

Code de Bonne Pratique 8

Bioventing

Bruxelles Environnement

Contenu

1.	Introduction.....	3
2.	Description de la technique et des principes technologiques mis en œuvre	5
2.1.	Description générale.....	5
2.2.	Association du bioventing avec d'autres techniques de traitement.....	7
2.3.	L'apport des nutriments	7
2.4.	Correction des propriétés physico-chimiques et physiques du sol.....	8
2.5.	L'apport de microorganismes au sol (bio-augmentation)	8
3.	Description des variantes	9
3.1.	L'injection d'air dans la couche insaturée du sol.....	9
3.2.	Le bioventing associé au chauffage du sol par injection d'air chaud ou de vapeur chaude 10	
4.	Objectifs poursuivis : panache versus noyau	11
5.	Polluants et situations les plus favorables (notions qualitatives)	12
5.1.	Polluants susceptibles d'être pris en charge par le bioventing	12
5.2.	Situations les plus favorables.....	14
6.	Examen à priori de la faisabilité technique	16
6.1.	Critères d'acceptation	16
6.2.	Etape préliminaire : faisabilité à priori	16
7.	Examen spécifique de la faisabilité	21
7.1.	Première étape de l'examen	21
7.2.	Deuxième étape de l'examen	24
7.3.	Nécessité d'un test pilote	26
8.	Description d'une installation type.....	28
8.1.	Circulation de l'air par extraction du gaz du sol.....	28
8.2.	Variante circulation de l'air par extraction +injection d'air dans la couche insaturée du sol 29	
8.3.	Variante SVE + chauffage du sol	29
8.4.	Apport par infiltration des solutions de nutriments	29
8.5.	Schéma conceptuel.....	30
9.	Descriptif de l'installation qui sera mise en place	31
10.	Limitation des incidences du projet sur l'environnement : odeurs, bruits, poussières,	33
10.1.	Points à prendre en compte	33
10.2.	Nuisances pour la qualité de l'air en cas de présence de polluants volatils.....	33
10.3.	Risques d'incendie et explosion	33
10.4.	Nuisances acoustiques.....	34
10.5.	Risques pour les installations de captage voisines.....	34
10.6.	Conformités aux cadres légaux existants.....	34
11.	Supervision du traitement.....	36
11.1.	Règles de base de la supervision	36
11.2.	Mesures de surveillance : dispositif type	36
11.3.	Mesures de supervision : paramètres de supervision du traitement et fréquences	36
12.	Rapportage, optimisation et mesures correctives.....	39
12.1.	Rapportage.....	39
12.1.	Mesures correctives et optimisation	39
13.	Mesures de validation et schéma décisionnel arrêt-prolongation du traitement	42
14.	Monitoring à long terme éventuel : dispositif et type de mesures.....	44
15.	Recommandation en matière de santé, sécurité et organisation	45
15.1.	Check-list succincte pour les entrepreneurs.....	45
15.1.	Check-list succincte pour les experts en pollution du sol	47
16.	Sources bibliographiques.....	49



1. Introduction

La technique d'intervention s'intitule « Bioventing » ou atténuation stimulée par voie biologique de la zone insaturée du sol par addition d'O₂ grâce à la circulation forcée d'air au travers du sol.

Cette technique, se différencie donc du traitement d'une contamination du sol par extraction des vapeurs du sol (SVE) pour lequel l'objectif est de traiter une contamination du sol présente dans la couche insaturée du sol à l'aide de la volatilisation des composés polluants et leur extraction suite au mouvement de convection de l'air du sol en direction de la surface.

Le Bioventing est une méthode de traitement in-situ, par voie biologique en condition d'aérobie, à l'aide des micro-organismes « indigènes », menée en apportant les quantités désirées d'oxygène grâce à la circulation d'un flux d'air au travers de la tache de contamination. Cette technique s'adresse donc aux composés facilement biodisponibles et biodégradables dans le sol et implique la mise en place de flux d'air limités adaptés à la vitesse de dégradation des polluants dans le sol et aux besoins en O₂ nécessaires à l'activité des microorganismes responsables de la dégradation. En conditions idéales, la dégradation des polluants est poursuivie pour donner naissance à des produits de réaction inoffensifs et naturellement présents dans le sol. Elle entraîne l'extraction hors du sol de faibles quantités de vapeurs polluées requérant un traitement.

Une distinction nette entre bioventing et SVE est cependant d'ordre académique, puisque dans tout processus d'extraction de vapeur, la zone insaturée à traiter s'enrichit en oxygène ce qui entraîne une biodégradation stimulée des composés biodégradables. Inversement, les processus de bioventing basés sur l'extraction de vapeurs du sol impliquent inévitablement l'extraction de polluants volatilisés dans la phase gazeuse du sol.

En fonction des circonstances prévalant sur le site, il sera utile ou indispensable d'associer la technique de bioventing avec d'autres techniques d'intervention : apport de nutriments dans les couches de sol impactées, le pompage pour le rabattement de la nappe d'eau souterraine, excavation du noyau de pollution, ... de manière à rencontrer les critères de performance (obtention durable des valeurs objectifs) et d'efficacité (respects de délais et de budgets raisonnables) désirés.

Cette technique de traitement peut être associée à plusieurs variantes selon les circonstances rencontrées sur le site. Les principales variantes considérées dans ce document sont :

- L'injection d'air dans la couche insaturée du sol, de manière passive ou active ;
- L'injection d'air dans la couche saturée du sol fréquemment désignée par son vocable anglais : air sparging. Les aspects liés à cette dernière technique sont détaillées dans le Code de Bonne Pratique n° 2 traitant du pompage des gaz dans la couche insaturée du sol et ne seront pas pris en compte dans le présent code.
- La stimulation de la biodégradation par réchauffement du sol, par injection d'air chaud, injection de vapeur, effet joule, ...

En cas de présence de quantités importantes de produit pur, piégé dans les pores du sol, ou sous forme de surnageant au-dessus de la nappe (LNALP), l'élimination de cette phase doit être opérée en préalable à la mise en œuvre des opérations de bioventing. En effet, la présence d'une phase importante de produit pur, peu disponible pour les microorganismes, aboutirait à des temps de traitement trop importants.

La technique visée ici se distingue des techniques qualifiées d'auxiliaires faisant l'objet de Codes de Bonne Pratique séparés : pompage de l'eau souterraine pour le rabattement, le traitement au-dessus du sol des gaz et condensats pompés.



Cette technique de prise en charge repose sur une bonne compréhension et une évaluation quantitative des mécanismes et processus naturels opérant dans le 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 insaturée 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 favorables (si pas 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 insaturées 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, ou en couche libre (peu importante) en surface de la nappe (LNALP). Idéalement, les produits de la dégradation chimique des polluants sont le CO_2 , le SO_4^{2-} , le Cl^- , l' H_2O , ... 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 insaturée du sol grâce à la circulation d'air au travers des couches polluées de la zone insaturée. Cette circulation est assurée à l'aide d'un dispositif de pompage des vapeurs du sol constitué de :
 - o Un ou plusieurs puits de pompage verticaux ou horizontaux établis dans la couche insaturée permettant le prélèvement actif des gaz du sol ;
 - o Une ou plusieurs pompes à vide ou ventilateurs disposées en surface du sol ;
- Un dispositif de collecte des vapeurs pompées menant vers une station de traitement après passage dans un séparateur liquide – vapeur. La collecte est assurée par des conduites individuelles ou par un réseau de conduites débouchant dans un ou plusieurs collecteurs.
- Apport des nutriments nécessaires à la constitution de la biomasse des microorganismes grâce à la mise en place d'un dispositif d'infiltration de solutions nutritives ;
- Contrôle de la teneur en eau des couches à traiter grâce à la mise en place d'un dispositif d'infiltration d'eau ;
- 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 suivi de la phase gazeuse du sol mesurant les dépressions, les débits pompés (instantanés et cumulés) et permettant l'échantillonnage des gaz en différents points du système.
- Un dispositif de supervision du traitement dans le sol permettant de suivre le niveau de la nappe aquifère (si rencontrée à faible profondeur) ;
- Un dispositif de traitement des gaz extraits du sol adapté aux débits attendus et aux polluants à traiter. La qualité des gaz traités avant leur rejet dans l'atmosphère doit être conforme aux recommandations de Bruxelles Environnement précisées dans [le code de](#)



bonne pratique 'Normes de rejet dans le cadre des travaux d'assainissement et des mesures de gestion du risque'.

- Un dispositif de traitement ou prise en charge des condensats liquides ;
- En cas de pollutions superficielles, un dispositif d'imperméabilisation de la surface du sol visant à allonger le trajet de la circulation de l'air au travers de la tache de pollution ;
- 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, risques d'explosion et d'incendie, ...

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

- L'injection d'air dans la couche insaturée du sol, de manière passive ou active ;
- L'injection d'air dans la couche saturée du sol fréquemment désignée par son vocable anglais : air sparging. Les aspects liés à cette technique sont détaillées dans le Code de Bonne pratique n° 2 traitant du pompage des gaz dans la couche insaturée du sol.
- La stimulation de la biodégradation par réchauffement du sol, par injection d'air chaud, injection de vapeur, effet joule, ...

Un dispositif type de bioventing (+ apport de nutriments et injection d'air dans le sol) est présenté à la **Figure 1**.

