

Code de Bonne Pratique 7

Atténuation naturelle stimulée de la zone saturée par voie biologique par addition d'O₂ et nutriments

Bruxelles Environnement

1. Contenu

1.	Introduction.....	4
2.	Description de la technique et des principes technologiques mis en œuvre	5
2.1.	Description générale.....	5
2.2.	Association de l'atténuation stimulée par voie biologique avec d'autres techniques de traitement.....	6
2.3.	L'apport d'oxygène (et des autres récepteurs d'électrons)	6
2.3.1	Apport par application de composés libérant de l'oxygène de manière lente.....	7
2.3.2	Apport par injection directe d'oxygène dans la nappe	7
2.3.3	Apport par apport de peroxyde d'hydrogène sous forme dissoute (eau oxygénée) ..	8
2.3.4	Apport d'oxygène par injection d'air dans l'eau souterraine (bioparging)	8
2.3.5	Apport d'autres accepteurs d'électrons	10
2.4.	L'apport des nutriments	10
2.5.	Correction des propriétés physico-chimiques et physiques du sol.....	11
2.6.	L'apport de microorganismes au sol (bio-augmentation)	11
3.	Description des variantes	13
3.1.	La circulation forcée avec ou sans recirculation.....	13
3.2.	L'ASVB par apport d'agents tensio-actifs	13
3.3.	L'atténuation naturelle associée au chauffage du sol par injection de vapeur chaude	13
3.4.	L'injection de colloïdes à pouvoir adsorbant accélérant la dégradation biologique	14
4.	Objectifs poursuivis : panache versus noyau	15
5.	Polluants et situations les plus favorables (notions qualitatives)	16
5.1.	Polluants susceptibles d'être pris en charge par ASVB.....	16
5.2.	Situations les plus favorables.....	18
6.	Examen a priori de la faisabilité technique	20
6.1.	Critères d'acceptation	20
6.2.	Etape préliminaire : faisabilité a priori	20
7.	Examen spécifique de la faisabilité	25
7.1.	Première étape de l'examen	25
7.2.	Deuxième étape de l'examen	25
7.3.	Troisième étape de l'examen	26
7.4.	Nécessité d'un test pilote	27
8.	Description d'une installation type.....	32
8.1.	Infiltration active ou passive.....	32
8.2.	Infiltration (active ou passive) + circulation forcée + recirculation éventuelle.....	32
8.3.	Injection directe sous pression de composés à libération lente d'O ₂	33
8.4.	Mise en place de composés à libération lente d'O ₂ par apport dans des puits d'injection	33
8.5.	Bioparging	33
8.6.	ASVB par chauffage du sol (par injection de vapeur).....	34
8.7.	Schéma conceptuel.....	35
9.	Descriptif de l'installation qui sera mise en place	36
10.	Limitation des incidences du projet sur l'environnement : odeurs, bruits, poussières,	38
10.1.	Points à prendre en compte	38
10.2.	Risques liés à la nature dangereuse ou toxique des réactifs utilisés.....	38
10.3.	Nuisances pour la qualité de l'air : en cas de traitement par bioparging en présence de polluants volatiles	39
10.4.	Risques d'incendie et explosion	39
10.5.	Risques accrus de migration des polluants	39
10.6.	Nuisances acoustiques.....	40
10.7.	Risques pour les installations de captage voisines.....	40
10.8.	Conformités aux cadres légaux existants.....	40

11.	Supervision du traitement.....	42
11.1.	Règles de base de la supervision	42
11.2.	Mesures de surveillance : dispositif type	42
11.2.1.	Règle générale.....	42
11.2.2.	Stimulation par injection (active ou passive) d'additifs dans la nappe.....	45
11.2.3.	Infiltration (active ou passive) avec circulation forcée + recirculation éventuelle ...	45
11.2.4.	Injection directe	46
11.2.5.	Mise en place de composés à libération lente d'O ₂ (puits d'injection).....	46
11.2.6.	Injection d'air dans la zone saturée (biosparging) + extraction des gaz de la zone insaturée	46
11.2.7.	Variante chauffage du sol par injection de vapeur.....	47
11.3.	Mesures de supervision : paramètres de supervision du traitement et fréquences	48
12.	Rapportage, optimisation et mesures correctives.....	52
12.1.	Rapportage.....	52
12.2.	Mesures correctives et optimisation	54
13.	Mesures de validation et schéma décisionnel arrêt-prolongation du traitement	55
14.	Mesures de supervision à long terme éventuelles : dispositif et type de mesures.....	57
15.	Recommandations en matière de sécurité et stabilité	59
15.1.	Check-list succincte pour les entrepreneurs.....	59
15.2.	Check-list succincte pour les experts en pollution du sol	62
16.	Sources bibliographiques.....	65

1. Introduction

La présente technique d'intervention s'intitule « Atténuation stimulée par voie biologique de la zone saturée par addition d'O₂ et de nutriments » (ASVB).

Elle vise principalement la prise en charge d'une pollution de la zone saturée du sol en favorisant la dégradation biologique des contaminants en conditions d'aérobie. La mise en place de conditions favorables ou optimales pour la biodégradation est effectuée à l'aide d'apport d'oxygène, ou d'autres accepteurs d'électrons, de nutriments et, si nécessaires, de micro-organismes aptes à dégrader les polluants. En conditions idéales, la dégradation des polluants est poursuivie pour donner naissance à des produits de réaction inoffensifs et naturellement présents dans le sol.

En cas de présence de quantités importantes de produit pur, surnageant (LNALP) ou plongeant (DNALP), ou de produit pur piégés dans les micropores du sol, l'élimination de cette phase doit être opérée au préalable de la mise en œuvre de l'atténuation stimulée sans quoi la durée du traitement nécessaire pour atteindre les objectifs [de traitement](#) pourrait être exagérément longue de sorte que les faisabilités financières et techniques de l'opération seraient médiocres.

Cette technique de prise en charge repose sur une bonne compréhension et une évaluation quantitative des mécanismes et processus naturels opérant au droit du site pollué. Elle doit également se baser sur la preuve que les processus mis en œuvre débouchent sur une protection suffisante des personnes et de l'environnement contre l'exposition aux polluants présents.

Remarque

L'ordonnance du 5 mars 2009 relative à la gestion et à l'assainissement des sols pollués et ses arrêtés d'exécutions 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. Description générale

Cette technique [de traitement](#) vise au traitement d'une tache de pollution dans la couche saturée du sol par la dégradation biologique stimulée en conditions d'aérobie des composés polluants. La stimulation des processus biologiques responsables de la dégradation est effectuée en créant et maintenant tout au long du traitement des conditions optimales à l'action des microorganismes.

L'objectif poursuivi est donc de réduire et, dans le meilleur des cas, faire disparaître la charge polluante présente dans les couches saturées au sein d'une tache de pollution. La charge polluante traitée pouvant être adsorbée sur la phase solide, ou sous forme de produit pur dans les pores du sol, sous forme dissoute dans l'eau souterraine ou en couche libre (peu importante) en surface de la nappe (LNALP). Idéalement, les produits de la dégradation chimique des polluants sont le CO₂, le SO₄⁻, le Cl⁻, l'H₂O (et en CH₄ et CO₂ en conditions anaérobiques), ... produits inoffensifs et naturellement présents dans le sol. Cependant, lorsque la dégradation n'a pas été menée jusqu'à son terme (par manque d'oxygène par exemple), des produits intermédiaires peuvent être formés et demeurer quelques temps dans le sol. En règle générale, ces produits intermédiaires sont moins nocifs que les polluants d'origine et sont nettement plus susceptibles d'être dégradés dans le sol par voie biologique.

Typiquement, les interventions visant à installer et maintenir les conditions les plus favorables à l'action des microorganismes consistent en :

- Apport d'oxygène dans la couche saturée du sol et/ou apport d'autres accepteurs d'électrons assurant la prolongation de l'action des microorganismes une fois l'oxygène épuisé ;
- Apport des nutriments nécessaires à la métabolisme des microorganismes ;
- Apport des microorganismes (souches ou consortium) nécessaires à une biodégradation efficace, au cas où la flore bactérienne autochtone s'avère insuffisante (bio-augmentation) ;
- Apport des réactifs nécessaires à la mise en place de conditions physico-chimiques favorables : réactifs pour la correction du pH, ...
- Un dispositif de contrôle et de supervision du traitement permettant de suivre la distribution des additifs dans le sol, de surveiller les conditions du milieu dans les différentes parties de la zone de traitement et de suivre le progrès de la destruction des polluants.
- Un dispositif de contrôle et de supervision du traitement permettant de suivre les risques d'accidents: dispersion et migration des additifs et des polluants (ainsi que les produits intermédiaires) vers les cibles sensibles, risque d'explosion et d'incendie, ...
- En cas d'apport d'oxygène par injection d'air dans l'eau souterraine (biosparging), mise en place d'un système de surveillance de la composition de l'air du sol dans la couche insaturée et le cas échéant, mise en place d'un système de capture et de traitement de l'air du sol à proximité des infrastructures sensibles.

D'autres interventions sont parfois jugées nécessaires constituant autant de **variantes** à la technique principale :

- Circulation forcée de l'eau souterraine et recirculation de l'eau traitée ;
- Augmentation de la biodisponibilité des polluants par addition d'agents tensio-actifs et/ou de solvants ;

- Chauffage du sol à la vapeur (ou par un autre procédé) pour augmenter la vitesse des processus biologiques
- Injection d'agents colloïdaux à pouvoir adsorbant et accélérant la biodégradation.

En règle générale, la dégradation biologique des composés organiques dans le sol peut être décrite par la réaction suivante :



Le terme $\text{CH}_{1.8}\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.2}$ représentant la composition moléculaire moyenne de la biomasse.

On considère que pour dégrader 1 kg de polluant dans le sol (de type hydrocarbure) de 3 à 3,5 kg de O_2 sont nécessaires.

La biodégradation se produit dans des conditions optimales si les nutriments N et P sont disponibles dans le sol selon le ratio suivant :

C : N :P allant de 100 :10 :1 à 100 :1 :0.5 selon les composés à dégrader et les microorganismes responsables de la biodégradation.

Les chemins métaboliques suivis par les différents microorganismes (ou consortium de microorganismes) responsables de la biodégradation des polluants dans le sol sont décrits dans la littérature. A cet égard, la base de données suivante peut être consultée : (the University of Minnesota Biocatalysis/Biodegradation Database ; <http://eawag-bbd.ethz.ch/>).

2.2. Association de l'atténuation stimulée par voie biologique avec d'autres techniques de traitement

La dégradation biologique, même stimulée, n'est pas adaptée à la prise en charge de contaminations sévères résultant de la présence de teneurs très importantes en polluants, pouvant être rencontrés sous forme de phase libre dans le sol. Plusieurs raisons peuvent être évoquées :

- Temps de traitement exagérément long par rapport à la mise en œuvre de méthodes de traitement alternatives ;
- Toxicité pour les microorganismes de certains polluants lorsque présents à de fortes teneurs (Par exemple : hydrocarbures légers et BTEX) ;
- Faible biodisponibilité des polluants présents dans une phase libre, particulièrement lorsque cette dernière est piégée dans les micropores du sol ;

C'est pourquoi, l'ASVB est fréquemment mise en œuvre après utilisation d'autres méthodes d'intervention « plus actives », telles que l'excavation et la prise en charge hors site des matériaux du noyau, le traitement d'une phase libre par pump and treat au sein du noyau, le traitement par oxydation chimique ... Elle correspond alors à une phase de finition surveillée.

A l'inverse, l'ASVB peut être identifiée comme la méthode de prise en charge la plus appropriée et ensuite céder la place, en cas de performances inférieures aux prévisions, à d'autres méthodes « plus actives », principalement si des cibles sensibles sont menacées par la progression du panache.

2.3. L'apport d'oxygène (et des autres récepteurs d'électrons)

L'apport d'oxygène dans la couche saturée du sol peut être effectué de différentes manières, chacune présentant des avantages et des inconvénients.



2.3.1 Apport par application de composés libérant de l'oxygène de manière lente

Il s'agit de composés solides appliqués au sol sous forme de poudre, de gel ou de coulis (slurry).

Ces composés renferment des peroxydes (peroxydes métalliques de Ca ou de Mg ou peroxyde d'hydrogène) qui au fur et à mesure de leur dissolution dans l'eau libèrent de l'oxygène.

Différents produits sont disponibles. On peut citer par exemple :

- peroxyde d'hydrogène refermé dans une matrice minérale de phosphate de Ca. Sous forme de gel, la capacité de libération en oxygène est de 10 à 12,5 % (en poids). Sous forme de poudre, cette capacité est d'environ de 17 %. La libération d'O₂ est complète au terme de 6 mois de présence dans l'eau.
- Les composés alimentant de l'oxygène. La forme Ca a une capacité de libération en O₂ de 17% tandis que la forme Mg libère 10 % de son poids. La libération complète intervient au terme de 1 an de présence dans l'eau du sol.

Ces produits sont appliqués dans le sol de différentes manières :

- Incorporation mécanique dans l'horizon saturé du sol, pour les pollutions superficielles ;
- Injection directe sous pression dans le sol de gel ou de coulis à l'aide d'un équipement d'injection ;
- Injection passive ou active sous pression d'un coulis dans un puits d'injection crépiné dans les couches saturées du sol ;
- Mise en place de sacs perméables et amovibles renfermant la poudre ou le gel dans des puits.

Sur base des teneurs en polluants à dégrader, de la stœchiométrie de la dégradation et des quantités d'O₂ disponibles dans l'eau souterraine, il est possible d'estimer les besoins en composés à ajouter au sol. Ces quantités sont importantes si on considère que cet apport constitue la seule source d'oxygène. Ainsi la disparition de 1000 mg d'hydrocarbures par kg de sol nécessite 28 kg de composé libérant de l'oxygène à raison de 10 % pour traiter un m³ de sol.

2.3.2 Apport par injection directe d'oxygène dans la nappe

Certaines systèmes permettent d'apporter de l'oxygène gazeux dans l'eau souterraine sans générer la formation de bulles grâce à l'intervention d'un dispositif de transfert de masse constitué de fibres microporeuses. Le dispositif installé dans un puits d'injection permet de délivrer de l'O₂ sous forme dissoute dans l'eau souterraine avec des teneurs pouvant aller jusqu'à 70 mg/l. La pression d'injection étant légèrement inférieure à la pression d'entrée du gaz dans la formation saturée. L'état de sursaturation de l'eau souterraine est relativement stable avec une demi-vie de plusieurs jours (jusqu'à 7) de sorte que le volume d'eau souterraine influencé par l'apport d'oxygène peut être important (en fonction de la vitesse de circulation de l'eau souterraine).

L'absence de bulles favorise la biodégradation des polluants au détriment de la volatilisation/extraction des polluants légers observée dans les autres systèmes d'injection de gaz.

2.3.3 Apport par apport de peroxyde d'hydrogène sous forme dissoute (eau oxygénée)

L'injection d'eau oxygénée permet d'apporter rapidement des quantités importantes d'oxygène dans l'eau souterraine.

Pour la mise en œuvre de cette technique, le lecteur est renvoyé au code de bonne pratique n° 3 traitant de l'oxydation in situ.

Pour stimuler la biodégradation des polluants, la fourniture d'oxygène par apport d'eau oxygénée présente les limitations suivantes :

- Toxicité pour les microorganismes du peroxyde d'hydrogène au-delà de certaines teneurs (100 à 200 mg/l)
- Perte importante de peroxyde suite à l'oxydation de composants du sol (humus, Fe^{2+} , Mn^{2+} , ...). Les réactions avec les métaux du sol peuvent donner naissance à des précipités d'oxyde et par là être à l'origine d'une occlusion du sol.

Les réactions avec le Fer du sol peuvent être limitées par apport de phosphate (précipitation du fer disponible) ou par apport d'agents stabilisateurs organiques.

