

Code de Bonne Pratique 1

Pompage de fluides dans la zone saturée du sol

Bruxelles Environnement

Contenu

Contenu	2
1. Introduction	4
2. Description de la technique et des principes technologiques mis en œuvre	5
3. Description des variantes	7
3.1. Le pompage accompagné de flushing	7
3.2. Le pompage accompagné de flushing avec adjonction d'agents chimiques (stimulation chimique)	7
3.3. Le traitement biphasé : enlèvement d'une couche de produit pur surnageante	9
3.4. Le pompage biphasé d'une phase libre plongeante (DNAPL)	10
3.5. Le bioslurping	10
4. Objectifs poursuivis : panache versus noyau	11
5. Polluants et situations les plus favorables (notions qualitatives)	12
6. Examen a priori de la faisabilité technique	14
6.1. Caractéristiques limites du ou des polluants	15
6.2. Caractéristiques limites du sol à traiter	17
6.3. Caractéristiques limites du site à assainir ou gérer	19
7. Examen spécifique de la faisabilité du traitement	20
7.1. Paramètres du polluant, du sol et du site à mesurer	20
7.2. Nécessité d'essais préalable au laboratoire	27
7.3. Nécessité d'un test pilote et caractéristiques minimales de ce test	28
8. Description d'une installation type et schéma de l'installation	31
8.1. L'objectif est l'interception d'un panache migrant vers une cible sensible	31
8.2. L'objectif est le confinement hydraulique d'un panache	32
8.3. L'objectif est le traitement du panache de contamination par pompage de l'eau souterraine	32
8.4. Les variantes	32
8.4.1 Pompage + injection d'eau avec ou sans adjonction d'additifs chimiques stimulants	32
8.4.2. Le traitement biphasé : enlèvement d'une couche de produit pur surnageante	33
8.4.3. Le pompage biphasé d'une phase libre plongeante (DNAPL)	34
8.4.4. Le pompage triphasé en cas de présence d'une couche de produit pur surnageante (bioslurping)	34
Schéma conceptuel	35
9. Descriptif de l'installation qui sera mise en place	36
10. Limitation des incidences du projet sur l'environnement : odeurs, bruits, poussières... ..	42
10.1. Points à prendre en compte	42
10.1.1. Nuisances pour la qualité de l'air	42
10.1.2. Risques d'explosion	42
10.1.3. Nuisances acoustiques	43
10.1.4. Risque de stabilité pour le bâti et les infrastructures voisines	43
10.1.5. Risques pour les installations de captage voisines	43
10.2. Conformités aux cadres légaux existants	43
11. Suivi du traitement	45
11.1. Mesures de surveillance : dispositif type	45
11.1.1. L'objectif poursuivi est l'interception ou le confinement du panache de contamination	45
11.1.2. L'objectif poursuivi est l'assainissement du panache de contamination	47
11.2. Mesures de surveillance : paramètres de suivi et fréquences	49
12. Rapportage, optimisation et mesures correctives	53

12.1.	Rapportage.....	53
12.2.	Mesures correctives et optimisation	55
12.2.1	L'objectif poursuivi est le confinement ou l'interception du panache de pollution.....	55
12.2.3	L'objectif poursuivi est le traitement du panache de pollution.....	55
13.	Mesures de validation et schéma décisionnel arrêt-prolongation du traitement	58
14.	Monitoring à long terme éventuel : dispositif, types de mesures et schéma décisionnel	60
15.	Recommandation pour la santé, sécurité et organisation	62
15.1.	Check-list succincte pour les entrepreneurs.....	62
15.2.	Check-list succincte pour les experts en pollution du sol	62
16.	Bibliographie.....	68

1. Introduction

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

Elle vise principalement le pompage de l'eau souterraine contaminée et son traitement ultérieur en dehors du sol à traiter.

