- Une dégradation du CT pour former du monoxyde de carbone avec le chloroforme (CF) comme produit intermédiaire ;
- Une dégradation du CT en CS₂ suivant une substitution soufre – oxygène et passage par une étape CO₂.

Le DCM peut également jouer le rôle de source de carbone et d'énergie en milieu aérobie ou en milieu anaérobie par des bactéries réductrices de nitrates. Le produit intermédiaire serait le métaldéhyde (formol), produit cancérigène et doté de propriétés bactéricides.

2.3. Méthodes du traitement in situ en milieu anaérobie des HCOV

Ce traitement consiste en la stimulation de la biodégradation des HCOV présents dans le sol grâce à l'apport de source de carbone et éventuellement de nutriments au sein de la tâche de pollution.

Il est également possible d'injecter dans le sol des microorganismes spécialisés dans la déchloration réductrice, développés au laboratoire (bio-augmentation ou inoculation). Le but visé est d'activer le démarrage de la dégradation et garantir que les microorganismes capables d'assurer la halorespiration complète soient présents.

2.3.1. Différents types de source de carbone (donneurs d'électrons)

Parmi les différentes sources de carbone on peut citer :

- Les sels (esters) d'acides organiques : acétate, lactate, pyruvate ;
- La mélasse, les sous-produits amidonnés de pomme de terre, les sous-produits laitiers (lactosérum) ;
- Les alcools : méthanol, éthanol, ...

Certains composés sont utilisés comme source de carbone à libération lente. On peut citer :

- Des composants qui fournissent de hydrogène, ester de polylactate libérant progressivement du lactate et du glycérol ;
- Les huiles végétales émulsifiées (huile d'olive, huile de maïs ou de soja) jouant le rôle de solvant pour les composés aliphatiques chlorés en plus de celui de donneur d'électrons.

Le type et les quantités d'additifs carbonés à injecter dépendent largement des conditions prévalant spécifiquement sur le site. Elles doivent être précisées lors des tests de faisabilité et du test pilote.

Certains additifs tels que la mélasse, le lactosérum et l'acide lactique ont une action acidifiante sur le sol. Ils sont donc moins indiqués pour les sols à faible pouvoir tampon. Le pH optimal pour la halorespiration se situe dans la tranche de 6 à 8. Au-delà d'une valeur de 9 et en dessous de 5, le processus est négativement influencé.

2.3.2. Méthodes d'apport des sources de carbone (donneurs d'électrons)

2.3.2.1. Infiltration passive et active de solutions aqueuses

Les composés carbonés éventuellement accompagnés de nutriments sont apportés dans le sol par infiltration d'une solution aqueuse. Cette infiltration peut être soit passive, sous l'effet de la gravité, soit active, sous l'effet de l'application d'une pression.

Cette infiltration prend place à l'aide de drains horizontaux ou de puits verticaux. Les drains présentent l'avantage de permettre une infiltration sous les bâtiments (forages dirigés). Ils assurent un moins bon contrôle de l'endroit exact de l'infiltration et, en cas de panache de grande puissance, la mise en place de drains à différentes profondeurs est nécessaire.

2.3.2.2. Injection par « Direct Push »

Les composés carbonés (éventuellement accompagnés des nutriments) sont injectés sous pression directement dans le sol à l'aide d'une sonde qui est relevée progressivement lors de l'injection, effectuant un passage allant du dessous de la tache de pollution jusqu'à son sommet.

L'injection s'effectue selon un maillage de points d'injection couvrant la totalité de la zone à traiter.

2.3.2.3. Injection d'hydrogène dans le sol (procédé ISOC ou équivalent)

L'hydrogène (donneur d'électron) est injecté dans l'eau souterraine à partir d'un puits équipé d'une cellule creuse présentant des membranes en fibres. Le gaz pénètre dans l'eau souterraine directement sous forme dissoute, sans formation de bulles. L'absence de bulle empêche la perte d'H₂ par remontée vers le toit de la nappe et dispersion dans le sol.

Il y a peu (ou pas) de retour d'expérience disponible quant à l'utilisation de ce système en Région de Bruxelles-Capitale.

Par principe de précaution, l'utilisation d'un système d'injection d'un gaz aussi inflammable et volatile que le H₂ dans un territoire aussi densément peuplé et aménagé que la Région de Bruxelles-Capitale implique nécessairement la mise en œuvre d'un système d'extraction des gaz

dans la couche insaturée du sol. A cet égard, il est conseillé de se référer au code de bonne pratique n° 2 (pompage des gaz dans la couche insaturée du sol).

3. Description des variantes

Cinq variantes au traitement décrit ci-dessus peuvent être considérées.

3.1. Apport de source de carbone avec pompage de l'eau souterraine en aval

Dans ce traitement, l'infiltration (active ou passive) ou l'injection directe de source carbonée (accompagnée éventuellement de nutriments) est combinée à un pompage de l'eau souterraine en aval. L'objectif du pompage est d'accélérer la migration et la distribution des additifs.

L'eau pompée est acheminée vers une station de traitement avant d'être rejetée dans le réseau d'égouttage public ou infiltrée dans le sol après enrichissement en source de carbone.

Pour la mise en œuvre de cette variante, il convient de se référer au code de bonne pratique n°1 (pompage des fluides dans la zone saturée) et au code de bonne pratique auxiliaire n°1 (traitement de l'eau souterraine pompée).

Au cas où la station de traitement met en œuvre une étape de dégradation anaérobie des HCOV, l'eau souterraine traitée qui sera réinjectée contiendra une concentration importante de microorganismes capables de réaliser la halorespiration.

3.2. Constitution d'une barrière aval de traitement par établissement d'un rideau de points d'injection directe

Cette technique consiste en l'aménagement d'une zone réactive située en aval du noyau de pollution et sur le trajet du panache de pollution. Cette zone est constituée par injection directe d'additifs (source de carbone et éventuellement nutriments) selon un maillage serré de points, de façon à assurer une distribution uniforme sur l'ensemble du panache lors de son passage dans la zone biologiquement réactive. Le dosage des apports doit permettre le traitement du panache de contamination afin d'arrêter son extension vers l'aval hydrogéologique.

3.3. Utilisation d'agents tensio-actifs

Selon cette variante, il est fait usage d'agents tensio-actifs de manière à mettre en solution les HCOV présents sous forme libre (DNALP) et les rendre plus disponibles à l'action des microorganismes responsables de la halorespiration.

Compte tenu de la densité élevée des composés aliphatiques chlorés, le risque de migration verticale des composés ainsi mis en solution doit être pris en compte.

Les agents tensio-actifs utilisés doivent être de type biodégradable selon les prescriptions de la réglementation européenne en vigueur (règlement 648/2004 du 31 mars 2004 et ses modifications ultérieures) : biodégradabilité ultime > 60 % en 28 jours et biodégradabilité primaire > 80 % en 21 jours.

3.4. Combinaison de l'atténuation stimulée en milieu anaérobie et aérobie

La biodégradation du HCOV faiblement chlorés (CV et DCE) s'effectue aisément et rapidement en conditions d'aérobies (à l'aide d'enzyme oxygénases) par un grand nombre de types de microorganismes.

Dès lors, lorsque l'atténuation anaérobie ne se prolonge pas jusqu'aux derniers stades (éthène) et que les produits intermédiaires de l'halorespiration s'accumulent dans le sol (stagnation), il peut s'avérer intéressant d'effectuer la biodégradation en deux étapes successives :

- La halorespiration en conditions anaérobies jusqu'au stade cisDECE et CV ;
- Ensuite l'oxydation des composés intermédiaires en conditions aérobies. En fonction de l'inertie rédox du sol (présence de fer, manganèse réduits, de sulfures, ...) cette modification du milieu peut être plus ou moins aisée.

La transformation des conditions du sol de l'anaérobies vers l'aérobies peut être réalisée par l'injection d'air dans les couches insaturées du sol (injection passive ou active), par l'injection d'air dans les couches saturées du sol (sparging), par l'apport d'agents oxydants tels que les peroxydes, ...

En cas d'injection d'air dans le sol (couches insaturées et saturées), il est impératif de coupler à cette technique un dispositif de pompage de l'air du sol de manière à éviter la volatilisation et l'entraînement des composés chlorés vers la surface du sol ou vers les cavités présentes dans le sol (caves, puits, conduites, ...). Pour l'injection d'air et le pompage des gaz dans le sol, il est renvoyé au code de bonne pratique N° 2 (pompage des gaz dans la couche insaturée du sol).

Pour l'injection d'agents oxydants dans le sol (peroxydes), il est renvoyé au code de bonne pratique 3 (atténuation stimulée par oxydation chimique in-situ).

Lorsque le traitement vise l'atténuation d'un panache de pollution, le changement en conditions aérobies peut être réalisé en aval du lieu de traitement par voie anaérobie. Cette deuxième alternative, lorsque spatialement possible, est nettement moins coûteuse et aléatoire que le « redox switch ».

3.5. Inoculation du sol par des souches bactériennes (bio-augmentation)

Cette variante consiste à inoculer le sol avec des souches bactériennes reconnues comme capables d'effectuer la déchloration complète des HCOV (jusqu'au stade éthène) dans des conditions proches de celles prévalent dans le sol. Cette variante peut se révéler utile en cas de constat d'une déchloration anaérobie incomplète des HCOV. Ces microorganismes (ou plutôt consortium de microorganismes) peuvent provenir d'un laboratoire assurant leur production et garantissant leurs caractéristiques et origine. Ils peuvent également provenir de prélèvements de sol ou d'eau souterraine effectués dans un site où la déchloration complète a été mise en évidence.

Actuellement, il n'existe pas de retour d'expérience de l'utilisation de cette variante en Région de Bruxelles-Capitale.

Les prescriptions en matière de qualité et caractéristiques des inoculums (éventuellement de type OGM) et en matière d'utilisation de ces additifs dans le sol ne sont définies dans aucune des régions de Belgique, de sorte que cette variante ne sera pas traitée plus avant dans le cadre de ce code de bonne pratique.

4. Objectifs poursuivis : panache versus noyau

La biodégradation anaérobie in-situ stimulée des HCOV s'applique d'avantage au panache de pollution plutôt qu'au noyau.

En effet, au niveau du noyau, les teneurs en HCOV peuvent être élevées et ainsi se montrer toxiques pour les bactéries responsables de la halorespiration. Par ailleurs, les bactéries capables de poursuivre la halorespiration jusqu'aux derniers stades (VC et éthène) sont plus sensibles à la toxicité des fortes teneurs en HCOV de sorte que dans les zones de noyau la halorespiration ne va pas au-delà du stade DCE.

Par ailleurs, dans les zones de noyau, les HCOV les moins solubles (PCE et TCE) sont souvent présents sous forme de phase libre (DNALP) peu bio-disponible pour les microorganismes, de sorte que [le traitement](#) de ces zones par voie biologique ne peut être réalisé dans des délais réalistes.

L'addition de composés carbonés dans la zone de noyau peut avoir pour effet de mettre en solution les HCOV présents sous forme de phase libre (DNALP) et les rendre ainsi disponibles pour une biodégradation. Les composés jouant ce rôle de « détergent » peuvent être, par exemple, les huiles végétales, l'éthanol injecté fortes doses (éthanol flushing), ...

5. Polluants et situations les plus favorables (notions qualitatives)

La technique d'atténuation stimulée par voie anaérobie peut être appliquée pour le traitement d'une pollution du sol et de la nappe aquifère par les HCOV avec des résultats favorables lorsque les circonstances suivantes sont rencontrées :

- Le composé chloré à traiter n'est pas présent au niveau du noyau de pollution à de trop fortes teneurs (toxicité des hautes teneurs en HCOV) et est réparti de manière homogène ;
- Le composé chloré n'est pas présent au niveau du noyau de pollution sous forme de phase libre peu accessible (DNALP) piégée dans les pores du sol, par exemple. Compte tenu de la faible biodisponibilité de cette phase libre, le temps nécessaire à la biodégradation peut s'avérer trop long sans mise en œuvre de techniques complémentaires (variante usage d'agents tensio-actifs par exemple) ;
- La source de pollution est éradiquée de sorte que l'arrivée du polluant dans le sol est définitivement interrompue ;
- Sol présentant une bonne perméabilité et une bonne capacité d'infiltration ;
- Sol de composition homogène : absence de couches et de lentilles de texture différentes, absence de voies de circulation préférentielles résultant de la présence d'impétrants et d'infrastructures enterrées ;
- Teneurs en composés carbonés suffisantes dans le sol et l'eau souterraine (source de carbone) mais pas trop importantes (favorisant la flore de la méthanogénèse) ;
- Faibles teneurs en composés réductibles dans l'eau souterraine : nitrates, Fe^{3+} , Mn^{4+} , sulfates, ... dont la réduction entraîne une consommation supplémentaire de donneurs d'électrons ;
- Bonne perméabilité du solPrésence dans le sol des microorganismes assurant une halorespiration rapide et complète ;
- Données acquises lors de l'étude de caractérisation suffisamment complètes et détaillées ;
- Absence dans le sol d'impétrants sensibles susceptibles d'être impactés par la mise en place de conditions réductrices (précipitation des sulfures métalliques) ;
- Profondeur limitée de la pollution à traiter sans quoi les budgets d'injection risquent d'augmenter.

Lorsque le traitement implique la mise en œuvre de la variante atténuation stimulée + pompage de l'eau souterraine en aval, les aspects favorables supplémentaires suivants sont à prendre en compte :

- Absence dans l'eau souterraine qui sera pompée de polluants autres que les HCOV, requérant un traitement avant rejet ou infiltration dans le sol (teneurs >NA).

Lorsque le traitement implique la mise en œuvre de la variante atténuation in-situ avec addition d'agent tensio-actifs et/ou solvants, les aspects favorables supplémentaires suivants sont à prendre en compte :

- Absence d'éléments enfouis susceptibles d'être abîmés par suite de la présence de ces additifs : conduites, cuves et fondations revêtues de goudrons isolants, ...

Lorsque le traitement implique la séquence atténuation des composés fortement chlorés en conditions anaérobies suivie par l'atténuation stimulée des composés faiblement chlorés en conditions aérobies, les aspects favorables supplémentaires suivants sont à prendre en compte :

- En cas de « Redox –Switch », sol à faible pouvoir redox tampon ;
- En cas de traitement aérobie localisé en aval : sol facilement oxydable ou étant naturellement en conditions aérobies : faibles teneurs en sulfures organiques, en composés carbonés dissous, ...

