

Code de Bonne Pratique 2

Pompage de gaz dans la couche insaturée du sol

Bruxelles Environnement



Contenu

1.	Introduction	3
2.	Description de la technique et des principes technologiques mis en œuvre	4
3.	Description des variantes.....	6
3.1	L'injection d'air dans la couche insaturée du sol.....	6
3.2	L'injection d'air dans la couche saturée du sol (sparging).....	7
3.3	La stimulation de la SVE par chauffage du sol (<100°C)	9
4.	Objectifs poursuivis : panache versus noyau	12
5.	Polluants et situations les plus favorables (notions qualitatives)	13
6.	Examen a priori de la faisabilité technique	14
6.1	Caractéristiques limites du ou des polluants	14
6.2	Caractéristiques limites du sol à traiter	18
6.3	Caractéristiques limites du site à assainir ou gérer	20
7.	Examen spécifique de la faisabilité du traitement.....	21
7.1	Paramètres du polluant, du sol et du site à mesurer	21
7.2	Nécessité d'essais préalables au laboratoire	26
7.3	Nécessité d'un test pilote et caractéristiques minimales de ce test	26
8.	Description d'une installation type	30
8.1.	SVE simple	30
8.2.	Variante SVE + Injection d'air dans la couche insaturée du sol.....	31
8.3.	Variante SVE + Injection d'air dans la couche saturée du sol (sparging).....	31
8.4.	Variante SVE + chauffage du sol (<100°C).....	31
9.	Descriptif de l'installation qui sera mise en place	32
10.	Limitation des incidences du projet sur l'environnement : odeurs, bruits, poussières	34
10.1	Points à prendre en compte.....	34
10.1.1	Nuisances pour la qualité de l'air	34
10.1.2.	Risques d'explosion.....	34
10.1.3.	Nuisances acoustiques	34
10.1.4.	Risques pour les installations de captage voisines	35
10.2	Conformités aux cadres légaux existants.....	35
11.	Suivi du traitement.....	36
11.1	Mesures de surveillance : dispositif type.....	36
11.1.1.	SVE simple.....	36
11.1.2.	SVE + Variante injection d'air dans la couche insaturée du sol	37
11.1.3.	SVE + Variante injection d'air dans la couche saturée du sol (sparging).....	37
11.1.4.	SVE + Variante chauffage du sol.....	37
11.2	Mesures de surveillance : paramètres de suivi et fréquences.....	37
12.	Rapportage, optimisation et mesures correctives.....	40
12.1	Rapportage	40
12.2	Mesures correctives et optimisation.....	41
13.	Mesures de validation et schéma décisionnel arrêt-prolongation du traitement.....	43
13.1	Monitoring à long terme éventuel : dispositif et type de mesures	44
14.	Recommandations pour la sécurité et la stabilité	47
14.1	Check-list succincte pour les entrepreneurs	47
14.2	Check-list succincte pour les experts en pollution du sol	49
15.	Sources bibliographiques.....	51

1. Introduction

La Technique principale s'intitule « Pompage de gaz dans la couche insaturée du sol ».

Elle vise principalement le pompage des vapeurs du sol dans la zone contaminée et son traitement ultérieur en dehors du sol à traiter. Dans la littérature, cette technique est fréquemment désignée sous son vocable anglais SVE (Soil Vapor Extraction).

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 ;
- la stimulation de la SVE par réchauffement du sol (<100°C), par injection d'air chaud, injection de vapeur, effet joule...

En cas de présence de quantités importantes de produit pur, surnageant LNAPL ou plongeant DNAPL, l'élimination de cette phase doit être opérée en préalable à la mise en œuvre des opérations de pompage de gaz. En effet, la présence d'une couche épaisse de LNAPL aboutirait à des temps de traitement trop importants tandis que les risques de migration verticale d'une phase de DNAPL lors des opérations de pompage ont été rapportés.

Le slurping ou traitement triphase (eau, produit pur et air du sol) en présence d'une couche surnageante (LNAPL) fait l'objet d'un code de bonne pratique distinct : code de bonne pratique 1 – Pompage des fluides dans la zone saturée.

Le traitement du sol par désorption thermique (>100°C) fait l'objet d'un code de bonne pratique distinct.

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 des gaz et condensats pompés au-dessus du sol.

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

Cette technique **de traitement** vise au traitement d'une tache de pollution du sol et/ou à la gestion des risques que cette contamination entraîne, par l'extraction de l'air (ou des vapeurs) du sol suite à la mise en place d'une dépression. L'extraction des gaz du sol circulant dans les couches insaturées entraîne l'enlèvement des contaminants suite à leur volatilisation dans la phase gazeuse du sol et leur prise en charge ultérieure dans une station de traitement située à la surface.

L'objectif poursuivi est donc de traiter la **charge polluante** présente dans les couches insaturées au sein d'une tache de pollution. La charge polluante traitée pouvant être présente sous forme gazeuse, adsorbée sur la phase solide ou encore sous forme de produit pur dans les pores du sol ou en couche libre en surface de la nappe.

Typiquement, cette technique implique la mise en place et en œuvre du dispositif suivant, représenté de manière schématique à la **figure 1** (tirée de *Vacuum Vapor Extraction, Springer, 1994*).

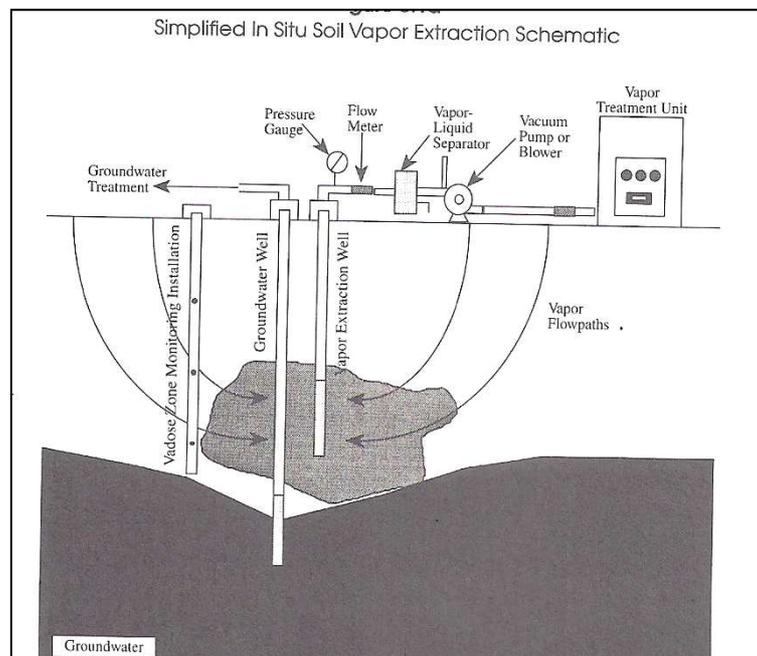


Figure 1 : Schéma simplifié d'une installation de SVE

- 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.
- Un dispositif de contrôle et de suivi mesurant les dépressions, les débits pompés (instantanés et cumulés) et permettant l'échantillonnage des gaz en différents points du système.
- Un dispositif de suivi du traitement dans le sol permettant de suivre les paramètres dépression, teneurs en contaminants dans la phase gazeuse du sol, 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.

Le principe technologique repose sur le prélèvement des vapeurs dans la couche insaturée du sol contaminées par la présence de composés volatilisés. Lors de ce prélèvement, les polluants volatils adsorbés sur la phase solide du sol ou dissous dans l'eau du sol sont mobilisés dans la phase vapeur et sont éliminés.

Cette technique s'adresse aux composés volatils à faible température, ayant une forte préférence pour la phase vapeur. La rencontre des objectifs [de traitement](#) suite à l'enlèvement de la totalité ou la majeure partie de la charge polluante du sol implique que la plus grande quantité possible de vapeurs issues de la zone polluée soient extraites du sol et ensuite traitées en surface.

Cette technique se différencie donc du traitement d'une contamination du sol par bio-venting où l'objectif est de traiter une contamination du sol présente dans la couche insaturée du sol par voie biologique à l'aide des micro-organismes « indigènes » 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 bio-disponibles 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. Elle entraîne l'extraction hors du sol de faibles quantités de vapeurs polluées requérant un traitement.

Une distinction nette entre ces deux techniques 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 bio-venting 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 d'extraction de gaz du sol avec d'autres techniques d'intervention : bio-venting avec ou sans injection d'agents bio-stimulants, atténuation biologique stimulée, le pompage pour le rabattement de la nappe d'eau souterraine de manière à rencontrer les critères de performance (obtention durable des valeurs objectifs) et d'efficience (respects de délais et de budgets raisonnables) désirés.

3. Description des variantes

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 bio-dégradation des polluants. En complément, il est parfois également recherché de mobiliser et disperser les polluants les plus volatils et ainsi augmenter le volume de sol jouant le rôle de bio-réacteur. 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 volatils 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, comme représenté de manière schématique à la **figure 2** (extrait de *Vacuum Vapor Extraction*, Springer, 1994), 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 volatilisation et d'extraction des composés volatils ou bien encore d'augmenter le flux d'oxygène alimentant les micro-organismes responsables de la biodégradation.

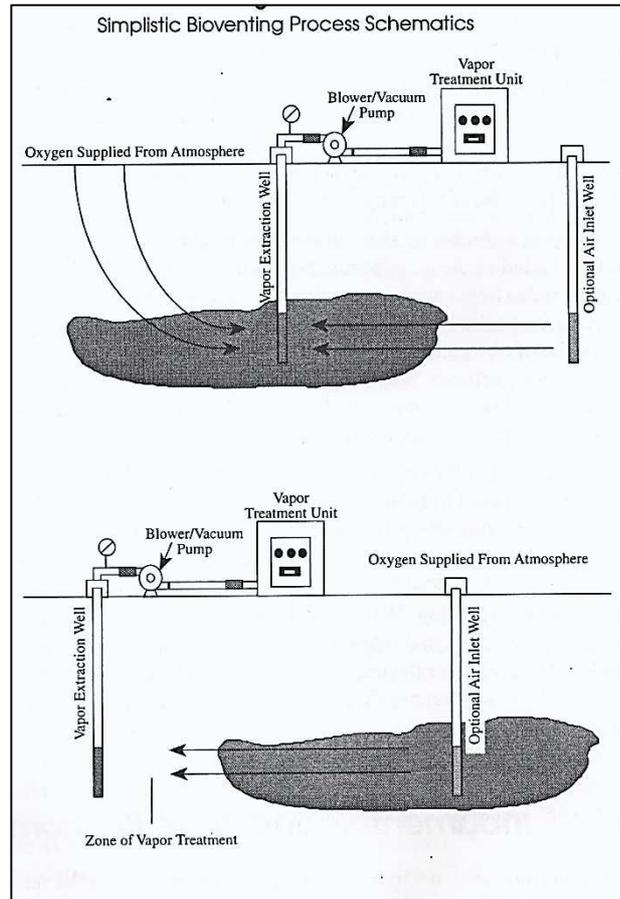


Figure 2 : Représentation schématique de 2 systèmes d'injection d'air

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 de l'atmosphère au travers la tache de pollution est activée par le 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 totalemt 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, des faibles flux que cette technique (peu énergivore) permet de développer.

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

- 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 L'injection d'air dans la couche saturée du sol (sparging)

Cette technique consiste à injecter de l'air dans la couche saturée du sol au moyen de puits. Les buts recherchés peuvent être de diverses natures.

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 bio-dégradation des polluants. En complément, il est parfois également recherché de mobiliser les polluants les plus volatils dissous dans l'eau souterraine et de les répandre dans la phase gazeuse des couches insaturées. De ce fait, on étend le volume de sol renfermant ces polluants volatilisés, augmentant ainsi le volume de sol jouant le rôle de bio-réacteur. 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, ...).

Une fois encore, compte tenu des risques de dispersion incontrôlée des polluants volatils 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, comme représenté de manière schématique à la **figure 3** (*Extrait de Air Sparging, Batelle Presse, 2002*), elle vise à mobiliser les polluants volatils présents sous forme dissoute dans l'eau souterraine et permettre leur extraction sous forme vapeur par les puits d'extraction.