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

- Le flushing ou injection d'eau dans le sol : il peut s'agir d'eau fraîche ou de l'eau traitée venant de l'installation de traitement de l'eau pompée ;
- L'injection d'agents chimiques (stimulation chimique) dans le sol visant à accélérer la désorption et la libération de composés polluants peu solubles dans la phase aqueuse.
- Le traitement biphasé en présence d'une couche de produit pur surnageante (communément appelée LNAPL pour light non aqueous liquid phase) ;
- Le traitement biphasé en présence d'une couche de produit pur rampante (communément appelée DNAPL pour dense non aqueous liquid phase) ;
- Le bioslurping ou traitement triphasé (eau, produit pur et air du sol) en présence d'une couche surnageante (LNAPL).

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 lors de travaux d'excavation et traitement de l'eau souterraine pompée 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 .

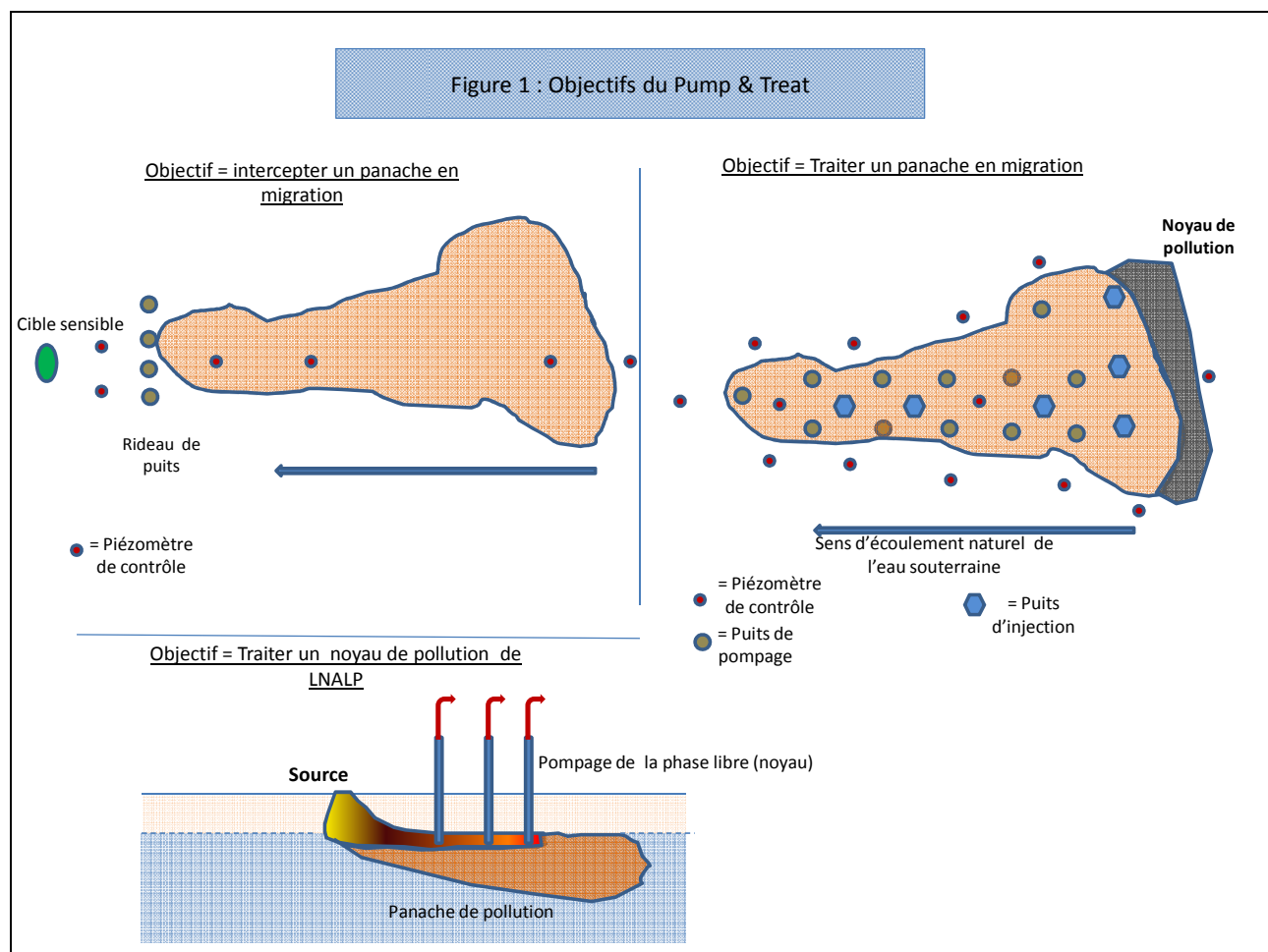
2. Description de la technique et des principes technologiques mis en œuvre