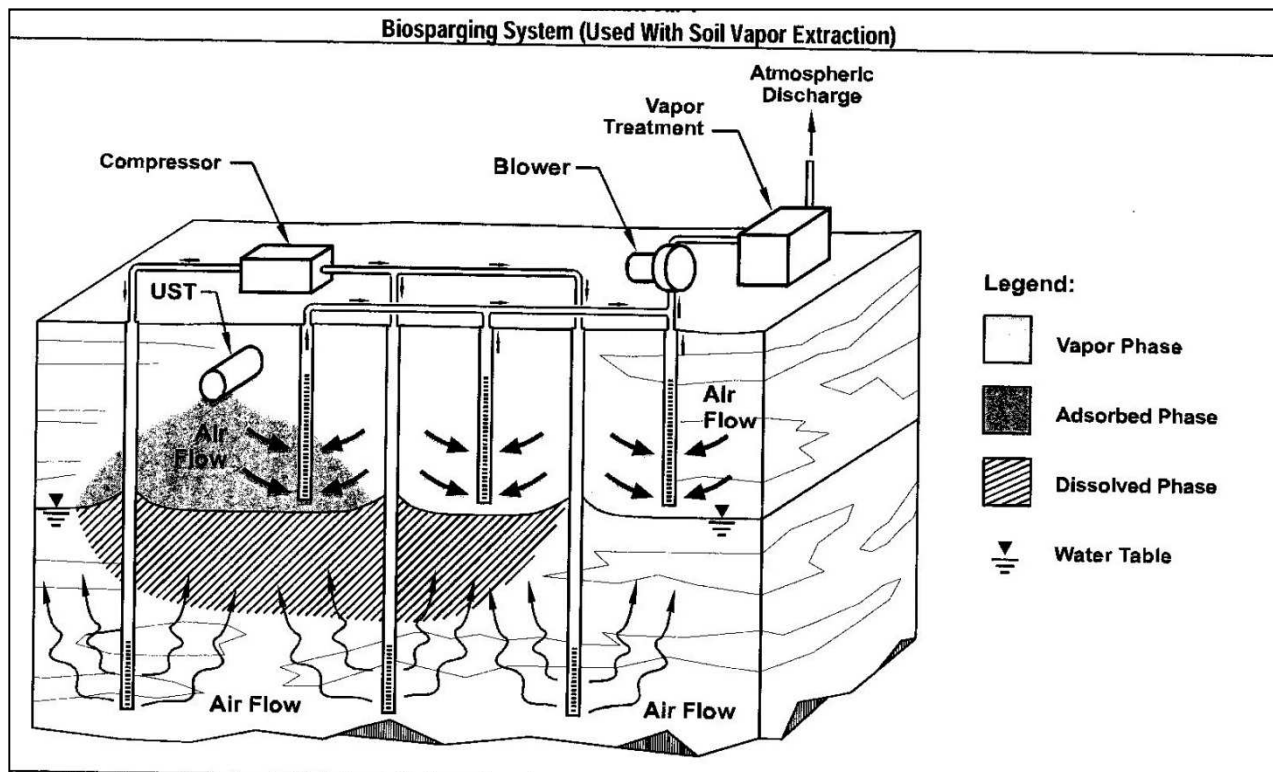
2.3.4 Apport d'oxygène par injection d'air dans l'eau souterraine (biosparging)

Comme le sparging, cette technique consiste à injecter de l'air dans l'eau du sol. La différence réside dans les volumes d'air injectés : l'objectif étant l'apport d'oxygène à l'eau souterraine et non la volatilisation et l'extraction des polluants légers, les volumes d'air injectés nécessaires sont beaucoup plus réduits. En règle générale les débits d'injection d'air sont de l'ordre de 5 à 20 m³ d'air par heure et par puits.

Le biosparging comprend également une composante biologique optimisée par l'injection de nutriments et/ou de microorganismes au droit de la zone à assainir si les conditions naturelles ne sont pas optimales.

La **Figure 1** présente un schéma de dispositif de biosparging.

Figure 1 : vision schématique d'un système de biosparging avec récupération de l'air du sol
(Extrait du document USEPA, 1995, 510-D-95-007, *How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites: A Guide For Corrective Action Plan Reviewers*)



En présence de composés polluants volatils dans le sol, il est inéluctable qu'une partie de ceux-ci sera volatilisée et entraînée vers les couches insaturées du sol. Compte tenu du degré important d'occupation du sol en Région de Bruxelles Capitale, il est impératif qu'un dispositif d'extraction de l'air du sol soit mis en place. Il appartient à l'expert d'établir lors des tests pilotes qu'un système d'extraction d'air n'est pas nécessaire en cas de mise en fonctionnement d'un système de biosparging.

Cette méthode d'apport ne peut être utilisée que lorsque les couches saturées du sol sont homogènes et suffisamment perméables (conductivité hydraulique $>10^{-6}$ m/s). La présence importante de Fe et de Mn dans l'eau souterraine constitue également un handicap en raison des risques d'occlusion des puits et du sol à proximité de ceux-ci, en résultat de la précipitation des oxydes métalliques. Les risques liés à cette méthode d'apport de l'oxygène sont :

- L'accumulation de poches de gaz enrichis en composés organiques volatiles et inflammables dans les espaces confinés ;
- Risques accrus de migration des polluants suite à la création d'un gradient hydraulique autour du puits d'injection.

2.3.5 Apport d'autres accepteurs d'électrons

L'apport d'oxygène est parfois combiné à l'apport d'autres accepteurs d'électrons de sorte que lorsque l'oxygène présent dans l'eau souterraine est consommé ($<0,5$ mg/l), la biodégradation des polluants par les microorganismes opérant en condition d'anaérobiose, peut prendre le relais.

Les accepteurs d'électrons alternatifs sont :

- Le nitrate constituant également une source d'azote ;
- Le sulfate.

Les autres accepteurs d'électrons actifs dans la biodégradation sont le Fe^{3+} , le CO_2 , ...

Le **Tableau 1** ci-après donne les accepteurs d'électrons autres que l'oxygène susceptibles d'intervenir dans la biodégradation des BTEX.

Tableau 1 : Accepteur d'électrons intervenant dans la biodégradation des BTEX

BTEX/Accepteur d'électron	Nitrate	Fe^{3+}	SO_4^{--}	CO_2
Benzène	?	+	+	+
Toluène	+	+	+	+
Ethylbenzène	-	?	?	?
m-Xylène	-	+	?	?
o-Xylène	-	+	+	+
P-Xylène	-	+	?	?

+ = dégradation avérée, ? = pas de référence, - = absence de dégradation avérée (Code van goede praktijk – Natuurlijke attenuatie, OVAM 2003)

2.4. L'apport des nutriments

De manière à constituer une biomasse microbienne suffisante pour dégrader les polluants, il est recommandé d'apporter des nutriments au sol, le plus fréquemment par infiltration de sels dissous. Cet apport vise à maintenir dans le sol le ratio C : N : P = 100 : 10 : 1 (parfois d'autres ratios sont utilisés (100 : 5 : 1 ou 100 : 10 : 10), en terme de quantités mobilisables par les microorganismes.

Les quantités optimales de nutriments à apporter sont déterminées à l'aide de tests de laboratoire (batch test). Les nutriments les plus utilisés sont : l'urée utilisable par les microorganismes après hydrolyse et ammonification enzymatique (effet retard), le nitrate et le nitrate d'ammonium.

Une teneur minimale en N (> 5 mg/l) dans l'eau souterraine est recommandée. L'établissement d'une teneur en nitrate >50 mg/l, est cependant à proscrire vu que cette teneur correspond à la norme d'intervention définie pour les eaux souterraines dans [l'AGRBC du 29/03/2018](#) déterminant les normes d'assainissement et les normes d'intervention.

2.5. Correction des propriétés physico-chimiques et physiques du sol

Le pH de l'eau souterraine doit idéalement être compris entre 6 et 8. Une correction du pH du sol par infiltration de réactif acidifiant ou alcalinisant peut s'avérer avantageuse lorsque les conditions rencontrées dans le sol s'éloignent de cet idéal. Les quantités de réactif (parfois importantes compte tenu du pouvoir tampon du sol) sont à déterminer en laboratoire.

Dans les sols acides, on veillera également à ne pas apporter l'azote sous une forme acidifiante pour le sol (ammonium et dans une moindre mesure, l'urée).

L'accélération de la biodégradation des polluants par chauffage du sol (apport de vapeur d'eau,) est parfois envisagée. En effet, comme pour tous les processus biologiques, les vitesses de dégradation sont multipliées par deux par chaque augmentation de 10 °C du sol. La température du sol doit impérativement rester comprise entre les limites 10° C et 45 ° C. Sous 5 ° C, on considère que l'activité microbienne est quasi nulle.

2.6. L'apport de microorganismes au sol (bio-augmentation)

L'apport de microorganismes spécialisés dans la dégradation des polluants peut être effectué si :

- La dégradation des polluants présents dans le sol par la flore microbienne naturellement présente dans le sol prend place de manière trop lente, et ce même après prise des mesures de stimulation (apport d'oxygène, de nutriments, ...) ;
- Les microorganismes nécessaires à l'atténuation naturelle ne sont pas présents dans le sol ou de manière insuffisante.
- Des tests microbiologiques réalisés en laboratoire sur cultures génériques et spécifiques permettent de déterminer l'absence de potentiel de dégradation de la flore endogène.

Les microorganismes peuvent être apportés au sol de différentes manières :

- Incorporation directe au sol (réserve aux pollutions superficielles) ;
- En cas de couplage avec une installation de pompage et de recirculation de l'eau souterraine, les eaux pompées et traitées de manière biologique sont réinjectées dans le sol après enrichissement en oxygène, nutriments et, en résultat du traitement, contiennent une importante population de microorganismes adaptés aux conditions prévalant dans le sol.
- Injection d'une suspension de microorganismes, enrichie ou non de nutriments, directement dans les couches saturées du sol. Certains microorganismes disponibles dans le commerce sont conçus pour être peu adsorbés sur la phase solide du sol, ce qui facilite leur dispersion.

Très souvent, l'apport des microorganismes (souches spécifiques ou consortium), doit être répété périodiquement pour prendre en compte la courte période de survie des organismes apportés.

La bio-augmentation peut être envisagée si :

- Les comptages des bactéries capables de dégrader les polluants donnent un résultat $< 10^5$ organismes (ou CFU colony forming unit) par gramme de sol ou par ml d'eau souterraine. Dans ces conditions, la dégradation du polluant risque d'être lente. Cette situation est rencontrée dans les sols pauvres en nutriments ou renfermant des composés toxiques ou inhibiteurs.
- L'activité biologique du sol doit être restaurée, par exemple après application d'un traitement physique ou chimique s'adressant à d'autres types de polluants ;

- Le délai disponible pour le traitement est réduit de sorte que la masse bactérienne doit être directement disponible et opérationnelle sans temps d'adaptation ;
- S'il existe une incertitude concernant la nature et l'efficacité des populations de microorganismes naturellement présentes.

3. Description des variantes

Les variantes suivantes peuvent être citées :

3.1. La circulation forcée avec ou sans recirculation

Selon cette technique, la migration et la distribution de l'oxygène (ou des autres accepteurs d'électrons), des nutriments et, éventuellement, des microorganismes apportés en un point dans la nappe d'eau souterraine sont favorisées par la réalisation d'un pompage de l'eau souterraine en un autre point. L'eau souterraine pompée du sol est ensuite traitée et peut, soit être rejetée, soit être infiltrée dans le sol.

Cette méthode présente les avantages suivants :

- Création d'un meilleur gradient et donc d'une circulation accélérée des accepteurs d'électrons, des nutriments et des microorganismes dans les couches aquifères par rapport à l'injection ou l'infiltration seule ;
- Le rayon d'influence des matières injectées dans la nappe est agrandi ;
- Meilleur contrôle de la migration des matériaux apportés et surtout des polluants dans le sol, en direction de cibles sensibles notamment ;
- En cas de recirculation des eaux traitées de manière biologique, apport au sol de microorganismes adaptés aux polluants et aux conditions du sol ;

Les aspects pompage, traitement et recirculation de l'eau souterraine font l'objet du Code de Bonne Pratique n°1 (Pompage de fluides dans la zone saturée du sol).

3.2. L'ASVB par apport d'agents tensio-actifs

Cette variante est utilisée lorsque la faible biodisponibilité des composés polluants constitue un frein à l'atténuation naturelle. Ce peut être le cas lorsque les polluants sont fortement adsorbés sur la phase solide du sol ou emprisonnés sous forme de produit pur dans les micropores du sol.

Pour porter remède à cette limitation, des co-solvants (composés alcooliques) et/ou des agents tensio-actifs sont injectés dans le sol, en accompagnement des nutriments et des accepteurs d'électrons. Suite à cet apport, les composés polluants sont nettement plus solubles et d'avantage disponibles pour une dégradation biologique. Le type et les quantités d'agents tensio-actifs à injecter sont à déterminer par essai de laboratoire.

Les tests à pratiquer au laboratoire pour les agents tensio-actifs sont repris dans le Code de Bonne Pratique n°1 (Pompage de fluides dans la zone saturée du sol).

3.3. L'atténuation naturelle associée au chauffage du sol par injection de vapeur chaude

Le chauffage du sol poursuit les objectifs suivants : augmentation de la solubilité et diminution de la viscosité des composés polluants présents sous forme de produit pur, avec en conséquence une mobilité et une biodisponibilité accrue pour les microorganismes. La vitesse de diffusion des polluants au travers des couches peu perméables est également augmentée.

La température plus élevée du sol accélère également les processus biologiques responsables de la dégradation. Les températures du sol et des vapeurs injectées ne doivent cependant pas dépasser 45 °C sans quoi, les vitesses de dégradation sont, au contraire, diminuées.

Les aspects liés à l'injection de vapeur chaude dans le sol sont décrits dans le Code de Bonne Pratique n°2 (Pompage des gaz dans la couche insaturée du sol).

Cette variante est rarement appliquée en Région de Bruxelles-Capitale et ne se justifie que lorsque les délais disponibles pour le traitement sont courts.

3.4. L'injection de colloïdes à pouvoir adsorbant accélérant la dégradation biologique

L'injection de solutions colloïdales à bon pouvoir de dispersion et pouvoir absorbant poursuit les différents objectifs suivant :

- Occasionner une chute rapide des teneurs dans l'eau souterraine permettant entre autres de réduire la toxicité des composés polluants pour les microorganismes, lorsque ces composés sont présents à de trop fortes teneurs ;
- Contrôler la migration des polluants dissous (ou en phase libre) dans la nappe en direction des cibles sensibles et en dehors du site ;
- Favoriser la dégradation des composés polluants en augmentant la surface de contact entre les polluants et les microorganismes.

Des résultats favorables de l'application de ce procédé sont rapportés pour les alcanes légers (de type essence), les BTEX et les solvants chlorés. Ce procédé étant encore actuellement de type innovateur, peu de retour d'expérience est disponible en Région de Bruxelles-Capitale.

4. Objectifs poursuivis : panache versus noyau

L'atténuation naturelle même stimulée s'applique d'avantage au panache de pollution qu'au noyau.

En effet, au niveau du noyau, les teneurs en polluants peuvent être élevées et ainsi se montrer toxiques ou peu favorables pour les microorganismes responsables de la biotransformation.

Par ailleurs, dans les zones de noyau, les polluants les moins solubles (hydrocarbures par exemple) 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.

La mise en œuvre des variantes -injection d'agents tensio-actifs biodégradable- et -injection de suspension colloïdale- mentionnées ci-dessus permet d'apporter une réponse aux contraintes propres au noyau de pollution : polluants en phase libre piégée dans les micropores et teneurs très élevées toxiques pour les microorganismes.

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

5.1. Polluants susceptibles d'être pris en charge par ASVB

Le **Tableau 2**, extrait du Code de Bonne Pratique n° 6 traitant de l'atténuation naturelle et présenté ci-après, reprend pour les principaux polluants rencontrés dans le sol, une appréciation du niveau de connaissance des mécanismes d'atténuation opérant dans le sol et une appréciation des chances de succès de l'atténuation naturelle.

Tableau 2 : Liste des principaux polluants rencontrés dans le sol, appréciation du niveau de connaissance des mécanismes d'atténuation et appréciation des chances de succès de l'atténuation naturelle même sans stimulation (Code van goede praktijk – Natuurlijke attenuatie, OVAM 2003)

Polluant	Processus d'atténuation les plus importants	Niveau actuel des connaissances sur les mécanismes d'atténuation	Chance de succès de l'atténuation sans stimulation
Polluants organiques			
Hydrocarbures			
BTEX	Biotransformation	Haut	Haute
Essence - gasoil de chauffage	Biotransformation	Moyen	Moyen
Aliphatiques peu volatiles	biotransformation/immobilisation	Moyen	Faible
HAP	biotransformation/immobilisation	Moyen	Faible
Huiles de créosotage	biotransformation/immobilisation	Moyen	Faible
Hydrocarbures oxydés			
Alcools à faible poids moléculaires, cétones et esters	Biotransformation	Haut	Haute
MTBE	Biotransformation	Moyen	Faible
HCOV			
PCE, TCE, CCL ₄	Biotransformation	Moyen	Faible
TCA, DCA	Biotransformation/transformation abiotique	Moyen	Faible
Dichlorométhane	Biotransformation	Haut	Haute
Chlorure de vinyle	Biotransformation	Moyen	Faible
DCE	Biotransformation	Moyen	Faible
Composés aromatiques halogénés			
<u>Fortement halogénés</u>	biotransformation/immobilisation	Moyen	Faible
PCB's			
Pentachlorophénols			
Chlorophénols			
Tetrachlorodibenzofuran			
<u>Faiblement chlorés</u>			
PCB's	Biotransformation	Moyen	Faible
Dioxine	Biotransformation	Moyen	Faible
Monochlorobenzène	Biotransformation	Moyen	Moyen
Composés aromatiques nitreux			
TNT, RDX	biotransformation/immobilisation/transformation abiotique	Moyen	Faible
Polluants anorganiques			
Métaux			

Cr	Biotransformation/Immobilisation	Moyen	Faible/moyen
Hg	Biotransformation/Immobilisation	Moyen	Faible
Non métaux			
As	Biotransformation/Immobilisation	Moyen	Faible
Se	Biotransformation/Immobilisation	Moyen	Faible
Oxy-anions			
Nitrates	Biotransformation	Haut	Faible
Perchlorates	Biotransformation	Moyen	Faible
Cyanures			
Libres	Biotransformation	Moyen	Moyen
Complexes (fer)	Immobilisation	Moyen	Faible

Le cadre reproduit à la **Figure 2** donne pour les hydrocarbures les plus couramment rencontrés une échelle relative de biodégradabilité.