6. Examen à priori de la faisabilité technique

6.1 Choix d'une source de carbone (donneur d'électrons) si nécessaire

Comme indiqué ci-dessus différentes sources possible de carbone peuvent être apportées au sol pour mettre en place les conditions réductrices et jouer le rôle de donneur d'électrons. Le choix de cette source dépend des paramètres suivants :

- La teneur naturelle du sol en composés organiques dégradables et la nécessité d'un apport complémentaire ;
- Le type de polluant et les quantités présentes ;
- Les quantités estimées d'additif nécessaires et le prix de l'additif ;
- La mobilité du réactif ;
- Le pouvoir acidifiant de l'additif ;
- La richesse du sol et de l'additif en nutriments (N et P) et la nécessité éventuelle d'apporter un supplément en sels d'azote (nitrate d'ammonium, urée, ...) et de phosphore de manière à approcher le ratio C : N : P de 100 :10 :1 (ou 100 :5 :1 selon les sources bibliographiques) ;
- L'effet « détergent » désiré ou non pour la mise en solution de la phase libre ;
- L'effet « slow release » recherché ou non afin de diminuer le nombre et la fréquence des applications ;
- Les caractéristiques du sol : pH, teneurs en métaux lourds, teneurs en composés réductibles teneurs en matière organique ;
- La géologie et l'hydrogéologie locale.

6.2 Caractéristiques limites du sol à traiter

6.2.1 Caractéristiques physiques du sol

La composition du sol influence la possibilité de migration de l'additif apporté. Les formations à faible perméabilité : limons et argiles (conductivité hydraulique $< 5 \times 10^{-7}$ m/s) où l'infiltration, la migration et la distribution des additifs sont, par définition, lents, apparaissent comme peu indiqués pour un traitement par atténuation stimulée. Pour pallier cette faible perméabilité, un système d'apport dense des additifs est nécessaire (faible équidistance entre les puits/draines d'infiltration ou les points d'injection).

Des tests d'infiltration dans les couches de sol visées par le traitement sont indispensables de manière à confirmer que le nombre de points d'infiltration nécessaires (volume de solution d'additif à apporter par unité de temps et de surface/débit d'un point d'infiltration) est réaliste du point de vue technique et économique.

Un dispositif de pompage de l'eau souterraine visant à activer la circulation de l'eau au sein de la tâche de pollution est également obligatoire, ce qui induit une augmentation supplémentaire des coûts du traitement.

Les mesures de conductivité hydrauliques réalisées avant le traitement peuvent donner une idée trop optimiste de la capacité de circulation de l'eau dans le sol, compte tenu du colmatage des

pores pouvant se produire suite à l'addition de composés carbonés dans le sol. Cette chute de conductivité peut résulter des effets suivants :

- Croissance de la biomasse bactérienne dans les pores du sol ;
- Dépôts de sulfures métalliques précipités ;
- Occupation des pores du sol par les gaz produits (méthane, ...).

6.2.2 Propriétés physico-chimiques du sol

6.2.2.1. PH du sol

Les processus de la halorespiration prennent place de manière optimale à des valeurs de pH allant de 6 à 8. Le pouvoir tampon du sol doit en outre compenser le pouvoir acidifiant de certains donneurs d'électrons apportés (mélasse, lactosérum, acides organiques).

6.2.2.2. Teneur en composés carbonés (donneurs d'électrons)

Afin d'assurer la dégradation anaérobie complète des HCOV dans l'eau souterraine, les sources de carbones disponibles sous forme dissoute (mesurées en tant que DCO ou demande chimique en oxygène) doivent être au minimum de 60 mg/l. Selon d'autres sources bibliographiques, les sources de carbone disponibles dans l'eau souterraine devraient atteindre 100 à 300 mg/l.

L'ajustement des doses de composés carbonés à apporter pour stimuler la halorespiration doit tenir compte deux paramètres supplémentaires :

- Une DOC trop élevée favorise l'activité de la flore responsable de la méthanogénèse, ce qui inhibe l'activité des microorganismes responsables de la halorespiration ;
- Le pouvoir Redox tampon du sol doit être pris en compte. Ce dernier repose sur la présence de composés réductibles (accepteurs d'électrons) tels que le Fe^{3+} , Mn^{4+} , le nitrate, le sulfate et l'oxygène dissous. Le **tableau 1** présenté ci-dessous donne un exemple de la quantité de donneur d'électrons (en ce cas, de lactate) nécessaire pour répondre aux besoins en électrons des composés naturellement présents dans un sol.

Tableau 1 : exemple de demande en donneur d'électron (lactate) pour un sol compte tenu de la teneur en accepteurs d'électrons dans l'eau souterraine

Accepteur d'électron	Teneur dans l'eau souterraine mg/l	Demande en électrons en eq/m ³ de sol *	Demande correspondante en lactate en g/m ³ de sol *
O ₂	1	0,04	0,3
NO ₃ ⁻	75	2	15
Fe ³⁺	0.5	16,3	115
SO ₄ ²⁻	200	5,5	41,5
Total		24	172

Extrait de (Code van goede praktijk in situ anaërobebioremediatie van VOCL's, OVAM 2007).

*La transformation est faite sur la base d'une teneur en eau du sol de 33 % (v/v)

6.2.2.3. Caractéristiques de l'eau souterraine

Il est possible d'obtenir a priori une évaluation du potentiel d'atténuation naturelle anaérobie des HCOV dans les eaux souterraines, à partir de la valeur des paramètres physico-chimiques relevés sur le site. Selon la méthode proposée par l'US-EPA en 1998, l'évaluation quantitative des paramètres repris dans le **tableau 2** ci-après selon l'échelle d'interprétation donnée dans le **tableau 3**, permet de se prononcer sur l'existence d'une biodégradation dans les conditions prévalant actuellement dans le sol impacté.

Tableau 2 : paramètres à mesurer dans l'eau souterraine et valeur du score à attribuer pour l'évaluation du potentiel d'atténuation. Extraite de: US-EPA, 1998, Technical protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in groundwater

Analysis	Concentration in Most Contaminated Zone	Interpretation	Value
Oxygen*	<0.5 mg/L	Tolerated, suppresses the reductive pathway at higher concentrations	3
Oxygen*	>5 mg/L	Not tolerated; however, VC may be oxidized aerobically	-3
Nitrate*	<1 mg/L	At higher concentrations may compete with reductive pathway	2
Iron II*	>1 mg/L	Reductive pathway possible; VC may be oxidized under Fe(III)-reducing conditions	3
Sulfate*	<20 mg/L	At higher concentrations may compete with reductive pathway	2
Sulfide*	>1 mg/L	Reductive pathway possible	3
Methane*	<0.5 mg/L	VC oxidizes	0
	>0.5 mg/L	Ultimate reductive daughter product, VC Accumulates	3
Oxidation Reduction Potential* (ORP) against Ag/AgCl electrode	<50 millivolts (mV)	Reductive pathway possible	1
	<-100mV	Reductive pathway likely	2
pH*	5 < pH < 9	Optimal range for reductive pathway	0
	5 > pH > 9	Outside optimal range for reductive pathway	-2
TOC	> 20 mg/L	Carbon and energy source; drives dechlorination; can be natural or anthropogenic	2
Temperature*	> 20°C	At T >20°C biochemical process is accelerated	1
Carbon Dioxide	>2x background	Ultimate oxidative daughter product	1
Alkalinity	>2x background	Results from interaction between CO ₂ and aquifer minerals	1
Chloride*	>2x background	Daughter product of organic chlorine	2
Hydrogen	>1 nM	Reductive pathway possible, VC may accumulate	3
Hydrogen	<1 nM	VC oxidized	0
Volatile Fatty Acids	> 0.1 mg/L	Intermediates resulting from biodegradation of more complex compounds; carbon and energy source	2
BTEX*	> 0.1 mg/L	Carbon and energy source; drives dechlorination	2
Tetrachloroethene		Material released	0
Trichloroethene*		Material released	0
		Daughter product of PCE	2 ^{a/}
DCE*		Material released	0
		Daughter product of TCE	2 ^{a/}
		If cis is > 80% of total DCE it is likely a daughter product	
		1,1-DCE can be chemical reaction product of TCA	
VC*		Material released	0
		Daughter product of DCE	2 ^{a/}
1,1,1-Trichloroethane*		Material released	0
DCA		Daughter product of TCA under reducing conditions	2
Carbon Tetrachloride		Material released	0
Chloroethane*		Daughter product of DCA or VC under reducing conditions	2
Ethene/Ethane	>0.01mg/L	Daughter product of VC/ethene	2
	>0.1 mg/L		3
Chloroform		Material released	0
		Daughter product of Carbon Tetrachloride	2
Dichloromethane		Material released	0
		Daughter product of Chloroform	2

* Required analysis. a/ Points awarded only if it can be shown that the compound is a daughter product (i.e., not a constituent of the source NAPL).

Tableau 3 : interprétation des paramètres physico-chimiques mesurés dans l'eau souterraine en termes de potentiel d'atténuation naturelle des solvants chlorés

Score	Interpretation
0 to 5	Inadequate evidence for anaerobic biodegradation* of chlorinated organics
6 to 14	Limited evidence for anaerobic biodegradation* of chlorinated organics
15 to 20	Adequate evidence for anaerobic biodegradation* of chlorinated organics
> 20	Strong evidence for anaerobic biodegradation* of chlorinated organics
*reductive dechlorination	

Si la variante pompage de l'eau souterraine en aval et infiltration des eaux pompées et traitées est envisagée, les paramètres physico-chimiques critiques de l'eau souterraine suivants peuvent être pris en compte (extrait du document de l'OVAM « Code van Goede Praktijk – Pump and Treat ») afin de limiter les risques de colmatage des ouvrages d'infiltration :

Tableau 4 : paramètres critiques des eaux d'infiltration

Paramètres de l'eau de réinjection	Unité	Valeur limite à ne pas dépasser
Teneur en Fer	mg/l	0.1
Teneur en Manganèse	mg/l	0.1
Teneur en Méthane	mg/l	0.1
Teneur en Oxygène	mg/l	0.01
Teneur en carbonate (indice de saturation de Langeleir)	-	0
Biomasse ou AOC (carbone organique assimilable)	µgAOC/l	10
Matières en suspension - MFI (Membrane filter index) *	s/l ²	3
* Par définition un MFI de 1 correspond à la vitesse de colmatation observée sur une membrane de filtration (<50µm) standard de surface 1,38.10 ⁻³ m ² , avec une chute de pression de 2 bars, pour une eau de viscosité de 1,3.10 ⁻³ Pa.s, et une vitesse d'infiltration de 1m/h		

6.2.3 Populations microbiennes et garniture enzymatique présentes dans le sol

Comme indiqué dans la **figure 2**, la déchlorination anaérobie des composés hautement chlorés (PCE et TCE) peut être réalisée par une grande variété de microorganismes. Ce n'est pas le cas de la déchlorination anaérobie des composés moins chlorés DCE et CV, qui est le fait d'un nombre beaucoup plus restreint de types bactéries (*Dehalococcoides* sp.) qui doivent en outre coder pour les enzymes *vcrAB* et *bvcA*.

De ce fait, la présence dans l'eau souterraine de bactéries du genre *Dehalococcoides* ainsi que la détection des gènes *vcrAB* et *bvcA* fournit une bonne indication que la flore bactérienne présente naturellement sur le site est en mesure d'effectuer la halorespiration complète pourvu que les conditions optimales soient mises en place (biostimulation). Ces paramètres sont mesurés dans les échantillons d'eau souterraine à l'aide de la technique d'analyse PCR (Polymérase Chain Reaction).

On considère qu'une population de *Dehalococcoides* sp. supérieure à 10⁴ cellules/ml d'eau souterraine fournit un bon indice de la capacité de la flore bactérienne du sol à assurer la halorespiration complète. Une population variant de 10 à 4 cellules/ml est capable d'assurer la halorespiration complète pourvu qu'une biostimulation soit mise en œuvre et que les enzymes *vcrAB* et *bvcA* soient détectés. La mesure d'une population plus faible amène à douter que la flore actuelle du sol soit en mesure d'assurer la halorespiration complète.

6.3 Caractéristiques limites du site à assainir ou à gérer

- **Taille du site** : le site à prendre en charge doit être suffisamment vaste pour accueillir le dispositif de stockage et préparation des additifs, d'injection/infiltration, de pompage et récupération de l'eau souterraine (si la variante pompage est mise en œuvre), ainsi que le dispositif éventuel de traitement de l'eau pompée ;
- **Environnement sensible** : il n'existe pas sur le site et dans les alentours immédiats des personnes ou des activités susceptibles d'être gênées par les opérations d'injection et éventuellement de pompage: bruit des compresseurs, pompes et de la station de traitement, odeurs, risques d'émissions de vapeurs, ...

- Encombrement du sous-sol : présence peu importante sur le site ou dans les alentours, d'infrastructures enterrées constituant autant de voies préférentielles pour la circulation des additifs sous forme liquide : réseau de distribution du gaz, de l'eau, de l'électricité, des fibres optiques, égouttage, ..., ou au contraire constituant des barrières à cette circulation (réseau du métro et des chemins de fer, ...) ;
- Absence d'infrastructures enterrées sensibles à l'établissement de conditions fortement réductrices : dépôts de sulfures métalliques, ...

7. Examen spécifique de la faisabilité du traitement

7.1. Paramètres du polluant, du sol et du site à mesurer

Les **tableaux 5a, 5b et 5c** suivants présentent les paramètres qui doivent être mesurés et/ou quantifiés avant le lancement d'un programme de traitement d'un cas de pollution du sol par les HCOV au moyen de l'atténuation anaérobie. Ces tableaux représentent une check liste des données devant être acquises, soit au cours des phases d'études successives (étude de reconnaissance, étude détaillée, étude de risques) soit lors de la rédaction du projet, ou avant le lancement des tests de laboratoire et du test pilote, **soit avant l'exécution des travaux ne nécessitant pas de projet spécifique**. Dans ces tableaux distinction est faite entre deux niveaux d'exigence :

- Paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut ;
- Paramètres dont la mesure ou l'estimation est utile.