Cette technique de **traitement** vise au traitement d'une ou de plusieurs nappes aquifères contaminées et/ou à la gestion des risques que cette contamination entraîne.

Les objectifs poursuivis peuvent être, isolément ou simultanément de :

- Traiter la charge polluante présente au sein du noyau (présence d'une couche surnageante) ;
- Traiter ou contenir l'extension d'un panache de pollution se déplaçant dans une nappe aquifère ;
- Intercepter le front de migration d'un panache de pollution se déplaçant dans une nappe aquifère.

Ces trois types d'objectifs sont illustrés dans la **Figure 1**.



Typiquement, cette technique implique la mise en place et en œuvre du dispositif suivant :

- Un dispositif de pompage ou de prélèvement de l'eau souterraine constitué de :

- 0 Un ou plusieurs puits de pompage établis dans la couche aquifère permettant le prélèvement actif de l'eau souterraine et/ou
 - 0 Une ou plusieurs tranchée(s) drainante(s) menant l'eau interceptée de manière passive vers un lieu de pompage (chambre de visite, ...).
- Le pompage de l'eau souterraine est assuré par une ou plusieurs pompes :
 - 0 Pompes immergées individuelles dans chacun des puits ou chacune des tranchées ;
 - 0 Pompes à vide ou aspirantes/foulante disposées en dehors des puits et tranchées connectées à un ou plusieurs puits ou tranchées.
- Un dispositif de collecte de l'eau pompée menant cette dernière vers une station de traitement. La collecte est assurée par des conduites individuelles ou par un réseau de conduites débouchant dans un ou plusieurs collecteurs, équipés éventuellement de réservoirs tampons permettant d'écarter les pics de flux. Selon le mode de pompage mis en place, le dispositif de collecte opérera en charge ou en dépression.
En différents points du réseau, des débitmètres donnent le débit instantané et cumulé de l'eau pompée par les différents puits et tranchées.
- Un dispositif de traitement de l'eau souterraine adapté aux débits attendus et aux polluants à traiter. La qualité de l'eau traitée après passage dans la station de traitement doit être conforme aux recommandations de Bruxelles Environnement ([code de bonne pratique 'Normes de rejet dans le cadre des travaux d'assainissement et des mesures de gestion du risque'](#)).
- Un point de rejet des eaux pompées après leur passage dans la station de traitement. Ce point de rejet peut être :
 - 0 Le réseau d'égouttage public ;
 - 0 Un élément des eaux de surface : rivière, canal ;
 - 0 Un dispositif de ré-infiltration dans le sol en direction de la nappe aquifère au niveau du chantier de traitement.

Le principe technologique repose sur le prélèvement dans la couche aquifère de l'eau souterraine contaminée par la présence de composés polluants dissous (ou en émulsion). Par la même occasion, les polluants adsorbés ou emprisonnés dans la phase solide du sol sont partiellement éliminés que ce soit dans la couche saturée du sol et/ou, si possible, dans la couche capillaire surmontant le toit de l'aquifère.

Si l'objectif poursuivi est le traitement de la nappe, au niveau du noyau ou au niveau du panache, la technique mise en œuvre peut être considérée comme efficace dans la mesure où, dans un délai et à des coûts raisonnables, les valeurs objectives de teneurs pour l'eau souterraine et le sol de la zone saturée peuvent être atteintes et maintenues de manière durable.