Figure 2 : Echelle de biodégradabilité des différents types d'hydrocarbures

(Extrait du document USEPA, 1995, 510-D-95-007, How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites: A Guide For Corrective Action Plan Reviewers)

Exhibit VIII-9 Chemical Structure And Biodegradability		
Biodegradability	Example Constituents	Products In Which Constituent Is Typically Found
More degradable	n-butane, l-pentane, n-octane	○ Gasoline
	Nonane	○ Diesel fuel
	Methyl butane, dimethylpentenes, methyloctanes	○ Gasoline
	Benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes	○ Gasoline
	Propylbenzenes	○ Diesel, kerosene
	Decanes	○ Diesel
	Dodecanes	○ Kerosene
	Tridecanes	○ Heating fuels
	Tetradecanes	○ Lubricating oils
	Naphthalenes	○ Diesel
	Fluoranthenes	○ Kerosene
Less degradable	Pyrenes	○ Heating oil
	Acenaphthenes	○ Lubricating oils

Les autres propriétés favorables sont les suivantes :

- Le polluant est mobilisable et disponible pour une mise en contact avec les microorganismes du sol. Pour les hydrocarbures, on considère que la solubilité du composé dans l'eau doit $> 0,1$ g/l et le rapport K_{ow} (coefficient de partage octanol/eau) < 4 . Pour les polluants de type hydrocarbures, un rapport $K_{ow} < 2$ indique que les composés polluants peuvent être toxiques pour les microorganismes.
- Si le biosparging est envisagé comme méthode d'apport, les caractéristiques des polluants à dégrader doivent être les suivantes :

- Tension de vapeur $< 0,5 \text{ mm Hg}$ ($< 66,67 \text{ Pa}$)
- Point d'ébullition $> 250\text{-}300 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Constante de Henry $< 100 \text{ atm}$ ($7,5 \cdot 10^{-5}$, sans unité)

sans quoi, les polluants ont d'avantage tendance à être volatilisés et entraînés vers la phase gazeuse des couches insaturées plutôt que d'être dégradés dans les couches saturées.

- les polluants sont dégradables par voie biologique sans donner naissance à des produits de dégradation intermédiaires à pouvoir toxique pouvant s'accumuler ou migrer dans le sol.

Certaines bases de données reprennent pour les différents polluants rencontrés dans le sol, les voies de dégradation suivies dans les conditions naturelles. On peut citer à cet égard la base de données « University of Minnesota Biocatalysis/Biodegradation database » (<http://eawg-bbd.ethz.ch/>)

5.2. Situations les plus favorables

L'ASVB des polluants peut être appliquée pour le traitement d'une pollution de la nappe aquifère avec des chances de résultats favorables lorsque les circonstances suivantes sont rencontrées :

- Le polluant à prendre en charge n'est pas présent au niveau du noyau de pollution à de trop fortes teneurs (toxicité ou conditions défavorables pour les microorganismes) et est réparti de manière homogène. Pour les hydrocarbures, on considère qu'une teneur totale $> 10.000 \text{ mg/kg}$ dans le sol est défavorable à la réussite d'une atténuation stimulée. Une teneur en hydrocarbures lourds (C30-C40) $> 1000 \text{ mg/kg}$ est également considérée comme non favorable à la réussite du traitement.
- Le polluant n'est pas présent au niveau du noyau de pollution sous forme de phase libre surnageante ou sous une forme 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.
- La source de pollution est éradiquée de sorte que l'arrivée du polluant dans le sol est définitivement interrompue ;
- 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. Couche aquifère non confinée ;
- Couches insaturées (biosparging) et saturées du sol suffisamment perméables permettant l'injection ou l'infiltration et la répartition d'oxygène, de nutriments et autres additifs. Conductivité hydraulique $> 10^{-6} \text{ m/s}$. Pour des conductivités plus faibles, les distances entre puits d'injection devront être faibles (de l'ordre de 4 à 5 m) ce qui implique des coûts de mise en œuvre élevés pour les sites de grande taille.
- Teneurs en nutriments suffisantes ou légèrement insuffisantes dans le sol et l'eau souterraine ;
- Approvisionnement du sol et migration suffisants en accepteurs d'électrons ;
- pH du sol compris entre 6 et 8 ;
- Vitesse de migration des polluants dans le sol compatible avec le temps nécessaire pour l'atténuation stimulée de sorte que les cibles sensibles ne sont pas menacées ;
- Présence dans le sol des microorganismes assurant une biotransformation rapide et complète, sans passage par des produits intermédiaires toxiques et mobiles dans le sol ;



- Données acquises lors de l'étude de caractérisation suffisamment complètes et détaillées ;
- Faible teneur en matière organique, absence de lentilles ou couches tourbeuses à fort pouvoir d'adsorption des composés organiques et occasionnant une forte demande en oxygène du sol ;
- Teneurs limitées en métaux lourds susceptibles d'exercer un effet toxique sur les microorganismes. En règle générale, on considère qu'une teneur totale en métaux lourds $> 2.500 \text{ mg/kg}$ (sol sec) est un facteur défavorable à la réussite de l'atténuation compte tenu des risques de toxicité pour les microorganismes.
- Teneur en Fe^{2+} dissous dans la nappe $< 10 \text{ mg/l}$ de sorte que les risques d'occlusion du sol par précipitation d'oxydes sont limités en cas d'apport d'oxygène ;
- Profondeur limitée de la pollution à traiter sans quoi les budgets d'injection risquent d'augmenter.

Lorsque le traitement implique la mise en œuvre d'un apport d'oxygène par bio-sparging (avec extraction de la phase gazeuse des couches insaturées, les aspects favorables suivants sont à prendre en compte :

- Profondeur minimale de la nappe $> 1 \text{ m}$ par rapport à la surface du sol ;
- Présence d'un revêtement imperméable à la surface du sol ;
- Faible présence de polluants volatiles dans la nappe ;
- Absence de couche imperméable dans le sol donnant un caractère confiné à la nappe d'eau souterraine ;

Lorsque le traitement implique la mise en œuvre de la variante atténuation stimulée + chauffage du sol par injection de vapeur, les aspects favorables supplémentaires suivants sont à prendre en compte :

- La conductivité thermique du sol est bonne et homogène ;
- Absence d'éléments enfouis susceptibles d'être abîmés par suite de l'augmentation de température : fibres optiques, conduites en PE, conduites avec goudrons isolants, ...

Lorsque le traitement implique la mise en œuvre de la variante atténuation stimulée + addition d'agent tensio-actifs et/ou co-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, ...

6. Examen à priori de la faisabilité technique

6.1. Critères d'acceptation

Les principaux critères d'acceptation de l'ASVB comme méthode de prise en charge sont les suivants :

- Les composés polluants sont totalement dégradables de manière biologique dans les circonstances qui prévaudront sur le site durant **le traitement** ;
- Un monitoring suffisant de la situation a été réalisé établissant que l'atténuation prend bien place dans le sol et se poursuit, et ce, de manière suffisamment efficace pour atteindre les objectifs **de traitement** ;
- Les objectifs **de traitement** peuvent être atteints dans un intervalle de temps raisonnable et ce délai n'est pas exagérément long en comparaison avec d'autres méthodes **de traitement** ;
- Des données objectives et suffisantes sont fournies permettant d'établir que durant le processus d'ASVB, les récepteurs sensibles sont et vont rester protégés et qu'aucune extension sensible du panache de pollution ne sera observée.
- L'ASVB est à considérer comme une technique « innovante » dans la mesure où les résultats ne peuvent être entièrement garantis. Au cas où les objectifs **de traitement** ne sont pas atteints au terme d'un délai raisonnable, la mise en œuvre d'une technique d'intervention plus « active » doit être envisagée. A cet égard un projet détaillé d'une variante doit être disponible lors de la rédaction du projet.

Les remarques suivantes peuvent être formulées :

- Les degrés de fiabilité et de précision des données qui doivent être fournies dépendent du type, de l'importance de la contamination et des risques qui en découlent ;
- Le délai estimé pour atteindre les objectifs **de traitement** doit être en relation avec les conditions prévalant sur le site : propriétés physico-chimiques des polluants, hydrogéologie du site, importance de l'aquifère ;
- L'utilisation du site ne doit pas être empêchée ou limitée sur le long terme par le processus d'ASVB. Les zones contaminées du site doivent rester accessibles pour les opérations de supervision et, le cas échéant, l'autorisation des voisins doit être demandée au préalable si les opérations de supervision doivent prendre place sur les parcelles voisines.

6.2. Etape préliminaire : faisabilité à priori

Au minimum les données suivantes doivent être disponibles lors de l'examen de la faisabilité du traitement :

Paramètres de polluants :

- Type de pollution ;
 - Localisation et extension (verticale et horizontale) du noyau de pollution ;
 - Localisation et extension (verticale et horizontale) du panache de pollution ;
 - Teneurs (grandeur et répartition) dans les zones de noyau et de panache ;
 - Charge polluante dans les zones de noyau et du panache pour les différents compartiments du sol (phase solide et liquide et gazeuse) et existence d'une phase de produit pur.
- L'examen de la phase gazeuse est également nécessaire en présence de polluants volatiles.

Cet examen porte sur les polluants responsables de la contamination et leurs produits de dégradation à caractère polluant

- Origine et cause de la pollution pour s'assurer que la source est éradiquée ou contrôlée ;
- Teneurs de fond dans les environs du site à traiter; mise en évidence éventuelle d'autres sources de pollution dans le voisinage.

Paramètres du sol :

- Si un aquifère est présent et concerné par la contamination : importance (physique et économique) de l'aquifère ;
- Présence d'une installation de captage (existante ou potentielle) dans l'aquifère ;
- Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère : conductivité hydraulique, gradient hydraulique, vitesse de circulation de l'eau, direction de l'écoulement (et variations éventuelles de celle-ci), composition du sol (hétérogénéité et présence de différentes couches), voies d'écoulement préférentielles, ... ;
- Paramètres influençant la mobilité des polluants (pH, teneur en argile et en matière organique, ...) ;
- Paramètres influençant la disponibilité des polluants à la (bio)dégradation : potentiel redox, disponibilités en accepteurs d'électrons, présence de pollutions multiples, ...

Récepteurs :

Identification et localisation des cibles sensibles actuelles ou potentielles : aquifères, installations de captage, eaux de surface, zone d'habitat, zones vertes et autres zones particulières (selon la définition donnée à l'annexe 3 de [l'AGRBC du 29/03/2018](#)).

L'examen de la faisabilité à priori sera effectué selon les critères suivants :

Faisabilité technique :

- Examen des propriétés physico-chimiques des polluants présents, de leur toxicité et de leur susceptibilité à la (bio)dégradation, selon les données de la littérature ;
- Examen des caractéristiques et propriétés du sol et de l'aquifère à traiter et influence de ces paramètres sur l'atténuation naturelle ;
- Examen de l'importance et de l'évolution de la contamination par les polluants d'origine et les produits de dégradation à potentiel polluants : charge polluante, teneurs présentes, extension latérale et verticale, vitesse de migration des polluants (polluants d'origine et produits de dégradation intermédiaires) stabilité ou évolution de l'extension de la tache de pollution (panache et noyau) ;
- Présence d'un risque avéré ou potentiel pour les cibles sensibles ;
- Examen des caractéristiques spécifiques du site et de leur compatibilité avec une dégradation biologique stimulée des polluants, sur la base des données rapportées dans la littérature : par exemple le pH, le potentiel redox du sol, ...

Aspects pratiques de la faisabilité :

- L'affectation future du site est-elle bien définie ? L'accessibilité du site est-elle garantie pour toute la durée de l'atténuation ? Le niveau de risque sera-t-il stable durant toute la durée de l'atténuation ?

- Mode d'occupation et propriétaires des parcelles voisines susceptibles d'être impactées en cas d'extension de la tache de pollution, accessibilité de ces parcelles pour les actes de supervision ;
- En cas de fonctionnement non suffisant de l'atténuation naturelle, les techniques de traitement alternatives à mettre en place sont-elles définies et peuvent-elles être mises en œuvre de manière réaliste ? La faisabilité des techniques alternatives doit être vérifiée durant le déroulement de la prise en charge par atténuation naturelle.
- 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 ou d'infiltration, de pompage et récupération des gaz (pour le traitement par biosparging) et des liquides (pour le traitement par circulation forcée et recirculation), ainsi que le dispositif éventuel de traitement des gaz pompés, des liquides pompés et, éventuellement le dispositif de préparation vapeur ;
- 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, fuites
- 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 ou gazeuse : 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, ...). La présence d'impétrant ne doit pas constituer un obstacle à la mise en place des dispositifs d'injection.
- Absence d'infrastructures enterrées sensibles à la corrosion du fait de l'application d'accepteurs d'électrons (oxygène et peroxydes), d'agents tensio-actifs éventuels: citernes, conduites, plots métalliques ou béton ferrailé, ...

Faisabilité financière et économique

- Etablir la faisabilité technique d'une prise en charge par l'ASVB implique l'exécution d'une étude détaillée ce qui, en soi, entraîne déjà des coûts importants ;
- Les coûts d'une supervision de longue durée peuvent également être élevés. Ces coûts ont-ils été correctement estimés, même dans une vision de long terme. L'impact économique d'une prise en charge à long terme sur le mode d'utilisation de la parcelle et sa valeur commerciale est-il évalué ?
- Evaluation des probabilités qu'une technique alternative de traitement doive être mise en œuvre. L'évaluation des coûts de l'atténuation stimulée doit prendre en compte l'éventualité de la mise en œuvre de cette technique alternative.
- La comparaison entre les coûts à long terme de l'ASVB et les coûts à court terme d'une technique alternative plus active doit être menée sur des bases fiables et complètes. Par exemple les surcoûts liés aux incertitudes des prises en charge par excavation + traitement hors site doivent être prise en compte, de même que les surcoûts liés à la longue durée de l'atténuation naturelle, à l'examen détaillé de la zone de traitement et l'éventualité de la nécessité de faire appel à une technique alternative.

Possibilité d'acceptation par l'opinion publique et les autorités

Cette possibilité repose sur les éléments suivants :

- Fiabilité de l'évaluation des risques ;
- Probabilité de succès de l'ASVB à comparer avec la fiabilité des autres techniques de prise en charge plus « actives » ;
- Séjour plus long de la parcelle concernée dans la catégorie 4 de l'inventaire de l'état du sol.

L'impact des différents critères de l'examen sur la faisabilité d'une prise en charge par atténuation naturelle peut être résumé comme présenté (de manière qualitative) dans le **Tableau 3**.

Remarque : l'ASVB comme méthode de prise en charge d'une pollution ne peut être acceptée si les mécanismes dominants sur lesquels elle repose sont la dilution, la volatilisation, l'adsorption réversible et la précipitation réversible.

Tableau 3 : Examen qualitatif de l'impact des différents critères de l'examen de la faisabilité a priori

Critère de l'examen	Situation favorable	Situation intermédiaire	Situation défavorable
A. Aspects techniques			
Source de la pollution	Éliminée	Épuisée ou presque épuisée	Présente et encore active
NAPL présente, couche flottante	Absente ou éliminée	Présente mais de faible extension	Présente et d'extension importante
Panache	Bien délimité spatialement et en phase de réduction	Stable	Contours mal définis et en phase d'expansion
Risque d'extension au-delà des limites de la parcelle	Pas de risque	Risque limité	Risque avéré
Susceptibilité théorique des polluants à une décomposition compte tenu des conditions spécifiques prévalant sur le site	Bonne	Moyenne	Faible ou incertaine
Mobilité du contaminant	Faible	Moyenne	Haute
Mécanisme de l'atténuation	Décomposition irréversible jusqu'au stade final		Décomposition incomplète / atténuation réversible
Produits de décomposition intermédiaires	Produits intermédiaires également décomposés/ne générant pas de risque		Produits intermédiaires s'accumulant/générant un risque
Effets délétères résultant de la combinaison des effets de pollutions mixtes	Pas d'effet : l'atténuation naturelle suit son cours sans être influencée		Effet de la combinaison des pollutions : l'atténuation naturelle du polluant 1 influence négativement celle du polluant 2
Couches aquifères : homogénéité et isotropie	Aquifère homogène et isotrope		Hétérogène/anisotrope - Voies de circulation préférentielles
Présence d'une cible sensible :			
- actuelle	Absence	Présente mais faible risque	Présente : risque élevé
- potentielle	Absence	Présente mais faible risque	Présente : risque élevé
Proximité d'une zone de protection de captage ou d'un captage	Absence		Présence d'une zone de protection de type I, II ou III selon la définition donnée par L'AGRBC du 19.09.2002
Importance de l'utilisation de l'eau souterraine, actuelle ou dans le futur			
- usage privé	Faible	Moyen	Élevée
- Usage industriel	Faible	Moyen	Élevée

Fiabilité des données de supervision	Haute : enregistrement des données depuis plus de deux ans		Faible : enregistrement des données depuis moins de deux ans
Validité des données concernant la charge polluante et la répartition entre les différentes phases du sol et l'extension en 3D	Elevée (polluant uniquement sous forme dissoute)		Faible : par exemple incertitude concernant la présence d'une phase de produit pur
B. Autorités compétentes			
Possibilité d'acceptation	Pas de conflit avec les directives et procédures en vigueur ; pas d'incertitude technique	Pas de conflit avec les directives et procédures en vigueur ; incertitudes techniques	Conflit avec les directives et procédures en vigueur ; incertitudes techniques
C. Aspects pratiques et faisabilité économique			
Points de la supervision situés en dehors des limites du site	Accessibilité sans restriction	Accès possible	Accessibilité limitée ou impossible
Aspects financiers	Budgets disponibles pour le long terme, source de financement garantie par contrainte légale	Budgets disponibles pour le long terme, source de financement non garantie par contrainte légale	Pas de budget prévu pour le long terme

7. Examen spécifique de la faisabilité

Les étapes suivantes peuvent être suivies.