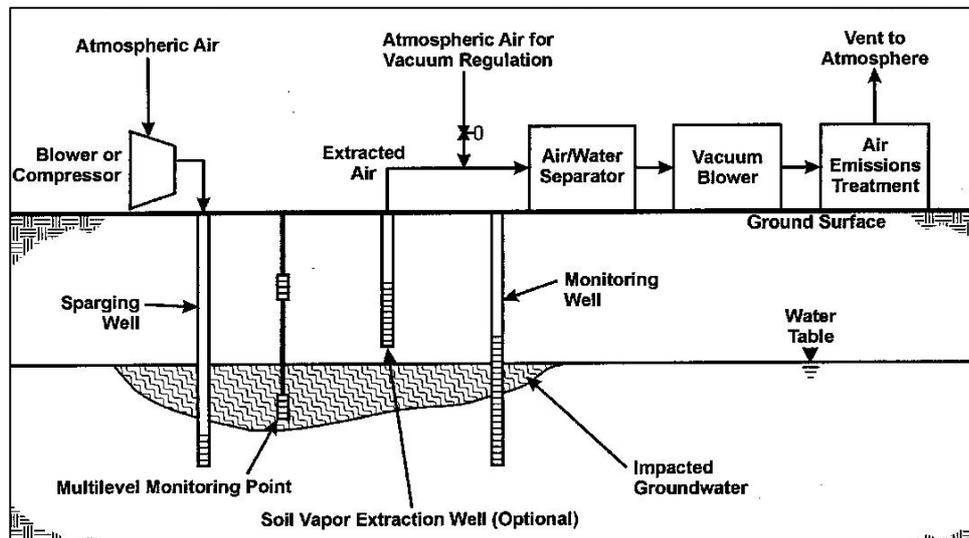


Figure 3 : Représentation schématique d'une installation de Sparging + SVE

Un autre but recherché (bio-sparging) est d'augmenter le flux d'oxygène alimentant les micro-organismes responsables de la biodégradation tant dans la couche saturée qu'insaturée du sol.

Plus rarement, le sparging est utilisé pour établir une barrière physique à la progression d'un panache de pollution en direction d'une cible sensible. En effet, la présence accrue d'air dans la couche saturée du sol, au niveau de la barrière ainsi créée, induit une réduction importante de la conductivité hydraulique, (perméabilité relative pour l'eau) ralentissant à cet endroit la vitesse de circulation de l'eau souterraine et des polluants dissous. Cette utilisation est cependant rarement rapportée compte tenu des risques de migration des polluants suivant une ou plusieurs directions peu prévisibles et donc incontrôlées.

Le sparging, enfin, constitue un moyen privilégié de mobiliser les polluants sous forme pure piégés dans les pores de la couche insaturée et de la couche capillaire suite au battement du niveau de la nappe. Il n'est pas rare en effet, qu'une couche de produit pure surnageante (LNAPL) apparaisse en début d'application du sparging.

Le dispositif à mettre en place se compose typiquement des éléments suivants :

- Un dispositif d'injection d'air dans la zone saturée comprenant
 - o Un ou plusieurs puits d'injection verticaux (plus rarement horizontaux) établis dans la couche saturée dont le trajet crépiné est entièrement situé sous le toit de la nappe ;
 - o Une ou plusieurs pompes (compresseurs) disposés en surface du sol raccordés chacune à un ou plusieurs puits d'injection.

- 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 équipées de manomètres et débitmètres.

- 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.
- Un dispositif de contrôle et de suivi mesurant les (dé)pressions tant dans la couche saturée que dans la couche insaturée du sol, les débits pompés et injectés (instantanés et cumulés) et permettant l'échantillonnage des gaz en différents points du système.
- Un dispositif de suivi du traitement dans le sol permettant de suivre les paramètres (dé)pression, teneurs en contaminants dans la phase gazeuse du sol, niveau de la nappe aquifère.
- 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 la circulation de l'air au travers de la tache de pollution.

3.3. La stimulation de la SVE par chauffage du sol (<100°C)

L'objectif poursuivi par la stimulation thermique est d'augmenter le flux de volatilisation des composés polluants grâce à l'augmentation de la température du sol. En effet, la tension de vapeur des composés organiques augmente de manière drastique avec la température comme le montre le graphique faisant l'objet de la **figure 4**. (*Extrait de Vacuum Vapor Extraction, Springer, 1994*).

Vapor Pressure for Various Organic Compounds
as a Function of Temperature

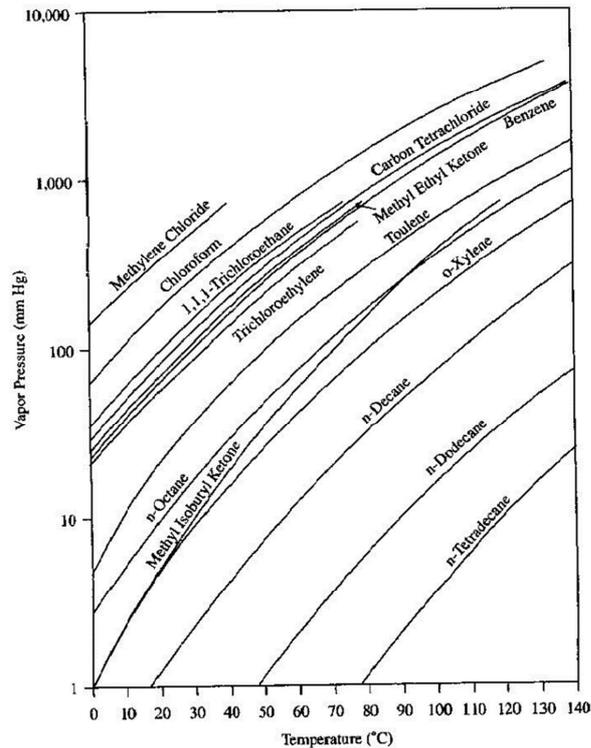


Figure 4 : Relation entre pression de vapeur et température pour certains composés

Cette relation peut être prédite par la relation de Clausius-Clapeyron :

$$P_j^v = \exp \left[-\frac{\Delta H_{v,j}}{RT} + B_j \right] \quad \text{où}$$

- P_j^v : tension de vapeur du composé pur j à la température T (Pa)
- $\Delta H_{v,j}$: chaleur molaire de volatilisation (joule/mole) et
- R : constante des gaz parfaits : Joule/mole. K
- T : température absolue
- B_j : constante sans unité liée au composé j

Un autre avantage recherché par le relèvement de la température est l'augmentation de la vitesse de diffusion des composés dans les zones de faible perméabilité qui, en fin de traitement, limite la vitesse d'extraction du polluant.

On considère généralement que pour un changement de température de T_1 à T_2 (température absolue) les coefficients de diffusion des composés en phase gazeuse évoluent suivant le facteur $(T_2/T_1)^{3/2}$.

Par ailleurs, une augmentation des températures dans des limites raisonnables ($<40^\circ \text{C}$), induira une augmentation de la vitesse des processus biologiques gouvernant la biodégradation des polluants : vitesse de dégradation multipliée par 2 par augmentation d'une tranche de 10° .

Le chauffage du sol peut être réalisé de différentes manières :

- Injection d'air chaud ou de vapeur.. De la vapeur ou de l'air chaud est injecté au droit de la source via des points d'injection et les polluants volatilisé sont récupéré via un réseau de puits



d'extraction. Cette technique est un procédé de chauffage du sol par convection puisqu'il y a un déplacement de matière dans le milieu et donc une variante du venting.

- Ondes-Radio/micro-onde la mise en place d'un maillage d'antennes dans le sol permet d'améliorer la désorption des polluants qui sont récupérés via un réseau de puits. La fréquence utilisée dépend de l'extension de la pollution et des propriétés diélectriques du sol. Cette technique, encore au stade de recherche et développement, permettrait d'allier la désorption/volatilisation des polluants et une dégradation des contaminants sous l'effet des vibrations moléculaires ;
- Etablissement d'un effet joule suite à l'établissement d'un réseau d'électrodes et l'application d'une différence de potentiel donnant naissance au passage de courant électrique au sein du sol.

De tous ces procédés, l'injection de vapeur est plus souvent appliquée étant donné la facilité de mise en place et le coût raisonnable qu'il implique. L'inconvénient de cette méthode est l'obligation de traiter un volume de condensat bien plus important que pour un système SVE classique. Ce procédé permet d'extraire du sol des composés fortement à moyennement volatils tels que le Naphtalène, les phénols et les HAP les moins lourds, grâce à l'effet d' « entrainement à la vapeur » mis en place.

Combiné avec de l'injection d'eau chaude, ce procédé a été appliqué avec succès pour éliminer les poches denses de déchets graisseux établis en profondeur dans de vieilles décharges.

On signalera également que l'injection d'eau chaude couplée à un chauffage du sol par effet joule combiné à un pompage biphasé (procédé ET-DSP_{TM}) a été utilisé pour traiter des sites d'imprégnation du bois pollués en profondeur par le créosote en présence d'un horizon tourbeux épais.

Le traitement du sol *in situ* par désorption thermique *in situ* faisant appel à des températures nettement plus élevées (>100 °C) n'est pas considéré dans ce dossier. Il fait l'objet d'un code de bonne pratique distinct.

4. Objectifs poursuivis : panache versus noyau

La technique du traitement par extraction de l'air du sol appliquée seule ou accompagnée d'injection d'air dans les couches insaturées et saturées du sol s'adresse principalement aux noyaux de pollution présents dans la phase solide du sol, la zone capillaire ou la zone de battement de la nappe.

En effet, elle permet d'extraire rapidement des composés polluants volatils présents en quantités importantes, dans la phase gazeuse du sol, sous forme adsorbée ou de produits purs piégés dans les pores du sol ou en couche libre. La variante sparging permet également d'assurer la volatilisation des composés volatils dissous dans l'eau souterraine. Compte tenu des moyens mobilisés, le sparging est rarement utilisé pour extraire les contaminants dissous dans un panache de contamination, si ce n'est de manière partielle pour intervenir dans les poches à fortes teneurs en polluants.

A contrario, la réalisation d'un bioventing ou d'un bio-sparging faisant appel à un dispositif semblable s'adresse, elle, au traitement des panaches où les teneurs en polluants sont plus faibles et accessibles à la bio-dégradation.

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

La technique d'extraction de l'air du sol peut être appliquée pour le traitement d'une pollution du sol et de la nappe aquifère avec des résultats favorables lorsque les circonstances suivantes sont rencontrées :

- Le polluant à traiter est volatil et peu ou modérément soluble dans l'eau ;
- Le polluant n'est pas fortement adsorbé par la phase solide du sol ;
- La source de pollution est éradiquée de sorte que l'arrivée du polluant dans le sol est définitivement interrompue ;
- Sol présentant une bonne perméabilité ;
- 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 lentilles ou couches tourbeuses à fort pouvoir d'adsorption des composés organiques ;
- Tache de pollution non superficielle ;
- Surface du sol peu perméable : présence d'un revêtement imperméable ;
- Nappe aquifère profonde présentant des fluctuations saisonnières peu importantes ;
- Données acquises lors de l'étude de caractérisation suffisamment complètes et détaillées ;
- Charge polluante répartie de manière homogène, absence d'une phase libre surnageante épaisse ou d'une phase libre plongeante, ou emprisonnée dans des cavités, de sorte que la chute des teneurs dans le sol suit une allure prévisible sans phénomène de retard, palier asymptotique et/ou rebond après fermeture du dispositif de pompage.

Lorsque la variante pompage + injection d'air dans la couche non saturée du sol est appliquée, les circonstances les plus favorables sont identiques.

Lorsque la variante pompage + injection dans la couche saturée du sol (sparging) est appliquée, les circonstances les plus favorables sont :

- Puissance de la nappe aquifère suffisante permettant l'injection à une profondeur suffisante sous le toit de la nappe et la création d'un volume important concerné par la circulation de l'air ;
- Cohésion suffisante du sol présentant une bonne résistance au risque de fragmentation au regard des pressions d'injection importantes nécessaires ;
- Teneurs en Fe et Mn dissous peu importantes de sorte que les risques de colmatage des pores du sol suite à la précipitation des oxydes ne sont pas importants.

Lorsque le traitement implique la mise en œuvre de la variante pompage des gaz dans la couche insaturée + chauffage du sol, les aspects favorables supplémentaires suivants sont à prendre en compte :

- La conductivité thermique du sol est bonne et homogène ;
- Absence d'éléments métalliques enfouis (chauffage par ondes radio et par effet joule).