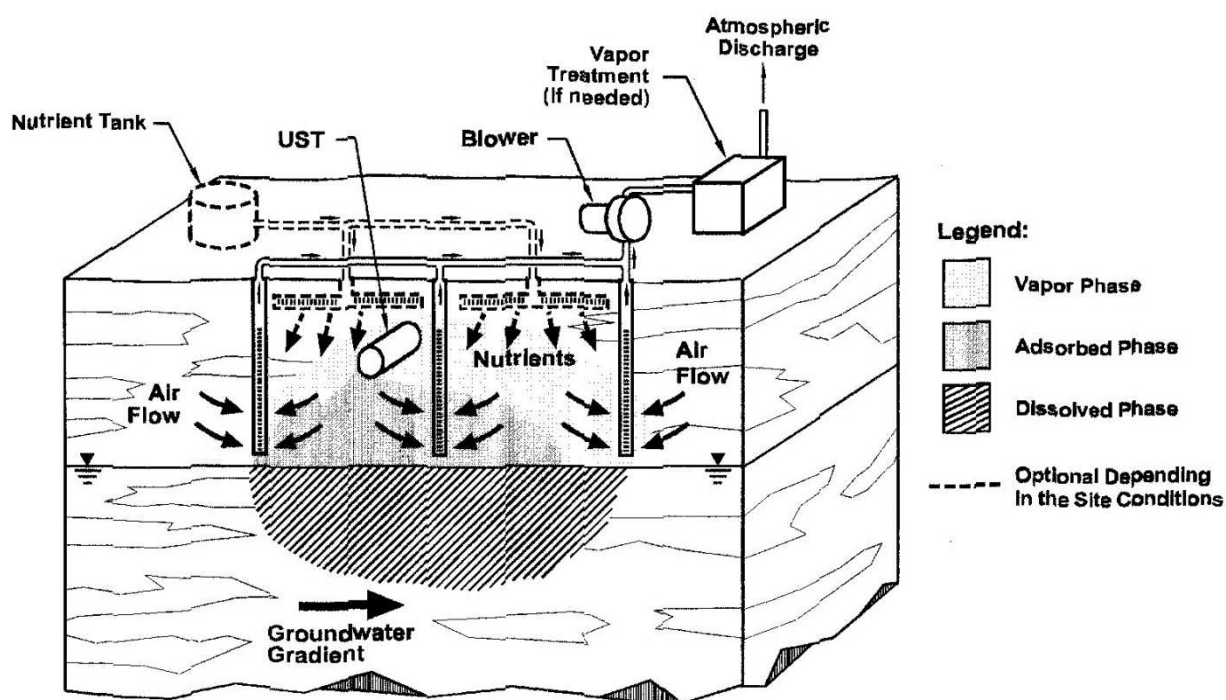


Figure 1 : Dispositif type de bioventing (Extrait du document USEPA, 1995, 510-D-95-007, How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites: A Guide For Corrective Action Plan Reviewers)

En 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 d' O₂ 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 du bioventing 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, le bioventing 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, le bioventing 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 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 cet apport est réalisé par infiltration de sels dissous au moyen de puits verticaux ou galeries horizontales d'infiltration. 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.

L'apport de nutriments sous forme de solution assure également l'approvisionnement en eau des couches de sol à traiter de manière à préserver un taux d'humidité optimal pour l'activité des microorganismes.

L'établissement d'une teneur en nitrate >50 mg/l dans l'eau souterraine en résultat des apports, 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.

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

Le pH du sol doit idéalement être compris entre 6 et 8. Une correction du pH du sol par incorporation direct (pollution superficielle) ou 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 au 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).

2.5. 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.

Les microorganismes peuvent être apportés au sol de différentes manières :

- Incorporation directe au sol (réservé aux pollutions superficielles) ;
- Infiltration d'une suspension de microorganismes, enrichie ou non de nutriments, directement dans les couches insaturées 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 $< 10^3$ organismes (ou CFU colony forming unit) par gramme de sol. 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 ;
- 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. L'injection d'air dans la couche insaturée du sol

Cette technique consiste à injecter de l'air dans la couche insaturée du sol au moyen de puits ou de tranchées horizontales. Les buts recherchés peuvent être de diverse nature.

Lorsque cette technique est **appliquée seule**, sans mise en place d'un dispositif d'extraction des vapeurs du sol, l'objectif poursuivi est d'approvisionner en oxygène les micro-organismes du sol responsables de la biodégradation des polluants. En complément, il est parfois également recherché de mobiliser et disperser les polluants les plus volatiles et ainsi augmenter le volume de sol jouant le rôle de bioréacteur. Cette technique peut également faire appel à l'injection d'oxygène pur, d'ozone, de co-métabolites à l'intention des micro-organismes (méthane, propane, ...).

Compte tenu des risques de dispersion incontrôlée des polluants volatiles et de formation de poches d'accumulation sous les bâtiments et autres cavités aménagées dans le sol, en règle générale on considère que cette technique ne sera jamais mise en œuvre seule en Région de Bruxelles-Capitale, densément peuplée et aménagée.

Lorsque cette technique est **couplée à un dispositif d'extraction** des vapeurs du sol, elle vise à augmenter le flux d'air passant au travers de la tache de pollution sans obligation d'augmenter la dépression dans le sol et les risques associés d'élévation du niveau de la nappe d'eau souterraine. Une fois encore, le but recherché est d'accélérer le processus de circulation de l'air dans les couches polluées du sol afin d'augmenter l'approvisionnement en O₂ des micro-organismes responsables de la biodégradation.

L'injection d'air peut être effectuée de manière passive par la mise en place de puits dont le trajet crépiné correspond à la profondeur de la tache de pollution. La circulation de l'air atmosphérique au travers de la tache de pollution est activée en résultat du vide créé au niveau du puits d'extraction. L'injection active, quant à elle, implique la mise sous pression de l'air injecté en direction du puits d'extraction de manière à augmenter le gradient de pression et donc le flux d'air au travers de la tache de pollution.

Les systèmes d'extraction-injection totalement passifs où le flux d'air circulant au travers de la zone à traiter du sol repose sur les variations de pression atmosphérique et les fermetures-ouvertures alternées des puits d'extraction et injection ne sont pas considérés dans ce dossier compte tenu, d'une part des faibles variations barométriques enregistrées en Région de Bruxelles-Capitales, et d'autre part, les faibles flux que cette technique (peu énergivore) permet de développer.

Le dispositif à mettre en place est identique à celui utilisé pour le bioventing classique auquel s'ajoutent les éléments suivants :

- Des puits (ou des galeries horizontales) d'injection d'air dont le trajet crépiné est implanté à la profondeur atteinte par la tache de pollution ;
- En cas d'injection active : une pompe + un filtre à air, éventuellement accompagné d'un humidificateur, ainsi qu'un dispositif de contrôle et de suivi mesurant les pressions appliquées, et les débits injectés (instantanés et cumulés).



3.2. Le bioventing associé au chauffage du sol par injection d'air chaud ou 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. 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 être comprise entre les limites 10°C et 45°C. Sous 5 °C, on considère que l'activité microbienne est quasi nulle. 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 relativement courts.



4. Objectifs poursuivis : panache versus noyau

Le bioventing 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 sont souvent présents sous forme de phase libre (NAPL) 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.

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

5.1. Polluants susceptibles d'être pris en charge par le bioventing

Le **Tableau 1**, 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.

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

Les autres propriétés favorables sont les suivantes :

- Le polluant est mobilisable et disponible pour une mise en contact avec les microorganismes du sol ;
- Les caractéristiques des polluants à dégrader doivent être les suivantes :
 - Tension de vapeur < 0,5 mm Hg (<66,67 Pa) ;
 - Point d'ébullition > 250-300 °C ;
 - Constante de Henry < 100 atm (7,5 10⁻⁵ , sans unité) ;

sans quoi, les polluants ont d'avantage tendance à être volatilisés et entraînés par convection vers les puits d'extraction de l'air du sol 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.

Tableau 1 : 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

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 nitrés			
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



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 Nonane	☐ Gasoline ☐ 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
	Pyrenes	☐ Heating oil
Less degradable	Acenaphthenes	☐ Lubricating oils

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*)

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

Le bioventing peut être appliqué pour le traitement d'une pollution des couches insaturées du sol 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.
- Le polluant n'est pas présent au niveau du noyau de pollution sous forme de phase libre, soit en couche surnageante au-dessus de la nappe, soit piégée dans les pores du sol. 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. Absence de couche imperméable dans le volume de sol à traiter.