Si l'objectif poursuivi est le confinement du panache de pollution ou son interception, la technique mise en œuvre peut être considérée comme efficace si elle assure, avec un degré de certitude suffisant et à des coûts raisonnables que la migration latérale et verticale du panache est endiguée. La notion de temps devient alors secondaire vu que la durée de l'intervention peut être longue (plusieurs années) à très longue (plusieurs décades).

En fonction des circonstances prévalant sur le site, il sera utile ou indispensable de coupler la technique du pompage avec d'autres techniques d'intervention : excavation ou confinement physique du noyau de pollution, injection d'agents oxydants, sparging, atténuation biologique stimulée, De manière à rencontrer les critères de performance (obtention durable des valeurs objectives) et d'efficacité (respects de délais et de budgets raisonnables) désirés.

3. Description des variantes

3.1. Le pompage accompagné de flushing

Le dispositif de pompage + flushing diffère du précédent par l'adjonction d'un volet injection d'eau dans le sol en direction de la nappe aquifère.

Le but recherché est de :

- Maintenir le niveau altimétrique du toit de la nappe et la puissance de celle-ci peu ou non changés lors du processus de pompage de façon à éviter les problèmes de stabilité des bâtiments et empêcher la contamination du sol suite à l'abaissement du niveau de la nappe en présence d'une couche de LNAPL ;
- Maintenir un débit de pompage important d'eau souterraine et de contaminants dissous ;
- Favoriser la libération des composés polluants emprisonnés dans les pores et les cavités du sol suite à la mise en place d'une vitesse importante de circulation de l'eau dans le sol.

L'eau injectée peut être soit de l'eau fraîche provenant du réseau de distribution, plus rarement d'un élément d'eau de surface, ou de l'eau issue de la station de traitement de l'eau pompée sur le site (réinfiltration).

Par rapport au dispositif décrit au Chapitre 2, des puits ou des tranchées d'infiltration sont établis au niveau de la zone à traiter, soit directement en amont des puits de pompage et/ou des tranchées d'interception soit en périphérie du panache ou intercalés entre les puits de pompage.

Cette technique implique la prise en compte de deux préoccupations supplémentaires :

- Vérifier que les débits d'injection et/ou d'infiltration sont adaptés aux propriétés de conductivité hydraulique du sol (risque d'inondation) ;
- Vérifier que les débits injectés ou infiltrés n'entraînent pas les composés polluants en dehors de la zone d'interception des éléments du dispositif de pompage.

3.2. Le pompage accompagné de flushing avec adjonction d'agents chimiques (stimulation chimique)

L'objectif poursuivi par la stimulation chimique lors de la mise en œuvre d'une opération de pompage dans une nappe aquifère, est la réduction du temps de traitement nécessaire pour atteindre les objectifs de concentration en polluants.

En effet, lors d'une opération de traitement par pompage, il est fréquent d'observer une chute graduelle des teneurs en polluants dans l'eau pompée aboutissant de manière asymptotique à une valeur constante, pouvant dépasser l'objectif [de traitement](#) poursuivi (voir **Figure 2**).