6. Examen à priori de la faisabilité technique

6.1 Caractéristiques limites du ou des polluants

Comme montré dans le schéma faisant l'objet de la **figure 5** (Extrait de *Soil Vapor Extraction and Bioventing, US Army Corps of Engineers, 2002*), les teneurs en composés polluants présents dans la phase gazeuse du sol et susceptibles d'être extraits du sol lors du pompage résultent de l'équilibre entre différents processus :

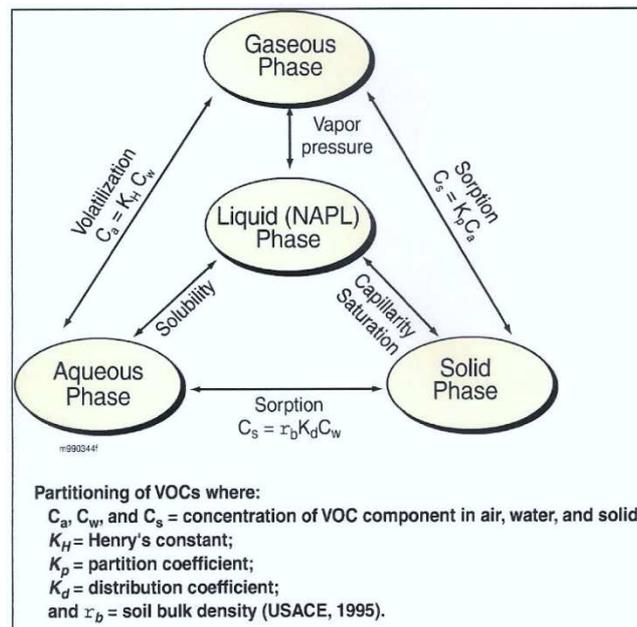


Figure 5 : Equilibres contrôlant les teneurs présentes dans la phase vapeur du sol

- Evaporation à partir d'une phase de produit pur ou d'une phase libre consistant en un mélange de composés ;
- Volatilisation à partir d'une phase liquide contenant le polluant sous forme dissoute ;
- Volatilisation à partir d'une phase solide sur laquelle le polluant est adsorbé ;
- Equilibre entre les différentes phases du sol contenant le polluant.

Les différents paramètres gouvernant ces processus sont les suivants :

- Evaporation à partir d'une phase de produit pur : la pression de vapeur P_{vi}° (en Pa) du produit i indique la force exercée par unité de surface par la vapeur en équilibre avec le produit pur. La concentration du produit i dans la phase vapeur est donnée par la relation :

$$C_v \text{ (en kg/m}^3\text{)} = \frac{M P_v}{R T} \quad \text{où}$$

$$M = \text{poids moléculaire en Kg/mole}$$

$$R = \text{constante des gaz parfait : } 8,314 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mole}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

$$T = \text{température en degré Kelvin}$$

La tendance d'un composé ou d'une famille de composés à s'évaporer à partir d'une phase liquide de produit pur est également indiquée par la température d'ébullition.

- Evaporation à partir d'une phase libre consistant en un mélange de produits (produits pétrolier par exemple) : la pression partielle de vapeur du produit i présent dans le mélange est donnée par la loi de Raoult :

$$P_{vi} \text{ (en Pa)} = X_i P_{vi}^{\circ} \text{ où}$$

X_i est la fraction molaire du composé i (sans unité)

P_{vi}° est la pression de vapeur du composé pur (Pa)

et la concentration du produit i dans la phase vapeur est donc donnée par la relation

$$C_{vi} \text{ (en Kg/m}^3\text{)} = X_i (M P_{vi}^{\circ} / R T)$$

- Volatilisation à partir d'une phase liquide contenant le polluant sous forme dissoute : la concentration du produit i dans la phase vapeur est donnée par la loi de Henry

$$C_{vi} \text{ (en Kg/m}^3\text{)} = H_i C_{wi} \text{ où}$$

H_i est la constante de Henry spécifique au composé i , sans unité. Ce paramètre augmente avec la température : augmentation d'un facteur de 1.6 par tranche de 10 ° C.

C_{wi} est la teneur du composé i dans la phase liquide du sol, en kg/m³

Cette relation indique que la teneur dans la phase gazeuse du sol augmente de manière proportionnelle avec la teneur dans la phase liquide. Il est important de remarquer que cette relation n'est valide que pour les teneurs résiduelles dans le sol suffisamment faibles, c'est-à-dire en l'absence d'une phase libre de produit pur (ou en mélange) auquel cas, les teneurs dans la phase gazeuse sont contrôlées par la pression de vapeur (ou pression de vapeur partielle pour les mélanges).

- Volatilisation à partir d'une phase solide sur laquelle le polluant est adsorbé. La relation prédictive reproduite à la **figure 5** mettant en relation la teneur adsorbée sur le sol avec la teneur présente dans la phase gazeuse du sol

$$C_s \text{ (en Kg/Kg)} = K_{pi} C_{vi} \text{ où}$$

K_p est le coefficient de partition sol/gaz en m³/kg du produit i
n'est généralement pas appliquée.

On considère plutôt que la teneur en composé adsorbé sur la phase solide est contrôlée par l'équilibre avec les teneurs présentes sous forme dissoute dans la phase liquide du sol. De ce fait la relation utilisée est la suivante :

$$K_{di} = C_{si} / C_{wi} \text{ où}$$

K_{di} est le coefficient de partition solide liquide du composé i exprimé en Kg/m³ :

C_{si} représente la teneur du composé ou de l'élément i dans la fraction solide du sol en kg/m³

C_{wi} représente la teneur du même composé (élément) i dans la fraction liquide du sol en kg/m³.

Pour les composés organiques, le K_d peut être approché par la relation

$K_d = K_{oc} \cdot f_{oc}$ où le K_{oc} représente l'affinité du composé pour une phase organique (en kg/m³) déterminée en tests de laboratoire (tests de partition eau-octanol) et le terme f_{oc} représente la fraction du carbone organique du sol (kg/kg).

Ainsi, en cas de teneurs résiduelles faibles dans le sol (pas de phase libre) les teneurs dans la phase gazeuse en équilibre avec les deux autres phases sont approchées par la relation

$$C_{vi} = H_i T_i / [H_i \theta_a + \theta_w + p_b K_{di}] \quad \text{où}$$

θ_a , θ_w représentent les fraction du volume du sol remplis respectivement par l'air et l'eau souterraine (en m³/m³ de sol)

T_i représente la teneur résiduelle en polluant i dans le sol (en kg/m³)

Les caractéristiques limites généralement admises pour les composés susceptibles d'être extraits du sol par pompage de la phase gazeuse sont repris dans le **tableau 1**.

Tableau 1 : Caractéristiques limites des polluants susceptibles d'être extraits par pompage de la phase gazeuse du sol ('Code van goede praktijk voor bodemluchextractie en persluchinjectie, OVAM 2002)

Caractéristique physico-chimique	Unité MKSA	Valeur limite	Commentaires
Pression de vapeur	Pa	> 66.7	à une T° de 20 ° C
Constante de Henry	sans	> 0.01	à une T° de 20 ° C
Température d'ébullition	° Celsius	>250-300	Utilisé pour les fractions de composés présentes dans les produits pétroliers
Variante Air sparging			
Constante de Henry	sans	> 0.001	à une T° de 20 ° C

Les composés susceptibles d'être extraits du sol par SVE sont repris dans la liste faisant l'objet du **tableau 2** reproduit ci-après.

Tableau 2 : Revue de la traitabilité par SVE de différents groupes de polluants (extrait du document "Code van goede praktijk voor bodemluchextractie en persluchinjectie, OVAM 2002).

Polluentgroep		Voorbeeld	Toepasbaarheid
Organische stoffen	Gehalogeneerde vluchtige organische stoffen	Koolstoftetrachloride Chloorbenzeen Chloorethaan Chloroform 1,1-Dichloorethaan 1,1-Dichloorethyleen 1,2-Dichloorbenzeen 1,2-Dichloorethaan 1,2-Dichloorethyleen 1,2-Dichloorpropaan 1,4-Dichloorbenzeen 1,1,1-Trichloorethaan 1,1,2-Trichloorethaan 1,1,2,2-Tetrachloorethaan Ethylbromide Methylchloride Perchloorethyleen (PER) Trichloorethyleen (TRI) Vinylchloride	+
	Gehalogeneerde semi-vluchtige organische stoffen	Para-dichloorbenzeen	+/-
Organische stoffen	Niet-gehalogeneerde vluchtige organische stoffen	<u>Ketonen:</u> Aceton Methylethylketon Methylisobutylketon <u>Aromaten:</u> Benzeen Ethylbenzeen Tolueen m-Xyleen o-Xyleen p-Xyleen	+
	Niet-gehalogeneerde semi-vluchtige organische stoffen	Diesel	+/- (bioventing)
	PCB's	Aroclor – 1242	-
	Pesticides	Chlordaan	-
	Dioxines/furanen	2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxine	-
	Organische cyanides		-
	Organische zuren		-
Organische stoffen	PAK's	Naftaleen	+
		Benzo(a)pyreen	-
Anorganische stoffen	Vluchtige metalen	Kwik, tetraethyllood	-
	Niet-vluchtige metalen	Nikkel, chroom	-
	Asbest		-
	Radioactieve verbindingen		-
	Anorganische zuren		-
	Anorganische cyanides	Natriumcyanide	-

+ : goed +/- : matig - : niet toepasbaar

6.2 Caractéristiques limites du sol à traiter

Le **tableau 3** ci-après reprend les paramètres du sol considérés comme à priori critiques pour envisager de mettre en œuvre une opération de traitement par pompage de l'air du sol.

Tableau 3 : Paramètres critiques du sol permettant d'envisager un traitement par pompage de l'air du sol et/ou injection

Caractéristique	Paramètre	Unité MKSA	Valeur limite	Commentaire
Perméabilité	Perméabilité intrinsèque	m ²	> 10 ⁻¹⁴	ou >10 ⁻² Darcy
Humidité	Teneur en eau du sol	% teneur en eau à saturation (m ³ eau/m ³ sol)	< 50 %	Influence la perméabilité relative à l'air
	Teneur en eau du gaz du sol	% Humidité relative	> 94 à 98,5	Influence la désorption des polluants fixés sur la phase solide
Profondeur de la tache de pollution à traiter	Profondeur par rapport à la surface	m ²	> 1,5	Trajet minimum pour la circulation de l'air
Profondeur du toit de la nappe d'eau souterraine	Hauteur piézométrique au repos par rapport à la surface du sol	m	> 3 m	Si le toit de la nappe est présent entre 2 et 3 m : mesures particulières pour prendre en compte la remontée en conditions de dépression.
Variations saisonnières de la profondeur de la nappe d'eau souterraine	Variations saisonnières des hauteurs piézométriques	m	< 1 à 2 m	En fonction de la profondeur de la nappe
Perméabilité surface du sol	Imperméabilisation surface du sol	-	-	Trajet minimum pour la circulation de l'air
Hétérogénéité du sol	Propriétés texturales des différentes couches (lentilles) de sol à traiter	% argile	-	En fonction de la puissance des différentes couches (lentilles)
Variante Sparging				
Teneur en Fer de l'eau souterraine	Teneur en Fe total dissout	kg/m ³	<10 ⁻²	Risque de colmatage des puits d'injection d'air

Ce tableau appelle les commentaires suivant :

- La circulation des gaz dans le sol lors d'une opération de pompage peut être simulée, en état de pseudo steady-state, par la relation suivante (P. C. Johnson et al., 1990)

$$\frac{Q}{H} = \pi \frac{k}{\mu} P_w \frac{[1 - (P_{atm} / P_w)^2]}{\ln(R_w / R_l)} \quad \text{où}$$

Q = le débit de vapeur extraite dans le puits d'extraction (m³/s)

H = la longueur de la crépine du puits d'extraction (m)

k = la perméabilité intrinsèque du sol en m²

μ = la viscosité de l'air en conditions normales de T° et pression, 1.83 10⁻⁵ newton.s.m⁻²

P_w = la pression absolue au niveau du puits de pompage (Pa)

P_{atm} = la pression ambiante, 98 066 Pa

R_w = Rayon du puits d'extraction (m)

R_l = Rayon d'influence du puits d'extraction

On remarque donc que :

- la perméabilité intrinsèque du sol est le paramètre principal gouvernant l'efficacité d'une extraction des gaz pour une dépression donnée.
- La teneur en eau du sol joue un rôle dans la perméabilité relative pour l'air étant donné que l'air et l'eau souterraine sont en compétition pour l'occupation des pores du sol comme le montre le graphique reproduit dans la **figure 6** (tiré de *Soil Vapor Extraction and Bioventing, US Army Corps of Engineers (EM 1110-1-4001, juin 2002)*).