- Couches insaturées du sol suffisamment perméables permettant la circulation de l'air et la répartition d'oxygène, l'infiltration de nutriments et autres additifs. Perméabilité $> 10^{-10} \text{ cm}^2$ (soit une conductivité hydraulique à $20^\circ\text{C} > 10^{-7} \text{ m/s}$) ;
- Teneurs en nutriments suffisantes ou légèrement insuffisantes dans le sol. Le ratio dans le sol C : N : P favorable à une biodégradation des polluants organiques se situe dans le marge allant de 100:10:1 à 100:1:0.5.
- pH du sol compris entre 6 et 8 ;
- Température du sol comprise entre 10°C et 45°C ;
- Présence dans le sol des microorganismes assurant une biotransformation rapide et complète, sans passage par des produits intermédiaires toxiques et mobiles dans le sol. En général, on considère que le bioventing sera efficace si le sol contient plus de 10^3 CFU (colony forming unit) de bactéries hétérotrophes par gramme de 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 eau des couches de sol à traiter allant de 40 à 85 % de la capacité de rétention en eau du sol (capacité au champ) ;
- Tache de pollution non superficielle de sorte que la circulation de l'air à partir de la surface vers les puits d'extraction n'est pas la composante majeure de la circulation de l'air en direction des puits.
- Profondeur de la nappe supérieure à 3 m sans quoi la remontée de la nappe accompagnant le pompage de l'air sous dépression risque de poser des problèmes : occupation par l'eau des puits d'extraction et réduction de la circulation de l'air dans le sol. La mise en œuvre de la variante injection d'air dans le sol (et le rabattement de la nappe) peut apporter une réponse à cette limitation mais dans tous les cas de figure la nappe sera rencontrée à une profondeur supérieure à 1 m.
- Présence d'un revêtement imperméable à la surface du sol.

Lorsque le traitement implique la mise en œuvre de la variante atténuation stimulée + chauffage du sol par injection de vapeur ou d'air chaud, 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, ...



6. Examen à priori de la faisabilité technique

6.1. Critères d'acceptation

Les principaux critères d'acceptation du bioventing 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** ;
- Une évaluation de la situation suffisante a été réalisée 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 de bioventing, les récepteurs sensibles sont et vont rester protégés et qu'aucune extension sensible du panache de pollution ne sera observée.

Le bioventing est à considérer comme une technique innovante dont les résultats ne sont pas 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 d'assainissement ou de gestion du risque.

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 ...
- L'utilisation du site ne doit pas être empêchée ou limitée sur le long terme par le processus de bioventing. 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 :

- 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, liquide et gazeuse) et existence d'une phase de produit pur. Cet examen porte sur les polluants responsables de la contamination et leurs produits de dégradation à caractère polluant.
- Origine et cause de la pollution ;

- 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 :

- composition du sol (hétérogénéité et présence de différentes couches), voies de circulation préférentielles des gaz du sol, ...
- Paramètres influençant la disponibilité des polluants (pH, teneur en argile et en matière organique, ...)
- Paramètres influençant la susceptibilité des polluants à la (bio)dégradation : potentiel redox, disponibilités en O₂, présence de pollutions multiples, ...

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).

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 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 éventuels, d'injection ou d'infiltration, de pompage et récupération des gaz, ainsi que le dispositif de traitement des gaz pompés, et, éventuellement le dispositif de préparation de la vapeur ou de l'air chaud (chauffage et humidification).
- 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 de pompage et éventuellement d'injection : 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 gaz : réseau de distribution du gaz, de l'eau, de l'électricité, des fibres optiques, égouttage, ..., ou au contraire constituant des barrières à cette circulation (réseau du métro et des chemins de fer, ...).
- Absence d'infrastructures enterrées sensibles à la corrosion du fait de l'apport d'O₂ par circulation d'air: citernes et conduites non revêtues, plots métalliques ou béton ferrailé, ...

Faisabilité financière et économique

- Etablir la faisabilité technique d'une prise en charge par bioventing 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 (inflation, actualisation des coûts). 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 du bioventing 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 pris 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 du bioventing 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**.



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
Phase de produit pur	Absente ou éliminée	Présente mais de faible extension	Présente et d'extension importante
Tache de pollution	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 du sol à traiter : homogénéité et isotropie de la circulation des gaz	Sol 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
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

Cet examen vise à établir que la (bio)dégradation des polluants prend bien place sur le site et peut être stimulée par bioventing. 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).
- Les conditions prévalant dans les couches insaturées du sol sont favorables à la dégradation des polluants et à la stimulation de cette dernière : la fourniture et la distribution de l'O₂ nécessaire à la dégradation peut être assurée par le bioventing dans des conditions techniquement et économiquement favorables, la biodisponibilité du polluant est suffisante, la durabilité de l'atténuation naturelle est assurée (ou peut être améliorée), la présence de nutriments est suffisante ou peut être améliorée dans des conditions techniquement et économiquement favorables .
- Utilisation d'indicateurs géochimiques ou biochimiques de l'atténuation naturelle : diminution des teneurs en O₂ et en nitrate, 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 (en résultat de l'entraînement par les eaux infiltrées), la volatilisation, la sorption réversible, ...).
- Evaluer les concentrations en polluants dans l'air extraite

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 par bioventing. 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 , avant le lancement des tests de laboratoire éventuels et/ou de tests pilote, ou 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.

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

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 (en présence d'une nappe concernée par la pollution)		
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
Teneurs dans la phase gazeuse du sol		
Mesure des teneurs en polluants dans la phase gazeuse du sol au sein de la tache de pollution	Placement de puits d'observation et mesure des teneurs dans le gaz du sol	
Présence d'une phase libre		
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 surnageante 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
Charge polluante globale		
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 bioventing

Paramètre	Moyen de mesures	Commentaires
Paramètres de la composition du sol		
Stratigraphie du sol : hétérogénéités , variations texturales, couches(s) aquifères (profondeur et puissance), 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	Disponible au terme de l'étude détaillée
Type de revêtement de la surface	Observation ou mesure du degré d'imperméabilisation de la surface du sol	Pour la prise en charge des pollutions superficielles
Variations saisonnières des niveau piézométriques	Suivi piézométrique lors de campagnes successives	
Caractéristiques du sol dans les couches insaturées		
Teneurs en nutriments : azote (nitrate et ammoniacal), Phosphore assimilable, Ca et mesure du pH du sol	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	
Recensements bactériens et examen par PCR : population de bactéries spécifiques	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	
Propriétés physiques : densité apparente, porosité, capacité de rétention en eau, teneur en eau actuelle	Prélèvement d'échantillons de sol à structure conservée et mesure des paramètres physiques au laboratoire	Trois échantillons par type de matériaux rencontrés dans la zone à traiter
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	
Capacité d'infiltration du sol (puits, drains ou tranchées)	Test d'infiltrations en continu, ou par intermittence sur le terrain	Si doute concernant la capacité d'infiltration du sol pour les solutions de sels de nutriments

= 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 bioventing

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
Accessibilité du site pour les campagnes de supervision et pour l'acheminement des équipements	Inventaire	
Accessibilité des parcelles voisines si les campagnes de supervision doivent ou peuvent y prendre place	Inventaire	
Présence de cibles aériennes sensibles au bruit, odeurs, vapeurs, ... sur le site et ses alentours immédiats	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 mise en œuvre de la variante chauffage du sol		
Présence d'infrastructures susceptibles d'être endommagées par suite de l'augmentation de la T° du sol.	Inventaire	
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)	

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

= paramètre dont la mesure ou l'estimation est utile

Ces tableaux appellent les commentaires suivants :

- Source de pollution éradiquée ou non: une certitude quant à l'absence de source de pollution résiduelle doit donc être obtenue avant le lancement d'une opération par bioventing ;
- Comme déjà mentionné, lorsqu'on observe une présence importante de produit pur, celle-ci doit faire l'objet d'une prise en charge préalable au lancement d'une opération de traitement par bioventing. Cette prise en charge peut être faite par un autre procédé de traitement : excavation, traitement thermique, pompage triphase, ...
- Teneurs en composés polluants dans la phase gazeuse du sol : pour le prélèvement des échantillons de l'air du sol, il est renvoyé au Code de Bonnes Pratiques n° 2 de Bruxelles Environnement portant sur les prises d'échantillons de sol, d'eau souterraine, de sédiments et d'air du sol. Cette campagne d'échantillonnage ne vise pas la délimitation de la tache de pollution dans le sol, étant donné que la correspondance entre teneurs mesurées dans les échantillons de gaz du sol et teneurs mesurées dans la phase solide du sol n'est pas toujours fiable et cohérente. Cette campagne vise à estimer les teneurs maximales en polluants qui seront présentes dans les gaz extraits du sol lors de la première phase du traitement (phase de flushing). Le nombre d'échantillons à prélever et à analyser fera l'objet d'une proposition de l'expert : un set d'échantillons prélevés à différentes profondeurs au centre de la tache (selon des intervalles de profondeur de 1,5 m) et un set d'échantillons en périphérie de cette dernière.
- Les aspects ayant trait à la mesure de la perméabilité du sol à l'air et aux tests de pompage sont décrits dans le Code de Bonne Pratique n° 2 consacré au pompage des gaz dans la couche insaturée du sol.
- Les aspects liés au sparging et au biosparging sont décrits dans le Code de Bonne Pratique n° 2 consacré au pompage des gaz dans la couche insaturée du sol et le Code de Bonne Pratique n° 7 traitant de l'atténuation naturelle stimulée par apport d'O₂ dans la nappe.

7.2. Deuxième étape de l'examen

Cette étape vise à confirmer la faisabilité du bioventing à l'aide de tests de laboratoire et de tests menés sur le terrain à petite échelle. Il appartient à l'expert de se prononcer sur la nécessité de réaliser ces tests compte tenu des données déjà collectées et de la fiabilité de celles-ci.