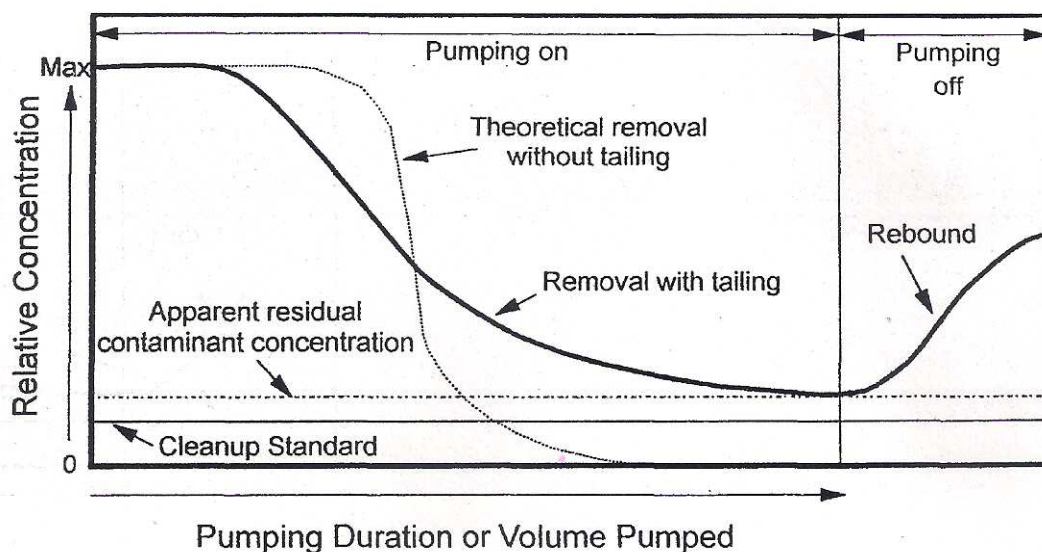


Figure 2 : Evolution typique des teneurs lors d'un traitement par pump and treat
USEPA, Methods for Monitoring Pump and Treat Performances, June 1994

Les raisons de cette atténuation de la décroissance des teneurs pompées peuvent être d'ordre physique :

- Présence dans la couche aquifère de zones ou lentilles de conductivités hydrauliques différentes (lentilles argileuses fréquemment observées dans les sols alluviaux en Région de Bruxelles-Capitale), de sorte que, après prélèvement rapide des polluants présents dans les zones à bonne conductivité hydraulique, le pompage des polluants présents dans les zones de faible conductivité est limité par les phénomènes de diffusion au départ de ces zones vers les zones plus perméables.

Ou d'ordre physico-chimique:

- Le polluant est adsorbé sur la matrice solide du site : la circulation du polluant vers le puits de pompage est alors affectée par un facteur de retard causé par l'interaction du polluant avec les surfaces réactives de la phase solide. Pour les polluants inorganiques chargés (cations et anions), la mobilisation des polluants suite à la désorption peut être tributaire de facteurs chimiques tels que le pH, l'Eh (le potentiel Redox du milieu), la présence d'autres ions en compétition pour les sites d'adsorption, ...
- La teneur en polluant dans l'eau souterraine est contrôlée par une phase précipitée cristalline ou amorphe, inorganique ou organique (naphtalène solide, carbonates de Cu,).
- La teneur en polluant dans l'eau souterraine est contrôlée par une phase de produit pur (NAPL) surnageante ou plongeante. Cette phase peut être présente dans les pores du sol (zone capillaire), dans les cavités ou en couche libre mobile.

De manière à accélérer la mobilisation du polluant et son prélèvement par les ouvrages de pompage, les agents injectés dans la couche aquifère peuvent être de plusieurs natures :

- Des composés (principalement ioniques) permettant le déplacement des polluants hors des sites d'adsorption par compétition pour ces derniers ;
- Des composés complexant augmentant la mise en solution des composés polluants (ions métalliques) ;
- Des composés jouant le rôle de co-solvants (principalement des composés alcooliques) ;

- Des agents tensio-actifs diminuant la tension interfaciale entre les molécules de polluants et la phase solide et augmentant la solubilité des composés hydrophobes. La diminution de la tension interfaciale diminue les forces de capillarité piégeant les phases de produits purs dans les micropores du sol et augmente ainsi la mobilité des NAPL. Dans le cas d'une phase plongeante (DNAPL) cet effet peut être considéré comme indésirable compte tenu des risques accrus de migration verticale du polluant.
- Des composés réducteurs ou oxydants modifiant l'étage d'oxydation des polluants ioniques et en conséquence leur disponibilité pour être transportés par advection dans l'eau souterraine ;
- Des composés favorisant la dissolution des phases précipitées, (principalement des agents acidifiants) ;
- Des agents ionisants (composés alcalins favorisant l'ionisation des acides faibles tels que les phénols par exemple) ;

Les agents tensio-actifs sont, de loin, les agents chimiques les plus utilisés, de sorte que seuls ces composés seront considérés dans les sections suivantes.