7.1. Première étape de l'examen

Analyse de tendance à effectuer sur les données de teneurs mesurées lors de campagnes réalisées depuis plusieurs années. Une tendance à la baisse de la gravité de la contamination peut être établie par :

- La baisse des teneurs mesurées dans différents piézomètres d'observation
- La chute des teneurs le long de l'axe de circulation de l'eau au sein du panache

Si la tendance à la baisse représente l'argument principal permettant d'établir la faisabilité de l'ASVB, cette tendance doit être définie sur la base de mesures effectuées depuis 3 ans au moins avec par année, exécution de 2 à 4 campagnes de mesures. De cette façon l'évolution des teneurs et de la charge polluante pourra être considérée comme statistiquement significative. La fixation du nombre et de la fréquence requis des campagnes de mesure doit prendre en compte les variations saisonnières ou permanentes des paramètres hydrogéologiques du site.

L'analyse statistique de la tendance doit reposer sur un nombre suffisant de points de mesure (par exemple, un minimum de 8 points de mesure si l'examen repose sur le test de Mann-Kendall). A cet égard, les données récoltées lors des études de reconnaissance et détaillées peuvent être utilisées si les méthodes de collecte de mesures sont comparables et n'introduisent pas un biais. Si une analyse de tendance est menée de manière statistique, l'expert apportera les justifications nécessaires à la méthodologie utilisée.

Remarque : la mise en évidence d'une tendance évolutive à partir des mesures de teneurs ne donne pas d'indication sur les mécanismes responsables de la diminution des teneurs mesurées : dégradation des polluants ou dilution ou atténuation réversible.

7.2. Deuxième étape de l'examen

Cet examen vise à établir que la (bio)dégradation des polluants prend bien place sur le site. Ceci peut être établi de différentes manières :

L'activité des microorganismes nécessaires à la biodégradation est bien présente : les bactéries pouvant utiliser le polluant comme substrat de croissance sont détectées dans les zones polluées du sol en nombre suffisant, l'activité des microorganismes est détectée par l'identification des produits de dégradation des polluants (surtout si ceux-ci sont absents des échantillons prélevés en dehors des zones polluées). Par exemple, la biodégradation des BTEX donne naissance à des produits intermédiaires tels que les phénols et l'acide benzoïque. Les alcanes peuvent donner naissance à des produits intermédiaires de type acides gras, cétones, aldéhydes et alcools.

- Les conditions prévalant dans les couches saturées du sol sont favorables à la dégradation des polluants : la fourniture et la distribution des accepteurs électrons nécessaires à la dégradation est assurée (ou peut être améliorée), la biodisponibilité du polluant est suffisante (ou peut être améliorée), la durabilité de l'atténuation naturelle est assurée (ou peut être améliorée).
- Utilisation d'indicateurs géochimiques ou biochimiques de l'atténuation naturelle : diminution des teneurs en O_2 et en nitrate, augmentation des teneurs en méthane, en Fe^{2+} et Mn^{2+} dissous, présence des produits de la dégradation des polluants (tels que les chlorures) ou de produits intermédiaires. Ces mesures donnent des informations sur les types de mécanismes responsables de l'atténuation et sur la vitesse de dégradation des polluants. Elles



permettent également de distinguer la contribution des autres mécanismes (non destructifs de l'atténuation tels que la dilution, la volatilisation, la sorption réversible, ...). L'exploitation de ces données sous la forme de cartes de distribution de valeurs (carte de contours) en comparaison des cartes de distribution des teneurs en polluants peut être un bon outil d'interprétation. La relation entre teneurs en polluants et valeurs des indicateurs indirects en fonction de la distance par rapport à la source peut ainsi être visualisée.

Les **Tableaux 4a, 4b et 4c** suivants présentent les paramètres qui doivent être mesurés et/ou quantifiés avant le lancement d'un programme de traitement d'une pollution du sol et/ou de l'eau souterraine au moyen de l'ASVB. 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 d'assainissement ou de gestion du risque, ou avant le lancement des tests de laboratoire éventuels et/ou de tests pilotes, soit avant l'exécution de 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.

7.3. Troisième étape de l'examen

Cette étape vise à confirmer la faisabilité de l'ASVB à l'aide de tests de laboratoire et de tests menés sur le terrain à petite échelle. Ces tests visent à apporter une réponse aux questions suivantes :

- Le sol pollué peut-il être assaini par voie biologique ?
- Quelles sont les conditions optimales du procès ?
- A quelle vitesse le traitement se déroulera-t-il ?
- Quelles sont les teneurs résiduelles auxquelles il sera possible d'accéder ?
- Quels produits intermédiaires (éventuellement toxiques et/ou non décomposables) seront formés durant le procès ?
- Quel est l'effet de l'apport de nutriments (N et P) ?
- Quel est l'effet de l'inoculation du sol avec des microorganismes ?
- Quel est l'effet de l'apport d'autres additifs tels que des agents tensio-actifs, des co-métabolites ?

Les résultats de ces tests seront utilisés lors de la phase de conception, soit dans le projet d'assainissement ou de gestion des risques, soit avant l'exécution de travaux ne nécessitant pas de projet spécifique. Les tests de laboratoire sont généralement conduits sous la forme de « Batch » par agitation d'une suspension de sol dans de l'eau souterraine (coulis), avec approvisionnement en air. Ces conditions sont à considérer comme optimales et débouchent sur une biodégradation plus rapide qu'en conditions de terrain. Durant le traitement, les paramètres suivants sont mesurés de manière régulière :

- Production de CO₂;
- Consommation d'O₂;
- Systématiquement : pH et teneurs en polluants (d'origine et intermédiaires).

En début et en fin de traitement, le pH et les teneurs en polluants (d'origine et produits intermédiaires) sont mesurées, ainsi qu'éventuellement, les teneurs en azote, phosphore. Ces



analyses peuvent être complétées par des comptages des bactéries spécifiques responsables de la dégradation, des analyses PCR et la mesure des isotopes stables.

Chaque type de traitement fait l'objet de répétitions et d'un traitement de contrôle abiotique. Ce dernier permet de faire la distinction entre diminution des teneurs due à la biodégradation et diminution due aux phénomènes abiotiques (sorption, dégradation chimique, ...). Ces tests permettent d'établir un bilan de masse et la cinétique du traitement. Ils visent également à établir la combinaison optimale des facteurs (addition de nutriments, d'agents tensio-actifs et éventuellement de souches bactériennes) à appliquer lors du traitement en vraie grandeur. Ils donnent également une idée sur les teneurs résiduelles en polluants minimales qu'il est possible d'escompter en conditions optimales, ce qui autorise une proposition plus fiable d'objectifs [de traitement](#). Ils permettent également d'établir que la décomposition du polluant peut être menée de manière complète jusqu'à la production de composés inoffensifs naturellement présents dans le sol. Ils peuvent être, par exemple, utiles pour mettre en évidence la dégradation de composés récalcitrants (le benzène en conditions anaérobiques, le MTBE en conditions aérobiques).

L'exécution de ces tests en batch requiert environ de 6 à 8 semaines (fonction du type des polluants présents). Un échantillon de 2 Kg représentatif de la couche saturée polluée du sol est nécessaire.

Une variante à ces tests en batch est donnée par les [tests de respirométrie](#) en laboratoire. Selon cette méthode un flux gazeux circule en continu au travers la suspension de sol et les teneurs en CO₂ et en O₂ de l'effluent gazeux sont analysées en continu. Il est possible de mesurer ainsi la vitesse de respiration des microorganismes. Dès que cette dernière chute, le test est arrêté et les teneurs résiduelles mesurées. Ce test mené en conditions non fermées est applicable aux polluants non volatils (huiles lourdes, HAP, ...).

Des tests de laboratoire à plus grande échelle, dans des [réacteurs](#), peuvent également être menés. Dans ces réacteurs (volume allant jusqu'à 100 l), les paramètres tels que teneurs en O₂, CO₂, T°, ... peuvent être mesurés en continu et des échantillons de sol et d'eau souterraine sont prélevés de manière régulière.

Les [tests en champs](#) à mener dans la couche saturée du sol sont généralement de type « push-pull ». Une quantité connue d'eau est injectée directement dans la couche aquifère au moyen d'un puits d'injection. Cette eau saturée en O₂, et éventuellement enrichie en nutriments et agents tensio-actifs, est également additionnée d'un composé traceur non biodégradable (de type Br⁻ par exemple). De manière périodique, des échantillons d'eau souterraine sont prélevés dans le puits d'injection et analysés pour leur teneur en O₂ et en traceur. Les mesures des teneurs du traceur permettent d'estimer de manière quantitative la dilution intervenue des additifs injectés. Sur base de données mesurées, il est possible d'obtenir une estimation de la vitesse de respiration.

En cas de mise en œuvre du biosparging, des tests « start-stop » peuvent être conduits. Ceux-ci consistent en l'injection d'air dans un puits d'injection et une fois l'injection terminée, l'échantillonnage périodique de l'eau souterraine à partir d'un piézomètre de monitoring et le suivi de l'évolution des teneurs en O₂ dissous. Ce test permet d'estimer les vitesses de respiration auxquelles on peut s'attendre en cas de biosparging.

7.4. Nécessité d'un test pilote

L'expert trouvera dans [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](#) les conditions rendant nécessaire les argumentations et le contenu d'un test pilote.

Compte tenu de la durée importante que pourrait prendre un test pilote, cette option n'apparaît pas justifiée. Si les résultats de l'examen de faisabilité amènent à considérer l'ASVB comme une

méthode de prise en charge adaptée, le traitement de la pollution et les opérations de supervision peuvent être lancés.

Les opérations de supervision menées lors du traitement permettront de statuer, lors de la phase de démarrage, si l'ASVB se révèle aussi efficiente qu'attendu ou si, au contraire, une ou plusieurs méthodes de prise en charge alternatives doivent être mises en œuvre.

Cependant en cas de biosparging, un test pilote est nécessaire afin de préciser, à l'aide d'un test en vraie grandeur les paramètres suivants :

- Rayon d'influence du puits d'injection d'air en termes d'apport en O_2 ;
- Débits et pression d'injection ;
- Niveau piézométrique au niveau de l'injection ;
- Teneurs en polluants volatils dans les couches insaturées du sol ;
- Le cas échéant, performances des puits d'extraction de gaz dans les couches insaturées : rayon d'action, débits et dépression de l'extraction et composition des gaz extraits.

Pour l'exécution des tests pilotes en cas de biosparging, le lecteur est renvoyé au Code de Bonne Pratique n° 2 traitant de l'extraction des gaz dans la couche insaturée du sol.

En cas d'injection directe sous pression ou d'apport dans des puits d'injection de gels ou coulis contenant des matériaux à pouvoir de lente libération d' O_2 , un test pilote sera également réalisé afin de définir la maille optimale séparant les points d'injection. Lors de ce test pilote les paramètres suivants sont mesurés :

- Rayon d'influence du point d'injection en termes d'apport d' O_2 ;
- Teneur en O_2 au sein du panache à traiter.

De manière à diminuer les coûts d'exécution des tests pilotes (sans mobiliser la machine d'injection), il est possible de réaliser des tests simplifiés : un piézomètre rempli de l'additif et 3-4 piézomètres en périphérie permettant de mesurer les paramètres.

En cas d'ASVB par chauffage du sol, un test pilote sera également réalisé de manière à déterminer les débits adéquats d'injection de vapeur et l'écartement entre les puits d'injection individuels.

Tableau 4a : paramètres des polluants à collecter avant le lancement d'un traitement par ASVB

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 totale	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 totale	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	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
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	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
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	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Analyse de tendance des teneurs sur plusieurs années dans le sol	Forages, prélèvement et analyses d'échantillons de sol et tracé des délimitations (krigeage)	Nombre de points de mesures et de campagnes de mesures suffisants - Pour les polluants d'origine et les produits intermédiaires
Analyse de tendance des teneurs sur plusieurs années dans l'eau souterraine	Placement de piézomètres, prélèvement et analyse d'échantillons, tracé des délimitations (krigeage)	Nombre de points de mesures et de campagnes de mesures suffisants - Pour les polluants d'origine et les produits intermédiaires
Analyse de tendance sur plusieurs années de la charge polluante totale	Sur base des volumes estimés et des teneurs moyennes	Nombre de points de mesures et de campagnes de mesures suffisants - Pour les polluants d'origine et les produits intermédiaires
Teneurs dans la phase gazeuse du sol		
Mesure des teneurs en polluants dans la phase gazeuse du sol	Placement de puits d'observation et mesure des teneurs dans le gaz du sol	Si jugé nécessaire par l'expert compte tenu de la contribution de la phase gazeuse dans la charge polluante totale
Présence d'une phase libre (DNAPL)		
Vérification de la présence d'une phase libre	Prélèvement et analyse d'échantillons d'eau et de sols dans la zone du noyau	
Extension latérale et en profondeur 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	Si présente
Estimation de la charge polluante globale, toutes phases du sol confondues	Sur base des volumes estimés et des teneurs moyennes	
Propriétés physico-chimique des polluants présents		
Disponibilité des polluants présents pour une dégradation spontanée dans le sol - Conditions favorables et défavorables	Données de la littérature	Pour tous les polluants présents pris individuellement - Effet de la combinaison de différentes pollutions

	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut
	= paramètre dont la mesure ou l'estimation est utile

Tableau 4b: paramètres du sol à mesurer avant lancement d'un traitement par ASVB

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, conductivité hydraulique, vitesse et sens d'écoulement, caractère confiné ou semi-confiné	Cartes géologiques et géotechniques, sondages et description des couches de sol, placement de piézomètres, mesures piézométriques et calage en altimétrie, tests de pompage ou slug tests, ...	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
Variations saisonnières des niveaux piézométriques	Suivi piézométrique lors de campagnes successives	
Caractéristiques du sol dans les couches saturées		
Teneurs en nutriments : azote (nitrate et ammoniacal), Phosphore assimilable	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	
Recensements bactériens et examen par PCR : population de bactéries spécifiques	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	
Caractéristiques de l'eau souterraine		
Paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine: pH, Eh, conductivité électrique, O ₂ dissous, T°	Mesure sur le terrain	Disponible au terme de l'étude détaillée
Paramètres chimiques : mesure des produits de dégradation intermédiaires, TOC, accepteurs d'électrons : Nitrate, Fe(III), Mn(IV), sulfates, CO ₂ , risque d'occlusion : Fe (II) et Mn (II)	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	
Autres paramètres chimiques : nitrites, Fe(II), Mn(II), sulfite, soufre.	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	
Indice phénol	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	Indicateurs de la décomposition de composés aromatiques tels que les BTEX (OVAM 2003)
Teneurs en nutriments : azote total, Phosphates, Ca	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	
Recensements bactériens et examen par PCR : population de bactéries spécifiques	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	
Paramètres complémentaires en cas de circulation forcée (par pompage) et recirculation de l'eau traitée		
Rayons d'influence d'un puits de pompage	Test de pompage de longue durée avec piézomètres d'observation	
Relation rabattement et débits pompés	Test de pompage de longue durée avec piézomètres d'observation	
Degré de confinement des différentes couches aquifères superposées	Test de pompage de longue durée avec piézomètres d'observation	
Paramètres physico-chimiques de l'eau pompée : teneurs en Fer, Manganèse, Arsenic, Carbonates, particules en suspension, pH, Eh, Sulfates,	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	
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, ...)
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	
Capacité du dispositif d'intercepter la totalité ou la quasi totalité des composés injectés et des polluants dont la mobilité est stimulée	Voir essai pilote + simulation à l'aide de modèle d'écoulement et de transport : MODFLOW, MODPATH ou autres	
Paramètres complémentaires en cas de biosparging (avec extraction des gaz du sol)		
Type de revêtement de surface	Observation du degré d'imperméabilisation de la surface du sol	Pour le traitement des pollutions superficielles
Perméabilité du sol à l'air	Tests de pompage de l'air du sol	
Rayon d'influence des puits d'extraction	Tests de pompage de l'air du sol	

	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut
	= paramètre dont la mesure ou l'estimation est utile

Tableau 4c : paramètres du site d'intervention à évaluer avant lancement d'un traitement par ASVB

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 : pré-fouilles, passage au détecteur CAT, ...	Réalisé lors des études de reconnaissance et détaillées
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 pour les campagnes de supervision et pour l'acheminement des équipements	Inventaire	
Possibilité que le panache de pollution atteigne ou s'approche des parcelles voisines	Simulation sur la base des données recueillies	
Accessibilité des parcelles voisines si les campagnes de supervision doivent ou peuvent y prendre place	Inventaire	
Présence d'infrastructures susceptibles d'être endommagées suite à la présence du polluant et des produits de dégradation compte tenu de la durée du traitement	Inventaire	
En cas de circulation forcée avec ou sans recirculation de l'eau pompée		
Présence d'infrastructures dont la stabilité pourrait être menacée suite au rabattement	Inventaire et étude de stabilité si le rabattement est important, notamment supérieur aux variations saisonnières	
Présence d'infrastructures susceptibles d'être menacées par les additifs de stimulation	Inventaire des infrastructures susceptibles d'être impactées par les additifs oxydants (conduites métalliques) et les agents tensio-actifs (goudrons isolants)	
En cas de biosparging		
Présence de cibles aériennes sensibles au bruit, odeurs, vapeurs, ... Sur le site et dans ses alentours immédiats	Inventaire	
Présence d'infrastructures susceptibles d'être impactées par une remontée de la nappe	Inventaire des infrastructures sensibles : voiries, parkings, ...	
	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut	
	= paramètre dont la mesure ou l'estimation est utile	

8. Description d'une installation type

Le type d'installation nécessaire à la mise en œuvre d'une ASVB dépend du mode d'apport de l'oxygène (et des autres accepteur d'électrons) et des autres additifs aux couches saturées du sol. Pour chaque type d'installation, on peut mentionner les éléments suivants.