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 process ?
- 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 process ?
- Quel est l'effet de l'apport de nutriments (N et P) ?
- Quel est l'effet de l'inoculation du sol avec des microorganismes ?

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 CO_2 ;
- Consommation d' O_2 ;
- Eventuellement : 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 et éventuellement de souches bactériennes) à appliquer lors du traitement en grandeur réelle. Ils donnent également une idée sur les teneurs résiduelles minimales en polluants 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, utilisés 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 6 à 8 semaines (en fonction du type des polluants présents).

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 CO_2 et en O_2 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 O_2 , CO_2 , T° , ... Peuvent être mesurées en continu et des échantillons de sol et d'eau souterraines sont prélevés de manière régulière.

Des tests de biodégradation peuvent également être menés sur des colonnes de sol prélevées dans les couches polluées à traiter avec passage d'un flux continu d'air au travers du matériau pollué. Les teneurs en CO_2 et en O_2 de l'effluent gazeux sont analysées de manière régulière. En début et en fin de traitement, le pH et les teneurs en polluants (d'origine et produits intermédiaires) sont mesurés, ainsi qu'éventuellement, les teneurs en azote et phosphore. Ces analyses peuvent être complétées par des comptages des bactéries spécifiques responsables de la dégradation, des analyses PCR, etc. Les tests en colonnes donnent des indications plus réalistes des performances à attendre d'un traitement par bioventing.

Les tests en champs à mener dans les couches insaturées du sol (tests de respirométrie in situ) sont généralement de type « start - stop ». Une zone limitée du sol à traiter est enrichie en air durant un



court laps de temps de manière à s'assurer de l'existence de conditions d'aérobies. Ensuite, l'air du sol est extrait durant quelques jours (entre 1 à 5 jours) et analysé pour sa teneur en O₂ et CO₂ afin de mesurer la vitesse de la respiration. Ce test est mené au niveau de plusieurs puits/piézomètres installés au sein de la tâche à assainir de même qu'au niveau de puits/piézomètres établis en dehors de la tâche de pollution de manière à quantifier le niveau background de la respiration du sol (dégradation de l'humus ou oxydation des matériaux réduits du sol). L'air injecté contient un gaz traceur inerte (He ou SF₆) de manière à déterminer la contribution de la dilution et de la diffusion dans la chute des teneurs en O₂ mesurées lors du pompage. Les vitesses de respiration ainsi mesurées donnent une appréciation de la faisabilité du bioventing. Elles permettent également d'établir une comparaison entre les vitesses de dégradation mesurées et les données publiées dans la littérature pour des conditions similaires. Selon l'USEPA, les tests en champs sont d'habitude réservés aux cas de pollution d'une certaine ampleur (>75.000m³) ou lorsque le sol est moyennement perméable (perméabilité < 10⁻⁸ cm²), ou bien encore lorsque l'objectif de traitement se situe à moins de 80 % des teneurs initiales.

7.3. 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 des nombreuses inconnues et paramètres difficilement contrôlables que comporte une intervention par bioventing dans la couche insaturée du sol dans un milieu aussi intensément urbanisé que la Région de Bruxelles-Capitale, l'exécution d'un test pilote est recommandée. Il appartiendra à l'expert, le cas échéant, de justifier l'inutilité de cette étape, en raison notamment de la disponibilité de suffisamment d'informations et de garanties concernant les chances de succès d'un traitement par bioventing.

Les aspects ayant trait à la mise en place et l'exécution du test pilote sont décrits dans le Code de Bonne Pratique 2 traitant du pompage de gaz dans la couche insaturée du sol.

Les paramètres à définir lors de l'exécution du test pilote sont donnés dans le **Tableau 5** reproduit ci-après.

Le **Tableau 5** appelle les commentaires suivants :

- La durée d'un test pilote est variable en fonction de la précision visée des paramètres à mesurer. Selon l'OVAM (Code van Goede Praktijk voor bodumluchtexttractie en perslucht injectie, 2002), un grand nombre d'enseignements importants pourraient déjà être obtenus au terme de deux jours de tests.
- L'exécution du test pilote vise à mettre au point les paramètres gouvernant la circulation de l'air dans le sol et l'efficacité de l'apport en O₂ dans le sol. La teneur initiale en polluants des gaz extraits du sol est également une donnée attendue. Le test ne vise pas à étudier l'évolution des teneurs en polluants dans le sol qu'il n'est pas réaliste de suivre sur des durées aussi courtes.

Tableau 5 : Paramètres et contenu des tests pilotes pour le traitement par bioventing des couches insaturées du sol.

Rubrique	Paramètres et quantité à mesurer	Commentaires
Description du dispositif mis en œuvre	Description des éléments du dispositif : puits de pompage (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête), piézomètres d'observation (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête), dispositif de mesure des débits de vapeur pompés (type, localisation, ...), dispositif de mesure de la dépression (type, localisation), dispositif de mesure de la hauteur piézométrique à proximité des puits d'extraction, conduite d'amenée des fluides, et station de traitement des gaz pompés et des condensats	La localisation des différents éléments du dispositif fait l'objet de figures à joindre en annexe 6 du Projet.
Puits	Un ou plusieurs puits d'extraction localisés au sein de la tache de pollution. Longueur crépinée correspondant à l'épaisseur de la tâche à traiter et surplombant de 0,5 à 1 m au moins le toit de la nappe	
Points d'observation	Localisés à différentes distances du puits d'extraction, permettant la mesure de la dépression et le prélèvement du gaz du sol dans la tache de pollution et à différentes profondeurs	
Conduites d'évacuation des fluides pompés et station de traitement	Localisation possible sur le site compte tenu de l'encombrement, des nuisances possibles (bruits, odeurs) et de la proximité d'un point de rejet	Le traitement des fluides pompés fait l'objet d'un code de bonne pratique séparé
Paramètres mesurés	Débits et volumes cumulés de gaz pompés. Dépression au niveau de la pompe, du puits d'extraction et des différents points d'observation. Prélèvement et analyses d'échantillons de gaz pompés : teneur en eau, T°, teneurs en polluants (d'origine ou produits intermédiaires), O ₂ et CO ₂ . Prélèvement et analyse des condensats et mesure des teneurs en polluants. Prélèvement et analyse des teneurs en polluants dans les gaz traités avant leur rejet. Prélèvement et analyse des teneurs en polluants dans l'air ambiant aux alentours de l'installation de traitement. Niveaux piézométriques à proximité des puits d'extraction et variation en fonction de la dépression.	
Paramètres calculés	Rayon d'influence des puits d'extraction	
	Bilan de masse : ratio quantité de polluant pompé et dégradé /quantité de polluant présent sur la période du test.	
	Estimation du temps de traitement	
	Relation entre la dépression et les débits pompés. Proposition d'une dépression optimale	
Mode opérationnel	Pompage continu versus pompage intermittent	
Variante : injection (active ou passive) d'air dans la couche insaturée		
Description du dispositif complémentaire mis en œuvre	Description et localisation des puits d'injection (diamètre, longueur et profondeur de la crépine, tête, humidificateur éventuel). Dispositif de mesure des pressions et débits d'injection.	
Paramètres complémentaires mesurés	Pression d'injection, débits et volumes cumulés d'air injectés.	
Variante : chauffage du sol		
Description du dispositif complémentaire mis en œuvre	Description et localisation du dispositif de chauffage : puits d'injection de vapeur ou d'air chaud, sonde d'émission d'ondes radio, électrodes de chauffage par effet joule. Dispositif de mesure des températures dans les fluides injectés, dans les gaz du sol et les gaz extraits : type, localisation, profondeur.	
Paramètres complémentaires mesurés	Température des fluides injectés, Pression d'injection, débits et volumes cumulés d'air chaud ou de vapeurs injectés, puissance déployées dans les autres dispositifs de chauffage (ondes radio ou champs électrique), température des gaz du sol et des gaz extraits	
	Bilan de masse : ratio produit pur pompé/produit pur présent sur la période du test. Teneurs résiduelles dans le sol de la couche capillaire	
Conclusions du test pilote		
	Faisabilité technique du traitement : nombre de puits d'extraction, d'injection, durée du traitement, volumes de gaz extraits, de condensats, à prendre en charge, volumes d'air et/ou de vapeur à injecter, consommation énergétique nécessaire, ...	
	Dimensionnement du dispositif de traitement en vraie grandeur : nombre et distance entre les puits d'extraction et éventuellement d'injection, débits des gaz pompés et éventuellement injectés, dépression et éventuellement températures à mettre en place, durée projetée du traitement, dimension et équipements de la station de traitement, quantités de gaz (et de condensats) à traiter et à rejeter, Définition des paramètres de suivi.	
	Mode opérationnel recommandé : pompage continu versus pompage intermittent, période de l'alternance	
	Bilans de masse et résultats attendus : masse de polluants extraits, masse de polluant dégradé, masse et teneurs en polluants résiduelles	



8. Description d'une installation type

Le type d'installation nécessaire à la mise en œuvre d'un traitement par bioventing comporte typiquement les éléments suivants.