Tableau 5a : paramètres des polluants à mesurer avant lancement d'un traitement par atténuation stimulée en conditions anaérobies

Paramètres	Moyen de mesure	Commentaire
Source de pollution active ou éradiquée	Etude historique, examen des lieux	Disponible au terme de l'étude de reconnaissance
Teneurs dans le sol		
Teneurs dans le sol : délimitation verticale et horizontale des taches de pollution (contour teneurs > NI et teneurs > NA et > teneurs objectifs)	Forages, prélèvement et analyses d'échantillons de sol et tracé des délimitations (krigeage)	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Teneurs dans le sol : délimitation verticale et horizontale des taches de pollution (contour teneurs > NI et teneurs > NA et > teneurs objectifs)	Forages, prélèvement et analyses d'échantillons de sol et tracé des délimitations (krigeage)	Pour les polluants générés par la biodégradation
Estimation de la charge polluante résiduelle	Sur base des volumes estimés et des teneurs moyennes	Pour tous les polluants concernés par la chaîne de biodégradation.
Teneurs dans l'eau souterraine		
Teneurs dans l'eau souterraine : délimitation verticale et horizontale des taches de pollution (contour teneurs > NI et teneurs > NA et > teneurs objectifs)	Placement de piézomètres, prélèvement et analyse d'échantillons, tracé des délimitations (krigeage)	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Teneurs dans l'eau souterraine : délimitation verticale et horizontale des taches de pollution (contour teneurs > NI et teneurs > NA et > teneurs objectifs)	Placement de piézomètres, prélèvement et analyse d'échantillons, tracé des délimitations (krigeage)	Pour les polluants générés par la biodégradation
Estimation de la charge polluante résiduelle	Sur base des volumes estimés et des teneurs moyennes	Pour tous les polluants concernés par la chaîne de biodégradation.
Facteur de retard	Valeurs du Kd et porosité efficace de l'aquifère	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration longitudinale du polluant (progression du panache selon la direction d'écoulement de l'eau souterraine)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et verticale Ou utilisation de modèles numériques tels que MODFLOW, ...	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration longitudinale avérée du polluant (progression du panache selon la direction d'écoulement de l'eau souterraine)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Vitesse de migration latérale dans le sol (extension latérale du panache lors de sa migration)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et verticale Ou utilisation de modèles numériques tels que MODFLOW, ...	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration latérale avérée du polluant (extension latérale du panache lors de sa migration)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Vitesse de migration verticale dans le sol (extension verticale du panache lors de sa migration)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et verticale Ou utilisation de modèles numériques tels que MODFLOW, ...	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration verticale avérée du polluant (extension verticale du panache lors de sa migration)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Présence d'une phase libre (DNAPL)		
Nature chimique de la phase libre	Prélèvement et analyse d'au moins 3 échantillons de la phase libre piégée ou plongeante	
Extension latérale de la phase libre	Observation de la présence d'une phase libre piégée ou plongeante à partir d'un réseau de piézomètres/sondages - campagnes de mesures à l'aide du système MIP (Géoprobe) ou de mesures de gaz dans le sol	
Mesure de l'épaisseur de la couche piégée ou plongeante	Mesure de l'épaisseur de la couche piégée ou plongeante dans un réseau de piézomètres/sondages d'observation.	
Estimation du volume de la phase libre	Estimation à partir des mesures d'épaisseur dans les piézomètres/sondages	
Mobilité de la phase libre	Tests de récupération sur site et estimation préalable par calcul ou utilisation de modèles	
Paramètres globaux (toutes phases confondues)		
Estimation de la charge polluante résiduelle	Sur base des volumes estimés et des teneurs moyennes	Pour tous les polluants concernés par la chaîne de biodégradation.
Chloride Index	Sur base des teneurs mesurées dans les différentes phases pour les différents composés chlorés	Permet de suivre le progrès de la déchlorination anaérobie.
	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut	
	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est utile	

Tableau 5b: paramètres du sol à mesurer avant lancement d'un traitement par atténuation stimulée en conditions anaérobies

Paramètre	Moyen de mesures	Commentaires
Paramètres hydrodynamique du sol		
Stratigraphie du sol : couches(s) aquifères, aquitard, aquicludes, ...	Cartes géologiques et géotechniques, sondages et description des couches de sol	Disponible au terme de l'étude détaillée
Piézométrie de ou des aquifère(s), gradients hydrauliques, sens d'écoulement, caractère confiné ou semiconfiné	Cartes géologiques et géotechniques, sondages et description des couches de sol, placement de piézomètres, mesures piézométriques et calage en altimétrie	Disponible au terme de l'étude détaillée
Puissance de la couche aquifère ou des couches aquifères	Cartes géologiques et géotechniques, sondages et description des couches de sol	Disponible au terme de l'étude détaillée
Capacité d'infiltration du sol par injection dans la couche insaturée et/ou dans la couche saturée (puits, drains ou tranchées)	Test d'infiltrations en continu, ou par intermittence sur le terrain	Avec prise en compte de l'influence des adjuvants sur la capacité d'infiltration du sol (stabilité de la structure, ...)
Variations saisonnières des niveau piézométriques	Suivi piézométrique lors de campagnes successives	
Caractéristiques de l'eau souterraine		
Paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine: pH, Eh, conductivité électrique, O ₂	Mesure sur le terrain	Disponible au terme de l'étude détaillée
Paramètres chimiques : mesure des produits de dégradation intermédiaires, Ethène, Ethane, méthane, TOC, Nitrate, Fe(II), Mn(II), sulfates,	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	OVAM 2007
Paramètres chimiques complémentaires : H ₂ dissous, acétate + autres acides gras volatiles, carbone inorganique dissous, Cl ⁻ , nitrite, sulfite,	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	OVAM 2007 (permet d'établir le potentiel de biodégradation anaérobique)
Examen par PCR : population de Dehalococcoides, enzymes bvcA et vcrA	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	OVAM 2007 (permet d'établir le potentiel d'halorespiration complète)
En cas de variante injection/infiltration + pompage en aval de l'eau souterraine		
Paramètres physico-chimiques de l'eau pompée et traitée : teneurs en Fer, Manganèse, Arsenic, Carbonates, particules en suspension, risque de colmatation	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	Voir Code de Bonne Pratique Auxiliaire 1 (Traitement de l'eau souterraine pompée)
Paramètres chimique de l'eau pompée :	Teneurs en composés > NA qui devront être traitées avant rejet ou infiltration	Voir Code de Bonne Pratique Auxiliaire 1 (Traitement de l'eau souterraine pompée)
	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut	
	= paramètre dont la mesure ou l'estimation est utile	

Tableau 5c : paramètres du site d'intervention à évaluer avant lancement d'un traitement par atténuation stimulée en conditions anaérobies

Paramètre	Moyen de mesures et d'observation	Commentaires
Présence d'impétrants dans le sol au droit du site et ses alentours immédiats	Consultation des concessionnaires des réseaux d'impétrants, Commune,	Réalisé lors des études de reconnaissance et détaillées
	Détection sur le terrain : préfourilles, passage au détecteur CAT, ...	Réalisé lors des études de reconnaissance et détaillées
Présence de cibles aériennes sensibles au bruit, odeurs, vapeurs, ... Sur le site et dans ses alentours immédiats	Inventaire	
Présence de cibles sensibles au niveau de l'aquifère traité et les autres aquifères sous-jacents	Inventaire des installations de captage proches, étude hydrogéologique	Réalisé lors de l'étude détaillée
Accessibilité du site aux équipements et surface disponible suffisante	Inventaire	
Si apport par infiltration, présence d'infrastructure susceptibles d'être impactées par une remontée de la nappe	Inventaire des infrastructures sensibles : voiries, parkings, ...	
Présence d'infrastructures susceptibles d'être endommagées suite à l'établissement de conditions anérobies strictes	Inventaire	
En cas d'injection/infiltration de solutions contenant des agents jouant le rôle de solvants (éthanol, huiles végétales) ou tensio-actifs		
Présence d'infrastructures susceptibles d'être menacées par les agents solvants ou tensio-actifs (revêtements goudronnés, ...)	Inventaire	
	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut	
	= paramètre dont la mesure ou l'estimation est utile	

Ces tableaux appellent les commentaires suivants :

- Source de pollution éradiquée ou non: une certitude quant à l'absence de source de pollution résiduelle doit donc être obtenue avant le lancement d'une opération par atténuation stimulée ;
- Les teneurs en produits de dégradation intermédiaires dans l'eau souterraine sont à déterminer avant le lancement des opérations. D'une part, en raison de leur potentiel de toxicité et de migration (CV) et, d'autre part, afin d'estimer en $t=0$ le degré d'avancement dans la séquence de biodégradation ;
- A cet égard, l'indice de chloration permet de suivre de manière quantitative l'avancement de la déchloration des composés chlorés.

Il se calcule comme suit :

Pour les éthènes substitués

Indice chloration = $(4 \times \text{PCE} + 3 \times \text{TCE} + 2 \times \text{DCE} + \text{VC}) / (\text{PCE} + \text{TCE} + \text{DCE} + \text{VC} + \text{éthène} + \text{éthane})$, les différents termes étant exprimés en $\mu\text{mole/l}$.

Une valeur d'indice de 3 à 4 indique que peu de produits intermédiaires ont été formés et la déchloration n'est pas importante. Une valeur d'indice de 2 à 3 indique l'accumulation de DCE (stagnation) résultat d'une déchloration incomplète. Une valeur d'indice < 2 indique que la déchloration complète est possible.

Pour les éthanes substitués

Indice chloration = $(3 \times \text{TCA} + 2 \times \text{DCA} + \text{CA}) / (\text{TCA} + \text{DCA} + \text{CA} + \text{éthane})$.

Pour le méthane substitué, l'indice est d'interprétation délicate vu que le CT et le CF peuvent être dégradés suivant d'autres mécanismes que la halorespiration ;

- Teneurs en composés polluants dans la phase gazeuse du sol, utilisées, notamment pour la délimitation d'une phase libre dans le sol : pour le prélèvement des échantillons de l'air du sol, il est renvoyé au code de bonnes pratiques n° 1, 2 et 3 de Bruxelles Environnement portant sur les prises d'échantillons de sol, d'eau souterraines, de sédiments et d'air du sol ;
- Pour la mise en œuvre de la variante infiltration/injection + pompage de l'eau souterraine en aval, les tests de pompage de l'eau du sol n'apparaissent pas comme indispensables vu que l'objectif poursuivi est l'augmentation du gradient hydraulique et donc de la vitesse de migration des additifs apportés et non pas l'interception de la totalité du panache de pollution (une test pilote pourrait être envisagé) ;
- Concernant la mesure des teneurs dans le sol des polluants susceptibles d'être libérés et migrer vers la nappe d'eau souterraine par suite de la mise en place de conditions réductrices (Arsenic, ...), le soin est laissé à l'expert d'estimer si les résultats analytiques obtenus au terme de l'étude de reconnaissance et détaillée sont suffisants pour apprécier de manière qualitative ce risque ou si au contraire des données supplémentaires sont à acquérir : teneurs minimales, maximales, moyennes, distribution spatiale, avant la mise en œuvre des tests de laboratoire et des tests pilotes.

7.2. Nécessité d'essais préalables au laboratoire

Compte tenu du nombre important de facteurs pouvant intervenir sur la faisabilité technique (et financière) du traitement par atténuation stimulée en conditions anaérobies (type et propriétés physico-chimiques de sol, flore bactérienne existante, type de polluant, adéquation entre le type d'additif choisi et le polluant, mode d'apport de l'additif, quantités à appliquer, ...), une première étape de test de la faisabilité technique et de mise au point apparaît comme indispensable avant la mise en œuvre du traitement en vraie grandeur.

L'expert trouvera dans [l'AGRB du 29/03/2018 fixant le contenu type du projet de gestion du risque, du projet d'assainissement, de la déclaration préalable au traitement de durée limitée et des modalités d'affichage du traitement de durée limitée](#), les conditions rendant nécessaire les argumentations et le contenu d'un test pilote.

Il appartient à l'expert de se prononcer sur le contenu de cette première étape, après prise en compte de la durée et du coût de chacune des étapes et de son degré de représentativité et de la complexité du cas à traiter (pollution complexe HCOV + métaux lourds, ...):

- Test de laboratoire → test pilote → mise en œuvre ;
- Test pilote → mise en œuvre ;
- Test de laboratoire → mise en œuvre.

Dans tous les cas de figure, l'étape de test de laboratoire sera requise en cas d'inoculation du sol par des organismes reconnus comme capables de réaliser une halorespiration complète, produits par laboratoire ou issus d'un site où la halorespiration complète a été observée.

Les tests de laboratoire (ou tests en microcosmes) font appel à des récipients hermétiquement fermés remplis d'échantillons représentatifs de sol + eau souterraine, soumis à différentes conditions (T° , types et quantités de sources de carbone, ajustement du pH, ...). A intervalles de temps réguliers, durant plusieurs mois, le progrès de la halorespiration est suivi par l'analyse des teneurs en composés chlorés (composés d'origine et produits de dégradation intermédiaires et finaux). Ces résultats sont comparés à différents tests de contrôle :

- Atténuation microbienne = 0, où l'activité microbienne est inhibée par addition d'un bactéricide ;
- Atténuation naturelle sans stimulation : sans apport d'additif.

Le nombre de répétitions est suffisant pour assurer que les résultats sont reproductibles.

7.3. Nécessité d'un test pilote et caractéristiques minimales de ce test

Les tests pilote peuvent être menés de deux manières :

- Méthode « Push-Pull » ;
- Apport dans le sol (injection/infiltration) et observation sur le site à une petite échelle.

7.3.1. Méthode « Push-Pull »

Selon cette méthode, le test consiste à pomper au niveau d'un piézomètre situé dans la tache de pollution une quantité donnée d'eau souterraine. Après examen des caractéristiques chimiques et physico-chimiques de l'eau pompée, celle-ci est conditionnée par ajout d'une solution de l'additif à tester (source de carbone, nutriment avec agent correcteur du pH, ...) avec éventuellement un agent traceur (par exemple Br⁻) permettant d'estimer le facteur de dilution. Au bout d'un intervalle de temps choisi, l'eau souterraine est à nouveau pompée et analysée. Les résultats d'analyse de début et de fin de test sont comparés afin d'estimer le progrès de la halorespiration dans les conditions du sol. Il est également possible de suivre l'évolution de l'atténuation à l'aide de prélèvements réalisés dans des piézomètres d'observation situés directement en aval du piézomètre test.

Par rapport à la deuxième méthode exposée ci-après, cette technique présente l'avantage de pouvoir observer l'avancement de la réaction directement sans attendre le délai de migration des additifs vers les piézomètres d'observation. La durée du test est ainsi réduite. Les risques de biais dans le test pilote, par exemple, suite à la présence de voies d'écoulement préférentielles sont également négligeables.

7.3.2. Apport dans le sol avec observation dans le sol à petite échelle

Cette méthode consiste à apporter au sol les additifs jugés nécessaires par injection/infiltration au niveau d'un ou plusieurs points/puits situés dans la tache de pollution et à observer à intervalles réguliers à partir de piézomètres de contrôle situés à faible distance, l'évolution de la qualité des eaux souterraines ainsi que la consommation des matières apportées et éventuellement l'enrichissement de la flore bactérienne utile à la déchloration.