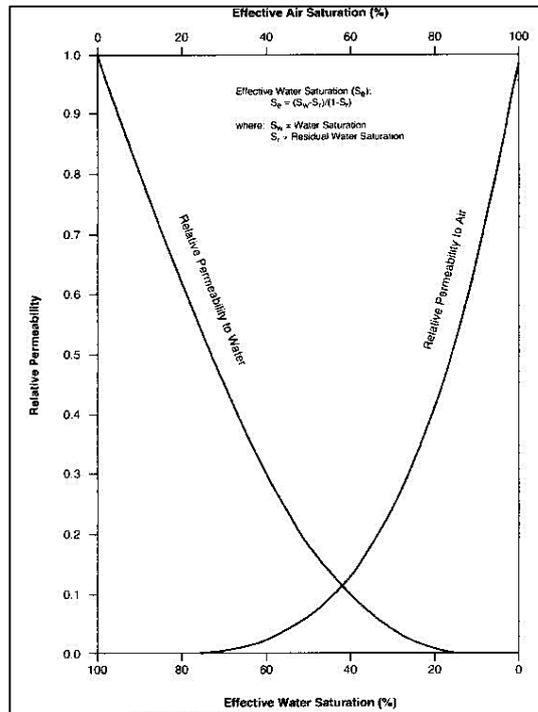


Figure 6 : Relation entre teneur en eau du sol et perméabilité relative à l'air

- Dans SVE, il est désirable d'avoir un certain taux d'humidité dans le sol parce que la désorption des polluants du sol augmente si un film d'eau est présent pour déplacer des molécules de polluants (EM 1110-1-4001, juin 2002). La teneur en eau des vapeurs extraites (humidité relative) permet de suivre la déshydratation du sol.
- La montée de l'eau souterraine causée par l'établissement d'une dépression au niveau du puits d'extraction, lorsque trop importante entraîne des effets négatifs : réduction du volume disponible pour la circulation des vapeurs et donc réduction du débit d'extraction, piégage de la phase libre dans les pores du sol, entrée d'eau dans le système de pompage des gaz.
- La présence de couches ou lentilles de sol de moindre perméabilité, en raison notamment d'une teneur supérieures en éléments fins, débouche sur une augmentation du temps de traitement étant donné qu'en phase finale, la vitesse d'extraction du polluant est contrôlée par la vitesse de diffusion au travers des couches peu perméables en direction des couches plus perméables où l'air circule plus vite. La succession des différentes phases d'un traitement par extraction est représentée de manière schématique par le graphique reproduit à la **figure 7** (Extrait de *Vacuum Vapor Extraction, Paul C. Johnson et al., 1994, Springer*).

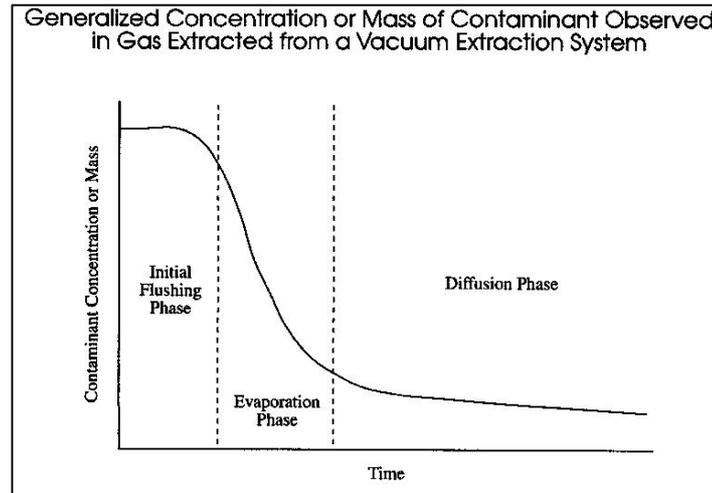


Figure 7 : Représentation schématique des différentes phases d'un traitement par SVE

6.3 Caractéristiques limites du site à assainir ou gérer

- Taille du site : le site à prendre en charge doit être suffisamment vaste pour accueillir le dispositif de pompage et récupération des gaz, ainsi que le dispositif de traitement des gaz pompés et des condensats et, éventuellement, le dispositif d'injection d'air.
- 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 : bruit des pompes et de la station de traitement, odeurs, risques d'émissions de vapeurs...
- Encombrement du sous-sol : présence peu importante sur le site ou dans les alentours, d'infrastructures enterrées constituant autant de voies préférentielles pour la circulation de l'air du sol (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...).

7. Examen spécifique de la faisabilité du traitement

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

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'un cas de pollution du sol par extraction des gaz dans la couche insaturée du sol. Ces tableaux représentent une check-list des données devant être acquises, soit au cours des phases d'études successives (étude de reconnaissance, étude détaillée, étude de risques) soit lors de la rédaction du projet d'assainissement ou de gestion du risques, ou avant le lancement du test pilote, **soit avant l'exécution des travaux ne nécessitant pas de projet spécifique**

Dans ces tableaux, distinction est faite entre deux niveaux d'exigence :

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

Tableau 4a : Paramètres des polluants à mesurer avant lancement du traitement

Paramètres	Moyen de mesure	Commentaire
Source de la pollution		
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 délimitation (krigeage)	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Estimation de la charge polluante résiduelle	Sur base des volumes estimés et des teneurs moyennes	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Teneurs dans l'eau souterraine		
Teneurs dans le sol : 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
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 Doménico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinal, latérale et vertical Ou utilisation de modèles numériques tels que MODFLOW, ...	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration longitudinale avérée du polluant (progression du panache selon la direction d'écoulement de l'eau souterraine)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Vitesse de migration latérale dans le sol (extension latérale du panache lors de sa migration)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Doménico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinal, latérale et vertical Ou utilisation de modèles numériques tels que MODFLOW, ...	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration latérale avérée du polluant (extension latérale du panache lors de sa migration)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Vitesse de migration verticale dans le sol (extension verticale du panache lors de sa migration)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Doménico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinal, latérale et vertical Ou utilisation de modèles numériques tels que MODFLOW, ...	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration verticale avérée du polluant (extension verticale du panache lors de sa migration)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Teneurs dans la phase gazeuse du sol		
Teneurs en polluants dans la phase gazeuse au sein du noyau de pollution	Prélèvements et analyses de la composition de la phase gazeuse	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention.
En cas de présence d'une phase libre résiduelle (peu importante)		
Nature chimique de la phase libre	Prélèvement et analyse d'au moins 3 échantillons de la phase libre surnageante ou plongeante	
Extension latérale de la phase libre	Observation de la présence d'une phase libre surnageante ou plongeante à partir d'un réseau de piézomètres - campagnes de mesures à l'aide du système MIP (Géoprobe) ou de mesures de gaz dans le sol	
Mesure de l'épaisseur de la couche surnageante ou plongeante	Mesure de l'épaisseur de la couche surnageante ou plongeante dans un réseau de piézomètres d'observation.	
Estimation du volume de la phase libre	Estimation à partir des mesures d'épaisseur mesurées dans les piézomètres	
	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut	
	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est utile	

Tableau 4b: Paramètres du sol à mesurer avant lancement du traitement

Paramètre	Moyen de mesures	Commentaires
Stratigraphie du sol : hétérogénéité et variations texturales, couches aquifères (profondeur et puissance), aquitard, aquicludes, ...	Cartes géologiques et géotechniques et sondages et description + analyse des différentes couches de sol	Disponible au termes de l'étude détaillée
Piézométrie de ou des aquifère(s), gradients hydrauliques, sens d'écoulement, caractère confiné ou semiconfiné	Cartes géologiques et géotechniques et sondages et description des couches de sol, placement de piézomètres, mesures piézométriques et calage en altimétrie	Disponible au termes de l'étude détaillée
Type de revêtement de surface	Observation du degré d'imperméabilisation de la surface du sol	Pour le traitement des pollutions superficielles
Propriétés physiques : densité apparente, porosité, capacité de rétention en eau, teneur en eau actuelle	Prélèvement d'échantillons à structure conservée et mesure des paramètres physique au laboratoire	Trois échantillons par type de matériaux rencontrés dans la zone à traiter
Perméabilité 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	
Variations saisonnières des niveaux piézométriques et	Suivi piézométrique lors de campagnes successives	
Pour la variante Sparging		
Caractéristiques de l'eau souterraine : pH, potentiel Redox, teneurs Fe et Mn dissous	Placement de piézomètres, prélèvement et analyse d'échantillons	
	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est indispensable	
	= paramètre dont la mesure ou l'estimation est souhaitable	

Tableau 4c : Paramètres du site d'intervention à évaluer avant lancement du traitement

Paramètre	Moyen de mesures et d'observation	Commentaires
Présence d'impétrants dans le sol au droit du site et ses alentours immédiats	Consultation concessionnaires réseaux d'impétrants, Commune,	Réalisé lors des études de reconnaissance et détaillées
	Détection sur le terrain : préfoilles, passage au détecteur CAT,	Réalisé lors des études de reconnaissance et détaillées
Présence de cibles aériennes sensibles au bruit, odeurs, vapeurs, ... Sur le site et dans ses alentours immédiats	Inventaire	
Accessibilité du site au équipements et surface disponible suffisante	Inventaire	
En cas d'utilisation de la variante chauffage du sol		
Présence d'infrastructures susceptibles d'être menacées par l'augmentation de température du sol	Inventaire des infrastructures susceptibles d'être impactées par une augmentation de températures : conduites revêtues de goudron, fibres optiques,	
	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est indispensable	
	= paramètre dont la mesure ou l'estimation est souhaitable	

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 pompage.
- Comme déjà mentionné, lorsqu'on observe une couche importante de produit pur, celle-ci doit faire l'objet d'une prise en charge préalable au lancement d'une opération de traitement par extraction des vapeurs du sol. Cette prise en charge peut être faite par un autre procédé de traitement : excavation, traitement thermique, pompage triphase... Seule la présence d'une phase libre résiduelle peu importante est considérée dans le présent code.
- Nature chimique de la phase libre si présente. Il est recommandé de prélever et analyser au moins 3 échantillons de cette phase, au front de migration, au centre et à la queue du panache de contamination. En effet, pour les polluants constitués de mélanges comme les hydrocarbures, en raison des différences de vitesse de migration des différents composants, la composition de la phase libre est différente selon la position dans un panache en migration. Des analyses multiples assurent également la détection de panaches mixtes résultant de contaminations

multiples, comme fréquemment observées dans les stations-service : gasoil + essence + huiles de lubrification.

- 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 de Bruxelles Environnement portant sur les prises d'échantillons de sol, d'eau souterraines, 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, voir **figure 7**). Le nombre d'échantillons à prélever et analyser fera l'objet d'une proposition de l'expert : 1 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.
- La perméabilité du sol à l'air peut être déterminée de plusieurs manières :
 - De manière indirecte, à partir de la conductivité hydraulique en utilisant la relation :
$$k = K \mu / \rho g$$
 où
 k est la perméabilité intrinsèque en m^2
 K est la conductivité hydraulique en m/s
 μ est la viscosité dynamique du composé en $Pa.s$
 ρ est la masse spécifique de l'eau en kg/m^3
 g est l'accélération gravitaire en m/s^2

La perméabilité à l'air est déduite de la perméabilité intrinsèque à l'aide de relations telles que celle de Corey (1986) faisant intervenir la saturation actuelle du sol en eau (m^3/m^3) et les paramètres saturation en eau (m^3/m^3) et l'index de distribution de la taille des pores du sol de Brooks-Corey déduit de l'étude des courbes de saturation/désaturation du sol.

Compte tenu du faible degré de représentativité des résultats des courbes d'humectation du sol obtenus sur des échantillons discrets et de l'extrapolation des données obtenus sur la couche saturée (conductivité hydraulique) à la couche insaturée (perméabilité à l'air), cette méthode n'est que rarement utilisée.