8.1. Circulation de l'air par extraction du gaz du sol

- Un ou plusieurs puits d'extraction (généralement verticaux, plus rarement horizontaux) localisés au sein de la tache de pollution. Les puits sont équipés de crépines interceptant la totalité de la puissance de la tâche. En cas de tache de pollution de puissance importante, le réseau de puits d'extraction sera composé de puits équipés de crépines situées à des profondeurs différentes et séquentielles. Les distances entre les puits d'extraction sont calculées pour intercepter les gaz circulant dans l'entièreté de la tâche.
- 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 d'imperméabilisation de la surface du sol, en cas de pollutions superficielles : membranes en PE, revêtement hydrocarbonés, revêtement en béton avec imperméabilisation de la sous-couche, ...
- Un dispositif de régulation du pompage 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 pompés reliant la(les) pompe(s) aux puits d'extraction et ensuite celles-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 l'absence de sections à contre-pente où les condensats pourraient s'accumuler. Des débitmètres permettant de suivre en instantané et en cumulé les volumes pompés 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 un filtre à particules.
- Une station de traitement des gaz pompés ;
- 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 (voir Chapitre 10).



8.2. Variante circulation de l'air par extraction + injection d'air dans la couche insaturée du sol

En plus des infrastructures décrites ci-dessus, le dispositif comporte un ou plusieurs puits d'injection d'air, passifs ou actifs, établis entre les puits d'extraction. Ces puits sont crépinés sur la puissance de la tache de pollution et, si nécessaire, équipé d'humidificateurs de l'air injecté. Idéalement ces puits sont équipés de débitmètres permettant de mesurer les débits et les volumes cumulés d'air injectés.

8.3. Variante SVE + chauffage du sol

En plus des infrastructures décrites à la Section 8.1., le dispositif comporte :

- un dispositif de chauffage de l'air ou de préparation de la vapeur d'eau à injecter dans les couches insaturées dans des puits établis comme décrit dans les sections 8.1 et 8.2. Les puits d'injection seront équipés de sondes permettant de mesurer la température des fluides injectés.

Plus rarement, le chauffage du sol fait appel à :

- des antennes enfouies pour l'envoi d'ondes radio dans le sol ou
- des électrodes enfouies pour le chauffage par effet joule.

Le dimensionnement de ces équipements sera réalisé à l'aide des informations collectées durant la phase pilote. Le dispositif de supervision (voir Chapitre 10) comportera en outre des sondes de température au niveau des points de contrôle et de puits d'extraction.

8.4. Apport par infiltration des solutions de nutriments

Les nutriments peuvent être apportés au sol par incorporation directe (pollutions superficielles) ou par arrosage du sol avec des solutions nutritives. Le plus généralement les nutriments sont apportés au sol par infiltration de solutions de sels d'azote (nitrates et ammonium) et de phosphore (phosphates). Le dispositif nécessaire comporte typiquement les éléments suivants :

- Un dispositif de préparation et conditionnement de la solution à infiltrer avec éventuellement une unité de stockage des additifs ;
- Un réseau de drains d'infiltration (plus rarement de puits verticaux) localisés à l'aplomb de la tache de pollution. Les distances entre les drains (ou puits) d'infiltration sont calculées pour 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 drains/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.

Le contrôle du taux d'humidité du sol par infiltration d'eau fait appel au même type de dispositif.



Remarque 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 et des cahiers de charge.

8.5. 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 2.

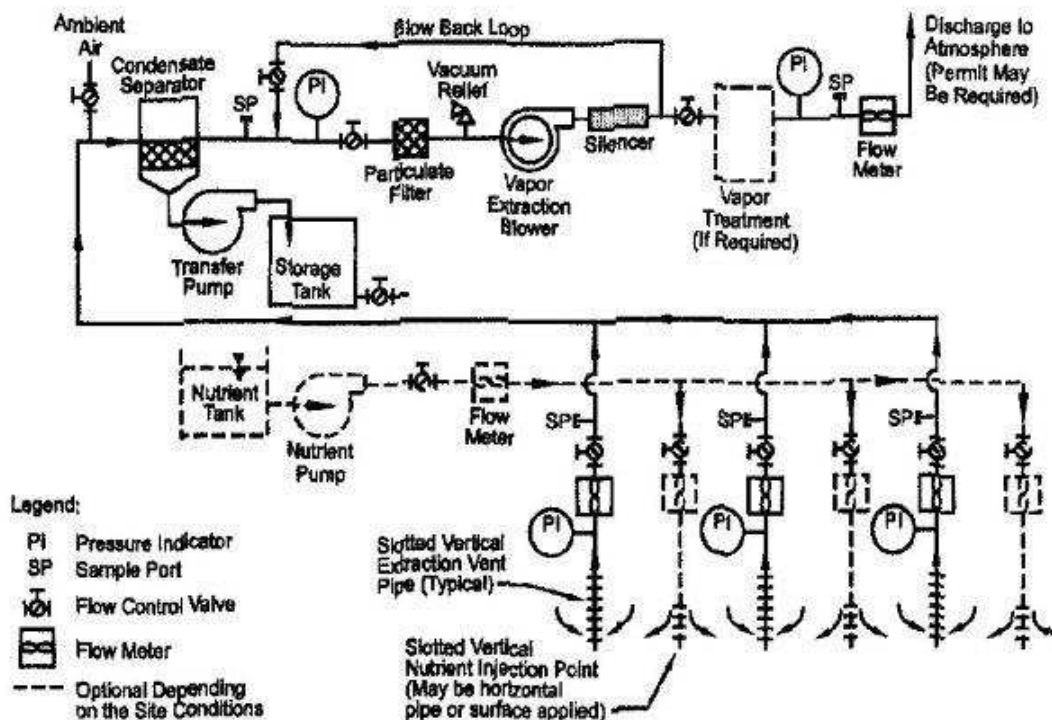


Figure 2 : Schéma technique d'une installation de bioventing par extraction de gaz (Extrait du document USEPA, 1995, 510-D-95-007, *How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites: A Guide For Corrective Action Plan Reviewers*)



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 bioventing 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, la possibilité que des contraintes interviennent dans le futur et limitent l'efficacité de l'atténuation : par exemple l'accumulation de produits intermédiaires (stagnation), l'occlusion du sol par les oxydes métalliques et la masse bactérienne, l'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 6**.

Remarque :

Il est possible qu'un dispositif de rabattement de la nappe aquifère doive être mis en place pour favoriser la circulation de l'air au sein de la tache de pollution et pour limiter la remontée de l'eau sous-terrainne suite à l'application d'une dépression dans le sol. Les aspects liés à ce rabattement font l'objet d'un code de Bonne pratique auxiliaire spécifique.

Tableau 6 : Données à fournir concernant le système de traitement à mettre en place

Partie du dispositif	Élément	Données du descriptif	Commentaire
Objectifs poursuivis	Traitement de la couche insaturée du sol	Objectifs de teneurs à atteindre de manière durable dans le sol. Extension actuelle en x, y et z de la contamination. Charge polluante initiale. Durée prévue du traitement. Débits prévus pour la circulation de l'air dans le sol.	
Dispositif d'extraction du gaz du sol dans la couche insaturée	Puits d'extraction	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 puits en dépression). Protection de la tête (trapillon de visite, tube en acier cadenassé, ...). Position des manomètres	Si la tache à traiter est de forte puissance, le dispositif peut comporter des puits établis à des profondeurs différentes



	Pompe	Type et localisation des pompes : pompes à vide, ventilateurs, ... connectées à 1 ou plusieurs puits, séparateur air/liquide, filtres à particules. Niveau de la dépression mise en œuvre. Mode opérationnel : continu - intermittent	La puissance des pompes doit être calculée par rapport aux débits d'extraction retenus en fonction des débits d'apport d'O ₂ souhaités et des dépressions réalistement applicables
	Système de régularisation	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	
Variante injection d'air dans la couche insaturée	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), type de tête, système passif ou actif. Pression et débit d'injection. Humidificateur.	
Variante chauffage du sol	Injection d'air chaud ou de vapeur	Localisation des points d'injection et descriptif (diamètres profondeurs, distances, ...). Températures de la vapeur/air injecté. Pressions et débits d'injection.	
Dispositif de collecte du gaz extrait	Conduite d'amenée du gaz pompé	Type, dimensions et disposition des conduites d'amenées, 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, des manomètres et des sondes de température.	
Dispositif d'apport de nutriments	Puits ou drains d'infiltration	Localisation, distance entre les différents puits ou drains, profondeurs de mise en place, longueurs des sections aveugles et crépinées, diamètre, débits attendus, pressions d'injection (si injection active), fréquences des apports, composition des solutions nutritives, dispositif de préparation des solutions et de stockage des additifs.	Le même dispositif peut être utilisé en cas d'apport éventuel de microorganismes (bio-augmentation)
Station de traitement du gaz pompé et dispositif de prise en charge des condensats	Cette rubrique fait l'objet d'un code de bonne pratique auxiliaire		
Dispositif anti-nuisances	Mesures antibruit	Type de mesure prévue : mesures anti-cavitation des pompes, isolation acoustique des pompes,	
	Mesures anti-odeur	Eventuelles pour les composés volatiles (acétones, composés aromatiques, hydrocarbures légers)	



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 :

- 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 en cas de migration verticale des polluants vers la nappe aquifère ;

10.2. Nuisances pour la qualité de l'air en cas de présence de polluants volatils

Les gaz extraits du sol 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.