8.1. Infiltration active ou passive

- Un dispositif de préparation et conditionnement de la solution à injecter avec éventuellement une unité de stockage des additifs. Cette solution consiste en eau saturée en oxygène, éventuellement enrichie en peroxyde d'hydrogène, nutriments, agents tensio-actifs ...
- 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'additifs sur la totalité de la puissance de la tâche. Les distances entre les puits d'infiltration sont calculées pour amener approvisionner en additifs la totalité du panache à traiter.
- 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) + circulation forcée + recirculation éventuelle

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

- Un ou plusieurs puits ou (drains) d'interception, localisés en aval hydrogéologique du panache, entre celui-ci et toute cible sensible éventuelle. 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 calculés 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 de réinfiltration).
- Une station de traitement des eaux pompées.
- Un point d'échantillonnage de l'eau traitée avant son rejet ou sa recirculation.

NB. Un code de bonne pratique distinct traite des opérations de traitement en surface des eaux et autres fluides pompés du sol. En cas de recirculation de l'eau traitée, les méthodes de traitement par voie biologique seront préférentiellement utilisées de manière à enrichir les eaux souterraines en microorganismes adaptés.

8.3. Injection directe sous pression de composés à libération lente d'O₂

- Un dispositif de préparation et conditionnement des gels ou coulis à injecter avec éventuellement une unité de stockage des additifs.
- Une machine mobile assurant l'injection du réactif directement dans le sol suivant 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. 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 matière injectée 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. Mise en place de composés à libération lente d'O₂ par apport dans des puits d'injection

- Un réseau de puits d'injection situés en amont hydrogéologique ou au sein du panache de contamination. Les crépines des puits d'injection traversent toute la puissance du panache de contamination (soit individuellement ou au moyen de puits juxtaposés). Les composés à libération lente sont mis en place dans les puits soit sous forme de gel, soit sous forme de cylindres de poudre à emballage perméable.
- La distance entre les puits d'injection et la fréquence de renouvellement des matériaux injectés sont déterminées sur base des résultats du test pilote.

8.5. Biosparging

- Un ou plusieurs puits d'injection d'air dans la couche saturée du sol et un dispositif de mise sous pression équipé de manomètres, débitmètres et sondes de température. La distance entre les puits, la pression et les débits d'injection sont établis sur la base des résultats du test pilote. A cet égard, il convient de signaler que les données de la littérature recommandent que la crépine des puits d'injection ne dépasse pas 1 m de longueur et que la crépine soit installée au minimum à 1,5 m sous la base du panache.
- Un ou plusieurs puits d'extraction des gaz dans la couche insaturée du sol. Les distances entre les puits d'extraction sont calculées pour intercepter la totalité des composés volatiles entraînés vers les couches non saturées du sol par l'injection d'air.
- Un dispositif d'extraction des gaz : pompes à vide, ventilateurs ... connectés à un ou plusieurs puits d'extraction. De manière à réduire les nuisances acoustiques, les unités de pompage peuvent être situées dans des enceintes isolées (caissons, containers, ...).



- Un dispositif de régulation de l'injection d'air et du pompage des gaz, pouvant prendre des formes très variées : capteurs électriques (niveau max –niveau min) dans les piézomètres surveillant la remontée de la nappe, capteurs reliés aux manomètres présents dans les différentes sections du dispositif, 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 des gaz extraits reliant la(les) pompe(s) aux puits d'extraction et ensuite celle(s)-ci à la station de traitement. Ces conduites préférentiellement enterrées sont équipées de clapets anti-retour et lors de leur mise en place, attention est portée sur l'absence de sections à contre-pente où les condensats pourraient s'accumuler. Des débitmètres permettent de suivre en instantané et en cumulé les volumes extraits au niveau des puits individuels ou au niveau des pompes. Des manomètres sont également établis au niveau des pompes d'extraction, des puits et en différents points de l'installation de manière à vérifier l'efficacité des pompes et dépister les points d'entrée d'air. Un ou plusieurs explosimètres sont établis avant le passage des gaz dans les pompes. Avant leur passage dans celles-ci, les gaz circulent dans un séparateur air/eau pour la récupération des condensats et au travers un filtre à particules.
- Une station de traitement des gaz pompés avant leur rejet dans l'atmosphère.
- Un dispositif d'échantillonnage comportant des points de prélèvement des gaz au niveau des différents puits individuels ou des différentes pompes ainsi qu'au niveau de la station de traitement de manière à échantillonner les gaz traités avant leur rejet dans l'atmosphère. La station est également équipée de dispositifs de régulation, alarme et mise à l'arrêt en cas de pannes et dysfonctionnements.
- Un dispositif de supervision du traitement.

8.6. ASVB par chauffage du sol (par injection de vapeur)

En plus des infrastructures liées à l'apport d'O₂ (ou d'autres accepteurs d'électrons) et de nutriments dans la couche saturée ou insaturée du sol :

- Un dispositif de préparation de la vapeur d'eau à injecter dans les couches insaturées et/ou saturées du sol.
- Un réseau de puits d'injection établi selon un maillage. Les débits d'injection de vapeur, l'écartement entre les puits individuels sont fixés sur base des résultats des tests pilote. Les puits d'injection sont équipés de sondes permettant de mesurer la température de la vapeur injectée, de débitmètres et de manomètres.

Le dispositif de supervision du traitement comportera en outre des sondes de températures au niveau des points de contrôle dans l'eau souterraine et des puits d'extraction éventuels.

Remarque générale

En règle générale, les équipements mis en œuvre dans les installations sont de type standard : puits, pompes, débitmètres, sondes LEL, manomètres, filtres à charbon actif ... disponibles sur le marché dans toutes les dimensions et offrant une très large gamme de performances, de sorte qu'il n'existe pas de tailles critiques ou modulaires offertes par les entrepreneurs. Aucune contrainte au niveau du dimensionnement des équipements n'est à prendre en compte lors de la rédaction des projets d'assainissement ou de gestion de risque et des cahiers de charge.

Pour l'injection directe, cependant, les équipements sont disponibles selon des gammes de dimensions fixées : diamètre des cannes, longueur des éléments individuels, pompe d'injection (pression et débits), puissance des marteaux de battage, ... La profondeur maximum d'injection,

techniquement et économiquement réalisable dépend du type de sol : présence d'éléments ou couches indurées, couches denses, ... En sol meuble, au-delà de 25 m de profondeur, la faisabilité technique du procédé devient aléatoire.

8.7. Schéma conceptuel

L'installation sera décrite par l'expert à l'aide d'un schéma technique de type comparable à celui représenté à la Figure 3 pour le bioparsing.

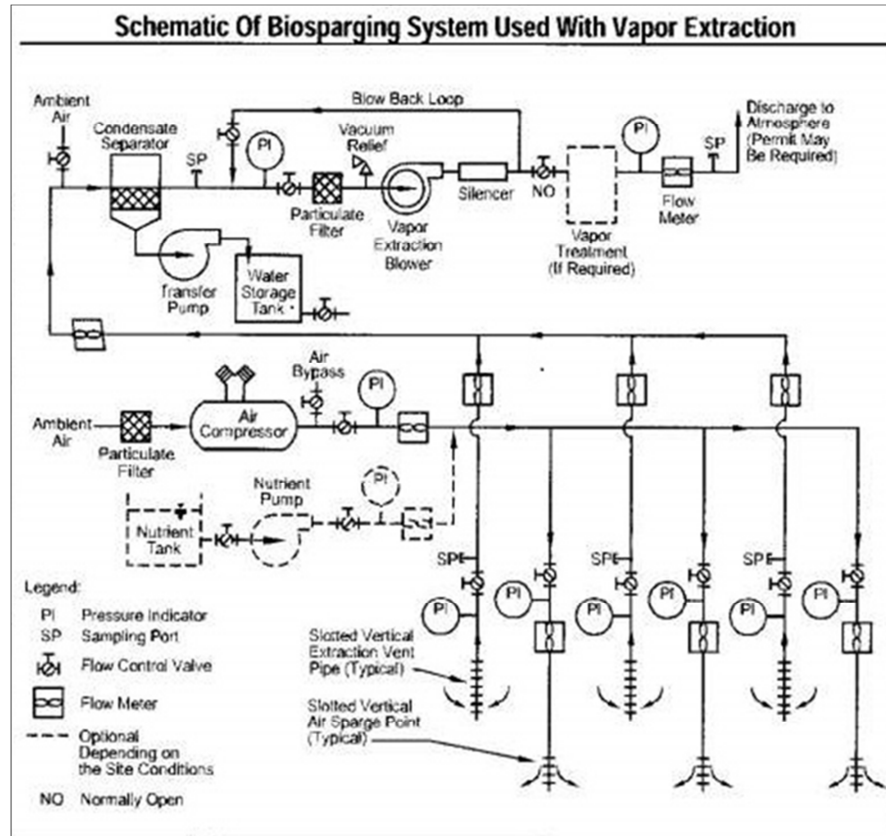


Figure 3: Schéma technique d'une installation d'ASVB par bioparsing (Extrait du document USEPA, 1995, 510-D-95-007, How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites: A Guide For Corrective Action Plan Reviewers)

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

Le projet reprendra l'ensemble des éléments de l'examen de la faisabilité du mode de traitement.

Seront également clairement définis :

- La durée estimée de la prise en charge par ASVB pour atteindre les objectifs **de traitement** fixés ;
- La comparaison de cette durée avec celle attendue en cas d'utilisation de techniques de prise en charge plus « actives » ;
- La possibilité que l'atténuation naturelle se poursuive au rythme attendu ou, à l'inverse, possibilité que des contraintes interviennent dans le futur et limitent l'efficacité de l'atténuation : par exemple accumulation de produits intermédiaires (stagnation), occlusion du sol par les oxydes métalliques et la masse bactérienne, acidification du sol ...
- La fiabilité et le degré de complétude des données collectées et le niveau de compréhension des phénomènes ayant conduit à la situation actuelle ;
- La fiabilité des prévisions et simulations faites sur l'extension du panache et la migration des polluants, d'une part, et l'efficacité de l'atténuation naturelle d'autre part, sur la base des données collectées. Ces dernières sont-elles complètes ou au moins suffisantes ?

Le projet fournira également la description d'une ou plusieurs méthodes alternatives de prise en charge de la contamination à mettre en place en cas d'échec de la procédure par atténuation stimulée.

Le dispositif qui sera mis en place dans le cadre **du traitement** sera décrit en fournissant, au minimum, les indications suivantes reprises dans le **Tableau 5**.

Tableau 5 : Données à fournir concernant le système de traitement à mettre en place

Partie du dispositif	Elément	Données du descriptif	Commentaire
Apport d'oxygène (ou autres récepteurs d'électrons) + autres apports	Type d'apport	Composés à pouvoir de libération lente, peroxyde d'hydrogène, Oxygène pur, air, ... Formulations, teneurs en O ₂ , état physique (poudre, gel, ...) ...	
	Autres additifs	Types d'additifs : nutriments, alcalinisants, agents tensio-actifs, souches ou consortium de microorganismes ... teneurs dans la solution d'apport	
	Dispositif de préparation des additifs	Localisation. Description	
Dispositif d'apport dans la couche saturée	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 cadénassé, ...). Position des manomètres, des débitmètres. Débits d'infiltration. Pression d'infiltration.	
	Infiltration + circulation forcée + recirculation éventuelle	Localisation et distance entre les différents puits d'infiltration et 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), type de tête de puits(étanche si infiltration sous pression), protection de la tête(trapillon de visite, tube en acier cadénassé, ...). Position des manomètres, des débitmètres. Débits d'infiltration et de pompage. Pression d'infiltration.	
	Addition de composés à libération lente dans des puits d'injection	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), protection de la tête(trapillon de visite, tube en acier cadénassé, ...). Conditionnement des composés : gel, coulis, poudres à emballage perméable. Fréquence prévue de renouvellement	
	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. Fréquence prévue du renouvellement	
	Biosparging	Localisation et distance entre les différents puits d'infiltration et d'extraction des gaz. 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), type de tête de puits, protection de la tête (trapillon de visite, tube en acier cadénassé, ...). Position des manomètres, des débitmètres et des sondes de température. Débits et pression d'injection. Débits et dépression dans les puits d'extraction. Mode permanent ou intermittent.	
	Mélange au sol	Description du dispositif de mélange (tarière, ...) diamètre des passages individuels, profondeur de mélange, quantités incorporées par m ³ de sol,	
Pompes	Pompes pour l'infiltration active, l'injection directe, le pompage pour la recirculation, l'extraction des gaz, le biosparging	Types et localisations des pompes : pompe à vide, ventilateurs, ... connectées à 1 ou plusieurs puits, séparateur air/liquide, filtres à particules. Niveau de la pression et de la dépression mise en œuvre. Mode opérationnel : continu - intermittent	La puissance des pompes doit être calculée par rapport aux débits d'injection/d'extraction retenus en fonction de la durée souhaitée du traitement et des (dé)pressions réalistement applicables
Système de régularisation	Régulation du traitement	Système de pompage travaillant en continu ou par période (battement recherché du niveau de la nappe), pompage simultané ou séquentiel dans les différentes sections du dispositif, repères de déclenchement ou d'interruption selon les niveaux de la nappe et selon les pressions mesurées	
Objectif poursuivi	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	
Variante chauffage du sol	Injection de vapeur	Localisation des points d'injection et descriptif (diamètres profondeurs, distances, ...). Températures de la vapeur injectée, Pressions et débits d'injection.	
Dispositif de collecte des fluides pompés	Conduite d'aménées des gaz et/ou de l'eau pompée	Type, dimensions et disposition des conduites d'aménées, cuve d'égalisation, dispositif antigel, dispositif anti vandalisme et contrôle des risques de déflagration. Localisation et dispositif pour la prise d'échantillons de contrôle. Localisation des débitmètres et des manomètres des sondes de température.	
Station de traitement des fluides pompés	Cette rubrique fait l'objet d'autres codes de bonne pratique		
Objectif de qualité des fluides pompés et traités avant leur rejet ou leur recirculation	Condensats et eaux traités	Les normes de qualités pour les eaux traitées à rejeter dans le réseau d'égouttage public ou les eaux de surface correspondent aux normes d'assainissement de l'AGRBC du 29/03/2018 déterminant les normes d'intervention et les normes d'assainissement.	Idem pour la réinjection dans le sol, bien qu'aucune disposition légale ou administrative n'existe à ce sujet.
	Phases pures séparées	Prise en charge selon le type de produit et la législation en vigueur : prise en charge en qualité de déchets, déchets dangereux, valorisation énergétique, ...	
	Gaz traités	Selon le code de bonne pratique « Normes de rejet dans le cadre des travaux d'assainissement et des mesures de gestion du risque » .	
Dispositif anti-nuisances	Mesures anti-bruit	Type de mesure prévue : mesures anti-cavitation des pompes, isolation acoustique des pompes,	
	Mesures anti-odeur	Eventuelles pour les composés volatiles (acétone, composés aromatiques)	

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 :

- Risque liés à la nature toxique/dangereuse des additifs utilisés (peroxydes,) ;
- Nuisances pour la qualité de l'air au niveau du chantier et de ses alentours immédiats : teneurs en gaz nocifs et odeurs, poussières ;
- Risques d'incendies et d'explosion;
- Nuisances acoustiques ;
- Risques pour les installations de captage voisines ;

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

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). Ces fiches 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. Ces mesures doivent, entre autre, porter sur :

- Le stockage et la manipulation des substances dangereuses ou toxiques : risque de dispersion, fuites, ...
- La neutralisation des substances quittant le site ;
- Risques d'exposition pour les personnes : inhalatoires, contacts dermiques ;
- Mesures de protection des personnes : EPI (équipement 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 traitement par biosparging en présence de polluants volatiles

Les gaz extraits du sol en cas de traitement par biosparging sont susceptibles d'être dispersés 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 de biosparging.

10.4. Risques d'incendie et explosion

L'injection d'oxygène et l'utilisation de peroxyde d'hydrogène peuvent être responsables de conditions propices à l'apparition d'incendies en cas de présence d'objets inflammables dans le sol : infrastructures en plastique, panneaux en bois, revêtements en goudron, remblais charbonneux...

L'extraction de gaz du sol accompagnant le biosparging en présence de polluants volatils 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).

Les opérations de biosparging en présence de composés volatiles non couplées à une extraction des gaz dans la couche insaturée du sol étant, a priori, exclues en Région de Bruxelles-Capitale, il n'y a pas lieu de redouter des risques d'explosion dans les zones d'accumulation potentielle de gaz inflammable dans le sol : caves, cavités, ...