- Au laboratoire, à partir de la répartition en fractions granulométriques. Les résultats obtenus par cette méthode sont également considérés comme peu fiables.
- Tests de pompage sur le terrain :
Idéalement ces tests devront faire appel au dispositif suivant représenté schématiquement dans la **figure 8** (*Extrait de Soil Vapor Extraction and Bioventing, Us Army Corps of Engineers, 2002*) :

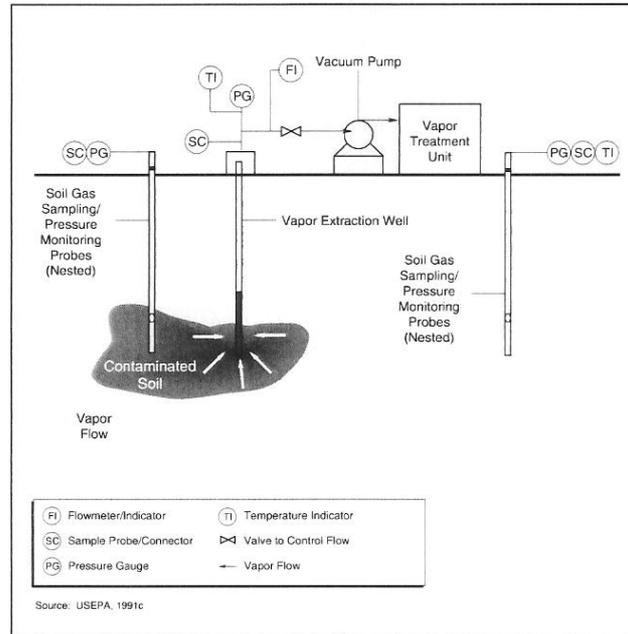


Figure 8 : Représentation schématique d'un dispositif de test de pompage de l'air du sol

- Un puits d'extraction comportant un débitmètre et un manomètre ;
- Deux séries de sondes équipées de manomètres, disposées perpendiculairement ;
- Dans chaque série, les sondes sont disposées à une distance croissant de manière logarithmique à partir du puits d'extraction, par exemple 0.2m, 2 m, 20 m.

Les tests de pompage peuvent être menés en régime de pseudo-équilibre et la perméabilité à l'air est alors déterminée à l'aide de la relation déjà présentée ci-dessus :

$$\frac{Q}{H} = \pi \frac{k}{\mu} P_w \left[\frac{1 - (P_{atm} / P_w)^2}{\ln(R_w / R_f)} \right]$$

Idéalement, ces tests sont effectués en établissant 2 ou 3 niveaux de dépression et requièrent de 1 à quelques jours.

Ils peuvent également être menés en régime transitoire à l'aide de la relation suivante :

$$P_{atm} - P_w = \frac{Q\mu}{4\pi H(k/\mu)} \left[-0.5772 - \ln\left(\frac{r^2 \theta_a \mu}{4kP_{atm}t}\right) \right] \text{ où}$$

t est le temps en s depuis le lancement de la mise sous dépression

- Le rayon d'influence des puits d'extraction peut être estimé sur la base des résultats en pseudo-équilibre par extrapolation des données de mesure des pressions dans le sol sur une échelle semi-logarithmique des distances par rapport au puits d'extraction.
- Différents modèles sont disponibles pour prendre en compte et interpréter les résultats des tests de pompage, dont le modèle HyperVentilate produit en collaboration par la Shell Oil company et l'US EPA et gratuitement accessible.

7.2 Nécessité d'essais préalables au laboratoire

Compte tenu de la faible représentativité des résultats obtenus au laboratoire à l'aide de tests en colonnes, l'étape de laboratoire n'apparaît pas utile.

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

Compte tenu des nombreuses inconnues et paramètres difficilement contrôlables que comporte une intervention par extraction des gaz dans la couche insaturée du sol, un test pilote pourrait être effectué, même si ce type d'intervention peut être considérée comme une technique éprouvée. Notons que ce test peut être réalisé en début de traitement.

Les paramètres à définir lors de l'exécution du test pilote sont donnés dans le **tableau 5** reproduit ci-après. Les installations du test pilote sont schématisées dans la **figure 9** (tirée de *Vacuum Vapor Extraction, Springer, 1994*).

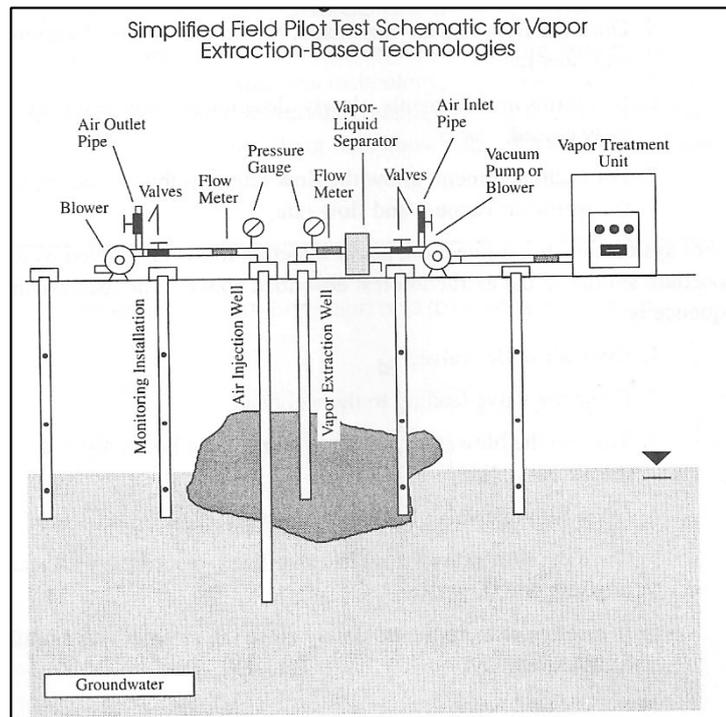


Figure 9 : Dispositif type d'un test pilote (SVE + Sparging)

Tableau 5 : Paramètres et contenu des tests pilotes

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 d'assainissement.
Puits	Un ou plusieurs puits d'extraction localisés au sein de la tache de pollution. Longueur crépinée correspondant à l'épaisseur de la tache 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, O2 et CO2. 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 produit pur pompé/produit pur 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 : injection dans la couche saturée (sparging)		
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. Points complémentaires de contrôle des pressions et d'échantillonnage dans la couche saturée : types, localisation, profondeur. Dispositif de mesure du niveau piézométrique à proximité du point d'injection.	
Paramètres complémentaires mesurés	Pression d'injection, débits et volumes cumulés d'air injectés, pressions dans la couche saturée, teneur en O2 dans la couche saturée,	
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, de produits pur 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 fluides 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 et teneurs en polluants résiduelles	

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 bodumluchtextractie en perslucht injectie, 2002), un grand nombre d'enseignements importants pourraient déjà être obtenus au terme de deux jours de tests.
- Les points de contrôle et d'observation permettant de suivre les paramètres dépression, température (si nécessaire) et permettant l'échantillonnage de la fraction gazeuse du sol seront utilement établis à différentes distances du puits d'extraction et suivant trois axes de manière à prendre en compte l'anisotropie du sol.
- La fréquence des mesures des paramètres lors des tests pilote fera l'objet d'une proposition de l'expert.
- Concernant l'analyse des teneurs en polluants au niveau du gaz extrait et au niveau des points d'observation, il est possible d'effectuer des mesures indirectes à l'aide d'appareils de type FID et PID dans la mesure où l'expert apporte la preuve qu'il existe une bonne correspondance entre les teneurs en polluants présentes et les résultats des mesures à l'aide de ces appareils.
- La détermination du rayon d'influence des puits de pompage peut faire appel à la méthode d'extrapolation sur base d'une échelle semi-logarithmique des distances par rapport au puits, comme mentionné plus haut, ou faire appel à la règle empirique suivante : la limite du rayon d'influence s'établit là où la dépression est inférieure à 1 % à la dépression mesurée à la pompe.
- La détermination du rayon d'influence dans la couche saturée du sol lors d'une opération de sparging peut se faire sur la base des mesures de pression aux alentours du puits d'injection en faisant appel à la règle empirique suivante : la limite du rayon d'influence s'établit là où la surpression mesurée dans le sol est inférieure à 1% de la pression d'injection mesurée à la pompe(ou au compresseur). La mesure des teneurs en O₂ dans l'eau du sol peut également fournir une indication du rayon d'influence de l'injection d'air. L'utilisation d'injection de gaz inerte tel que l'He afin de faciliter l'estimation du rayon d'influence est parfois mentionnée dans la littérature. Le recours à cette technique, souvent onéreuse, n'est cependant pas considéré comme une procédure standard en Région de Bruxelles-Capitale.
- Les changements de niveau du toit de la nappe lors de la mise en place de la dépression dans le sol méritent une attention particulière dans la mesure où la remontée de la nappe induit une diminution de l'épaisseur de la tranche de sol disponible pour la circulation des gaz et où les polluants présents en phase libre peuvent être emprisonnés dans les micropores du sol.
- Lors de la mise en place d'un test pilote faisant appel à l'injection d'air dans la couche insaturée, deux niveaux critiques de pression d'injection doivent être reconnus : le niveau d'entrée de l'air dans la couche saturée et le niveau critique de stabilité de la couche aquifère.

- Le niveau de pression permettant l'entrée de l'air dans le sol est estimé à l'aide la relation suivante :

$$\text{Pression d'injection} = P_h + P_e + P_{ch}$$

Où P_h (Pa) = pression hydrostatique au niveau du sommet de la crépine d'injection

$$P_h = p_w g (Z_s - Z_w)$$

avec Z_s le niveau altimétrique (m) du toit de la nappe et Z_w le niveau altimétrique du sommet de la crépine

p_w la masse spécifique de l'eau (kg/m³)

g = l'accélération gravitaire en m/s²

P_{ch} (Pa) = les pertes de charge dans les conduites et tubages (souvent négligeables) et

P_e (Pa) = pression d'entrée dans la formation, dépendante du diamètre des pores.

Le tableau 6 suivant donne des valeurs de pression d'entrée typiques de sols de classes texturales différentes

Tableau 6 : Valeurs représentatives de pression d'entrée

Classe texturale	Diamètre des plus grands pores (µm)	Pression d'entrée kPa
Sable grossier	>1000	<0.3
Sable fin à moyen	100	3
Limon	10	30
Argile limoneuse	<1	>300

(Tiré de *In-situ Air Sparging, 2008, US Army Corps of Engineers*)

- Le niveau critique de résistance de la couche aquifère est estimé à l'aide de la relation suivante, sur la base d'une densité apparente du sol de 1680 kg/m³ :

$$P_{fr} \text{ (Pa)} = 0.73 D_{sol}$$
 où D_{sol} est l'épaisseur de la tranche du sol (m) allant de la surface jusqu'au sommet de la crépine du puits d'injection
- Lors de l'exécution du test pilote, il est recommandé de tester deux modes d'opération : extraction en continu ou extraction en mode intermittent. Le second mode opérationnel est recommandé en cas de mise en oeuvre de la variante Sparging.
- Lors du suivi du test pilote, le calcul des volumes cumulés de gaz pompés et des teneurs en polluants dans les gaz sera systématiquement effectué après correction des données par rapports aux conditions standards de pression et de volume.

8. Description d'une installation type

Une installation d'intervention par pompage des gaz dans la couche insaturée du sol comprend typiquement les éléments suivants.

8.1. SVE simple

- Un ou plusieurs puits d'extraction (ou plus rarement tranchées d'extraction) localisés au sein de la tache de pollution. Les puits sont équipés de crépines interceptant la totalité de la puissance de la tache. 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. Une attention particulière doit être portée à bien étanchéifier l'espace annulaire entre la piézomètre et la paroi du forage, pour éviter l'extraction d'air de la surface le long du piézomètre.
- 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 à 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. Le traitement du gaz avant son rejet dans l'atmosphère fait le plus souvent appel à la filtration sur filtre à charbon actif. En cas de teneurs importantes d'autres procédés peuvent être utilisés : oxydation catalytique, oxydation thermique, passage sur bio-filtres, adsorption sur résines. Le traitement des gaz extraits fait l'objet d'un code distinct.
- 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 suivi et monitoring (voir chapitre 11).