Les paramètres à définir lors de l'exécution des tests pilote sont donnés dans le **tableau 6** reproduit ci-après.

Tableau 6 : paramètres et contenu des tests pilotes pour le traitement par atténuation stimulée en conditions anaérobies

Rubrique	Paramètres et quantité à mesurer	Commentaires
En cas d'un test par Push and Pull		
Description du dispositif mis en œuvre	Description des éléments du dispositif : puits d'infiltration/pompage (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête), piézomètres d'observation éventuels (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête),	La localisation des différents éléments du dispositif fait l'objet de figures à joindre en annexe 6 du Projet d'assainissement.
Paramètres du traitement	Composition de la solution d'additif : type et teneur en source de carbone, nutriments (N et P), agent correcteur de pH, agent tensio-actif éventuel, traceur. Débits et pression d'infiltration. Calendrier infiltration/pompage	
Paramètres mesurés dans l'eau souterraine avant le traitement et lors du suivi, dans l'eau pompée et dans les piézomètres d'observation éventuels	Teneurs en HCOV (d'origine et produits de dégradation intermédiaires), éthène, éthane, méthane. pH, Eh, T°, teneurs en O ₂ . Teneurs en agents tensio-actifs éventuels. TOC. Teneurs en source de carbone ajoutée, Nitrate, Nitrite, sulfate, sulfite, soufre, phosphate. Fer (II) et total. Manganèse (II) et total. Chlorure. Teneur en traceur.	
Autres paramètres de l'eau souterraine avant et après traitement	Analyse de l'eau souterraine par PCR : teneurs en Dehalococcoides sp. et en enzymes bvcA et vcrA	A exécuter éventuellement si doute concernant la possibilité d'une halorespiration complète
Paramètres calculés	Consommation en composés carbonés et en nutriments. Bilan de masse : diminution de la charge polluante dans l'eau souterraine, Indice de chloration, quantité de composé carbonés nécessaire pour éliminer la charge polluante totale. Débits d'infiltration optimum. Dilution (traceur). Estimation du temps de traitement	
En cas d'un test par infiltration/injection + piézomètres d'observation à petite échelle		
Description du dispositif mis en œuvre	Description des éléments du dispositif : puits d'infiltration/point d'injection et piézomètres d'observation (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête), dispositif de mesure des débits infiltrés	La localisation des différents éléments du dispositif fait l'objet de figures à joindre en annexe 6 du Projet d'assainissement.
Paramètres du traitement	Composition de la solution d'additif : type et teneur en source de carbone, nutriments (N et P), agent correcteur de pH, agent tensio-actif éventuel, traceur. Débits et pression d'infiltration	
Paramètres mesurés dans l'eau souterraine avant le traitement et lors du suivi dans les piézomètres d'observation	Teneurs en HCOV (d'origine et produits de dégradation intermédiaires), éthène, éthane, méthane. pH, Eh, T°, teneurs en O ₂ . Teneurs en agents tensio-actifs éventuels. TOC. Teneurs en source de carbone ajoutée, Nitrate, Nitrite, sulfate, sulfite, soufre, phosphate. Fer (II) et total, Manganèse (II) et total. Chlorure. Teneur en traceur.	
Paramètres éventuels de l'eau souterraine avant et après traitement	Analyse de l'eau souterraine par PCR : teneurs en Dehalococcoides sp. et en enzymes bvcA et vcrA	A exécuter éventuellement si doute concernant la possibilité d'une halorespiration complète
Paramètres calculés	Rayon d'action des dispositifs d'infiltration/injection. Vitesse de migration de l'eau souterraine et des additifs. Consommation en composé carbonés et en nutriments. Bilan de masse : diminution de la charge polluante dans l'eau souterraine, Indice de chloration, quantité de composé carbonés nécessaire pour éliminer la charge polluante totale. Débits d'infiltration optimum. Dilution (traceur). Estimation du temps de traitement	
Conclusions du test pilote		
	Faisabilité technique du traitement : nombre de puits d'infiltration/de points d'injection, durée du traitement, volumes et compositions des solutions d'additif, nécessité d'un pompage en aval, ...	
	Dimensionnement du dispositif de traitement en vraie grandeur : nombre et distance entre les points d'injection/puits d'infiltration, débits d'apport des solutions d'additifs, durée projetée du traitement, Définition des paramètres de supervision.	
	Bilans de masse et résultats attendus : masse de polluants biodégradés, masse et teneurs en polluants résiduelles	

Le **tableau 6** appelle les commentaires suivants :

- Le tableau constitue une checklist des paramètres devant être **a priori** pris en compte, mesurés et rapportés lors de l'exécution du test pilote. Il appartient à l'expert de définir et justifier les modalités de l'exécution du test pilote, sur la base de la checklist proposée ;
- La durée du test pilote et la fréquence des mesures des paramètres fera l'objet d'une proposition de l'expert.

8. Description d'une installation type

Un dispositif de traitement par atténuation stimulée en conditions anaérobies comprend typiquement les éléments suivants.

8.1. Infiltration active ou passive

- Un dispositif de préparation et conditionnement de la solution d'additifs (source de carbone + éventuellement nutriments, correcteur de pH, tensio-actifs, ...) accompagnée éventuellement d'une unité de stockage des réactifs ;
- Un ou plusieurs puits d'infiltration (ou plus rarement drains d'infiltration) localisés en amont hydrogéologique ou au sein de la tache de pollution. Les puits sont équipés de crépines assurant un apport d'additif sur la totalité de la puissance de la tâche. Les distances entre les puits d'infiltration sont calculées pour amener l'additif dans l'entièreté de la tache ;
- En cas d'injection sous pression, une unité de mise sous pression (pompe ou compresseur) équipée de manomètre et d'un système de régulation des pressions et de détection des fuites ;
- Un dispositif de régulation de l'infiltration pouvant prendre des formes très variées : capteurs électriques (niveau max –niveau min) dans les puits d'infiltration connectés à un coffret électrique de régulation des pompes, systèmes à horlogerie, systèmes séquentiels assurant le fonctionnement en séquence de différentes zones d'infiltration, ... ;
- Un dispositif de mesure des débits et des volumes injectés.

8.2. Infiltration (active ou passive) avec pompage et recirculation éventuelle

En plus des infrastructures décrites ci-dessus, le dispositif comporte :

- Un ou plusieurs puits ou (drains) de pompage, localisés en aval hydrogéologique du panache, entre celui-ci et toute cible sensible éventuelle. L'objectif poursuivi peut être uniquement d'accélérer la vitesse de migration de l'eau souterraine et de distribution des additifs ou d'intercepter le panache de pollution en voie d'atténuation. Dans ce dernier cas, les puits doivent avoir la profondeur suffisante pour être en mesure d'intercepter la totalité de la puissance du panache à traiter. Les distances entre les ouvrages d'interception et l'extension du dispositif sont calculées pour intercepter le panache dans toute son extension ;
- Un dispositif de pompage de l'eau interceptée : pompe immergée dans les puits de pompage, pompe à vide connectée à un ou plusieurs puits, ... De manière à réduire les nuisances acoustiques, les unités de pompage aériennes peuvent être situées dans des enceintes isolées (caissons, containers, ...) ;
- Un dispositif de régulation du pompage pouvant prendre des formes très variées : systèmes à flotteurs pour les pompes immergées, capteurs électriques (niveau max –niveau min) dans les puits, capteurs dans les différents éléments de la station de traitement, connectés à un coffret électrique de régulation des pompes, systèmes à horlogerie, systèmes séquentiels assurant le fonctionnement en séquence de différentes zones de pompage, ... ;
- Des conduites de collecte et d'amenée de l'eau pompée reliant les pompes à la station de traitement. Ces conduites préférentiellement enterrées sont équipées de clapets anti-retour et de débitmètres permettant de suivre en instantané et en cumulé les volumes pompés au niveau des puits individuels ou au niveau des pompes ;

- Des points permettant l'échantillonnage de l'eau pompée, aménagés au niveau des puits individuels, des conduites d'amenée, à l'entrée de la station de traitement et au niveau du point de rejet (ou en amont du dispositif d'infiltration) ;
- Une station de traitement des eaux pompées.

N.B :un code de bonnes pratiques distinct traite des opérations de traitement en surface des eaux et autres fluides pompés du sol (CBP AUX 1)

8.3. Injection directe sous pression (direct push)

- Un dispositif de préparation et conditionnement de la solution d'additifs à injecter avec éventuellement une unité de stockage des additifs ;
- Une machine mobile assurant l'injection du réactif directement dans le sol dans un maillage de points d'injection, par fonçage ou battage d'une canne d'injection crépinée permettant l'injection sous pression dans la tranche de sol désirée. L'injection peut être réalisée en mode unique (injection unique sur toute la puissance de sol à traiter) ou en mode séquentiel (injection dans des tranches de sol successives par relevage de la canne) ;
- Un dispositif de régulation des débits injectés et de la pression d'injection et un dispositif d'arrêt en urgence en cas de résurgence de la solution d'additif en surface ou de chute de pression (injection dans une voie préférentielle) ;
- La grandeur de la maille du réseau de points d'injection est déterminée sur base des résultats du test pilote.

8.4. Combinaison de l'atténuation stimulée en milieu anaérobie et aérobie

L'obtention de conditions aérobies pour l'exécution de la deuxième phase de l'atténuation peut être réalisée en aval de la zone où a pris place phase anaérobie ou au même endroit mais ultérieurement (Redox Switch).

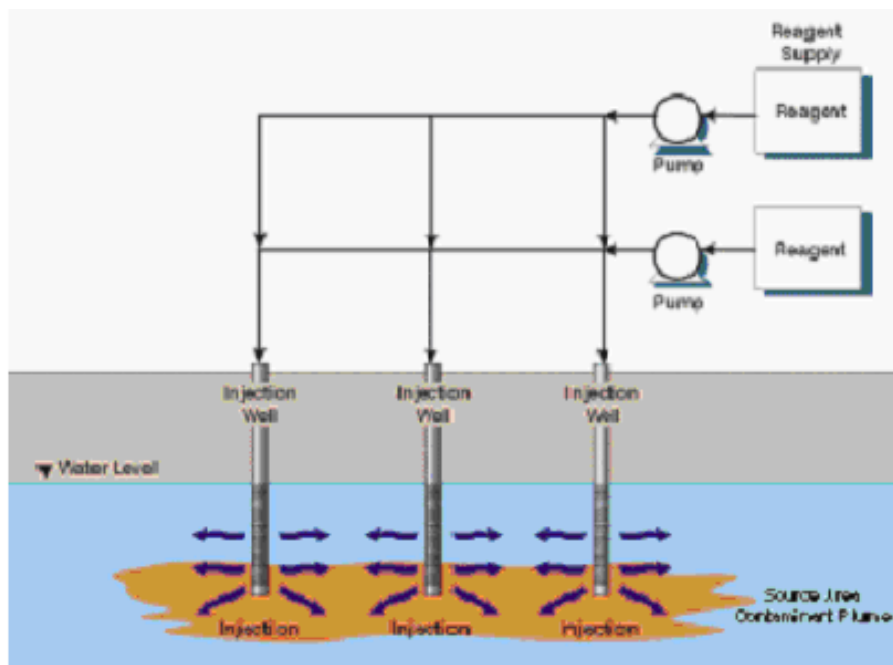
Dans les deux cas, l'obtention des conditions aérobies est obtenue par l'injection d'air dans les couches insaturées du sol, par l'injection d'air dans les couches saturées du sol (sparging), par l'injection de composants qui alimentent de l'oxygène, par l'infiltration/injection d'agents oxydants tels que les peroxydes, ...

En cas d'injection d'air dans le sol (couches insaturées et saturées), un dispositif de pompage des gaz du sol est impérativement mis en place de manière à éviter la volatilisation et l'entraînement des composés chlorés vers la surface du sol ou vers les cavités présentes dans le sol (caves, pertuis, conduites, ...). Pour l'injection d'air et le pompage des gaz dans le sol, il est renvoyé au code de bonne pratique (Pompage des gaz dans la couche insaturée du sol).

Pour l'injection d'agents oxydants dans le sol (peroxydes), il est renvoyé au code de bonne pratique 3 (atténuation stimulée par oxydation chimique in-situ).

8.5. Schéma conceptuel

La figure ci-dessous présente le schéma d'une unité d'oxydation chimique des polluants in situ (<http://emis.vito.be/techniekfiche/concept-situ-chemical-oxidation?language=en>)



9. Descriptif de l'installation qui sera mise en place

Le dispositif qui sera mis en place dans le cadre **des travaux** sera décrit en fournissant, au minimum, les indications suivantes reprises dans le **tableau 7**. L'installation sera décrite par l'expert à l'aide d'un schéma technique de type similaire à celui représenté à la **figure 3**.