10.5. Risques accrus de migration des polluants

Les risques de migration non contrôlée des polluants dissous en direction des cibles sensibles peuvent résulter de l'emploi d'agents tensio-actifs et de l'infiltration de solutions, d'eau traitée et d'air dans le sol, augmentant le gradient hydraulique à partir du puits d'injection. En cas d'addition d'agents tensio-actifs, les risques de dissolution des enveloppes de protection goudronnées sont également à considérer...

10.6. Nuisances acoustiques

Des nuisances acoustiques pour les personnes résidant aux alentours du chantier peuvent résulter du fonctionnement des pompes, des compresseurs, ventilateurs, 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.

Ces installations sont susceptibles d'être impactées par suite d'une vitesse de dégradation des polluants (et des produits intermédiaires) insuffisante, par rapport à la vitesse de migration de ces composés dans les conditions du traitement. Le risque de migration des agents tensio-actifs en dehors de la zone d'intervention est également à prendre en compte.

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 [code de bonne pratique 'Normes de rejet dans le cadre des travaux d'assainissement et des mesures de gestion du risque'](#).

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 biosparging et 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 [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.



L'apport de nutriments dans les couches saturées du sol ne doit pas donner naissance à des teneurs en nitrate supérieures aux normes d'intervention définies dans [l'AGRBC du 29/03/2018](#) déterminant les normes d'intervention et d'assainissement.

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

11. Supervision du traitement

11.1. Règles de base de la supervision

Les actes à réaliser dans le cadre de la supervision de l'ASVB visent à fournir une image précise et actualisée de l'état de pollution du sol et des paramètres géochimiques et hydrogéologiques du sol. Les données collectées permettent également de se prononcer sur l'efficacité des moyens de stimulation mis en œuvre.

Plus précisément, le programme de supervision doit répondre aux objectifs suivants :

- Montrer que l'ASVB se déroule comme anticipé ;
- Identifier tous les produits intermédiaires de la dégradation éventuellement formés (surtout ceux présentant un caractère de toxicité) ;
- Contrôler l'extension éventuelle du panache (dans les trois dimensions) ;
- Vérifier qu'aucune cible sensible n'est menacée ;
- Vérifier l'efficacité des moyens de stimulation mis en œuvre, notamment pour l'optimisation et le contrôle des conditions prévalant dans le sol ;
- Vérifier l'évolution des teneurs et éventuellement valider l'atteinte des objectifs [de traitement](#).

Le programme de supervision doit être adapté au site à prendre en charge (basé sur le modèle conceptuel défini pour la tache de pollution) et faire l'objet d'un plan de prélèvements et mesures dans l'eau souterraine avec prélèvements et analyses périodiques d'échantillons de sol. Le programme de supervision sera d'autant plus complet et détaillé que des incertitudes subsistent sur la validité et la représentativité du modèle conceptuel.

Le plan de prélèvement et mesures à définir lors du lancement du traitement doit au minimum définir les éléments suivants :

- La durée de la supervision ;
- La fréquence des campagnes de mesure et d'échantillonnage ;
- La localisation des points de mesure et de prélèvement ;
- Le mode d'échantillonnage et les paramètres à mesurer et analyser.

11.2. Mesures de surveillance : dispositif type

11.2.1. Règle générale

La supervision de l'atténuation d'une contamination dans l'eau souterraine repose sur le placement, l'observation et le prélèvement d'un certain nombre de piézomètres disposés au sein et aux alentours de la zone contaminée. Un tel dispositif a pour but d'observer si l'importance de la tache de pollution (noyau + panache) en termes de teneurs et extension, varie et de vérifier que le panache ne s'étend pas au-delà des limites autorisées. Les piézomètres doivent être établis au minimum dans les endroits suivants :

- En amont hydrogéologique de la source de pollution en dehors de la tache de pollution, le long de l'axe de circulation de l'eau souterraine (et du panache). Objectif : contrôle de la qualité de l'eau souterraine pénétrant dans la zone polluée et contrôle des modifications des paramètres physico-chimiques pouvant influencer les processus gouvernant l'atténuation naturelle.

- Au niveau du noyau de pollution. Objectif : identification de contaminations complémentaires qui pourraient influencer le déroulement de l'atténuation naturelle et suivi de l'évolution de la gravité de la pollution au niveau du noyau (et de la source éventuellement encore présente) en fonction du temps. Le nombre de piézomètres doit être adapté à l'extension du noyau de manière à obtenir une bonne image de l'évolution.
- En aval du noyau, le long de l'axe principal de migration, tant dans les zones d'anaérobie que d'aérobie de l'eau souterraine, de manière à suivre les changements dans les caractéristiques physico-chimiques et les teneurs enregistrées dans le panache. Le nombre de points d'observations et de prélèvements dépend de la taille du panache mais il doit être suffisant pour pouvoir prédire (par modélisation) l'évolution du panache.
- En aval de la tache de contamination, où aucun polluant n'est encore détecté mais où les teneurs en accepteurs d'électrons sont déjà moins élevées en comparaison des zones non influencées de la nappe d'eau souterraine. Ces piézomètres fournissent une indication prémonitoire de la migration du panache de contamination.
- Au niveau de points de contrôle « sentinelles » en aval du panache de contamination, localisés à la limite des parcelles cadastrées ou en direction de cibles sensibles. Ces points de mesures doivent permettre de déclencher suffisamment tôt la mise en œuvre de procédures de prises en charge alternatives assurant le contrôle de la contamination avant le franchissement des limites parcellaires ou avant l'impact des cibles sensibles.
- Sur les côtés du panache de manière à surveiller l'extension latérale du panache.

Un exemple de dispositif de surveillance type est donné dans la **Figure 4**.

Au niveau des différents points de prélèvements, surtout au sein du panache de contamination, il est recommandé de mettre en place des piézomètres multiples (installés dans le même trou de sondage ou dans des trous de sondage voisins) de manière à mettre en place des crépines à différentes profondeurs. Cette recommandation est particulièrement justifiée dans les cas suivants :

- Présence de polluants plus denses que l'eau (goudrons, HCOV, ...) ;
- Variations significatives des niveaux piézométriques ;
- Présence d'une installation de pompage ou de drainage profonde causant un rabattement localisé des niveaux piézométriques ;
- Stratification importante de la pollution (hydrocarbures).

Il est également recommandé de placer les crépines dans les couches aquifères caractérisées par la conductivité hydraulique la plus élevée de manière à éviter la sous-estimation des risques de dissémination des polluants.

Une attention particulière, tenant compte des caractéristiques du site, sera apportée par l'expert dans l'élaboration plan de prélèvements et mesures. Pour le placement correct des piézomètres le long de l'axe de circulation, la prise en compte des teneurs en polluants et des valeurs mesurées pour les indicateurs géochimiques est généralement suffisante. Pour les panaches de grande extension et dans les sols hétérogènes, l'expert peut faire appel à des tests de traçage (bromure, iodures, borate, ...). De manière à être certain d'identifier correctement la direction de l'axe de migration des polluants, il est recommandé d'établir les piézomètres de contrôle le long de lignes transversales au sens d'écoulement (transects) comme montré dans la **Figure 5**.



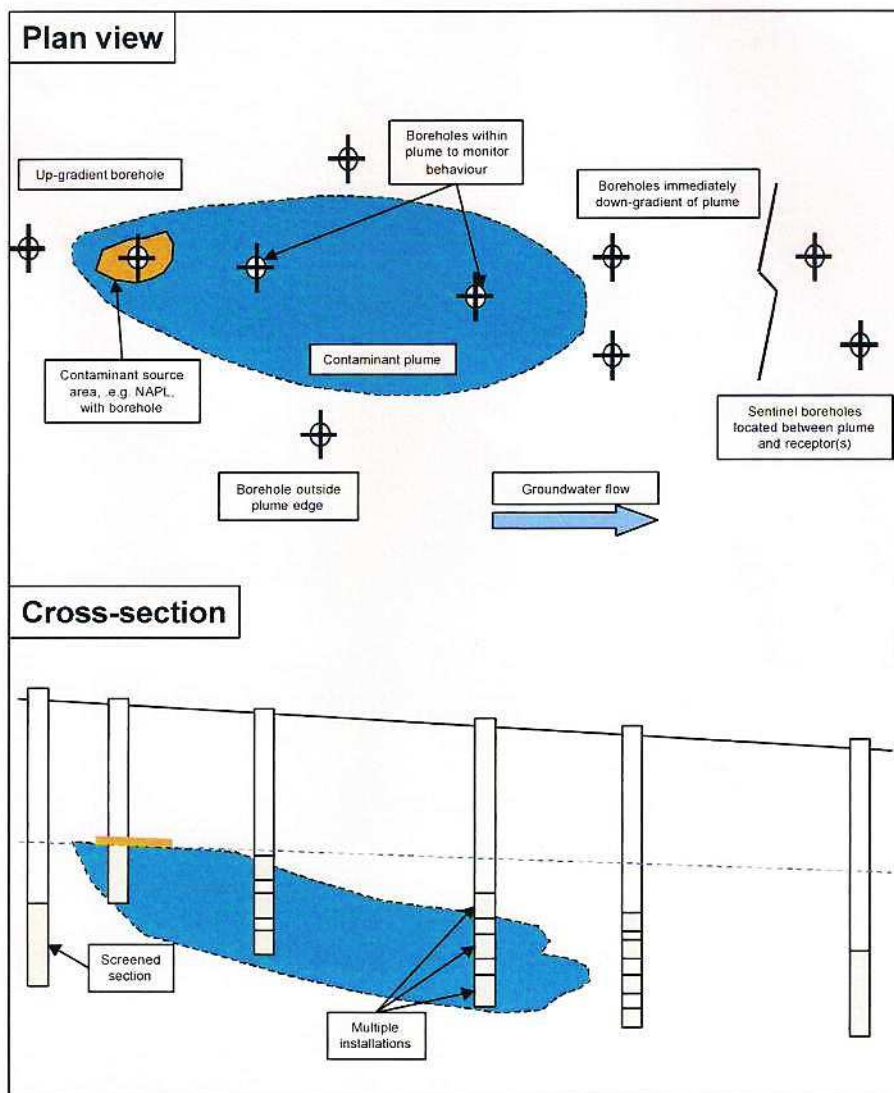


Figure 4 : schéma d'un dispositif type de supervision (extrait de « Guidance on the Assessment and Monitoring of Natural Attenuation of Contaminants in groundwater » M.A. Carey et al., June 2000)

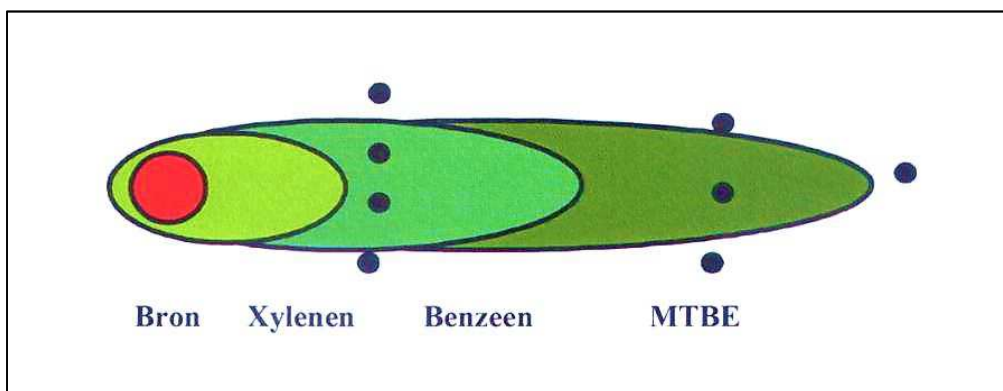


Figure 5 : Position des piézomètres de contrôle en lignes transversale
(Extrait de OVAM 2003, Code van Goede praktijk - Natuurlijke attenuatie)

Il est également recommandé de placer des piézomètres de contrôle, le long de l'axe de circulation de l'eau souterraine, à proximité des interfaces entre différents milieux.

La densité du réseau des points de surveillance doit être adaptée en fonction de l'hétérogénéité et la complexité de la composition du sol. Le nombre de points de mesure doit également être suffisant si un traitement statistique des données est envisagé (analyse de tendance) pour les paramètres les plus critiques.

En cas de situation particulièrement complexes (sols très hétérogènes), les piézomètres peuvent être remplacés par des tranchées d'interception du panache.

11.2.2. Stimulation par injection (active ou passive) d'additifs dans la nappe

En plus des éléments décrits ci-dessus pour la règle générale, le dispositif de supervision doit répondre aux exigences suivantes :

- Le réseau de piézomètres doit permettre de suivre l'évolution de la piézométrie en cours de traitement, au sein de la tache de pollution, en amont et en aval de celle-ci ;
- Le réseau de piézomètres doit permettre de suivre l'efficacité de la distribution des additifs au sein des couches saturées du sol : O₂ (et autres accepteurs d'électrons), nutriments, agents tensio-actifs ... de manière à valider la densité des puits d'injection et la technique d'injection ;
- Le dispositif permet de mesurer les débits et les volumes cumulés des solutions infiltrées/injectées ;
- Le dispositif permet de contrôler les pressions d'infiltration des solutions (en cas d'infiltration active).

11.2.3. Infiltration (active ou passive) avec circulation forcée + recirculation éventuelle

En plus des éléments décrits ci-dessus pour la règle générale, le dispositif de supervision doit répondre aux exigences suivantes :

- Le réseau de piézomètres doit permettre de suivre l'évolution de la piézométrie en cours de traitement, au sein de la tache de pollution, en amont et en aval de celle-ci ;
- Le réseau de piézomètres doit permettre de suivre l'efficacité de la distribution des additifs au sein des couches saturées du sol : O₂ (et autres accepteurs d'électrons), nutriments, agents tensio-actifs ... de manière à valider la densité des puits d'injection et de pompage ainsi que la technique d'injection ;
- Le dispositif permet de mesurer les débits et les volumes cumulés des solutions infiltrées/injectées ;
- Le dispositif permet de contrôler les pressions d'infiltration des solutions (en cas d'infiltration active) ;
- Le dispositif permet 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) ;
- La qualité des eaux pompées, traitées, rejetées ou réinjectées est suivie à l'aide de 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.

11.2.4. Injection directe

En plus des éléments décrits ci-dessus pour la règle générale, le dispositif de supervision doit répondre aux exigences suivantes :

- Les débits et les volumes d'additifs injectés dans chaque point d'injection pourront être mesurés ;
- Le réseau de piézomètre doit permettre de suivre l'efficacité de la distribution des additifs au sein des couches saturées du sol : O₂ (et autres accepteurs d'électrons), nutriments, agents tensio-actifs ... de manière à valider la densité des puits d'injection ainsi que la technique d'injection. Les données mesurées permettent également de statuer sur la nécessité de renouveler les opérations d'injection.

11.2.5. Mise en place de composés à libération lente d'O₂ (puits d'injection)

En plus des éléments décrits ci-dessus pour la règle générale, le dispositif de supervision doit répondre aux exigences suivantes :

- Le réseau de piézomètres doit permettre de suivre l'efficacité de la distribution de l'O₂ au sein des couches saturées du sol, de manière à valider la densité des puits d'injection ainsi que la technique d'apport. Les données mesurées permettent également de statuer sur la nécessité de renouveler les opérations d'injection.

11.2.6. Injection d'air dans la zone saturée (biosparging) + extraction des gaz de la zone insaturée

En plus des éléments décrits ci-dessus pour la règle générale, le dispositif de supervision doit répondre aux exigences suivantes :

- Les puits d'injection seront équipés de débitmètres mesurant les débits et les volumes cumulés d'air injectés, de manomètres indiquant la pression d'injection de même que des jauges de température.
- A proximité des puits d'injection, des points d'observation seront équipés de manomètres et de sondes d'échantillonnage de gaz permettant de suivre l'évolution de l'influence de l'injection en termes de pression et de teneurs en O₂ à des distances discrètes des puits d'injection.
- Un réseau de points d'observation répartis sur la zone impactée permettra de suivre l'évolution des paramètres : pressions, teneurs dans les gaz du sol et éventuellement température. 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.

Un exemple de point d'observation est reproduit à la **Figure 6**.

Des piézomètres situés à proximité des puits d'extraction et des puits d'injection hermétiquement fermés, permettront de contrôler la remontée du toit de la nappe suite à l'application de la dépression.

- Un dispositif permettant la mesure des débits de gaz extraits sera mis en place. 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 permettra de mesurer les quantités de polluants extraits.
- Un dispositif d'échantillonnage des gaz traités sera mis en place avant leur rejet vers l'atmosphère
- Un dispositif d'échantillonnage des condensats sera également mis en place avant leur traitement sur site ou prise en charge en dehors du site.

11.2.7. Variante chauffage du sol par injection de vapeur

En plus des éléments décrits dans les sections précédentes relatives aux différents modes d'apport des réactifs, le dispositif de supervision inclura les éléments suivants :

- Au niveau des puits d'injection, des débitmètres mesurant les débits et les volumes cumulés de vapeur injectés, des manomètres montrant la pression d'injection de même que des jauges de température
- Equipement de différents points d'observation dans le sol avec des jauges de température.