8.2. Variante SVE + 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.

Une attention particulière doit être portée à bien étanchéfier l'espace annulaire entre la piézomètre et la paroi du forage, pour éviter l'extraction d'air de la surface le long du piézomètre.

8.3. Variante SVE + Injection d'air dans la couche saturée du sol (sparging)

En plus des infrastructures décrites à la section 8.1. le dispositif comporte un ou plusieurs puits d'injection d'air établis entre les puits d'extraction. La section crépinée se situe idéalement à 1-1,5 m sous la zone polluée de la couche saturée.

Ces puits sont équipés de débitmètres permettant de mesurer les débits et les volumes d'air injectés. Ils comportent également un manomètre permettant de mesurer et contrôler la pression d'injection.

En règle générale, on considère que les débits d'injection d'air doivent être inférieurs aux débits d'extraction, d'un facteur de 2 à 3.

8.4. Variante SVE + chauffage du sol (<100°C)

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

- des antennes enfouies pour l'envoi d'ondes radio dans le sol
- ou des électrodes enfouies pour le chauffage par effet joule
- ou un dispositif de chauffage de l'air ou de préparation de la vapeur d'eau à injecter dans les couches insaturées du sol dans des puits établis comme décrit dans les sections 8.2 et 8.3. Les puits d'injection seront équipés de sondes permettant de mesurer la température des fluides injectés.

Le dimensionnement de ces équipements sera réalisé à l'aide des informations collectées durant la phase pilote. Le dispositif de suivi et monitoring (voir chapitre 11) comportera en outre des sondes de température au niveau des points de contrôle et de puits d'extraction.

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.

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

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 7**. L'installation sera décrite par l'expert à l'aide d'un schéma technique de type similaire à celui représenté à la **figure 10**.

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

Partie du dispositif	Élément	Données du descriptif	Commentaire
Objectif poursuivi	Traitement de la couche insaturée du sol	Objectif de teneurs à atteindre de manière durable dans le sol, extension actuelle en X, Y et profondeur de la contamination. Débits attendus par puits. Durée prévue	
Dispositif d'extraction des gaz	Puits d'extraction	Localisation et distance entre les différents puits, profondeur des tronçons aveugles et crépinés, diamètre et type de tubage, dimension 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 cadencassé, ...). 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 de la pompe : pompe 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 de la durée souhaitée du traitement et des dépressions souhaitées
	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	
Variants			
Variante injection 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 injection dans la couche saturée	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. Pression et débit d'injection. Mode permanent ou intermittent.	
	Traitement de la couche saturée du sol	Objectif de teneurs à atteindre de manière durable dans la nappe et éventuellement le sol (frange capillaire), extension actuelle en X, Y et profondeur de la contamination. Débits attendus par puits. Durée estimée	
Variante chauffage du sol	Injection d'air chaud ou de vapeur	Températures des fluides, Pressions et débits d'injection	
Dispositif de collecte des fluides pompés	Conduite d'aménées	Type, dimensions et disposition des conduites d'aménées, cuve d'égalisation, dispositif anti-gel, dispositif anti vandalisme et contrôle des risques de déflagration. Localisation et dispositif pour la prise d'échantillons de contrôle. Localisation des débitmètres et des manomètres.	
Station de traitement des fluides pompés	Cette rubrique fait l'objet d'un autre code de bonne pratique		
Objectif de qualité des fluides pompés et traités avant leur rejet	Condensats traités	Les normes de qualités pour les eaux traitées à rejeter dans le réseau d'égouttage public ou les eaux de surface correspondent aux normes d'assainissement de l'AGRBC du 17 décembre 2009 déterminant les normes d'intervention et les normes d'assainissement.	
	Phases pures séparées	Prise en charge selon le type de produit et la législation en vigueur : prise en charge en qualité de déchets, déchets dangereux, valorisation énergétique, ...	
	Gaz traités	Selon l' Info fiche fixant les normes d'émission des effluents gazeux résultant d'un assainissement de sol.	
Dispositif anti-nuisances	Mesures anti-bruit	Type de mesure prévue : mesures anti-cavitation des pompes, isolation acoustique des pompes,	
	Mesures anti-odeur	Eventuelles pour les composés volatiles (acétone, composés aromatiques)	

Les commentaires suivants peuvent être formulés :

- La distance entre les puits d'extraction peut être calculée de différentes manières :

- Sur la base des rayons d'influence déterminés lors des tests de pompage et le test pilote en ménageant un taux de recouvrement suffisant entre les rayons d'influence des différents puits. Cette méthode, quoique simple, souffre de nombreuses imperfections.
- Sur la base d'une approche prédictive suivant la relation suivante

$$N_{wells} = V_{soil} C_s \alpha p_s / (Q_v \tau_{clean})$$
où

N_{wells} = le nombre de puits

V_{soil} = volume de sol impacté (m³)

p_s = la densité apparente du sol (kg/m³)

C_s = teneur moyenne dans le sol (kg/kg)

Q_v = le volume de gaz extrait (m³/s)

τ_{clean} = le temps de traitement (s)

α = le volume minimum de vapeur nécessaire pour extraire le polluant jusqu'à atteindre l'objectif **du traitement** (en m³/kg de polluant). Le facteur α peut être déterminé à l'aide de modèles tels que Hyperventilate où le facteur efficacité du traitement SVE intervient ou en comparant les teneurs mesurées dans le gaz du sol (à l'équilibre) et teneurs dans les gaz extraits lors de l'essai pilote.

- La distance entre les puits de sparging est définie sur la base des rayons d'influence estimés lors de l'essai pilote. Des intervalles de 4,6 à 6 m sont fréquemment rapportés dans la littérature.
- La longueur recommandée des crépines d'injection établies pour une opération de sparging est de 0,3 à 0,6 m. Le massif filtrant établi autour des crépines est de granulométrie fine afin de jouer le rôle de diffuseur.
- En cas de remontée importante de la nappe limitant le volume disponible pour la circulation des gaz, un rabattement de la nappe peut s'avérer nécessaire. Ce type d'opération fait l'objet d'un code de bonne pratique distinct « Pompage de l'eau souterraine à des fins de rabattement ».

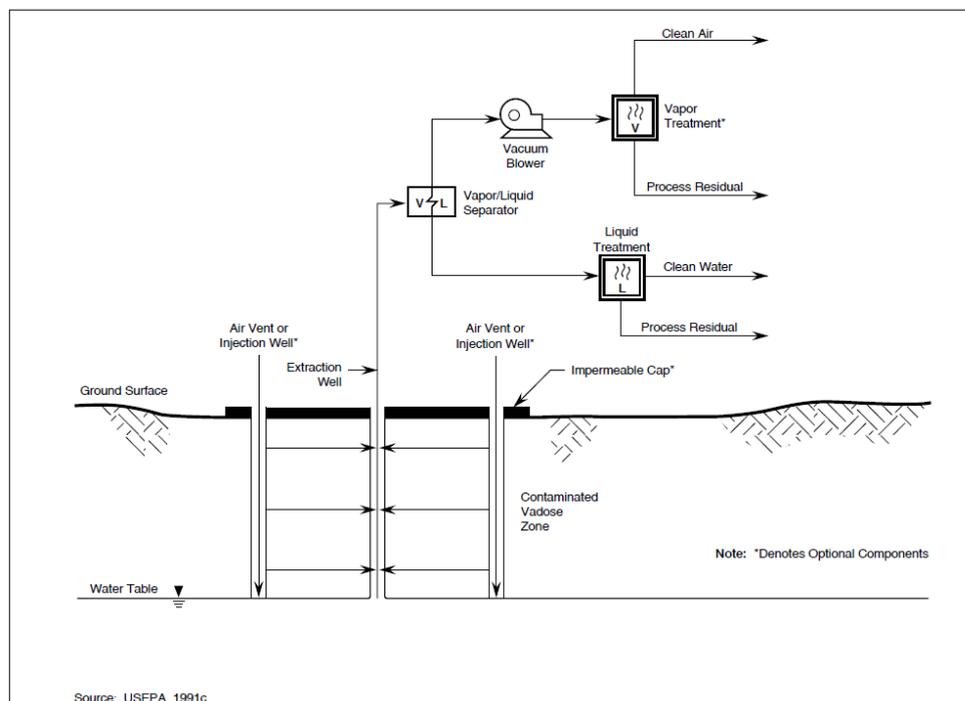


Figure 10 : installation type (extrait de *Soil Vapor Extraction and Bioventing, Us Army Corps of Engineers, 2002*)

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'explosion ;
- Nuisances acoustiques ;
- Risques pour les installations de captage voisines.

10.1.1 Nuisances pour la qualité de l'air

Par définition, les opérations de traitement par extraction des vapeurs du sol s'adressent à des pollutions par des composés volatils tels que les hydrocarbures aliphatiques légers (C5-C8, C8-C10) les composés aromatiques (BTEX), les éthers (MTBE...) et les solvants chlorés. L'air en contact direct avec les installations de pompage, d'adduction et traitement des gaz pollués est susceptible d'être contaminé par les vapeurs s'échappant du dispositif (tronçons non sous-vide). 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 du suivi des opérations, lors du lancement des opérations, et deux semaines par 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 suivi périodique.

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

10.1.2. Risques d'explosion

Le pompage des gaz du sol renfermant des composés volatils peut entraîner des risques d'explosion au sein du dispositif de prélèvement et de traitement des fluides pompés. Des explosimètres doivent donc être mis en place à différents endroits du dispositif : au niveau des canalisations de collecte des gaz extraits avant passage dans les pompes, au niveau des installations de traitement ... Ces explosimètres doivent être reliés à un système d'alerte, ouverture automatique et entrée d'air et, si nécessaire arrêt du fonctionnement en cas de dépassement de la valeur de 10 % de la LEL (Lower Explosive Limit).

Les opérations d'injection d'air 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.

10.1.3. Nuisances acoustiques

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

Les mesures aptes à minimiser ces nuisances doivent être prises :

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

10.1.4. Risques pour les installations de captage voisines

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

Ces installations sont susceptibles d'être impactée par suite du traitement insuffisant de l'eau souterraine au niveau du noyau de pollution et la création d'un panache migrant vers les sites de captage.

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

10.2 Conformités aux cadres légaux existants

Pour les nuisances atmosphériques, les normes à l'émission pour les gaz rejetés dans l'atmosphère sont données dans [le 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 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 [disponibles sur la plateforme S-Risk © \(Substance data sheets, <https://s-risk.be/documents>\)](#). En cas de dépassement de celles-ci, une vérification de l'étanchéité des installations s'impose. Dans les zones sujettes à un niveau élevé de pollution atmosphérique ambiante (voiries à trafic intenses, zones industrielles, ...) une opération de vérification sera déclenchée si le niveau de contamination de l'air à proximité des installations dépasse le niveau de contamination ambiant mesuré sur une période de 24 h.

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

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

De plus, les permis d'environnement et les prescriptions fixées dans la déclaration de conformité des projets seront respectées.

11. Suivi du traitement

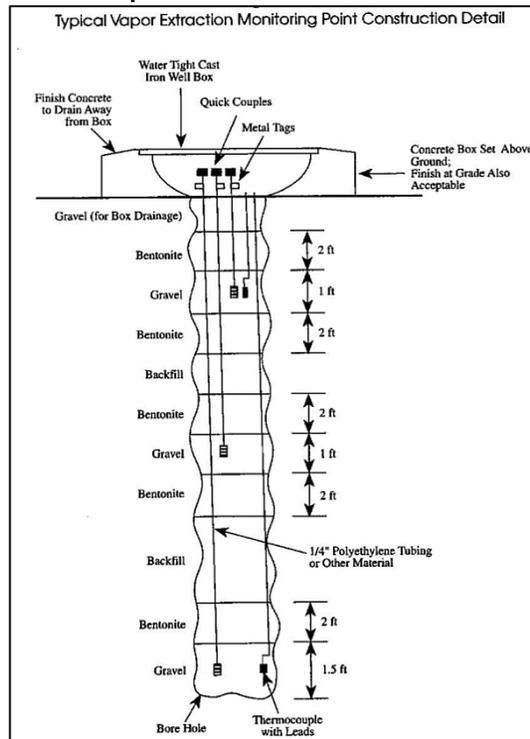
11.1 Mesures de surveillance : dispositif type

11.1.1. SVE simple

Le dispositif de suivi repose sur les éléments suivants :

- Un réseau de points d'observation répartis sur la zone impactée visant à suivre l'évolution des paramètres : pressions, teneurs dans les gaz du sol et éventuellement température. Un exemple de point d'observation est reproduit à la **figure 11** (Extrait de *Vacuum Vapor Extraction, Springer, 1994*)

Figure 11 : Exemple d'équipement d'un point d'observation



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

- Des piézomètres situés à proximité des puits d'extraction, hermétiquement fermés, visant à contrôler la remontée du toit de la nappe suite à l'application de la dépression.
- Un dispositif de mesure des débits de gaz extraits. Ces mesures seront accompagnées de mesures des paramètres pressions et température afin d'exprimer les résultats en conditions normales de 1° et de pression.
- Un dispositif d'échantillonnage des gaz extraits de chacun des puits (ou groupe de puits) d'extraction permettant de mesurer les quantités de polluants extraits.
- Un dispositif d'échantillonnage des gaz traités avant leur rejet vers l'atmosphère.
- Un dispositif d'échantillonnage des condensats avant leur traitement sur site ou prise en charge en dehors du site.