Tableau 7 : données à fournir concernant le système de traitement à mettre en place

Partie du dispositif	Élément	Données du descriptif	Commentaire
Composition de la solution d'additifs	Source de carbone	Type de composé carboné, quantités prévues sur base de la charge polluante et des accepteurs d'électrons présents	Sur base des tests de laboratoire ou des tests pilote
	Autres additifs	Nutriments N et P (types, concentrations teneurs), agents régulateur du pH (types, teneurs et quantités), agents tensio-actifs éventuels (types, teneurs et quantités).	Sur base des tests de laboratoire ou des tests pilote
	Dispositif de préparation des solutions infiltrées/injectées	Localisation. Description	
Dispositif d'apport	Infiltration passive ou active	Localisation et distance entre les différents puits, profondeur des tronçons aveugles et crépinés, diamètre et type de tubage, dimensions des ouvertures de la crépine, type et position du massif filtrant, type et position du bouchon imperméabilisant (bentonite), type de tête de puits(étanche si infiltration sous pression), protection de la tête(trapillon de visite, tube en acier cadenassé, ...). Position des manomètres, des débitmètres. Débits d'infiltration. Pression d'infiltration.	
	Injection directe	Localisation et distance entre les points d'injection. Profondeur de l'injection, description de l'équipement (tubage, crépine, ...), mode d'injection (unique ou séquentiel). Pression et débits d'injection. Quantité injectée par point.	
Système de régularisation	Régulation du traitement	Système d'infiltration/injection travaillant en continu ou par période, repères de déclenchement ou d'interruption selon les niveaux de la nappe	
Objectif poursuivi	Traitement de la couche insaturée du sol (noyau)	Objectifs de teneurs à atteindre de manière durable dans le sol, extension actuelle en X, Y et Z de la contamination. Durée prévue	
	Traitement de la couche saturée du sol	Objectif de teneurs à atteindre de manière durable dans la nappe et éventuellement le sol (frange capillaire), extension actuelle en X, Y et Z de la contamination. Durée prévue	
Dispositif anti-nuisances	Mesures anti-bruit	Type de mesure prévue : isolation acoustique des pompes,	
	Mesures anti-odeur	Eventuelles pour les composés volatiles (acétones, composés aromatiques)	
Variante : infiltration/injection d'additifs + pompage en aval de l'eau souterraine			
Dispositif de pompage de l'eau souterraine		Localisation et distance entre les différents puits de pompage. Pour tous les puits : profondeur des tronçons aveugles et crépinés, diamètre et type de tubage, dimensions des ouvertures de la crépine, type et position du massif filtrant, type et position du bouchon imperméabilisant (bentonite), protection de la tête(trapillon de visite, tube en acier cadenassé, ...). Position des débitmètres. Débits de pompage.	
Pompes		Types et localisations des pompes : pompe à vide, ... connectées à 1 ou plusieurs puits. Niveau de la dépression mise en œuvre. Mode opérationnel : continu - intermittent	
Dispositif de collecte des fluides pompés	Conduite d'aménées de l'eau pompée	Type, dimensions et disposition des conduites d'aménées, dispositif anti-gel, dispositif anti vandalisme et contrôle des risques de déflagration. Localisation et dispositif pour la prise d'échantillons de contrôle. Localisation des débitmètres.	
Station de traitement des fluides pompés	Cette rubrique fait l'objet d'un autre code de bonne pratique		
Variante : Combinaison atténuation stimulée en conditions anaérobiques et aérobies			
Réactifs oxydants à injecter		Type de réactif : air injecté, ORC, peroxydes, ... Quantités et fréquence	
Dispositif d'injection si différent de celui de la phase 1	Infiltration passive ou active	Localisation et distance entre les différents puits, profondeur des tronçons aveugles et crépinés, diamètre et type de tubage, dimensions des ouvertures de la crépine, type et position du massif filtrant, type et position du bouchon imperméabilisant (bentonite), type de tête de puits(étanche si infiltration sous pression), protection de la tête(trapillon de visite, tube en acier cadenassé, ...). Position des manomètres, des débitmètres. Débits d'infiltration. Pression d'infiltration.	
	Injection directe	Localisation et distance entre les points d'injection. Profondeur de l'injection, description de l'équipement (tubage, crépine, ...), mode d'injection (unique ou séquentiel). Pression et débits d'injection. Quantité injectée par point.	
Dispositif de pompage des gaz du sol si injection d'air		Localisation et distance entre les différents puits de pompage. Pour tous les puits : profondeur des tronçons aveugles et crépinés, diamètre et type de tubage, dimensions des ouvertures de la crépine, type et position du massif filtrant, type et position du bouchon imperméabilisant (bentonite), protection de la tête(trapillon de visite, tube en acier cadenassé, ...). Position des débitmètres et des manomètres. Pressions et débits de pompage.	
Station de traitement des gaz pompés	Cette rubrique fait l'objet d'un autre code de bonne pratique		

10. Limitation des incidences du projet sur l'environnement: odeurs, bruits, poussières

10.1. Points à prendre en compte

En fonction de l'occupation actuelle et future du site et de ses alentours immédiats, les points suivants sont à prendre en compte :

- Risques liés à la nature toxique/dangereuse des additifs utilisés (en cas d'utilisation de peroxyde pour la variante combinaison des conditions anaérobies/aérobies) ;
- Nuisances pour la qualité de l'air au niveau du chantier et de ses alentours immédiats : teneurs en gaz nocifs et odeurs, poussières (en cas de pompage des gaz du sol pour la variante combinaison des conditions anaérobies/aérobies) ;
- Risques d'incendies et d'explosion ;
- Risques de dissémination des composés entrant dans la composition des solutions d'additifs ;
- Nuisances acoustiques ;
- Risques pour les installations de captage voisines.
- Risques de mobilisation et de dissémination de la contamination via l'eau ou l'air du sol

10.2. Risques liés à la nature dangereuse ou toxique des additifs utilisés

En règle générale, les composants entrant dans la composition des solutions d'additifs ne revêtent pas un caractère dangereux ou toxique (lactates, émulsions d'huiles, ...). Cependant, en cas d'utilisation de peroxyde, de permanganates, ... sous forme liquide pour la variante combinaison des conditions anaérobies/aérobies, il y a lieu de tenir compte de la nature dangereuse et toxique de ces composés. Les risques à prendre en compte découlent du stockage, de la manipulation et de la mise en œuvre de composés dangereux et/ou toxiques. Ces risques doivent être identifiés et évalués lors de la préparation du projet.

Les risques liés à la nature de la substance utilisée peuvent être estimés à l'aide de la FDS (Fiche de Donnée de Sécurité) ou en Anglais MSDS (Material Safety Data Sheets). Cette fiche, dont le contenu est régi par la réglementation européenne REACH, donne les propriétés physiques, les données de toxicité, d'écotoxicité, les risques liés au stockage, les données de réactivité, ... des substances individuelles ainsi que les mesures de protection à prendre en préalable et les mesures correctives à prendre en cas d'accident.

Les phrases de risques et de sécurité reprises sur l'emballage des réactifs donnent également des indications sur les risques liés à la formulation des substances présentes sur le chantier.

Les mesures particulières à prendre lors de l'exécution du chantier doivent être décrites lors de la rédaction du projet, **ou doivent être évaluées avant l'exécution des travaux ne nécessitant pas de projet spécifique**. Ces mesures doivent, entre autres, porter sur :

- Le stockage et la manipulation des substances dangereuses ou toxiques : risque de dispersion, fuites, ... ;
- La neutralisation des substances quittant le site ;
- Risque d'exposition pour les personnes : inhalation, contact dermiques ;

- Mesures de protection des personnes : EPI (Equipement de Protection Individuelle), mesure de détection dans l'air ambiant ;
- Information et formation des personnes amenées à travailler près de ou avec ces substances dangereuses ou toxiques.

10.3. Nuisances pour la qualité de l'air (en cas de pompage des gaz du sol)

Les gaz extraits du sol en cas de traitement par injection d'air (combinaison atténuation stimulée en conditions anaérobies/aérobies) peuvent être à l'origine d'une contamination de l'air ambiant en cas de non étanchéité du dispositif de collecte et transport vers la station de traitement. De manière à prévenir le risque de dissémination de vapeurs nocives ou odorantes vers les cibles sensibles susceptibles d'être présentes sur le site et ses abords immédiats, l'étanchéité des installations fera l'objet d'un soin particulier.

Comme précisé dans la section traitant de la supervision du traitement, lors du lancement des opérations, et deux semaines après, un examen de la qualité de l'air à proximité des installations de traitement des gaz extraits sera effectué si des cibles sensibles sont présentes à proximité immédiate du chantier (zones d'habitat, écoles, ...). En cas de plaintes répétées des riverains concernant la présence d'odeurs résultant du traitement, une campagne de mesures de la qualité de l'air devra également intervenir.

Les rejets gazeux résultant du traitement des gaz extraits doivent faire l'objet d'un examen périodique.

L'émission de poussières n'est pas susceptible de résulter de la mise en opération d'un dispositif d'extraction des gaz du sol.

10.4. Risques d'incendie et explosion

L'extraction de gaz du sol accompagnant l'injection d'air dans le sol peut amener à la création de conditions explosives dans les conduites et réservoir abritant les gaz pompés (vapeurs de composés volatils enrichies en oxygène). Des explosimètres doivent donc être mis en place à différents endroits du dispositif : au niveau des canalisations de collecte des gaz extraits avant passage dans les pompes, au niveau des installations de traitement ... Ces explosimètres doivent être reliés à un système d'alerte, ouverture automatique et entrée d'air et, si nécessaire, arrêt du fonctionnement en cas de dépassement de la valeur de 10 % de la LEL (Lower Explosive Limit).

10.5. Risques de dissémination des polluants dans la nappe d'eau souterraine

Le risque de dispersion non contrôlée des composés polluants (et leurs produits de dégradation) présents dans l'eau souterraine en résultats de l'infiltration/injection de solutions d'additifs sont à prendre en compte. Ces risques se posent de manière plus aigüe en cas d'apport d'agents tensio-actifs ou de composés carbonés jouant le rôle de solvants (émulsions d'huiles végétales, éthanol, ...) en présence d'une phase libre (DNAPL).

10.6. Nuisances acoustiques

Des nuisances acoustiques pour les personnes résidant aux alentours du chantier peuvent résulter du fonctionnement des pompes et d'un générateur d'électricité dans les zones non raccordées à un réseau.

Les mesures aptes à minimiser ces nuisances doivent être prises :

- Mise en place des installations à une distance raisonnable des zones d'habitat ;
- Régulation des débits afin d'éviter les phénomènes de cavitation au niveau des pompes ;
- Mise en place des installations bruyantes dans des caissons ou conteneurs acoustiquement bien isolés ;
- Régulation des horaires de fonctionnement afin d'éviter les nuisances nocturnes en cas de fonctionnement intermittent.

10.7. Risques pour les installations de captage voisines

Les installations de captage utilisées à des fins de distribution publique doivent être considérées comme des cibles prioritaires. Les autres installations de captage utilisées à des fins privées doivent également être prises en compte si elles risquent d'être impactées suite aux opérations de traitement.

Ces installations sont susceptibles d'être impactées par suite du traitement insuffisant de l'eau souterraine au niveau du noyau de pollution et/ou du panache migrant vers les sites de captage. Ces risques de migration sont accentués par suite de l'emploi d'agents tensio-actifs ou de composés carbonés jouant le rôle de solvants capables de mobiliser les éventuelles phases libres de HCOV dans le sol.

La vérification de la qualité des eaux souterraines en aval de la zone d'intervention doit donc impérativement être effectuée.

10.8. Conformités aux cadres légaux existants

Pour les nuisances atmosphériques, les normes à l'émission pour les gaz rejetés dans l'atmosphère sont données dans la circulaire « Info-fiche Sol » de février 2011.

Les normes de qualité de l'air à l'immission dans l'air extérieur pour mesurer l'importance de la contamination résultant de la mise en service d'un dispositif de pompage des gaz du sol ne sont pas disponibles en Région de Bruxelles-Capitale. Dans une première approche, les teneurs mesurées en polluants volatils sont comparées aux valeurs TCL disponibles sur la plateforme S-Risk © (Substance data sheets, <https://s-risk.be/documents>). En cas de dépassement de celles-ci, une vérification de l'étanchéité des installations s'impose. Dans les zones sujettes à un niveau élevé de pollution atmosphérique ambiante (voiries à trafic intenses, zones industrielles, ...), une opération de vérification sera déclenchée si le niveau de contamination de l'air à proximité des installations dépasse le niveau de contamination ambiant mesuré sur une période de 24 h.

En matière de perception d'odeurs, il n'existe pas de seuil légal en vigueur pour les différents composés en Région de Bruxelles-Capitale. Une vérification de l'étanchéité des installations sera nécessaire en cas de plaintes répétées des riverains.

En matière de nuisances acoustiques, le niveau de bruit tolérable généré par les chantiers de traitement de la nappe aquifère par pompage est réglementé par l'Ordonnance du 17.07.1997 et son arrêté d'exécution du 24 novembre 2002 relatif à la lutte contre les bruits et les vibrations par les installations classées. Dans les zones à niveau de bruit ambiant élevé (voiries, zones industrielles actives, ...), il convient de comparer le niveau mesuré de l'impact des installations au niveau de bruit ambiant.

Les impositions renseignées au permis d'environnement prédélivré doivent également être respectées..

11. Supervision du traitement

11.1 Mesures de surveillance : dispositif type

11.1.1. Infiltration active ou passive et injection directe

Le dispositif de supervision repose sur les éléments suivants :

- Un réseau de piézomètres visant à suivre l'évolution de la piézométrie et des paramètres de l'eau souterraine en cours de traitement : au sein de la tache de pollution, en amont et en aval hydrogéologique de celle-ci. Dans tous les cas de figure, en cas de cibles sensibles identifiées en aval hydrogéologique de la tache de pollution (limites parcellaires, ouvrages de captage), des piézomètres d'observation seront établis entre la tache de contamination et les cibles identifiées. Des piézomètres de contrôle seront également placés latéralement par rapport au panache de pollution de manière à surveiller l'extension latérale de celui-ci. Les piézomètres établis au sein du noyau de pollution doivent permettre de contrôler la migration verticale de la pollution. ;
- Un dispositif permettant de mesurer les débits et les volumes cumulés des additifs infiltrés ;
- Un dispositif permettant de contrôler les pressions d'infiltration des additifs (en cas d'infiltration active).

11.1.2. Infiltration (active ou passive) avec pompage en aval avec éventuellement infiltration après traitement

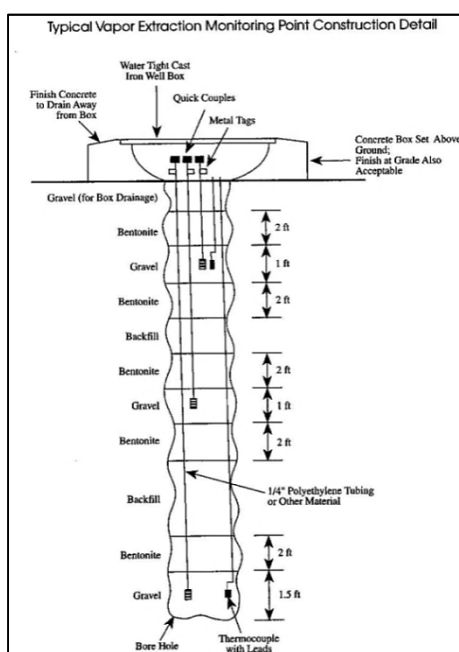
- Un réseau de piézomètres visant à suivre l'évolution de la piézométrie et des paramètres de l'eau souterraine en cours de traitement : au sein de la tache de pollution, en amont et en aval hydrogéologique de celle-ci. Dans tous les cas de figure, en cas de cibles sensibles identifiées en aval hydrogéologique de la tache de pollution (limites parcellaires, ouvrages de captage), des piézomètres d'observation seront établis entre la tache de contamination et les cibles identifiées. Des piézomètres de contrôle seront également placés latéralement par rapport au panache de pollution de manière à surveiller l'extension latérale de celui-ci. Les piézomètres établis au sein du noyau de pollution doivent permettre de contrôler la migration verticale de la pollution ;
- Un dispositif permettant de mesurer les débits et les volumes cumulés des additifs infiltrés ;
- Un dispositif permettant de contrôler les pressions d'infiltration des réactifs (en cas d'infiltration active) ;
- Un dispositif permettant de mesurer les débits et volumes cumulés de l'eau souterraine pompée au niveau des puits individuels ou groupes de puits (si reliés à la même pompe) ;
- Des points d'échantillonnage de l'eau pompée situés à la sortie des puits individuels ou groupes de puits (si reliés à la même pompe), à l'entrée de la station de traitement et à la sortie de celle-ci.