10.3. Risques d'incendie et explosion

L'injection d'air dans le sol combiné à l'extraction de gaz 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, d'ouverture automatique et d'entrée d'air et, si nécessaire d'arrêt du fonctionnement en cas de dépassement de la valeur de 10 % de la LEL (Lower Explosive Limit).

Les opérations d'injection d'air dans le sol en présence de composés volatils, 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, ...



10.4. Nuisances acoustiques

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

10.5. 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 verticale de ces composés en direction de la nappe aquifère exploitée.

La vérification de la qualité des eaux souterraines en aval de la zone d'intervention doit donc impérativement être effectuée si des risques de migration verticale des polluants sont identifiés.

10.6. 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 valeurs TCL [disponibles sur la plateforme S-Risk © \(Substance data sheets, <https://s-risk.be/documents>\)](#). En cas de dépassement de celles-ci, une vérification de l'étanchéité des installations s'impose. Dans les zones sujettes à un niveau élevé de pollution atmosphérique ambiante (voiries à trafic intense, 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 insaturées du sol et la lixiviation de ces derniers ne doit pas donner naissance à des teneurs en nitrate dans la nappe 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.

11. Supervision du traitement

11.1. Règles de base de la supervision

Les actes à réaliser dans le cadre de la supervision d'un traitement par bioventing 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 le bioventing 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 de mesures comportant notamment des 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 prélèvements et de 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

Le dispositif type pour la surveillance du traitement est décrit dans le Code de Bonne Pratique n° 2 traitant du pompage des gaz dans la couche insaturée du sol.

En plus des éléments décrits dans ce code, le dispositif d'infiltration (ou d'injection) des solutions nutritives doit permettre de mesurer les débits et les volumes d'additifs apportés au niveau de chaque point d'infiltration/injection.

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 7** suivant.



Tableau 7 : Fréquences et paramètres des opérations de supervision du traitement

Paramètres de supervision	Moyen	Paramètre	fréquence minimale	Commentaires
Circulation de l'air par simple extraction des gaz du sol				
Débits 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 puis trimestriel	
Dépression et température au niveau des puits d'extraction	Manomètre et sonde de température au niveau des puits	Dépression (Pa) et Température (°C)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	Pour le calcul des volumes extrait en unités normalisées (T° et Pressions standard)
Teneurs en polluants dans les gaz extraits par chacun des puits	Prélèvement au niveau des puits d'extraction et analyse des échantillons. Cartouche à charbon actif, cartouche Dräger, PID, FID	Teneurs des polluants requérant une intervention + produits de dégradation intermédiaires	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	
Teneurs en eau, O ₂ et CO ₂ dans les gaz extraits par chacun des puits	Prélèvement au niveau des puits d'extraction et analyse des échantillons : mesure directe, ballons,	Teneurs en eau, O ₂ et CO ₂ (kg/m ³)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	Suivi de la teneur en eau minimale et suivi des paramètres de l'activité biologique
Dépression au niveau des points d'observation	Manomètres au niveau des points d'observation	Dépression (Pa)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	Suivi des rayons d'influence et mise en évidence des zones exclues
Estimation des quantités de polluants prélevées par puits et totales	Somme des quantités prélevées pour les différentes périodes de contrôle	quantités de polluants extraites (Kg)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	
Teneurs dans la phase gazeuse du sol dans la zone insaturée	Prélèvement dans les points de contrôle et analyse des échantillons de gaz	Teneurs en polluants et en produits de dégradation secondaires, teneurs en O ₂ et en CO ₂	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	Identification des zones non touchées par la circulation de l'air, suivi de la volatilisation des polluants volatiles
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	
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 puis trimestriel	Identifier la filière de traitement sur ou en dehors du site
Teneurs résiduelles dans le sol	Forages, prélèvements et analyse de carottes de sol	Teneurs des polluants requérant une intervention, en produits de dégradation intermédiaires, en C (organique) en N (nitrate et ammonium), en P assimilable (kg/Kg), pH, teneur en eau	Au lancement des opérations, au terme de la phase de lancement, ensuite tous les 3 mois	Facultatif : comptage des bactéries hétérotrophes (CFU/gr de sol). La profondeur des prélèvements doit permettre de suivre une éventuelle migration verticale des polluants
Bilan de masse de la charge polluante	Sur base des mesures des teneurs	Charge polluante initiale, charge polluante résiduelle, quantités extraites, quantités dégradées.	Au terme de la phase de lancement et ensuite tous les 3 mois	
Quantités de nutriments apportées et ratios C:N:P	Quantités et teneurs des solutions nutritives infiltrées et analyse des échantillons de sol	Ratios C:N:P dans le sol et quantités de N et P apportées	Au terme de la phase de lancement et ensuite tous les 3 mois	Ajustement de la fréquence des apports en N et P et contrôle de la distribution des nutriments
SVE + Variante injection dans la couche insaturée Paramètres complémentaires				
Mesure des débits 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 puis trimestriel	
SVE + Variante chauffage du sol Paramètres complémentaires				
Mesure des températures au niveau des puits d'injection si chauffage par injection d'air chaud ou de vapeur d'eau	Sondes de température dans les puits d'injection	T ° °C	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	
Mesure de la température du sol dans les points d'observation	Sondes de température dans les points de contrôle	T° °C	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	

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



Ce tableau appelle les commentaires suivants :

- Concernant les paramètres à analyser, le **Tableau 7** ci-dessus fournit une checklist à l'intention des experts. Lors de la rédaction du plan de prélèvements et de 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.
- L'analyse des teneurs en polluants dans les gaz sera réalisée au laboratoire après prise d'échantillons sur des cartouches à charbon actif ou dans des ballons. L'expert pourra cependant proposer de réaliser des mesures directes de teneurs à l'aide d'appareil FID, PID ou de cartouches Dräger, s'il démontre qu'il existe une bonne correspondance entre les mesures directes et les analyses de laboratoire. 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'analyses 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 le traitement des gaz extraits du sol (teneurs dans les gaz rejetés, consommation en charbon actif, ...), l'expert est renvoyé aux recommandations des Codes de Bonne Pratique AUX 2 traitant spécifiquement de cet aspect.

Les paramètres de supervision du traitement ayant trait aux nuisances font l'objet du **tableau 8** suivant.

Tableau 8: 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, cartouche Dräger, PID, FID	Teneurs des polluants requérant une intervention (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 bioventing 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'injection d'air, abandon de puits, extension du réseau de puits d'observation en résultat de l'extension du panache, mise en œuvre d'autres techniques de traitement, ...

Le contenu du premier rapport intermédiaire comprendra au minimum les informations reprises dans le **Tableau 9**.

En ce qui concerne le traitement des gaz extraits du sol (teneurs dans les gaz rejetés, consommation en charbon actifs, ...), l'expert est renvoyé aux recommandations des Codes de Bonne Pratique AUX 2 traitant spécifiquement de cet aspect.

12.1. 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 du bioventing 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, 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 bioventing 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, plusieurs types de situations problématiques sont typiquement rencontrés.



Tableau 9 : informations à présenter dans le premier rapport intermédiaire

Rubrique	Paramètres et quantités 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 la phase solide, la phase gazeuse des couches insaturées du sol et, éventuellement dans l'eau souterraine. Teneurs en C (organique), N et P assimilable, pH, teneur en eau dans le sol. Niveaux piézométriques. Teneurs en O ₂ et CO ₂ dans la phase gazeuse du sol et répartition des teneurs.	Représentation graphique de l'extension du panache de contamination
Description du dispositif mis en œuvre (as built) pour la première phase.	Description des éléments du dispositif : puits d'extraction (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête avec valve de mise à vide), points d'observation (nombre, localisation, description, profondeur des sondes, massifs filtrants, bouchons de l'espace annulaire, tête), dispositif de mesure des débits (type, localisation, ...), dispositif de mesure de la dépression (type, localisation), conduite d'amenée des fluides, séparateur et station de traitement des gaz pompés	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 injection d'air et chauffage par injection de vapeur ou d'air chaud	Description des éléments complémentaires : puits d'injection (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massifs filtrants, bouchons bentonitiques, tête), dispositif de mesure des débits injectés (types, localisation), dispositif de mesure des températures de la vapeur ou de l'air chaud injecté et de la t° dans le sol	La localisation des différents éléments du dispositif fait l'objet de figures à joindre en annexe rapport intermédiaire
Description du dispositif mis en œuvre (as built) pour la première phase pour l'apport d'éléments nutritifs	Description des éléments du dispositif : puits ou drains d'infiltration/d'injection (nombre, localisation, profondeur, longueurs aveugles et crépinées, dispositif de mesure des débits). Composition des solutions infiltrées ou injectées. Pression d'injection (si injection active).	La localisation des différents éléments du dispositif fait l'objet de figures à joindre en annexe rapport intermédiaire
Paramètres à rapporter si circulation d'air par simple extraction des gaz de la zone saturée	Dépressions mesurées au niveau des puits et dans les points d'observation et débits et volumes extraits dans les différents puits. Vérification de l'extension de la zone de capture. Teneurs mesurées dans les gaz extraits (polluants, produits intermédiaires, O ₂ , CO ₂ , H ₂ O) - Teneurs dans le gaz du sol dans les points d'observation au départ et après démarrage du pompage (polluants, produits intermédiaires, O ₂ , CO ₂). Quantités et teneurs des condensats. Teneurs résiduelles dans le sol (polluants, produits intermédiaires, C organique, N, P) et bilan de masse (Charge en polluants résiduelle, charge en polluants initiale, quantité de polluants extraite, quantité de polluants biodégradé). Teneurs en N et P du sol, ratio C:N:P du sol. Quantités de solutions de nutriments infiltrés/injectées. Durée projetée du traitement sur base des données acquises. Modalité opérationnelle : pompage continu ou intermittent. Niveaux piézométriques de la nappe. Faisabilité de l'intervention - Mesures correctives à apporter	
Paramètres complémentaires à rapporter si variante injection dans la couche insaturée	Pressions d'injection et débits d'injection d'air (et volumes cumulés)	
Paramètres complémentaires à rapporter si variante injection de vapeur ou d'air chaud	Débits, t° et pression d'injection de vapeur/air chaud. Quantités injectées. Températures mesurées dans le sol.	
Paramètres facultatifs à rapporter	Comptage de bactéries hétérogènes dans le sol	Si jugé nécessaire par l'expert
Interprétation des résultats	Simulation de l'extension future du panache de pollution (migration verticale) et niveau de risque pour les cibles sensibles. Estimation de la durée du traitement. Analyse de la faisabilité de la prise en charge par bioventing	
Actions correctives	Modifications à apporter au dispositif de supervision. Modification du dispositif de bioventing. En cas d'insuffisance avérée du bioventing (durée trop longue, migration verticale des polluants et risque pour les cibles sensibles) mise en œuvre d'une technique de prise en charge alternative	