11.1.2. SVE + Variante injection d'air dans la couche insaturée du sol

En plus des éléments décrits dans la section 11.1.1. le dispositif de suivi inclura des instruments de mesure des débits d'air injectés de manière active et passive.

A proximité des puits d'injection, des points d'observation équipés de manomètres et de sonde d'échantillonnage de gaz permettant de suivre l'évolution de l'influence de l'injection d'air en termes de pression et de teneurs en O₂ à des distances discrètes des puits d'injection.

11.1.3. SVE + Variante injection d'air dans la couche saturée du sol (sparging)

En plus des éléments décrits dans la section 11.1.1. le dispositif de suivi inclura les éléments suivants :

- au niveau des puits d'injection, des débitmètres mesurant les débits et les volumes cumulés d'air injectés, des manomètres montrant la pression d'injection de même que des jauges de température.
- A proximité des puits d'injection, des points d'observation équipés de manomètres et de sonde d'échantillonnage de gaz permettant de suivre l'évolution de l'influence de l'injection d'air en termes de pression et de teneurs en O₂ à des distances discrètes des puits d'injection.

11.1.4. SVE + Variante chauffage du sol

En plus des éléments décrits dans la section 11.1.1. le dispositif de suivi inclura les éléments suivants :

- Dans les cas de mise en œuvre des techniques d'injection d'air chaud et de vapeur chaude dans la couche insaturée du sol, au niveau des puits d'injection, des débitmètres mesurant les débits et les volumes cumulés d'air ou de vapeur injectés, des manomètres montrant la pression d'injection de même que des jauges de température.
- Dans le cas de la mise en œuvre des techniques d'injection d'air chaud et de vapeur chaude dans la couche saturée du sol, au niveau des puits d'injection, des débitmètres mesurant les débits et les volumes cumulés d'air injectés, des manomètres montrant la pression d'injection de même que des jauges de température. Et à proximité des puits d'injection, des points d'observation équipés de manomètres et de sonde d'échantillonnage de gaz permettant de suivre l'évolution de l'influence de l'injection d'air en termes de pression et de teneurs en O₂ (pour l'air chaud) à des distances discrètes des puits d'injection.
- Dans le cas de mise en œuvre des techniques de chauffage du sol par effet joule ou ondes radios, équipement des différents points d'observation, de jauges de température.

11.2 Mesures de surveillance : paramètres de suivi et fréquences

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

Tableau 8 : Fréquences et paramètres des opérations de suivi

Paramètres de suivi	Moyen	Paramètre	fréquence minimale*	Commentaires
SVE simple				
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	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Teneurs en eau, O2 et CO2 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, O2 et CO2 (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
Teneurs résiduelles en polluants dans les gaz du sol au niveau des points d'observation	Prélèvement au niveau des points d'observation et analyse des échantillons, cartouche à charbon actif, cartouche Dräger, PID, FID	Teneurs des polluants requérant une intervention (kg/m ³)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	Suivi du rendement de l'extraction
Estimation des quantités de polluants prélevées par puits et totales	Somme des quantités prélevées pour les différentes périodes de contrôle	Bilan de masse : quantités de polluants extraites et quantités résiduelles (Kg)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	Estimation du temps de traitement
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	
Teneurs dans les rejets gazeux et estimation des quantités nécessaires de charbon actif (si traitement du gaz par filtration sur charbon)	Prélèvement des gaz à l'entrée et la sortie de l'installation de traitement et analyse des teneurs en polluants : cartouche à charbon actif, Dräger, PID, FID	Teneurs des polluants requérant une intervention (kg/m ³)	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	
Quantités de charbon actif consommées	Quantités de charbon actif utilisées dans le filtre	Kg	Selon les livraisons + bons de prise en charge	
Quantité et teneurs en polluants des condensats	Quantités de liquide récupéré dans le séparateur et teneurs en composés polluants	m ³ et kg/m ³	avant chaque prise en charge par l'entrepreneur	Identifier la filière de traitement sur ou en dehors du site
Teneurs résiduelles dans le sol et/ou l'eau souterraine	Forages et prélèvements de carottes de sol et/ou prélèvement dans des piézomètres de contrôle et analyse des polluants requérant une intervention	Teneurs des polluants requérant une intervention (kg/Kg ou kg/m ³)	Au lancement des opérations et ensuite en fonction des données de suivi	
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 injection dans la couche saturée 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	
Mesure des pressions dans les points de contrôle disposés près des puits d'injection	Manomètres au niveau des points de contrôle	Pression dans la couche saturée et contrôle du rayon d'influence	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	Suivi de l'efficacité du Sparging
Mesure de l'O2 dans les points de contrôle disposés près des points d'injection	Prélèvement et analyse de l'O2	Teneur en O2 et contrôle de la circulation de l'air dans la couche saturée	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel puis trimestriel	Suivi de l'efficacité du Sparging
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	
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	
* la fréquence sera ajustée par l'expert en fonction des données du suivi				

Ce tableau appelle les commentaires suivants :

- Lors de la mesure des polluants requérant une intervention (ceux-dont les teneurs détectées lors de l'étude détaillée entraînent la nécessité de gérer les risques ou assainir), les composés polluants produits par la dégradation des premiers sont également à analyser. Par exemple, lors d'une intervention déclenchée par l'observation de teneurs importantes en TCE et DCE, le chlorure de vinyle sera également mesuré. De manière identique le traitement d'une contamination par le pentachlorophénol sera suivi par l'analyse des teneurs de tous les chlorophénols.
- 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 et en eau dans les gaz pourront faire l'objet de mesures directes.

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

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

Tableau 8bis: Fréquences et paramètres du suivi 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	
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 pompage de gaz dans la couche insaturée du sol 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 dans le projet, 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 suivi, 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, abandon de puits, extension du réseau de piézomètres d'observation en résultat de l'extension du panache, installation ou modification d'un dispositif de rabattement de la nappe, ...

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

Tableau 9 : Informations à présenter dans le premier rapport intermédiaire.

Rubrique	Paramètres et quantité à mesurer	Commentaires
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), séparateur et station de traitement des gaz pompés	La localisation des différents éléments du dispositif fait l'objet de figures à joindre en annexe du rapport intermédiaire
Paramètres à rapporter si SVE Simple	Dépressions mesurées au niveau des puits et dans les points d'observation. Débits et volumes extraits aux puits. Vérification de l'extension de la zone de capture. - Teneurs mesurées dans les gaz extraits et bilan de masse des polluants présents (quantités extraites et quantités résiduelles) - Teneurs résiduelles dans les gaz du sol dans les points d'observation au départ et après démarrage du pompage. - Teneurs en polluants des gaz traités et rejetés, teneurs dans les condensats et quantités des condensats. Quantités de charbon actif consommées. 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	
Description des installations complémentaires si mise en œuvre de variante	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 pour le chauffage du sol, électrodes ou antennes, dispositif de mesure des températures dans le sol	
Paramètres complémentaires à rapporter si SVE + Variante injection dans la couche insaturée	Pressions d'injection et débits d'injection d'air (et volumes cumulés)	
Paramètres complémentaires à rapporter si SVE + Variante injection dans la couche saturée	Pression d'injection dans les différents puits. Débits et volumes cumulés injectés. Paramètres mesurés dans les points de contrôle complémentaire près des puits d'injection (pressions et O ₂) et confirmation du rayon d'influence du puits. Apparition d'une phase libre dans les piézomètres de contrôle.	
Paramètres complémentaires à rapporter si SVE + Variante chauffage du sol	Si chauffage par injection d'air chaud ou de vapeur : pression d'injection dans les différents puits, débits et volumes cumulés injectés. Température des fluides injectés. Si chauffage par effet joule ou ondes radio : puissance appliquée au réseau de sondes et d'électrode. Température du sol mesurées dans les points d'observation. Apparition d'une phase libre dans les piézomètres de contrôle.	

12.2 Mesures correctives et optimisation

Les mesures correctives à apporter à une intervention par pompage des gaz du sol couvrent de nombreux aspects. Les situations rencontrées le plus fréquemment sont les suivantes.

Problème :

Les débits de gaz extraits chutent rapidement même si la dépression appliquée reste constante.

Solutions correctives possibles :

- 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.

Problème :

Les teneurs en polluants dans les gaz extraits chutent et/ou se stabilisent à un niveau bas

Solutions correctives possibles :

- Moduler les dépressions et les débits au niveau des différents puits de manière à favoriser la circulation des gaz au centre de la tache au détriment de la périphérie
- Si la chute des teneurs résulte de l'hétérogénéité du sol (vitesse d'extraction limitée par la vitesse de diffusion au travers des couches moins perméable), passer en mode intermittent ou envisager le chauffage du sol pour augmenter les vitesses de diffusion.

Problème :

Le niveau de dépression dans le sol n'est pas uniforme au niveau de la tache.

Solutions correctives possibles :

Augmenter la densité des puits d'extraction.

Problème :

Compte tenu des débits d'extraction et des teneurs en polluants dans les gaz extraits, le temps de traitement prévu est trop important.

Solutions correctives possibles :

- Augmenter la densité des puits d'extraction ;
- Augmenter la dépression et les débits ;
- Intercaler des puits d'injection ;
- Envisager le chauffage du sol.

Problème :

Variante Sparging : les débits d'injection d'air dans la nappe chutent ou sont trop bas.

Solutions correctives possibles :

- Décolmater les puits d'injection : traitement à l'aide d'un biocide (colonies bactériennes) ou d'un acide (dépôts de fer et/ou de Manganèse) ;
- Augmenter la pression d'injection dans des limites raisonnable ($P < P$ de fracturation de la formation) ;
- Augmenter la densité des puits d'injection.



Problème :

Le volume de la couche saturée du sol concerné par la circulation de l'air injecté est trop faible ou la répartition spatiale de l'air n'est pas optimale

Solutions correctives possibles :

- Injection par intermittence de manière à homogénéiser la circulation de l'air dans les pores ;
- Augmenter la pression d'injection (dans des limites raisonnables) et ainsi le rayon d'influence ;
- Augmenter la densité des puits d'injection.

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 :

- Si l'assainissement par pompage des gaz du sol vise à traiter les teneurs dans le sol dans les couches insaturées, saturées ou la frange capillaire de l'aquifère, les mesures de validation consistent en une dernière campagne d'échantillonnage et d'analyse des couches de sols impactées. Cette campagne d'analyse portera sur tous les polluants dont la présence a requis une intervention et leurs produits de dégradation nuisibles éventuels. Les teneurs de ces derniers produits, si présents, sont comparées aux normes d'intervention ou d'assainissement définies dans **l'AGRBC du 29/03/2018**. Le cas échéant, ces normes sont à considérer comme des valeurs objectifs de teneurs complémentaires à prendre en compte.
En cas d'atteinte des objectifs **de traitement** au sein de la tache de pollution, les opérations de traitement peuvent être arrêtées, les installations démantelées et le rapport d'évaluation final peut être rédigé et soumis.

En cas de non atteinte des objectifs de teneurs, le dispositif de pompage des gaz est maintenu en activité après mise en place de mesures correctives éventuelles : adjonction de puits d'extraction complémentaires, pompage intermittent, injection d'air, chauffage du sol eau , ... et ou après mis en place de mesures complémentaires : excavation du noyau, oxydation chimique in-situ ...

Si lors de la prochaine campagne 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.