11.1.3. Combinaison de l'atténuation stimulée en conditions anaérobies et aérobies avec extraction des gaz de la zone insaturée en cas d'injection d'air dans le sol

Outre le dispositif déjà décrit au point 11.1.1., en cas d'injection d'air dans le sol (couche saturée ou insaturée) :

- Au niveau des puits d'injection d'air, des débitmètres mesurant les débits et les volumes cumulés d'air injectés, des manomètres indiquant la pression d'injection de même que des jauges de température ;
- Un réseau de points d'observation répartis sur la zone impactée visant à suivre l'évolution des paramètres : pressions, teneurs en O₂ et polluants volatiles dans les gaz du sol et éventuellement température. Un exemple de point d'observation est reproduit à la **figure 4** (Extrait de *Vacuum Vapor Extraction, Springer, 1994*).

Figure 4 : exemple d'équipement d'un point d'observation



En cas de tache de pollution de puissance importante, ces points d'observation permettent de mesurer les paramètres à différentes profondeurs, les sondes étant placées à des profondeurs discrètes dans le même trou de forage ou dans des trous voisins. Le nombre, la densité et la localisation des points d'observation feront l'objet d'une proposition de la part de l'expert ;

- Des piézomètres situés à proximité des puits d'extraction et des puits d'injection, hermétiquement fermés, visant à contrôler la remontée du toit de la nappe suite à l'application de la dépression ;
- Un dispositif de mesure des débits de gaz extraits. Ces mesures seront accompagnées de mesures des paramètres pressions et température afin d'exprimer les résultats en conditions normales de t° et de pression ;
- Un dispositif d'échantillonnage des gaz extraits de chacun des puits (ou groupe de puits) d'extraction permettant de mesurer les quantités de polluants extraits ;
- Un dispositif d'échantillonnage des gaz traités avant leur rejet vers l'atmosphère ;
- Un dispositif d'échantillonnage des condensats avant leur traitement sur site ou prise en charge en dehors du site.

11.2. Mesures de supervision : paramètres de supervision du traitement et fréquences

Les paramètres de supervision du traitement et la fréquence des mesures sont donnés dans le **tableau 8** suivant :

Tableau 8 : fréquences et paramètres des opérations de supervision du traitement

Paramètres de supervision	Moyen	Paramètre	Fréquence minimale*	Commentaires
Infiltration active et passive et injection				
Débits et volumes des additifs infiltrés par puits/drain d'infiltration	Débitmètre au niveau des puits	Débit (m³/s) et volume cumulés	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	Si infiltration de longue durée
Suivi piézométrique	Mesures du niveau de l'eau souterraine dans les piézomètres de contrôle	Sonde piézométrique (m)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	Etablissement d'une carte des iso-pièzes et sens d'écoulement
Paramètres de l'eau souterraine	Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine	Teneurs en polluants faisant l'objet de l'intervention (HCOV), produits de dégradation intermédiaires, Ethène, Ethane, méthane, TOC. Teneurs en accepteurs d'électrons : O₂, Nitrate, sulfate, Fe(II), Mn(II), pH, Eh, conductivité électrique, T°,	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Paramètres facultatifs pour l'eau souterraine	Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine	Examen PCR, H₂, acétate et acides gras volatiles, carbone inorganique dissous, chlorure, nitrite, sulfite, sulfure,	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Teneurs résiduelles dans le sol	Forages et prélèvements de carottes de sol et analyse des HCOV et des produits intermédiaire de dégradation	Teneurs en HCOV et produits de dégradation intermédiaires (kg/Kg ou kg/m³)	Au lancement des opérations et ensuite tous les 6 mois	La profondeur d'échantillonnage doit permettre de suivre une éventuelle migration verticale de la pollution
Bilan de masse : Estimation des quantités résiduelles de HCOV et des produits de dégradation	Teneurs résiduelles moyennes dans le sol et les eaux souterraines dans la zone d'intervention	Bilan de masse : quantités de polluants initiales, quantités résiduelles, quantités détruites (Kg) et quantités produites (kg) de produits de dégradation intermédiaires	Tous les 6 mois	Estimation du temps de traitement
Extension de la tache de pollution	Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine	Extension latérale et verticale du panache de pollution	Tous les 2 mois	Risque de migration vers les cibles sensibles et les couches profondes
Infiltration (active ou passive) + agents tensio-actifs : paramètres supplémentaires				
Teneurs en agents tensio-actifs dans l'eau souterraine	Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine	Teneurs en agents tensio-actifs	Tous les deux mois	Risque de migration en dehors de la zone d'intervention
Infiltration (active ou passive) + pompage : paramètres supplémentaires				
Paramètres de l'eau pompée	Echantillonnage et analyse d'échantillons de l'eau pompée	Teneurs en polluants faisant l'objet de l'intervention (HCOV), produits de dégradation intermédiaires, Teneurs en polluant >NA. TOC. Teneurs en O₂, Fer total, Manganèse total, pH, Eh, conductivité électrique, T°	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Débits extraits par puits de pompage	Débitmètre au niveau des puits	Débit (m³/s) et volume cumulés	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Teneurs mesurées dans l'eau de rejet	Code de bonne pratique auxiliaire : Traitement de l'eau souterraine pompée			
Combinaison atténuation stimulée en conditions aérobies et anaérobiques avec injection d'air + extraction des gaz du sol. Paramètres supplémentaires.				
Mesure des débits de l'air injecté et des pressions d'injection au niveau des puits	Débitmètres, sondes de T° et manomètres au niveau des puits	Débits et volumes cumulés d'air injectés	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Mesure de l'O₂, des HCOV dans la phase vapeur, des pressions, dans les points de contrôle dispersés dans la zone de traitement	Prélèvement des gaz du sol et analyse de l'O₂, des HCOV (+ produits de dégradation volatiles), suivi des manomètres	Teneur en O2, HCOV (et produits de dégradation) et contrôle de la circulation de l'air dans la couche saturée	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	Suivi de l'efficacité de l'aération et des teneurs dans la phase gazeuse
Débits extraits par puits d'extraction	Débitmètre au niveau des puits	Débit (m³/s) et volume cumulés	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Dépression et température au niveau des puits d'extraction	Manomètre et sonde de température au niveau des puits	Dépression (Pa) et Température (°C)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	Pour le calcul des volumes extrait en unités normalisées (T° et Pressions standard)
Teneurs en polluants dans les gaz extraits par chacun des puits	Prélèvement au niveau des puits d'extraction et analyse des échantillons. Cartouche à charbon actif, cartouche Dräger, PID, FID	Teneurs en HCOV + produits de dégradation à caractère nocif	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Estimation des quantités de polluants prélevées par puits et totales	Somme des quantités prélevées pour les différentes périodes de contrôle	Bilan de masse : quantités de polluants initiales, quantités résiduelles dans les trois phases du sol, quantités détruites (Kg), quantités extraites (kg), et quantités produites (kg) de produits de dégradation intermédiaires	Tous les 6 mois	
Teneurs dans les rejets gazeux	Code de bonne pratique auxiliaire : Traitement des gaz du sol pompés			
Quantité et teneurs en polluants des condensats	Quantités de liquide récupéré dans le séparateur et teneurs en composés polluants	m³ et kg/m³	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	Identifier la filière de traitement sur ou en dehors du site
	* la fréquence sera ajustée par l'expert en fonction des données du suivi			

Ce tableau appelle les commentaires suivants :

- L'analyse des teneurs en polluants dans les gaz sera réalisée au laboratoire après prise d'échantillons sur des cartouches à charbon actif ou dans des ballons. L'expert pourra cependant proposer de réaliser des mesures directes de teneurs à l'aide d'appareil FID, PID ou de cartouches Dräger, s'il démontre qu'il existe une bonne correspondance entre les mesures directes et les analyses de laboratoire. Les mesures de teneurs en O₂, CO₂ dans les gaz pourront faire l'objet de mesures directes ;
- La périodicité des campagnes de prélèvement et d'analyse des échantillons de sol, de l'eau souterraine et des gaz du sol, pourra être modifiée sur proposition de l'expert ;
- Pour le prélèvement des échantillons de sol, d'eau souterraine et de gaz, il convient de se référer au code de bonnes pratiques n° 3 de Bruxelles Environnement « prise d'échantillons de sol, d'eau souterraine, de sédiments et d'air du sol ... ». Pour l'analyse de ces échantillons, il convient de se conformer au code de bonnes pratiques n° 4 « Code de bonne pratique pour les méthodes d'analyse ... » de Bruxelles Environnement.

Les paramètres de supervision du traitement ayant trait aux nuisances font l'objet du **tableau 9** suivant.

Tableau 9: fréquences et paramètres de supervision du traitement ayant trait aux nuisances

Paramètres de suivi	Moyen	Paramètre	fréquence minimale	Commentaires
Teneurs en HCOV et autres polluants dans l'air ambiant	Prélèvement de l'air à proximité de la station de traitement de l'eau souterraine et/ou des gaz ou des zones sensibles et analyse des échantillons, cartouche à charbon actif, cartouche Dräger, PID, FID	Teneurs en HCOV et produits de dégradation intermédiaires nocifs pour la santé (kg/m ³)	Lors du lancement, ensuite après 2 semaines et ensuite tous les 3 mois	
Mesure de bruit	Mise en place d'un réseau de mesures	Niveau de bruit	En cas de plainte des riverains	
Mesure des odeurs	Mise en place d'un réseau de mesures	Niveau des odeurs	En cas de plainte des riverains	

12. Rapportage, optimisation et mesures correctives

12.1 Rapportage

Conformément au prescrit de l'AGRBC du 29/03/2018 fixant le contenu type du projet de gestion du risque, du projet d'assainissement, de la déclaration préalable au traitement de durée limitée et des modalités d'affichage du traitement de durée limitée, la mise en œuvre d'une intervention par oxydation in-situ implique la remise à Bruxelles Environnement de un ou plusieurs rapports intermédiaires :

- Rapport intermédiaire clôturant la phase de démarrage. On estime à deux mois un délai normal d'exécution d'une phase de démarrage. Sur proposition justifiée de l'expert, ce délai peut être modifié ;
- Autres rapports intermédiaires si les travaux s'étendent sur plusieurs années. La fréquence de ces rapports intermédiaires n'est pas précisée dans l'Arrêté. Cette fréquence sera déterminée sur proposition justifiée de l'expert. Un rapport intermédiaire sera produit et présenté à Bruxelles Environnement lorsque, sur la base des données collectées lors des différentes campagnes de supervision, des modifications significatives dans le dispositif d'intervention sont nécessaires et soumises à l'approbation de Bruxelles Environnement : implantation de nouveaux puits d'extraction ou d'infiltration, abandon de puits, extension du réseau de piézomètres d'observation en résultat de l'extension du panache, mise en œuvre d'autres techniques de traitement, ...

Le contenu du premier rapport intermédiaire comprendra au minimum les informations reprises dans le **tableau 10** suivant.

Tableau 10 : informations à présenter dans le premier rapport intermédiaire

Rubrique	Paramètres et quantité à mesurer
Description du dispositif mis en œuvre (as built) pour la première phase, toutes techniques d'apport des additifs confondues (y inclus pompage en aval) et tous types d'additifs confondus	Type de source de carbone, de nutriment, d'agent régulateur de pH, de tensio-actifs utilisés (teneurs et caractéristiques des additifs). Description des éléments du dispositif : puits/drain d'infiltration et/ou de pompage (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête), points d'injection directe (nombre, localisation, profondeurs), piézomètres d'observation (nombre, localisation, description, profondeur, massifs filtrants, bouchons de l'espace annulaire, tête, sonde de T°), dispositif de mesure des débits d'infiltration et/ou de pompage, conduites d'aménée des fluides extraits, station de traitement de l'eau, points d'échantillonnage de l'eau, points d'échantillonnage du sol (localisation, profondeur).
Description des installations complémentaires si mise en œuvre de la variante combinaison atténuation naturelle en conditions anaérobiques et aérobie avec injection d'air + pompage des gaz du sol	Description des éléments complémentaires : Puits d'injection d'air (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massifs filtrants, bouchons bentonitiques, tête), dispositif de mesure des débits et des pressions d'injection, puits de pompage des gaz du sol (localisation, nombre, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massifs filtrants, bouchons bentonitiques, tête), dispositif de mesure des débits et des pressions. Points d'observations répartis dans la zone de traitement (localisation, profondeur, équipement en sondes T°, manomètres, points d'échantillonnage).
Paramètres à rapporter si apport par infiltration active ou passive et injection directe.	Débits infiltrés et pressions appliquées dans les différents puits, vérification de l'extension de la zone d'influence de l'infiltration. Niveaux piézométriques et carte des iso-pièzes (sens d'écoulement). Teneurs mesurées dans l'eau souterraine au niveau des piézomètres de contrôle : polluants, produits de la réaction (intermédiaires ou finaux), Ethène, Ethane, méthane, TOC, accepteurs d'électrons : O ₂ , nitrates, sulfates, Fer (II), Mn(II), pH, Eh, conductivité électrique, T°. Durée projetée du traitement sur base des données acquises. Faisabilité de l'intervention - Mesures correctives à apporter
Paramètres facultatifs à rapporter si apport par infiltration active ou passive et injection directe.	Examen par PCR de l'eau souterraine. Teneurs dans l'eau souterraine en H ₂ , acétate et autres acides organiques volatiles, carbone inorganique dissous, chlorure, nitrite, sulfite, sulfure,
Paramètres complémentaires à rapporter si infiltration + pompage de l'eau souterraine en aval	Débits d'eau souterraine pompée. Rayon d'influence et de capture des puits de pompage. Teneurs en polluants (HCOV + produits de dégradation) + polluants présents à des teurs >NA dans l'eau souterraine extraite. Teneur en polluants de l'eau traitée avant rejet.
Paramètres complémentaires à rapporter si injection d'air + extraction des gaz du sol	Débits et pression d'injection de l'air. Dépression, T° et débits dans les puits d'extraction. Vérification du rayon d'influence des puits d'extraction. Teneurs en O ₂ + HCOV (et produits de dégradation), T° et pressions dans les points de contrôle répartis sur la zone à traiter. Teneurs en polluants (HCOV + produits de dégradation + autres polluants), O ₂ et CO ₂ dans les gaz extraits. Teneurs en polluants dans les gaz traités avant leur rejet.