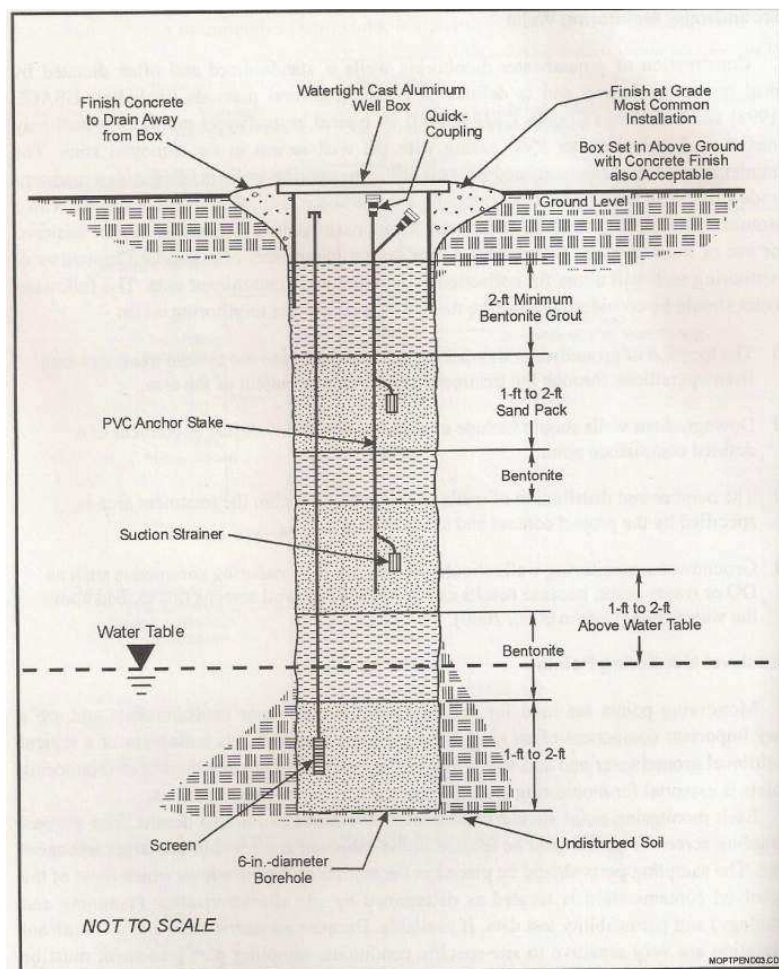


Figure 6 : Exemple d'équipement d'un point d'observation 6
(Extrait de *Air Sparging, A Project Manager's Guide*, Battelle Press 2002)

11.3. 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 6** suivant :

Tableau 6 : Fréquences et paramètres des opérations de supervision du traitement

Paramètres de suivi	Moyen	Paramètre	fréquence minimale*	Commentaires
En règle générale				
Suivi piézométrique	Mesures du niveau de l'eau souterraine dans les piézomètres de contrôle	Niveau piézométrique m	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	Etablissement et mise à jour d'une carte des iso-pièzes et du 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 et produits de dégradation intermédiaires + polluants secondaires générés (As, ...)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	Objectif : réaliser ou compléter l'analyse de tendance, mettre en évidence l'atténuation, surveiller l'extension du panache
Paramètres de l'eau souterraine	Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine	Indicateurs géochimiques de l'atténuation : TOC, teneurs en accepteur d'électrons (O ₂ , nitrate, sulfate), teneurs en Fe(II), Mn(II), pH, Eh, conductivité électrique, T°, carbone inorganique dissous (alcalinité)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Paramètres facultatifs pour l'eau souterraine	Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine	Comptage bactéries, Examen PCR, acétate et acide gras volatiles, chlorures, nitrites, sulfite, sulfure, éthène, éthane, méthane, indice phénol, CO ₂	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Teneurs résiduelles dans le sol	Forages, prélèvement et analyses de carottes de sol prélevées au sein du noyau et du panache de contamination	Teneurs en polluants faisant l'objet de l'intervention et produits de dégradation intermédiaires	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 - Si possible, évaluation du rôle des processus abiotiques (précipitation, sorption, ...) dans l'atténuation
Teneurs dans la phase gazeuse des couches insaturées	Prélèvement dans l'air du sol	Polluants et produits de dégradation à pouvoir polluant volatils	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	Facultatif, si la volatilisation ou la dégradation en phase gazeuse est un mécanisme important de l'atténuation
Bilan de masse : estimation des quantités résiduelles de polluants et des produits de dégradation à pouvoir polluant	Teneurs résiduelles moyennes dans les différentes phases du sol de la zone d'intervention	Bilan de masse : quantités (kg) initiales de polluants, quantités résiduelles, quantités détruites, quantités produites de produits de dégradation intermédiaires	Tous les 6 mois	Estimation du temps de traitement
Infiltration active et passive (paramètres complémentaires et fréquences plus intensives par rapport à la règle générale)				
Débits des solutions d'additifs infiltrés par puits d'infiltration	Débitmètre au niveau des puits	Débit (m ³ /s) et volumes 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
Injection directe sous pression (paramètres complémentaires)				
Quantité de réactif injecté par point d'injection	Débitmètre dans le dispositif d'injection	Quantité par point d'injection	Lors de l'injection	
Infiltration (active ou passive) avec circulation forcée + recirculation éventuelle (paramètres complémentaires et fréquences plus intensives par rapport à la règle générale)				
Débits des solutions d'additifs infiltrés par puits d'infiltration	Débitmètre au niveau des puits	Débit (m ³ /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
Débits extraits par puits de pompage	Débitmètre au niveau des puits	Débit (m ³ /s) et volume cumulés	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Teneurs mesurées dans l'eau pompée	Echantillonnage de l'eau pompée	Teneurs en polluants faisant l'objet de l'intervention, produits de dégradation intermédiaires, additifs résiduels (tensio-actifs), pH, Eh, O ₂ dissous, conductivité électrique, T°, TOC,	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Teneurs mesurées dans l'eau réinjectée après traitement	Echantillonnage à la sortie de la station de traitement avant réinjection	Teneurs en polluants faisant l'objet de l'intervention, produits de dégradation intermédiaires, pH, Eh, O ₂ dissous, conductivité électrique, T°, AOC(mesure biomasse) , comptage bactéries (facultatif), particules en suspension (MFI), teneur en Fe, Mn, méthane , carbonates (indice de saturation Langelier)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	Apport en O ₂ et risques de colmatage des puits d'injection
Teneurs mesurées dans l'eau de rejet	Echantillonnage à la sortie de la station de traitement	Voir Code de Bonne pratique AUX 1 Traitement de l'eau pompée		

* la fréquence sera ajustée par l'expert en fonction des données du suivi

Tableau 6 - suite : Fréquences et paramètres des opérations de supervision du traitement

Injection passive de composés à libération lente de O₂ (paramètres complémentaires et fréquences plus sévères par rapport à la règle générale)				
Quantités d'additif mises en place par puits d'injection	Mesure quantités par puits	Quantités d'additifs (solide, gel ou coulis) en kg/puits	Lors du dépôt	
Quantité d'additif consommée par puits	Mesure quantités par puits	Quantités d'additifs (solide, gel ou coulis) consommée en kg/puits	Deux premiers mois (Phase de lancement) : mensuel, ensuite selon rapidité de consommation	Adaptation de la fréquence d'apport
Biosparging (air) + extraction des gaz du sol (paramètres complémentaires et fréquences plus sévères par rapport à la règle générale)				
Mesure des débits de l'air injectés et des pressions d'injection au niveau des puits d'injection	Débitmètres et manomètres au niveau des puits	Débits et volumes cumulés d'air injectés	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel	
Mesure des pressions dans les points de contrôle disposés près des puits d'injection	Manomètres au niveau des points de contrôle	Pression dans la couche saturée et contrôle du rayon d'influence	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel	Suivi de l'efficacité du biosparging
Mesure de l'O ₂ dans les points de contrôle disposés près des points d'injection	Prélèvement et analyse de l'O ₂	Teneur en O ₂ et contrôle de la circulation de l'air dans la couche saturée	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel	Suivi de l'efficacité du Sparging
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	Etablissement d'une carte des iso-pièzes - Sens d'écoulement
Débits de gaz extraits par puits d'extraction	Débitmètre au niveau des puits	Débit (m ³ /s) et volume cumulés	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel	
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	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 des polluants requérant une intervention et des produits de dégradation intermédiaires à pouvoir polluant	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 extraites et quantités résiduelles (Kg)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Teneurs dans les rejets gazeux	Prélèvement des gaz à l'entrée et la sortie de l'installation de traitement et analyse des teneurs en polluants : cartouche à charbon actif, Dräger, PID, FID	Teneurs des polluants requérant une intervention (kg/m ³)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Quantités de charbon actif consommées	Quantités de charbon actif utilisées dans le filtre	Kg	Selon les livraisons + bons de prise en charge	
Quantité et teneurs en polluants des condensats	Quantités de liquide récupéré dans le séparateur et teneurs en composés polluants	m ³ et kg/m ³	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel	Identifier la filière de traitement sur ou en dehors du site
Atténuation naturelle stimulée + Variante chauffage du sol (paramètres complémentaires + fréquences plus sévères par rapport à la règle générale)				
Débits et pression d'injection de la vapeur dans les points d'injection	Débitmètre et manomètre au niveau des points d'injection	Débits injectés (m ³ /s) et Pression d'injection (Pa)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel	
Mesure des températures au niveau des puits d'injection de vapeur	Sondes de température dans les puits d'injection	T ° en °C	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel	
Mesure de la température de l'eau souterraine dans les points d'observation	Sondes de température dans les points de contrôle	T° en °C	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel	



Ce tableau appelle les commentaires suivants :

- Concernant les paramètres à analyser, le **Tableau 6** ci-dessus fournit une check list à l'intention des experts. Lors de la rédaction du plan de prélèvements et mesures, l'expert formulera et justifiera une proposition de paramètres à analyser dans les différentes phases du sol.
- La liste des paramètres à analyser proposée par l'expert pourra être modifiée de manière évolutive : réduction du nombre de paramètres à analyser après la phase de lancement si l'atténuation stimulée suit son cours comme anticipé et que les données disponibles sont jugées suffisantes pour prédire l'évolution de la tache de contamination en termes de teneurs et extension. En cas d'apparition de phénomènes ou comportements non prévus, la démarche inverse pourra être conseillée.
- Concernant la fréquence des prélèvements et des analyses de l'eau souterraine, différents facteurs sont à prendre en compte : les variations saisonnières de la piézométrie, la distance des cibles sensibles et la vitesse d'advection de l'eau souterraine. En règle générale, on admet que l'intervalle de temps entre deux campagnes successives de supervision représente au maximum le temps nécessaire pour que le panache de contamination atteigne le premier piézomètre de contrôle non pollué. Ce laps de temps est parfois divisé par deux pour prendre en compte les incertitudes concernant la limite du panache de pollution et la vitesse de migration du polluant. Les règles de fréquence proposées dans le **Tableau 6** sont donc proposées à titre indicatif et peuvent être modifiées par l'expert sur la base d'une justification motivée par des arguments concrets basés sur les caractéristiques spécifiques du site.
- On remarquera que pour le MTBE, des fréquences de supervision plus élevées sont à conseiller compte tenu du comportement particulier de ce polluant : variations importantes dans le temps des teneurs mesurées suite à une mise en solution sporadique du composé.
- 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 ou PID, s'il démontre qu'il existe une bonne correspondance entre les mesures directes et les analyses de laboratoire. Pour les polluants présents sous forme de mélanges tels que les hydrocarbures, compte tenu de l'évolution de la composition des mélanges lors de l'avancement du traitement, la correspondance entre mesures directes et analyses de laboratoire devra faire l'objet de réajustements périodiques selon une fréquence proposée par l'expert. Les mesures de teneurs en O₂, CO₂ dans les gaz pourront faire l'objet de mesures directes.
- La périodicité des campagnes de prélèvements et d'analyse des échantillons de sol, de l'eau souterraine et de gaz du sol, pourra être modifiée sur proposition dûment argumentée et justifiée de l'expert.
- Pour le prélèvement des échantillons de sol, d'eau souterraine et de gaz, il convient de se référer au Code de Bonne Pratique 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 Bonne Pratique n° 4 « Code de Bonne Pratique pour les méthodes d'analyse ... », de Bruxelles Environnement .
- En ce qui concerne la recirculation des eaux traitées et l'injection des agents tensio-actifs, l'expert tiendra compte des recommandations formulées dans le Code de Bonne Pratique n°1 traitant du pompage des fluides dans la couche saturée du sol.
- En ce qui concerne le traitement de l'eau et des gaz extraits du sol, l'expert est renvoyé aux recommandations des Codes de Bonne Pratique AUX 1 et 2 traitants respectivement de ces deux aspects.

Les paramètres de supervision du traitement ayant trait aux nuisances font l'objet du **Tableau 7** suivant.

Tableau 7: Fréquences et paramètres de supervision du traitement ayant trait aux nuisances

Paramètres de suivi	Moyen	Paramètre	fréquence minimale	Commentaires
Teneurs en polluants dans l'air ambiant	Prélèvement de l'air à proximité de la station de traitement ou des zones sensibles et analyse des échantillons, cartouche à charbon actif, PID, FID	Teneurs des polluants requérant une intervention et des produits de dégradation à pouvoir polluant volatiles (kg/m ³)	Lors du lancement, ensuite après 2 semaines et ensuite tous les 3 mois	En cas de présence de polluants volatils extraits par pompage des gaz du sol
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 ASVB 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 le traitement s'étend 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 méthodes d'apport d'O₂, mise en œuvre d'autres techniques de traitement, ...

Le contenu du premier rapport intermédiaire comprendra au minimum les informations reprises dans le **Tableau 8** suivant.

Tableau 8 : Informations à présenter dans le premier rapport intermédiaire

Rubrique	Paramètres et quantité à mesurer	Commentaires
Description de la situation de départ, lors du lancement de la prise en charge	Répartition des teneurs en polluants et en produits intermédiaires (situation 3 D) dans l'eau souterraine, la phase solide et éventuellement la phase gazeuse. Niveaux piézométriques et carte des iso-pièzes (sens d'écoulement). Indicateurs géochimiques dans l'eau souterraine : TOC, accepteurs d'électrons (O ₂ , nitrate, sulfate), Fe (II), Mn(II), pH, Eh, conductivité électrique, T °, carbone inorganique	Représentation graphique de l'extension du panache de contamination
Description du dispositif mis en œuvre (as built) pour la première phase, toutes techniques d'apport des agents stimulant confondues et tous types d'additifs confondus	Types d'accepteurs d'électrons, de nutriments, de tensio-actif, souches bactériennes éventuelles utilisées (teneurs et caractéristiques des solutions d'apport). Description des éléments du dispositif : puits d'infiltration et/ou d'extraction (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 d'extraction (solutions d'additifs, eau souterraine, gaz du sol), dispositif de mesure de la dépression (en cas d'extraction de gaz), conduites d'amenée des fluides extraits, station de traitement de l'eau ou du gaz pompé, points d'échantillonnage de l'eau et des gaz pompés (localisation), points d'échantillonnage du sol (localisation, profondeur).	La localisation des différents éléments du dispositif fait l'objet de figures à joindre en annexe rapport intermédiaire
Description des installations complémentaires si mise en œuvre de la variante addition de tensio-actifs et chauffage par injection de vapeur	Description des éléments complémentaires : puits d'injection de la vapeur (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massifs filtrants, bouchons bentonitiques, tête), dispositif de mesure des débits injectés), dispositif de mesure des températures dans le sol (localisation des sondes). Si variante = addition de tensio-actifs : type et quantités apportées et localisation des points d'apport.	
Paramètres à rapporter si apport par infiltration active ou passive	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 dégradation (intermédiaires ou finaux), pH, Eh, O ₂ (et autres accepteurs d'électrons) dissous, nutriments, conductivité électrique. Indicateurs géochimiques de l'atténuation : TOC, Fe(II), Mn (II), carbone inorganique dissous. Teneurs résiduelles dans le sol et bilan de masse des polluants à traiter et charge polluante résiduelle (quantités initiales, quantités résiduelles et quantités détruites). Durée projetée du traitement sur base des données acquises. Faisabilité de l'intervention - Mesures correctives à apporter	
Paramètres complémentaires à rapporter si infiltration avec circulation forcée + recirculation éventuelle	Débits de l'eau souterraine pompée. Rayon d'influence et de capture des puits de pompage. Teneurs en polluants (polluant requérant l'intervention + produits de réaction intermédiaires) de l'eau souterraine extraite. Teneur en polluants de l'eau traitée avant rejet. Débit de recirculation de l'eau traitée	
Paramètres à rapporter si apport par injection directe	Pression d'injection et quantités de réactifs injectés dans les différents points. Rayon d'influence des points d'injection. Teneurs mesurées dans l'eau souterraine au niveau des piézomètres de contrôle : polluants, produits de la réaction (intermédiaires ou finaux), pH, Eh, O ₂ (et autres accepteurs d'électrons) dissous, teneurs en nutriments, conductivité électrique. Indicateurs géochimiques de l'atténuation : TOC, Fe(II), Mn(II), carbone inorganique dissous. Teneurs résiduelles dans le sol et bilan de masse des polluants à traiter et charge polluante résiduelle (quantités initiales, quantités résiduelles et quantités détruites). Faisabilité de l'intervention (Nombre de campagnes d'injection). Mesures correctives à apporter	
Paramètres complémentaires à rapporter si addition d'agents à libération lente d'O₂	Consommation des additifs par puits d'injection.	
Paramètres à rapporter si biosparging + extraction des gaz du sol	Débits et pression d'injection de l'air, vérification de l'extension de la zone d'influence des puits. 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), teneurs en nutriments, pH, Eh, O ₂ (et autres accepteurs d'électrons) dissous, conductivité électrique. Dépression et débits dans les puits d'extraction. Vérification du rayon d'influence des puits d'extraction. Teneurs en polluants (polluants requérant l'intervention + autres polluants), O ₂ et CO ₂ dans les gaz extraits. Indicateurs géochimiques de l'atténuation : TOC, Fe(II), Mn(II), carbone inorganique dissous. Teneurs résiduelles dans le sol et bilan de masse des polluants à traiter et charge polluante résiduelle (quantités initiales, quantités résiduelles, quantités extraites et quantités détruites). Teneurs en polluants dans les gaz traités avant leur rejet. Durée projetée du traitement sur base des données acquises. Faisabilité de l'intervention - Mesures correctives à apporter	
Paramètres complémentaires à rapporter si variante injection de vapeur	Débits, t° et pression d'injection de vapeur. Quantités injectées. Températures mesurées de l'eau souterraine	
Paramètres complémentaires à rapporter si variante injection de tensio-actifs	Quantités injectées de tensio-actifs, teneurs en tensio-actifs dans l'eau souterraine dans les piézomètres de contrôle.	
Paramètres facultatifs à rapporter	Comptage de bactéries, examen par PCR, teneurs dans l'eau souterraine de H ₂ , acétate et autres acides organiques volatiles, chlorure, nitrite sulfite, soufre, éthène, éthane, méthane, indice phénol, CO ₂	Si jugé nécessaire par l'expert
Interprétation des résultats	Simulation de l'extension future du panache de pollution et niveau de risque pour les cibles sensibles. Estimation de la durée du traitement. Analyse de la faisabilité de la prise en charge par atténuation naturelle stimulée	
Actions correctives	Modifications à apporter au dispositif de supervision. Modification du dispositif de stimulation. En cas d'insuffisance avérée de l'atténuation naturelle stimulée (durée trop longue, risque pour les cibles sensibles) mise en œuvre d'une technique de prise en charge alternative	

12.2. Mesures correctives et optimisation

Comme toute méthode de prise en charge où les processus biologiques prenant place en conditions naturelles jouent un rôle prépondérant, l'efficacité de l'ASVB 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), ...