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

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

La durée du traitement par bioventing 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 (verticale) de la tache de pollution vers les cibles sensibles identifiées (nappes aquifères, ...). Les solutions correctives passent nécessairement par la mise en œuvre de techniques d'intervention plus actives permettant soit, de freiner la migration du panache, soit d'augmenter la vitesse de dégradation des polluants (chauffage du sol, bio-augmentation), soit les deux modes d'intervention combinés.

Les débits de gaz extraits chutent rapidement même si la dépression appliquée reste constante. Les solutions correctives possibles sont les suivantes :

- Mettre en place un système de rabattement de la nappe de manière à regagner le volume disponible pour la circulation des gaz ;
- Décolmater les puits d'extraction ;
- Intercaler des puits d'injection entre les puits d'extraction afin de diminuer la dépression de service et ainsi rabattre le niveau de la nappe tout en gardant un débit intéressant.

Le niveau de dépression dans le sol n'est pas uniforme au niveau de la tache. La solution corrective possible revient à augmenter la densité des puits d'extraction.

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 sol. 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, l'assainissement ou la gestion du risque peuvent être considérés comme accomplis, 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 peut être introduit.

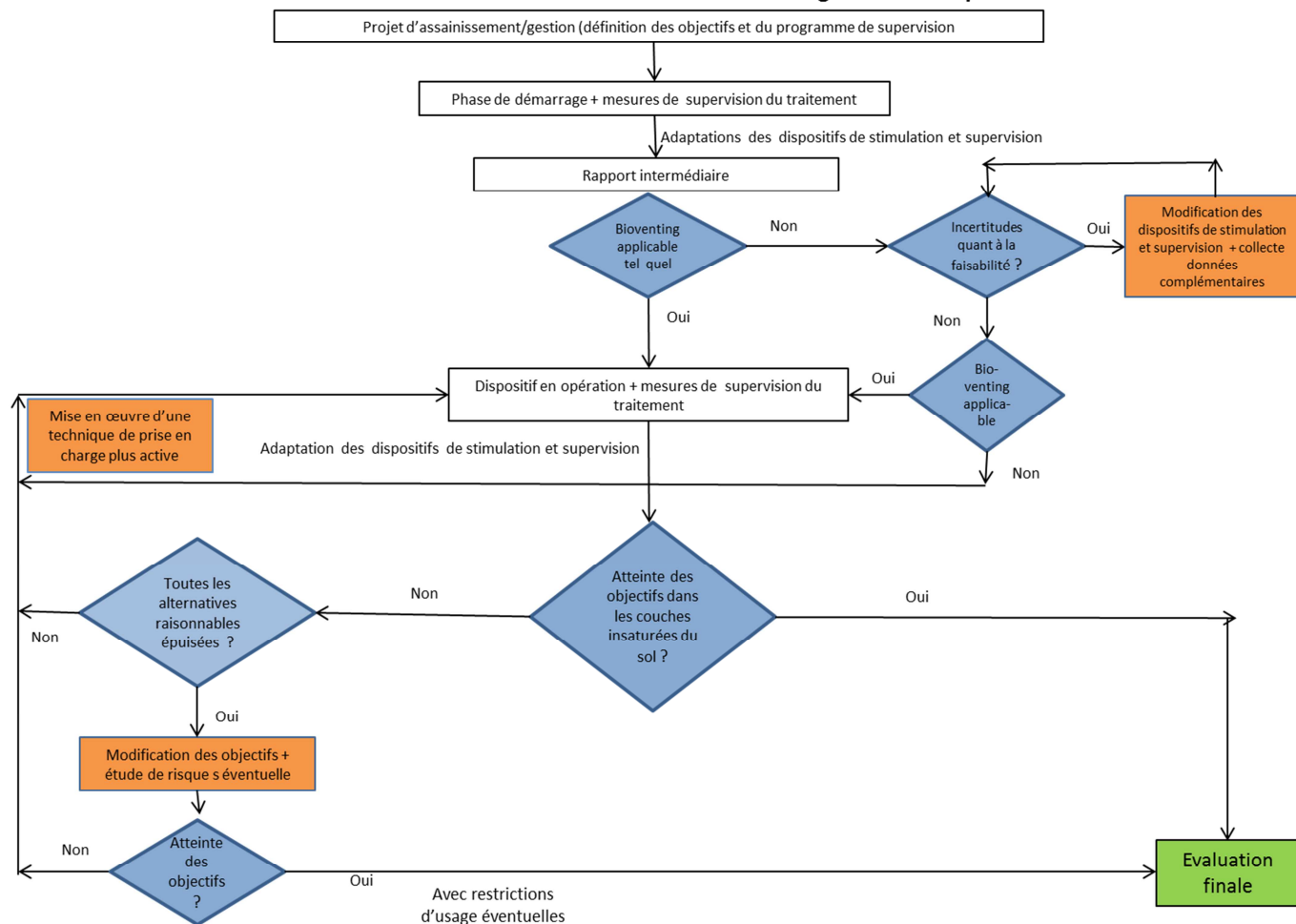
En cas de non atteinte des objectifs **de traitement**, les dispositifs de stimulation et de supervision sont maintenus en activité après mise en place de mesures correctives éventuelles : bio-augmentation, chauffage du sol, mise en œuvre de méthodes d'intervention plus « actives » : excavation du noyau,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

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.

Schéma décisionnel validation de l'assainissement ou de la gestion du risque



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

Sur suggestion de l'expert et/ou à la demande de Bruxelles Environnement, des mesures de 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 échantillons de sol, niveaux de teneur stabilisés à une valeur proche des objectifs [de traitement](#), circonstances particulières défavorables ...

Les paramètres de cette supervision à long terme éventuelle seront définis sur base des conclusions du rapport d'évaluation.



15. Recommandation en matière de santé, sécurité et organisation

15.1. Check-list succincte pour les entrepreneurs

La check-list à destination des entrepreneurs fait l'objet du **Tableau 10**. 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.

Les remarques suivantes peuvent être faites :

- Pour les entrepreneurs certifiés VCA ou de manière équivalente, les mesures énumérées dans le **Tableau 10** et ayant trait à la sécurité sont systématiquement d'application ;
- La check liste du **Tableau 10** 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 (rabattement éventuel de la nappe), on privilégiera de manière systématique, les conduites enterrées de manière à éviter les accidents, l'incidence du gel 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.