- Si les opérations de traitement visent à assainir ou gérer le niveau de contamination de l'eau souterraine, les mesures de validation consistent en une dernière campagne d'échantillonnage et d'analyse des teneurs en polluants dans les piézomètres de contrôle. Les teneurs mesurées sont comparées avec les objectifs **de traitement**. Lors de cette mesure de validation, les teneurs de tous les polluants dont la présence a justifié une intervention sont mesurées. On mesurera également les teneurs des produits de dégradation des polluants susceptibles de jouer un rôle délétère sur la santé et l'environnement. Les teneurs de ces derniers produits, si présents, sont comparées aux normes d'intervention ou d'assainissement définies dans **l'AGRBC du 29/03/2018**. Le cas échéant, ces normes sont à considérer comme des valeurs objectifs de teneur complémentaires à prendre en compte.

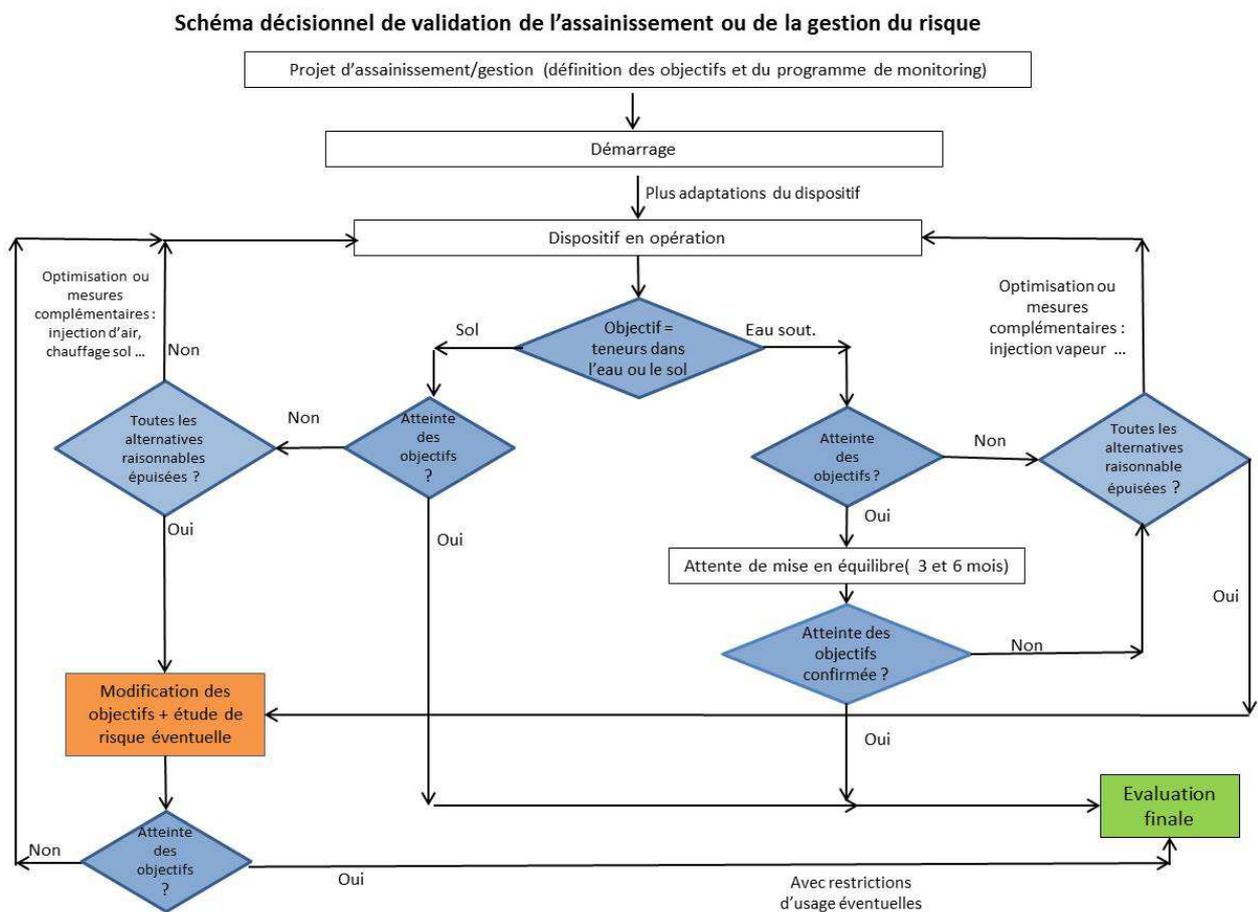
En cas d'atteinte des objectifs, la mesure sera répétée à deux reprises, 3 mois et 6 mois après interruption du pompage, de manière à vérifier la durabilité des résultats acquis.

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

Dans le cas contraire, le dispositif de pompage est remis en marche, après mise en place de mesures correctives éventuelles : adjonction de puits d'extraction ou de puits d'injection complémentaires, pompage intermittent, injection d'air chaud ou de vapeur, et ou après mis en place de mesures complémentaires : excavation du noyau, oxydation chimique in-situ ...

Si lors de la prochaine campagne 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.



13.1 Monitoring à long terme éventuel : dispositif et type de mesures

Sur suggestion de l'expert et/ou à la demande de Bruxelles Environnement, un monitoring (validation à long terme ou post gestion) peut être demandé au titulaire de l'obligation après la clôture des travaux . Ce suivi vise à confirmer que les résultats des travaux et notamment la rencontre des objectifs **de traitement** sont acquis de manière durable. Selon toute logique, ce suivi à long terme se justifie s'il existe une incertitude quant à la pérennité des résultats obtenus : variation importante des teneurs



mesurées dans les piézomètres de contrôle, niveaux de teneur stabilisés à une valeur proche des objectifs de traitement, circonstances particulières défavorables ...

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

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

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

Les paramètres qui seront relevés seront :

- Les teneurs résiduelles en polluants dans l'eau souterraine. Seuls les polluants dont la présence a justifié l'intervention sont analysés. Leurs produits de dégradation à pouvoir délétère sur la santé humaine et l'environnement seront également analysés.
- Les paramètres influençant ou témoignant de l'atténuation naturelle de la contamination si cette atténuation a été prise en compte dans l'analyse des risques générés par les teneurs résiduelles : pH, O₂, CO₂, méthane, nitrate, sulfate, nutriments, Fer, Mn, ... selon les processus responsables de l'atténuation naturelle escomptée.

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

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

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

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

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

- Toutes les teneurs mesurées sont systématiquement inférieures aux objectifs de traitement : la pérennité des résultats est acquise et le dossier est clos.
- Les teneurs de certains polluants et au niveau de certains points d'observation fluctuent avec de temps à autre de légers dépassements des valeurs objectives : prolongation de la période des mesures de validation à long terme, si une tendance à la baisse peut être dégagée.
- Les teneurs de certains polluants dépassent les valeurs objectives de manière récurrente même après prolongation de la période d'observation ou les teneurs de certains polluants dépassent de manière notable et soutenue les objectifs de traitement ou une couche libre (re)fait apparition. Face à cette situation, trois attitudes peuvent être adoptées :

- La contamination revêt un caractère différent de ce qui est apparu lors de l'étude détaillée : nouvelle source active, nouveau cas de contamination, nouvelles circonstances, ... Une nouvelle étude détaillée est nécessaire aboutissant éventuellement à un nouveau projet , ou, le cas échéant, un nouveau traitement ne nécessitant pas de projet spécifique, le titulaire de l'obligation étant le même ou différent.
- Des compléments de travaux sont nécessaires afin d'aboutir aux objectifs de traitement définis précédemment. L'atténuation naturelle et l'atténuation naturelle stimulée pouvant constituer une option.
- Il n'est pas possible d'atteindre les objectifs de manière durable dans des délais raisonnables et selon un budget réaliste : les objectifs de traitement sont modifiés (valeurs d'intervention ou valeurs définies suite à une étude de risque).

14. Recommandations pour la sécurité et la stabilité

14.1 Check-list succincte pour les entrepreneurs

La check-list à destination des entrepreneurs est reprise dans le tableau 10. Cette liste vise à aider les entrepreneurs dans la rédaction de leurs offres en réponse aux cahiers de charge rédigés par les experts. Compte tenu de la grande diversité des situations rencontrées, cette liste ne saurait être exhaustive.

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 checklist 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 pompés, on privilégiera de manière systématique, les conduites enterrées de manière à éviter les accidents, l'incidence du gel (condensats) et les actes de vandalisme.
- Lorsque les installations du chantier (puits d'extraction et station de traitement) sont proches de bâtiments, des analyses de l'air seront effectuées 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 un dépassement de 10 % de la LEL (entrée d'air et alarme).
- En cas de stockage sur site de terres polluées ramenées à la surface du fait de la mise en place des puits, 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 effectuée et réponse adéquates obtenues
Caractéristiques des infrastructures sur le site et son voisinage immédiat	Inventaires et cartographie des bâtiments et infrastructures aériennes. Inventaire et cartographie des infrastructures enterrées et impétrants.
Etude de stabilité des infrastructures enfouies	Etudes de stabilité adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser
Etude de stabilité des ouvrage aériens	Etudes de stabilité adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser
Cibles sensibles	Cibles sensibles présentes sur et aux alentours du chantier bien identifiées
Aspects techniques du cahiers des charges ou du descriptif des travaux	Descriptif du dispositif de 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	Identités et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'agent de l'IBGE, des autorités compétentes sont connues
Informations devant être présentes dans le plan de sécurité - Hygiène et prévention de l'entrepreneur	
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
	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 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 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 (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, identités et coordonnées des personnes et/ou service à contacter : service incendie, commune, protection civile, exploitant des réseaux
Identification des nuisances possibles	Odeur et vapeurs dangereuses pour le voisinage en cas de fuites et pertes à partir des installations
	Bruit des équipements : pompes, groupes électrogènes ,
	Encombrement des voiries
	Salissement des voiries
Mesures préventives	Pour chacune des nuisances identifiées, identification et description des mesures préventives. Par exemple, mise en place d'explosimètres, de systèmes d'alarme et de mise à l'arrêt et de sauvegarde (entré d'air dans les canalisations)
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacune des nuisances identifiées, préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Planning des interventions	
Plan de monitoring et d'entretien	Planning des visites de contrôle : fréquence bimensuelle minimum
	Planning des visites d'entretien
Identification des pannes et des problèmes techniques susceptibles de se produire	Défectuosité des équipements et de l'installation : défaut 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	
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.

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

La check-list à destination des experts est fournie au 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 insaturée ou saturé 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 différents 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 connus.
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 ou intermittent. Risques de colmatage. Actions correctives et d'optimisation possibles.
	Vérification <i>a priori</i> 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
	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 l'IBGE
Identification des procédures particulières à respecter	Identifier les procédures particulières et vérifier que leur respect est bien pris en compte dans le cahier des charges ou le descriptif des travaux : transport des déchets dangereux (condensats), rejets gazeux,
Les lignes de communication sont définies	Identité et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'agent de l'IBGE, des autorités compétentes sont connues
Identification et nature des risques	Risque d'explosion dans les canalisations de collecte des gaz compte tenu de l'inflammabilité des composés extraits
	Risque pour les infrastructures enterrées en cas de chauffage du sol par effet joule ou ondes radio 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 suivi, de validation et de monitoring à long terme	
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 dans la nappe panache 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 ?
Monitoring long terme	Dispositif de suivi : piézomètres d'échantillonnage
	Paramètres du suivi : teneurs en polluants et produits de dégradation, paramètres permettant de suivre l'atténuation naturelle si prise en compte de cette dernière

15. Sources bibliographiques

Les sources utilisées lors de la rédaction du document :

- Code van goede praktijk voor bodemluchtextractie en perslucht injectie, OVAM, 2002 ;
- Air Sparging, A Project Manager's Guide, Keith Fields et al., Battelle Press, 2002;
- Innovative Site Remediation Technology Vol. 8, Paul C. Johnson et al., Springer 1994;
- Soil Vapor Extraction and Bioventing, US Army Corps of Engineers, EM 1110-1-4001, June 2002;
- Engineering and Design IN-SITU AIR SPARGING, US Army Corps of Engineers, January 2008;
- HyperVentilate Users Manual, US EPA, January 1993;
- Achilles, Veiligheid, gezondheid en milieuzorgsysteem voor on-site bodemsanering werken, OVAM 2001.