12.2 Mesures correctives et optimisation

Comme tout processus biologique prenant place en conditions naturelles, l'efficacité de l'atténuation stimulée est sujette à de nombreuses incertitudes compte tenu du grand nombre de facteurs pouvant influencer la bonne conduite du traitement : propriétés physico-chimiques du sol et des eaux souterraines, hétérogénéité du sol, pollutions mixtes pouvant influencer négativement l'activité bactérienne (métaux lourds, par exemple), ... Malgré le niveau d'informations recueillies lors des étapes préliminaires au laboratoire et lors de la phase pilote, la vitesse de dégradation des polluants chlorés peut être inférieure à celle escomptée lors de la rédaction du projet.

Trois types de situations problématiques sont typiquement rencontrés.

Diminution lente des teneurs en composés fortement chlorés (PCE et TCE), alors que les conditions favorables à la halorespiration sont remplies. La cause la plus fréquente est la libération progressive de polluant à partir d'une phase libre (DNAPL). Les solutions correctives à apporter peuvent être les suivantes :

- Prise en charge du noyau de pollution à l'aide d'autres techniques [de traitement](#) : excavation du sol, traitement thermique, oxydation chimique, ...
- Infiltration de solutions contenant des agents solvants ou tensio-actifs capables de mobiliser la phase libre et de la rendre disponible pour une dégradation biologique.

Stagnation ou accumulation de produits de dégradation intermédiaires moins chlorés mais plus mobiles et plus toxiques (DCE et CV) en raison, par exemple, de l'absence d'une flore bactérienne capable de réaliser les dernières étapes de la dégradation. Cette explication peut être vérifiée par un examen PCR de l'eau souterraine. Différentes solutions correctives peuvent être envisagées :

- Combinaison avec une phase d'atténuation stimulée en condition aérobies : soit dans la même zone de traitement (Redox Switch) soit en aval hydrogéologique de la zone de traitement en conditions anaérobies. Les conditions aérobies peuvent être assurées par injection d'air (+ dispositif d'extraction des gaz du sol), injection d'ORC, d'agents oxydants, ... ;
- Inoculation du sol avec des microorganismes capables de mener la halorespiration jusqu'au stade ultime (éthène, éthane) après tests de laboratoire et obtention des autorisations nécessaires. Ces microorganismes peuvent être délivrés par un laboratoire certifiant leur caractéristiques et potentiel de dégradation ou être constitué par un inoculum (sol ou eau souterraine) provenant d'un site où la halorespiration complète a été observée.

Migration des composés chlorés en dehors de la zone de traitement et de supervision avec risque d'impact de cibles sensibles. Ce type de situation peut être le résultat de différentes causes : atténuation moins rapide que prévu, produits de dégradation plus mobiles que les polluants d'origine, vitesse de migration accélérée du fait de l'infiltration de solutions dans l'eau souterraine, apport d'additifs jouant le rôle de solvants ou de tensio-actifs mobilisant la phase libre de polluants. La réponse à apporter à ce type de situation dépend de la proximité de cibles sensibles en aval hydrogéologique :

- Modification des paramètres hydrogéologiques du site visant à empêcher la migration des polluants en dehors de la zone de traitement ;
- Mise en place d'une barrière active de stimulation de l'atténuation : réalisation d'un rideau d'injection directe d'additifs ;
- Mise en place d'une barrière de traitement par pump and treat de l'eau souterraine ;

- Mise en place d'une barrière de traitement par sparging+ extraction des gaz du sol ;
- Mise en place d'une barrière active de traitement de l'eau souterraine.

13. Mesures de validation et schéma décisionnel arrêt-prolongation du traitement

Les mesures de validation visent à préciser si les objectifs de **de traitement** sont atteints de manière durable de sorte que les opérations de traitement peuvent être considérées comme terminées.

Ces mesures consistent en une dernière campagne d'échantillonnage et d'analyse des couches de sols et de l'eau souterraine impactées. Cette campagne d'analyse portera sur tous les polluants dont la présence a requis une intervention, leurs produits de dégradation intermédiaires à caractère nocif et les autres polluants susceptibles d'avoir été libérés suite à la mise en place de conditions réductrices strictes (As, ...).

Les teneurs de ces derniers produits, si présents, sont comparées aux normes d'assainissement et normes d'intervention définies dans [l'AGRBC du 29/03/2018](#).

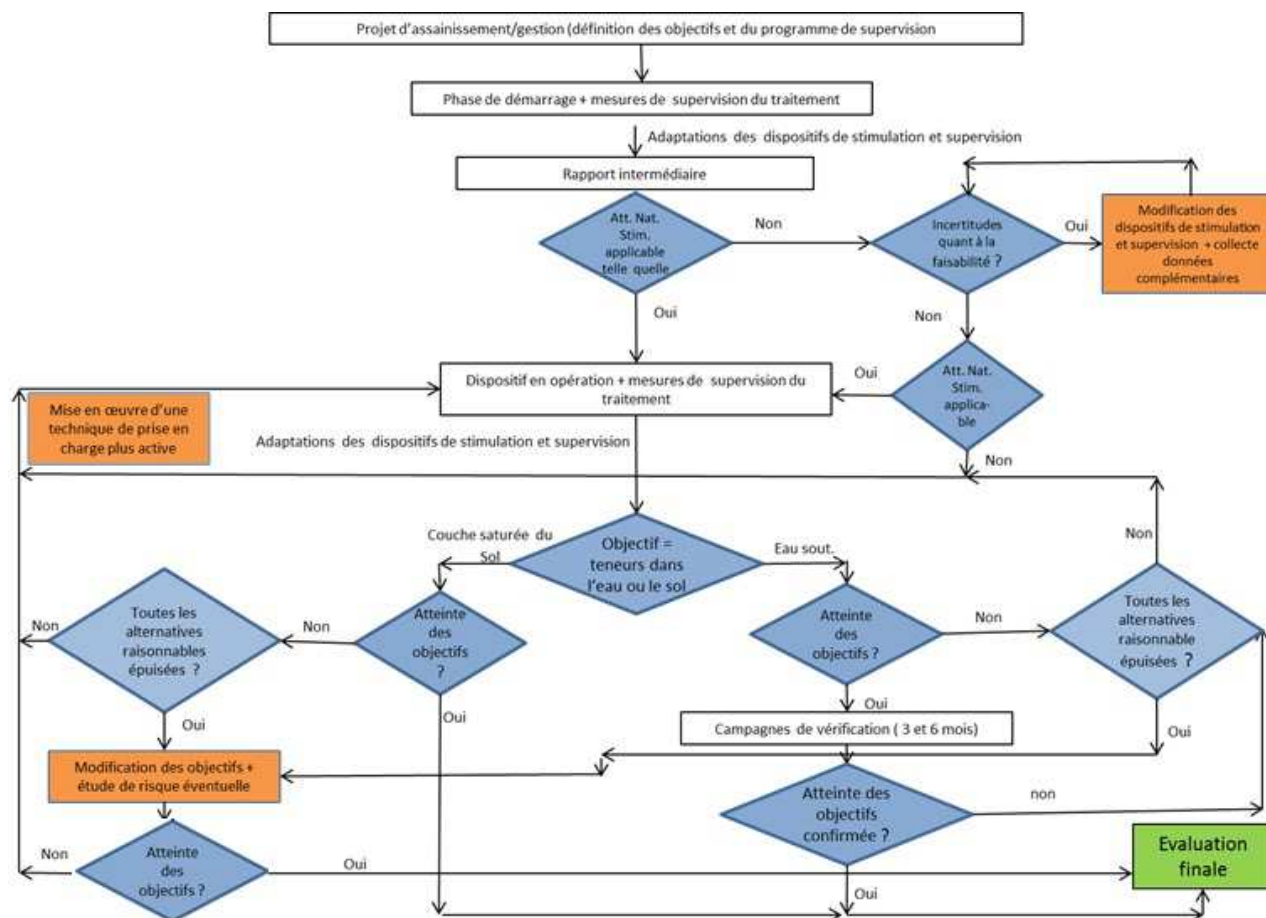
En cas d'atteinte des objectifs **de traitement** au sein de la tache de pollution, les opérations de traitement peuvent être interrompues. Deux autres campagnes d'échantillonnage de l'eau souterraine successives seront effectuées, à respectivement 3 mois et 6 mois comptés après la fin de la période d'efficacité attendue des derniers additifs apportés de manière à vérifier la durabilité des résultats acquis.

En cas de maintien des niveaux de teneurs en équilibre sous les valeurs objectifs, **le traitement** peut être considérés comme accomplis, le dispositif peut alors être démantelé et un rapport d'évaluation finale introduit.

En cas de non atteinte des objectifs de teneurs, le dispositif de traitement par atténuation stimulée est maintenu en activité ou renouvelé (nouvelle campagne d'injection directe, par exemple) après mise en place de mesures correctives éventuelles : adjonction de puits d'infiltration/injection complémentaires, aménagement des conditions de pH, de T°, addition d'autres sources de carbone, d'agent surfactants, ... et/ou après mis en place de mesures complémentaires : excavation du noyau, mise en place d'une phase aérobie en aval de la zone de traitement ...

Si lors de la campagne suivante de mesures de validation, les objectifs de teneurs ne sont toujours pas rencontrés, une modification des objectifs **de traitement** pourra être proposée par l'expert en même temps qu'une étude de risque (avec éventuellement proposition de restriction d'usage). Après l'approbation de cette modification par Bruxelles Environnement, deux cas de figure peuvent se produire : sur la base des nouveaux objectifs, le traitement peut être considéré comme terminé ou, au contraire, les opérations de traitement doivent être relancées avec adjonction de nouvelles mesures correctives ou mise en place de mesures complémentaires.

Le schéma décisionnel lors de l'étape de validation du traitement est le suivant :



14. Monitoring à long terme éventuel : dispositif et type de mesures

Sur suggestion de l'expert et/ou à la demande de Bruxelles Environnement, des mesures de suivi (validation à long terme ou post gestion) peuvent être demandées au titulaire de l'obligation après la clôture des travaux. Ces mesures visent à confirmer que les résultats des travaux et notamment que la rencontre des objectifs [de traitement](#) sont acquis de manière durable sur le long terme. Selon toute logique, ces mesures de suivi à long terme se justifient s'il existe une incertitude quant à la pérennité des résultats obtenus : variation importante des teneurs mesurées dans les piézomètres de contrôle, niveaux de teneur stabilisés à une valeur proche des objectifs [de traitement](#), circonstances particulières défavorables ...

Dans la mesure où les objectifs [de traitement](#) portent sur la qualité des eaux souterraines, le dispositif de suivi à long terme éventuel peut porter sur certains des piézomètres d'observation établis au sein de la zone polluée et en aval de celle-ci.

Contrairement aux mesures de supervision du traitement et de validation, les mesures de suivi à long terme n'impliquent pas l'échantillonnage et l'analyse de la qualité des eaux souterraines au niveau de tous les piézomètres d'observation mais un certain nombre d'entre eux représentatifs de l'état de la nappe d'eau souterraine dans la zone polluée et de la situation en aval de cette dernière.

Dans tous les cas de figure, un ou plusieurs piézomètres d'observation situés en amont des cibles sensibles identifiées sera(ont) inclus(s) dans les campagnes de prélèvement et d'analyses.

Les paramètres qui seront relevés seront :

- Les teneurs résiduelles en polluants dans l'eau souterraine (les polluants dont la présence a justifié l'intervention sont analysés avec produits de dégradation intermédiaires à pouvoir délétère sur la santé humaine et l'environnement, métaux et autres polluants sensibles aux conditions redox du sol) ;
- Les paramètres influençant la poursuite de l'atténuation naturelle de la contamination: pH, O₂, CO₂, TOC, méthane, nitrate, sulfate, nutriments, Fe, Mn, ... selon les processus responsables de l'atténuation naturelle escomptée.

Pour le prélèvement des échantillons d'eau souterraine, il convient de se référer au code de bonnes pratiques n° 3 de Bruxelles Environnement « prise d'échantillons de sol, d'eau souterraine, de sédiments et d'air du sol. ... ». Pour l'analyse des échantillons d'eau souterraine, il convient de se conformer au code de bonnes pratiques n° 4 « Code de bonne pratique pour les méthodes d'analyse ... », de Bruxelles Environnement.

La durée et la fréquence des mesures de suivi à long terme varient en fonction des situations rencontrées : degré d'incertitude et niveaux des teneurs résiduelles, types de polluants présents et niveaux de risque que leur présence induit, présence et distance de cibles sensibles, vitesse de circulation des polluants.

[Le programme de suivi visant l'atteinte durable des objectifs finaux de traitement doit être représentatif et raisonnable tant en fréquence qu'en durée totale de suivi, ceci \(1\) afin de pouvoir statuer sur la stabilité des résultats finaux de traitement ou \(2\) sur une éventuelle tendance ascensionnelle. Sans motivation particulière, la durée du suivi n'excédera pas deux ans.](#)

Le rapportage des campagnes de mesure et la transmission des rapports à Bruxelles Environnement s'effectuent sur une base annuelle ou, plus rarement, après chaque campagne de suivi.

Les teneurs mesurées sont comparées aux objectifs **de traitement**. L'interprétation des valeurs s'effectue comme suit :

- Toutes les teneurs mesurées sont systématiquement inférieures aux objectifs **de traitement** : la pérennité des résultats est acquise et le dossier est clos ;
- Les teneurs de certains polluants et au niveau de certains points d'observation fluctuent avec, de temps à autre, de légers dépassements des valeurs objectifs : prolongation de la période des mesures de validation à long terme, si une tendance à la baisse peut être dégagée ;
- Les teneurs de certains polluants dépassent les valeurs objectifs de manière récurrente même après prolongation de la période d'observation ou les teneurs de certains polluants dépassent de manière notable et soutenue les objectifs **de traitement** et/ou une couche libre (re)fait apparition. Face à cette situation, trois attitudes peuvent être adoptées :
 - La contamination revêt un caractère différent de ce qui est apparu lors de l'étude détaillée: nouvelle source active, nouveau cas de contamination, nouvelles circonstances, ... Une nouvelle étude détaillée est nécessaire aboutissant **éventuellement** à un nouveau projet, **ou, le cas échéant, un nouveau traitement ne nécessitant pas de projet spécifique**, le titulaire de l'obligation étant le même ou différent ;
 - Des compléments de travaux sont nécessaires afin d'aboutir aux objectifs **de traitement** définis précédemment ;
 - Il n'est pas possible d'atteindre les objectifs **de traitement** de manière durable dans des délais raisonnables et selon un budget réaliste : les objectifs **de traitement** sont modifiés (norme d'intervention ou valeurs définies suite à une étude de risque).