Les moyens de stimulation appliqués lors du traitement visent à assurer la présence de conditions optimales dans le sol pour la dégradation biologique des polluants en conditions d'aérobie. Ces moyens ont été définis lors des études préalables, des tests de laboratoire, de terrain et des essais pilotes.

Des mesures correctives peuvent s'avérer nécessaires si, malgré le niveau élevé d'informations recueillies lors des étapes préliminaires, le niveau d'incertitude quant à la faisabilité (technique et économique) du procédé par ASVB est jugé trop important, ou si la vitesse de dégradation des polluants s'avère être inférieure à celle escomptée lors de la rédaction du projet.

L'optimisation peut porter sur des modifications mineures à apporter aux moyens de stimulation mis en œuvre et à leur mode d'application. En dehors de ces situations simples, quatre types de situations problématiques sont typiquement rencontrés.

Les informations collectées apparaissent insuffisantes pour se prononcer sur la faisabilité (technique et/ou économique) du traitement par atténuation naturelle. Les solutions correctives à apporter peuvent être les suivantes :

- Densification ou extension du réseau de piézomètres d'observation ;
- Mesures de paramètres complémentaires permettant de suivre l'évolution de l'atténuation naturelle ou de simuler l'extension du panache de pollution.

La durée du traitement par ASVB apparaît irréaliste du point de vue économique. La durée escomptée du traitement pour atteindre les objectifs de traitement doit être revue nettement à la hausse sur base des observations faites durant la phase préliminaire de sorte que les délais nécessaires deviennent irréalistes en termes d'occupation et accessibilité du terrain, coûts de la supervision, ... Les solutions correctives passent nécessairement par la mise en œuvre de techniques d'intervention plus actives au niveau du noyau ou au niveau du panache de la contamination.

La vitesse de dégradation des polluants et des produits intermédiaires n'est pas suffisante pour empêcher la migration du panache de pollution vers les cibles sensibles identifiées (limites de la parcelle, cibles sensibles telles que les zones d'habitat, les zones de protection de captage, les zones vertes, ...). Les solutions correctives passent nécessairement par la mise en œuvre de techniques d'intervention plus actives permettant soit, d'intercepter la migration du panache, soit d'augmenter la vitesse de dégradation des polluants, soit les deux les deux modes d'intervention combinés.

La chute de la conductivité hydraulique lors du traitement, en raison de la perte de structure du sol (disparition de la matière organique) ou la précipitation de Fe_2O_3 , MnO_2 , la croissance de la biomasse bactérienne. Le maintien de la structure du sol peut être favorisé par la mise en place d'un bon ratio entre cations divalents et monovalents et d'une force ionique suffisante dans la solution du sol. L'effet du MnO_2 peut être atténué par l'addition d'un agent stabilisateur (hexamétaphosphate).



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

Les mesures de validation visent à préciser si les objectifs 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'échantillonnages et d'analyses 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 présence prolongée de la pollution (As, ...).

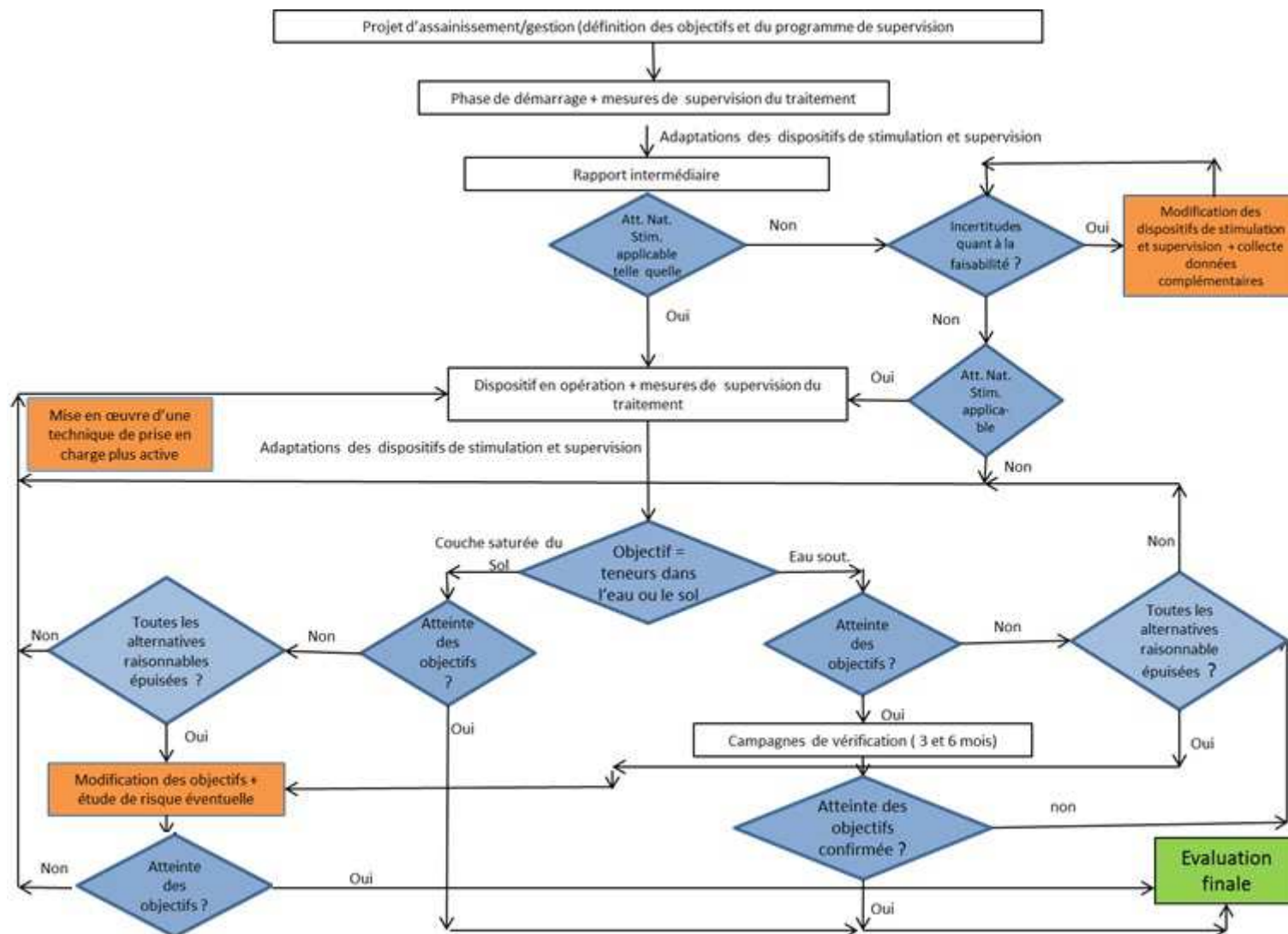
En cas d'atteinte des objectifs **de traitement** au sein de la tache de pollution, deux autres campagnes d'échantillonnage de l'eau souterraine successives seront effectuées, à respectivement 3 mois et 6 mois comptés après la fin de la période d'efficacité attendue des derniers additifs injectés de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

En cas de maintien des niveaux de teneurs en équilibre sous les valeurs objectif, **le traitement** peut être considéré comme accompli, les dispositifs de stimulation et supervision peuvent alors être démantelés (à moins qu'une validation à long terme ne doive être réalisée) et un rapport d'évaluation finale introduit.

En cas de non atteinte permanente des objectifs de teneurs, les dispositifs de stimulation et de supervision sont maintenus en activité après mise en place de mesures correctives éventuelles : mise en œuvre de méthodes d'intervention « plus actives » : excavation du noyau, ...

Si lors des campagnes suivantes 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 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. Mesures de supervision à long terme éventuelles : dispositif et type de mesures

Sur suggestion de l'expert et/ou à la demande de Bruxelles Environnement, des mesures de supervision (validation à long terme ou post gestion) peuvent être demandées au titulaire de l'obligation après le clôturage des travaux. Ces mesures visent à confirmer que les résultats des travaux et notamment la rencontre des objectifs **de traitement** est acquise de manière durable sur le long terme. Selon toute logique, ces mesures de supervision 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, variations importantes des niveaux piézométriques, niveaux de teneurs 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 supervision à long terme éventuel peut porter sur un certain nombre 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 prélèvements et d'analyses.

Les paramètres qui seront relevés seront :

- Les teneurs résiduelles en polluants dans l'eau souterraine (polluants dont la présence a justifié l'intervention + 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, nitrate, sulfate, nutriments, Fe(III), Mn(III), ... 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 Bonne Pratique n° 4 « Code de bonne pratique pour les méthodes d'analyse ... », de Bruxelles Environnement.

La durée et la fréquence des mesures de supervision 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 objectif 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 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. Recommandations en matière de sécurité et stabilité

15.1. Check-list succincte pour les entrepreneurs

La check-list à destination des entrepreneurs fait l'objet du **Tableau 9**. Cette liste vise à aider les entrepreneurs dans la rédaction de leurs offres en réponse aux cahiers des charges rédigés par les experts. Compte tenu de la grande diversité des situations rencontrées, cette liste ne saurait être exhaustive.

Tableau 9 : Checklist 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 oxydants (si emploi de peroxyde), aux agents tensio-actifs	Etudes de stabilité adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser
Etude de stabilité des ouvrages 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 cahier des charges ou du descriptif des travaux	Descriptif du dispositif de l'infiltration/injection, de pompage (puits, localisation, dimension, ...) : 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,
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	Identité et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'expert, de l'agent de Bruxelles Environnement, 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 canalisations de collecte des gaz compte tenu de l'inflammabilité des composés extraits
	Risques d'incendie dans le sol en raison de la présence d'O ₂
	Risque pour les infrastructures enterrées si contact avec les oxydants (si utilisation de peroxyde) et en cas de chauffage du sol par injection de vapeur,
	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 présence de composés volatiles dangereux dans l'atmosphère lors du pompage et du traitement des gaz du sol (en cas de biosparging).

	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 d'apport et de collecte des liquides
	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 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, compresseurs, ventilateurs, 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 (entrée 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 : chute des débits, des pressions et dépressions
	Epuisement prématuré des matériaux utilisés pour le 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 9** et ayant trait à la sécurité sont systématiquement d'application ;
- La check liste du **tableau 9** 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 10**. Cette liste vise à aider les experts dans la rédaction des descriptifs des travaux, les estimations de coût et l'élaboration des cahiers des charges à destination des entrepreneurs.

Tableau 10 : checklist à l'intention des experts

Rubrique	Vérification
Informations préalables complètes et suffisantes (études préalables, cahier de charge, descriptif des travaux..)	
Caractéristiques du sol (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 à l'air et à l'eau 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 différents 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 (analyse de la tendance, potentiel d'atténuation naturelle)
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 ou d'injection. Descriptif du dispositif de pompage de l'eau ou des gaz (puits, localisation, dimension, ...). Estimation 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 : biodégradabilité des polluants, conditions du sol optimales pour la dégradation, type et quantités des agents stimulants nécessaires pour créer les conditions optimales à la biodégradation. Sens et mode de la circulation de l'eau souterraine et des gaz du sol, extension de la zone d'influence des puits d'infiltration/injection, extension de la zone de capture des puits d'extraction de l'eau souterraine et des gaz, ...
	Objectifs du traitement bien identifiés pour le sol et les eaux souterraines
	Estimation de la durée du traitement et nécessité de faire appel à des procédés complémentaires : chauffage du sol par injection de vapeur, injection d'agents tensio-actifs, bioaugmentation,
	Vérifier que le descriptif de la station de traitement 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 de l'eau et 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 Bruxelles Environnement ?
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, manipulation et transport de substances dangereuses/toxiques, rejets gazeux,
Les lignes de communication sont définies	Identité et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'agent de Bruxelles Environnement, 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 par suite de l'augmentation de t° résultant du chauffage du sol éventuel.
	Risque d'incendie dans le sol du fait de la circulation d'O ₂
	Risques d'explosion en cas de création de poches de produits volatiles inflammables dans le sol
	Risque pour la santé du personnel, des riverains et des visiteurs du fait de la présence sur le chantier et de la manipulation de substances dangereuses et toxiques, des remontées possibles de réactifs vers la surface lors de l'injection, de libération vers l'atmosphère de gaz et vapeurs dangereux (polluants volatiles).

	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de produits dangereux/toxiques et/ou de polluants. Risque d'écoulement sur le sol d'additifs lors de l'infiltration Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de sol pollué sur site (lors de l'exécution des puits). Risques climatiques : gel des conduites d'apport et de collecte des liquides 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 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, compresseurs, ventilateurs, 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 (entrée d'air dans les canalisations)
Planning et contenu des opérations de supervision du traitement, de validation et de monitoring à long terme (post-gestion)	
Dispositif de supervision du traitement	Descriptif, localisation et cartographie du dispositif de supervision : Débitmètres, manomètre et sondes de t° au niveau des puits d'extraction, des puits d'infiltration et 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 débits et des pressions d'infiltration et d'injection, dépressions et des débits d'extraction des gaz et de l'eau souterraine, mesure des dépressions dans le sol, mesures piézométriques, teneurs dans l'eau et les gaz pompés, bilan de masse de la charge polluante, teneurs résiduelles en polluant et en produits de dégradation (si délétères), des métaux lourds (réagissant au potentiel redox) dans le sol et la nappe et répartition, calcul de l'extension des zones d'influence des puits et points d'infiltration ou d'injection, extension des zones de capture de l'eau souterraine et des gaz, teneurs de l'eau souterraine et des gaz pompés à l'entrée et la sortie de la station de traitement, présence et puissance d'une phase libre, T° des fluides injectés, extraits et T° du sol, migration des polluants dans la nappe vers les cibles sensibles
Paramètres d'optimisation	Modification des conditions du sol (pH, T°), pompage et injection en mode intermittent, recirculation de l'eau souterraine, chauffage du sol, injection d'agents tensio-actifs, placement de nouveaux puits d'extraction ou d'injection (zones de stagnation), adéquation de la profondeur des crépines, bioaugmentation, ...
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, rebond 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 ?
Monitoring à long terme (post-gestion)	Dispositif de supervision : piézomètres d'échantillonnage Paramètres de la supervision : teneurs en polluants et produits de dégradation, paramètres permettant de suivre l'atténuation naturelle spontanée si prise en compte de cette dernière

16. Sources bibliographiques

- Code van goede praktijk : in-situ chemische oxidatie – Draft, OVAM, 2014
- Code van goede praktijk : in-situ Bioremediatie van Petroleumwaterstoffen, OVAM 2005
- Code van goede praktijk : Natuurlijk attenuatie, OVAM, 2003
- Air Sparging, A Project Manager's Guide, Keith Fileds et al., Battelle Press, 2002
- US EPA, Guidance on the Assessment and Monitoring of Natural Attenuation of Contaminants in groundwater » M.A. Carey et al., June 2000)
- Vacuum Vapor Extraction, Johnson Paul C. et al., Springer, 1994)
- Achilles, Veiligheid, gezondheid en milieuzorgsysteem voor on-site bodemsanering werken, OVAM 2001.
- Standaardprocedure Bodemsaneringwerken, Eindevaluatieonderzoek en Nazog-versie oktober 2011, OVAM