Tableau 10 : check-list à destination des entrepreneurs

Rubrique	Vérification
Informations préalables complètes et suffisantes (cahier de charges, descriptif des travaux...)	
Impétrants	Demande auprès des exploitants des réseaux effectuées 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.
Etude de stabilité des infrastructures enfouies	Etudes de stabilité adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser (si rabattement de la nappe)
Etude de stabilité des ouvrages aériens	Etudes de stabilité adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser (si rabattement 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 pompage (puits, localisation, dimension, ...) et éventuellement d'injection : établissement des quantités : débits, pressions, dépressions, types de pompes....
Identification des autorisations nécessaires et des cadres normatifs à respecter	Vérifier que les autorisations nécessaires ont été demandées par le donneur d'ordre. Vérifier la cohérence des performances demandées avec les cadres normatifs en vigueur.
Identification des procédures particulières à respecter	Identifier les procédures particulières et vérifier que leur respect est bien pris en compte dans le cahier des charges ou le descriptif des travaux : transport des déchets dangereux (condensats), rejets gazeux,
Points de rejets	Points de rejet 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'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	Risques pour les bâtiments et les infrastructures aériennes du fait du rabattement (étude de stabilité) - Mesures préventives pour éviter les tassements - Mesures de contrôle des tassements
	Risques pour les infrastructures enterrées du fait du rabattement - Mesures préventives pour éviter les tassements - Mesures de contrôle des tassements
	Risque d'explosion dans les canalisations de collecte des gaz compte tenu de l'inflammabilité des composés extraits
	Risque pour les infrastructures enterrées en cas de chauffage du sol par injection d'air chaud, de vapeur ou par tout autre système
	Risques d'explosion en cas de création de poches de produits volatiles inflammables dans le sol
	Risque électrique : respect du RGIE, conformité des installations et rapport de contrôle
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de produits dangereux et/ou polluants (carburants)
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de sol pollué sur site (lors de l'exécution des puits ou des fossés).
	Risques pour la santé du personnel du fait de la présence de produits volatiles et dangereux
	Risques d'accidents en général : chutes, incendie, électrocution
	Risques liés à l'intrusion sur le site de personnes non autorisées : vols, vandalisme et risque pour la santé
	Risque en cas de travail en milieu confiné (caves, fosses,...) liés à la mauvaise qualité de l'air du milieu
	Risques climatiques : gel des conduites....
	Risques liés à la circulation si infrastructures présentes sur la voie publique
Mesures préventives	Pour chacun des risques identifiés, identification et mise en place des mesures préventives (matériel électrique antidéflagrant), y inclus la formation du personnel
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacun des risques identifiés, préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Personnes et services à contacter en cas de problème	Pour chacun de risques identifiés, identité et coordonnées des personnes et/ou service à contacter : service incendie, commune, protection civile, exploitant des réseaux
Identification des nuisances possibles	Odeur et vapeurs dangereuses pour le voisinage en cas de fuites et pertes à partir des installations
	Niveau des nuisances sonores: pompes, groupes électrogènes,
	Encombrement des voiries
	Salissement des voiries
Mesures préventives	Pour chacune des nuisances identifiées, identification et description des mesures préventives. Par exemple, mise en place d'explosimètres, de systèmes d'alarme et de mise à l'arrêt et de sauvegarde (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 mensuelle 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 (charbon actif)
Mise en place de systèmes d'alarme, de mise en sauvegarde, et de mise à l'arrêt	Contrôle du bon fonctionnement du système de gestion à distance et de l'installation.
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.
Points d'attention spécifiques aux techniques mises en œuvre	
Qualité du matériel	Tous les matériaux sont testés pour le fonctionnement sous pressions. Un test des canalisations est effectué afin de s'assurer qu'aucune fuite ou obturation n'est présente. Tous les composants utilisés possèdent une fiche technique valide.
Impétrants	Compléter éventuellement le repérage des réseaux par une prospection géophysique Excavation manuelle préalable à proximité des canalisations ou des endroits à risques potentiels.
Pompes et canalisation	Les contaminations secondaires par l'air rejeté et les fuites de lubrifiant sont en permanence contrôlées Les pompes sont pourvues de récipients collecteurs permettant de prévenir toute fuite de lubrifiant. Une alarme se déclenche lorsqu'il y a une perte de pression dans l'installation
Protection contre le gel de l'installation d'injection de nutriments	Il est nécessaire d'établir un compromis entre rendement du bioventing et pérennité de l'installation de traitement.
Exploitation des puits d'extraction d'air	Mesures contre le colmatage des puits d'extraction d'air ou injection de nutriments Demander à l'Expert l'évaluation des facteurs potentiels d'obturation (impuretés, activité biologique, densité de la solution de nutriment injecté...)
Composants volatils / explosifs	En fonction de la volatilité des polluants, que l'on retrouve dans les études précédentes, on vérifie sur la base des fiches chimiques ou des MSDS existantes, entre autres, si la contamination peut être volatile et peut représenter un risque pour la santé humaine. On installe des instruments de mesure adéquats sur place et on mesure lors du contrôle mensuel dans l'installation de chantier et éventuellement dans les infrastructures à proximité. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un explosimètre ou si possible un appareil de mesure des composants individuels. Des mesures sont éventuellement prises afin de limiter le contact ou l'inhalation de ses polluants volatils par l'être humain.
Installations d'épuration	L'influent et l'effluent de l'installation d'épuration de l'air sont contrôlés régulièrement. En cas de nécessité, deux unités de traitement de l'air extrait sont placées en série afin de prévenir la saturation de la première.

15.1. Check-list succincte pour les experts en pollution du sol

La check-list à destination des experts est présentée dans le **Tableau 11**. Cette liste vise à aider les experts dans la rédaction des descriptifs des travaux, les estimations de coût et l'élaboration des cahiers de charge à destination des entrepreneurs.

Tableau 11 : check-list à l'intention des experts

Rubrique	Vérification
Informations préalables complètes et suffisantes (études préalables, cahier de charge, descriptif des travaux..)	
Caractéristiques du sol et des 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 du sol, tests de pompage, mesures piézométriques et sens d'écoulement de l'eau souterraine, variations saisonnières de la piézométrie, puissance de l'aquifère, isolation des différentes aquifères éventuels. Degré d'imperméabilisation de la couche supérieure. Densité et détail des données suffisants ?
Polluants présents et/ou à traiter	Nature des polluants présents et/ou à traiter, répartition des teneurs, source encore active ?, évaluation de la charge polluante dans les différentes phases du sol, potentiel de migration, présence d'une phase libre surnageante ou plongeante, évolution naturelle attendue des teneurs (évolution mesurée, potentiel d'atténuation naturelle)
Caractéristiques 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 de pompage (puits, localisation, dimension, ...) et éventuellement d'injection : établissement des quantités : débits, pressions, dépressions, types de pompes....
	Mode de fonctionnement du dispositif : continu vs intermittent. Risques de colmatage. Actions correctives et d'optimisation possibles.
	Vérification a priori de la performance du dispositif : sens et mode de la circulation des gaz du sol, extension de la zone de capture, rendement de l'extraction des gaz du sol...
	Objectifs du traitement sont bien identifiés pour le sol et les eaux souterraines
	Estimation de la durée du traitement et nécessité de faire appel à des procédés complémentaires : injection d'air, chauffage du sol, apport de nutriments, bio-augmentation, ...
	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 des gaz traités issus du traitement 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 : transport des déchets dangereux (condensats), rejets gazeux,
Les lignes de communication sont	Identité et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'agent de Bruxelles Environnement, des autorités compétentes sont connues



définies	
Identification et nature des risques	Risque d'explosion dans les canalisations de collecte des gaz compte tenu de l'inflammabilité des composés extraits
	Risque pour les infrastructures enterrées en cas de chauffage du sol par injection d'air chaud, de vapeur ou par tout autre système
	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).
	Risques climatiques : gel des conduites si beaucoup de condensats
	Risques liés à la circulation si infrastructures présentes sur la voie publique
Mesures préventives	Pour chacun des risques identifiés, identification et mise en place des mesures préventives y inclus la formation du personnel
Personnes et services à contacter en cas de problème	Pour chacun de risques identifiés, identité et coordonnées des personnes et/ou service à contacter : service incendie, commune, protection civile, exploitant des réseaux
Identification des nuisances possibles	Odeur et vapeurs dangereuses pour le voisinage en cas de fuites et pertes à partir des installations
	Bruit des équipements : pompes, groupes électrogènes .
	Encombrement des voiries
	Salissement des voiries
Mesures préventives	Pour chacune des nuisances identifiées, identification et description des mesures préventives
	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, de validation et de supervision à long terme (post-gestion)	
Dispositif de suivi	Descriptif, localisation et cartographie du dispositif de suivi : Débitmètres, manomètre et sondes de t° au niveau des puits d'extraction, des puits d'injection, piézomètres de contrôle, points d'observation dans le sol et points d'échantillonnage des gaz du sol et des gaz extraits et traités, échantillonnage de l'air ambiant ... Prise en compte des cibles sensibles à protéger.
Paramètres du suivi	Mesures des dépressions et des débits d'extraction, mesure des dépressions dans le sol, mesures piézométriques, teneurs dans les gaz pompés, bilan de masse de la charge polluante, teneurs résiduelles en polluant et en produits de dégradation (si délétères) dans le sol et la nappe et répartition, calcul de l'extension des zones de capture, teneurs des gaz pompés à l'entrée et la sortie de la station de traitement, présence et puissance d'une phase libre, débits et pression d'injection d'air, T° des fluides injectés, extraits et T° du sol, migration des polluants en direction de la nappe et vers les cibles sensibles
Paramètres d'optimisation	Pompage et injection en mode intermittent, modulation des dépressions selon les zones, optimisation de la dépression de service, rabattement de la nappe, chauffage du sol, placement de nouveaux puits d'extraction ou d'injection (zones de stagnation), adéquation de la profondeur des crépines, ...
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 ?
Supervision à long terme (post-gestion)	Dispositif de suivi : piézomètres d'échantillonnage
	Paramètres de la supervision : teneurs en polluants et produits de dégradation, paramètres permettant de suivre l'atténuation naturelle



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
- Code van goede praktijk voor bodemluchtexttractie en perslucht injectie, OVAM, 2002
- Innovative Site Remediation Technology Vol. 8, Paul C. Johnson et al., Springer 1994.
- Soil Vapor Extraction and Bioventing, US Army Corps of Engineers, June 2002.
- Engineering and Design IN-SITU AIR SPARGING, US Army Corps of Engineers, January 2008
- HyperVentilate Users Manual, US EPA, January 1993