15. Recommandation en matière de santé, sécurité et organisation

15.1 Check-liste succincte pour les entrepreneurs

La check-list à destination des entrepreneurs fait l'objet du **tableau 11**. Cette liste vise à aider les entrepreneurs dans la rédaction de leurs offres en réponse aux cahiers de charge rédigés par les experts. Compte tenu de la grande diversité des situations rencontrées, cette liste ne saurait être exhaustive.

Tableau 11 : check-list à destination des entrepreneurs

Rubrique	Vérification
Informations préalables complètes et suffisantes (cahier de charges, descriptif des travaux...)	
Impétrants	Demande auprès des exploitants des réseaux effectuée et réponse adéquates obtenues
Caractéristiques des infrastructures sur le site et son voisinage immédiat	Inventaires et cartographie des bâtiments et infrastructures aériennes. Inventaire et cartographie des infrastructures enterrées et impétrants.
Sensibilité des infrastructures enfouies aux conditions anaérobiques strictes, aux solvants et aux agents tensio-actifs	Inventaire des infrastructures sensibles
Etude de stabilité des ouvrage aériens	Etudes de stabilité adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser (en cas de rabattement important de la nappe)
Cibles sensibles	Cibles sensibles présentes sur et aux alentours du chantier bien identifiées
Aspects techniques du cahiers des charges ou du descriptif des travaux	Descriptif du dispositif de l'infiltration, de pompage (puits, localisation, dimension, ...) et éventuellement d'injection : établissement des quantités : débits, pressions, dépressions, types de pompes....
Identification des autorisations nécessaires et des cadres normatifs à respecter	Vérifier que les autorisations nécessaires ont été demandées par le donneur d'ordre. Vérifier la cohérence des performances demandées avec les cadres normatifs en vigueur.
Identification des procédures particulières à respecter	Identifier les procédures particulières et vérifier que leur respect est bien pris en compte dans le cahier des charges ou le descriptif des travaux : stockage et transport de substances dangereuses et/ou toxique, rejets gazeux, inoculation de microorganismes
Points de rejets	Points de rejet des eaux et des gaz traités issus du traitement identifiés et compatibles avec les caractéristiques du site. Autorisations demandées et obtenues
Les lignes de communication sont définies	Identités et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'expert, de l'agent de l'IBGE, des autorités compétentes sont connues
Informations devant être présentes dans le plan de santé et sécurité, et prévention de l'entrepreneur	
Identification et nature des risques	FDS (fiche de données de sécurité) et phrase de risque et de sécurité des substances utilisées. Risques lors du stockage, de la manipulation et de la mise en œuvre des différentes substances : risques pour le personnel (inhalation, contact dermique), risques d'incendie, risque de dispersion....
	Risque d'explosion dans les canalisation de collecte des gaz compte tenu de l'inflammabilité des composés extraits (si injection d'air et extraction de gaz)
	Risque pour les infrastructures enterrées si contact avec des composés tensio-actifs ou des solvants
	Risques d'explosion en cas de création de poches de produits volatiles inflammables dans le sol
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de produits dangereux et/ou polluants
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de sol pollué sur site (lors de l'exécution des puits ou des fossés).
	Risque pour le personnel du fait de la remontée possible du réactif en surface lors de l'injection directe ou de débordement lors de l'infiltration
	Risques pour la santé du personnel du fait de la présence de produits volatiles, dangereux/toxiques sur le site en général. Risque de dégagements gazeux toxiques (CV) dans l'atmosphère lors de l'extraction et le traitement des gaz du sol
	Risques d'accidents en général : chutes, incendie, électrocution
	Risques liés à l'intrusion sur le site de personnes non autorisées : vols, vandalisme et risque pour la santé
	Risque en cas de travail en milieu confiné (caves, fosses,...) liés à la mauvaise qualité de l'air du milieu
	Risques climatiques : gel des conduites
	Risques liés à la circulation si infrastructures présentes sur la voie publique
Mesures préventives	Pour chacun des risques identifiés, identification et mise en place des mesures préventives (matériel électrique antidéflagrant, équipement de protection individuel), y inclus la formation du personnel
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacun des risques identifiés, préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Personnes et services à contacter en cas de problème	Pour chacun de risques identifiés, identité et coordonnées des personnes et/ou service à contacter : service incendie, commune, protection civile, exploitant des réseaux
Identification des nuisances possibles	Odeur et vapeurs dangereuses pour le voisinage en cas de fuites et pertes à partir des installations
	Bruit des équipements : pompes, groupes électrogènes ,
	Encombrement des voiries
	Salissement des voiries
Mesures préventives	Pour chacune des nuisances identifiées, identification et description des mesures préventives. Par exemple, mise en place d'explosimètres, de systèmes d'alarme et de mise à l'arrêt et de sauvegarde (entré d'air dans les canalisations)
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacune des nuisances identifiées, préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Planning des interventions	
Plan de monitoring et d'entretien	Planning des visites de contrôle : fréquence bimensuelle minimum
	Planning des visites d'entretien
Identification des pannes et des problèmes techniques susceptibles de se produire	Défectuosité des équipements et de l'installation : défauts d'étanchéité
	Risque de colmatage des puits d'extraction et d'injection/infiltration : chute des débits, des pressions et dépressions
	Epuisement prématuré des matériaux utilisés pour la traitement des gaz et de l'eau (charbon actif)
Mise en place de systèmes d'alarme, de mise en sauvegarde, et de mise à l'arrêt	
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacun des problèmes susceptibles de se produire : préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Rapports de surveillance de l'expert	Prise en compte des rapports de suivi de l'expert et mise en place concertée des mesures correctives ou d'optimisation.

Les remarques suivantes peuvent être faites :

- Pour les entrepreneurs certifiés VCA ou de manière équivalente, les mesures énumérées dans le **tableau 11** et ayant trait à la sécurité sont systématiquement d'application ;
- La check liste du **tableau 11** est valable pour les entrepreneurs et leurs sous-traitants dans leurs domaines d'intervention respectifs ;
- En règle générale, les visites d'inspection à mener sur le chantier sont à exécuter au minimum sur une base bimensuelle ;
- Pour les conduites de collecte et d'amenée des gaz et des liquides pompés, on privilégiera de manière systématique les conduites enterrées de manière à éviter les accidents, l'incidence du gel (condensats) et les actes de vandalisme ;
- Lorsque les installations du chantier (puits et station de traitement) sont proches de bâtiments, des analyses de l'air pourraient être prévues au sein de ces bâtiments de manière à mesurer l'importance des teneurs en composés volatils.
- Lorsqu'un risque d'explosion est avéré au niveau des puits de pompage, des conduites ou de la station de traitement, le risque d'explosion (LEL) sera mesuré en continu et le système sera mis en sauvegarde dès mesure de dépassements de 10 % de la LEL ;
- En cas de stockage temporaire de terres polluées sur site des mesures seront prises pour éviter la contamination du sol et des eaux souterraines sous-jacentes.

15.2 Check-list succincte pour les experts en pollution du sol

La check-list à destination des experts est présentée dans le **tableau 12**. Cette liste vise à aider les experts dans la rédaction des descriptifs des travaux, les estimations de coût et l'élaboration des cahiers de charge à destination des entrepreneurs.

Tableau 12 : check-list à l'intention des experts

Rubrique	Vérification
Informations préalables complètes et suffisantes (études préalables, cahier de charge, descriptif des travaux...)	
Caractéristiques du sol et des couches insaturées et saturées à traiter	Composition du sol : succession et caractéristiques des couches, présence de couches de perméabilités différentes, capacité d'adsorption, homogénéité, Densité des observations suffisante ?
	Caractéristiques de perméabilité du sol, tests de pompage, mesures piézométriques et sens d'écoulement de l'eau souterraine, variations saisonnières de la piézométrie, puissance de l'aquifère, isolation des différentes aquifères éventuels. Densité et détail des données suffisants ?
Polluants présents et/ou à traiter	Nature des polluants présents et/ou à traiter, répartition des teneurs, source encore active ?, évaluation de la charge polluante dans les différentes phases du sol, potentiel de migration, présence d'une phase libre surnageante ou plongeante, évolution naturelle attendue des teneurs (évolution mesurée, potentiel d'atténuation naturelle)
Caractéristiques physico-chimiques et chimiques du sol	Caractéristiques : pH, Eh, cond. électrique, accepteurs d'électrons (nitrates sulfates, ...), donneurs d'électrons (TOC, ...), ...
Caractéristiques des infrastructures sur le site et son voisinage immédiat	Inventaires et cartographie des bâtiments et infrastructures aériennes. Inventaire et cartographie des infrastructures enterrées et impétrants.
Cibles sensibles	Cibles sensibles présentes sur et aux alentours du chantier bien identifiées
Aspects techniques de l'intervention et descriptif technique des travaux	Descriptif du dispositif d'infiltration et éventuellement de pompage (puits, localisation, dimension, ...) et d'injection : établissement des quantités : débits, pressions, dépressions, types de pompes....
	Mode de fonctionnement du dispositif : continu vs intermittent. Risques de colmatage. Actions correctives et d'optimisation possibles.
	Vérification a priori de la performance du dispositif : sens et mode de la circulation de l'eau du sol, vitesse de migration des additifs, ...
	Objectifs du traitement sont bien identifiés pour le sol et les eaux souterraines
	Estimation de la durée du traitement et nécessité de faire appel à des procédés complémentaires : excavation du noyau, apport de solvants ou de tensio-actifs, injection d'air en aval ...
	Vérifier que le descriptif de la station de traitement éventuelle est suffisamment détaillé. Les quantités physiques des installations (volumes, taille, performances, ...) sont-elles cohérentes avec les paramètres du chantier (débits, teneurs prévues, condensats ...) ?
Points de rejets	Points de rejet des eaux et ou des gaz traités identifiés et compatibles avec les caractéristiques du site. Autorisations demandées et obtenues
Identification des autorisations nécessaires et des cadres normatifs à respecter	Vérifier que les autorisations nécessaires ont été demandées par le donneur d'ordre. Vérifier la cohérence des performances demandées avec les cadres normatifs en vigueur. Les procédures prévues sont-elles en conformité avec les codes de bonne pratique et les autres recommandations de l'IBGE
Identification des procédures particulières à respecter	Identifier les procédures particulières et vérifier que leur respect est bien pris en compte dans le cahier des charges ou le descriptif des travaux : transport des déchets dangereux (condensats), rejets gazeux, inoculation de microorganismes
Les lignes de communication sont définies	Identité et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'agent de l'IBGE, des autorités compétentes sont connues
Identification et nature des risques	Risque d'explosion dans les canalisations de collecte des gaz compte tenu de l'inflammabilité des composés extraits
	Risque pour les infrastructures enterrées en cas d'apport de solvants ou de tensio-actifs
	Risques d'explosion en cas de création de poches de produits volatils inflammables dans le sol
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de produits dangereux et/ou polluants
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de sol pollué sur site (lors de l'exécution des puits ou des fossés).
	Risques climatiques : gel des conduites si beaucoup de condensats
	Risques liés à la circulation si infrastructures présentes sur la voie publique
Mesures préventives	Pour chacun des risques identifiés, identification et mise en place des mesures préventives y inclus la formation du personnel
Personnes et services à contacter en cas de problème	Pour chacun des risques identifiés, identité et coordonnées des personnes et/ou service à contacter : service incendie, commune, protection civile, exploitant des réseaux
Identification des nuisances possibles	Odeur et vapeurs dangereuses pour le voisinage en cas de fuites et pertes à partir des installations
	Bruit des équipements : pompes, groupes électrogènes,
	Encombrement des voiries
	Salissement des voiries
Mesures préventives	Pour chacune des nuisances identifiées, identification et description des mesures préventives
	Mise en place d'explosimètres, de systèmes d'alarme et de mise à l'arrêt et de sauvegarde (entré d'air dans les canalisations)
Planning et contenu des opérations de supervision, de validation et de suivi à long terme (post-gestion)	
Dispositif de supervision du traitement	Descriptif, localisation et cartographie du dispositif de supervision : débitmètres, manomètres et sondes de t° au niveau des puits d'extraction, des puits d'injection, piézomètres de contrôle, points d'observation dans le sol et points d'échantillonnage des gaz du sol et des gaz extraits et traités, échantillonnage de l'air ambiant ... Prise en compte des cibles sensibles à protéger.
Paramètres de la supervision du traitement	Mesures des pressions et des débits d'infiltration et d'injection, mesure des dépressions dans le sol (si pompage), mesures piézométriques, teneurs dans l'eau et les gaz éventuellement pompés, bilan de masse de la charge polluante, teneurs résiduelles en polluant et en produits de dégradation (si déléters) dans le sol et la nappe et répartition, surveillance de l'extension du panache, présence et puissance d'une phase libre, débits et pression d'injection d'air, migration des polluants dans la nappe panache vers les cibles sensibles
Paramètres d'optimisation	Mise en place des variantes : pompage en aval, apport de tensio-actifs, combinaison de l'atténuation stimulée en conditions anaérobiques et aérobies, inoculation du sol. Traitement du noyau de pollution : excavation, ...
Rapportage	Planning pour la soumission du premier rapport intermédiaire et des rapports intermédiaires suivants.
	Les données recueillies sont-elles suffisantes pour la rédaction de ces rapports ?
Etape de validation des résultats	Les données recueillies sont-elles suffisantes pour la réalisation de cette étape : teneurs résiduelles dans le sol et les eaux souterraines, croissance des teneurs, bilan de la charge polluante
Etude de risque si modification des objectifs	Les données recueillies sont-elles suffisantes pour la réalisation de cette étape ?
Suivi à long terme (post-gestion)	Dispositif de suivi : piézomètres d'échantillonnage
	Paramètres du suivi : teneurs en polluants et produits de dégradation, paramètres permettant de suivre la continuation de l'atténuation naturelle

16. Sources bibliographiques

Les sources bibliographiques utilisées lors de la rédaction de ce document sont les suivantes :

- Code van goede praktijk : in-situ anaërobebioremediatie van VOCL's, OVAM, 2007;
- Technical protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in groundwater. US-EPA, 1998;
- Biodégradation des solvants chlorés en conditions naturelles, S. Denys, INERIS, octobre 2004 ;
- Chloronet, Guide des hydrocarbures chlorés, Propriétés et comportement dans l'environnement, Schlieren et al., Office Fédéral Suisse de l'Environnement, mai 2008 ;
- Achilles, Veiligheid, gezondheid en milieuzorgsysteem voor on-site bodemsanering werken, OVAM 2001;
- Standaardprocedure Bodemsaneringwerken, Eindevaluatieonderzoek en Nazorg, versie oktober 2011, OVAM ;
- Vacuum Vapor Extraction , Paul C. Johnson et al., Springer, 1994.