3.3. Le traitement biphasé : enlèvement d'une couche de produit pur surnageante

Ce procédé vise à supprimer l'existence d'une phase libre surnageante de produit pur (LNAPL) au sein d'un noyau de pollution. Il peut être mis en œuvre de manière isolée ou en complément d'une opération de pompage et traitement, visant à traiter ou contenir la migration d'un panache. Deux types de dispositifs peuvent être mis en œuvre, soit dans des puits de pompage soit dans des tranchées d'interception (**voir Figure 1.5**) :

- L'écumage (skimming) mettant en œuvre des écrémeurs (ou skimmers) dont le plus courant est le scavenger system utilisant un filtre hydrophobe/oléophile flottant. Particulièrement adapté pour l'écumage dans les puits de petit diamètre, le système ODS permet la récupération de couches surnageantes d'épaisseur allant de quelques mm à plusieurs m, entraînant de faibles dépenses énergétiques. Les pompes pneumatiques permettent également la récupération de LNAPL dans des puits de faible diamètre. Pour les nappes superficielles, des écrémeurs à bande ou à corde et des chaussettes absorbantes peuvent être utilisés. Ces dispositifs visent à récupérer la couche libre tout en pompant le minimum possible d'eau souterraine dont le traitement ultérieur est source de dépense. Vu les faibles débits pompés ils n'entraînent pas d'abaissement du niveau de la nappe et donc de contamination du sol par la phase libre lors d'un rabattement. Compte tenu de l'absence de rabattement et de gradient hydraulique au niveau du puits, le rayon d'action du dispositif d'écumage est faible.
- Le pompage biphasé assuré au moyen d'une seule pompe immergée située sous le niveau stationnaire du surnageant ou au moyen de deux pompes : une pompe immergée prélevant uniquement de l'eau de manière à créer un cône de rabattement et une zone d'appel et une pompe superficielle ne pompant que le surnageant. Les quantités d'eau pompée, éventuellement polluée, à prendre en charge sont importantes ce qui entraîne des coûts importants par unité de produit pur récupéré.

3.4. Le pompage biphas d'une phase libre plongeante (DNAPL)

Cette opération vise à prélever la phase libre plongeant au moyen de puits de pompage (plus rarement de tranchées).

Cette technique est rarement appliquée compte tenu de la difficulté de délimiter en trois dimensions l'extension de la DNAPL et de définir la direction de sa migration, surtout lorsqu'elle a atteint des profondeurs importantes.

3.5. Le bioslurping

Le bioslurping consiste à prélever de manière simultanée la LNAPL à la surface d'une nappe aquifère et l'air du sol dans la couche insaturée du sol, par l'application d'un vide dans le puits de pompage. Comme visible dans la **Figure 3**, le dispositif nécessaire pour cette méthode de traitement se compose typiquement de :

- Un puits d'extraction comportant une longueur crépinée d'environ 2 m : 1 m au-dessus et 1 m sous le niveau du toit de la nappe ;
- Un tube de succion dont la base est située (après ajustement) au sommet de la nappe aquifère ;
- Un couvercle étanche permettant l'installation d'une dépression au sein du puits de pompage ;
- Une pompe à vide et un réseau d'évacuation acheminant le produit pur, l'eau souterraine et les gaz du sol pompés vers l'installation de traitement ;
- Une installation de traitement assurant la séparation des trois phases pompées (produit pur, eau souterraine et gaz) et ensuite leur traitement avant rejet.

La mise en place d'un vide au niveau du puits assure la migration de la LNAPL vers le point de pompage en addition de l'établissement d'un gradient hydraulique. Le pompage du gaz de la couche insaturée vise principalement à assurer l'approvisionnement en O₂ et donc favoriser la dégradation biologique des polluants. L'objectif principal recherché n'est pas d'extraire par pompage les composés volatiles présents dans la couche insaturée du sol.

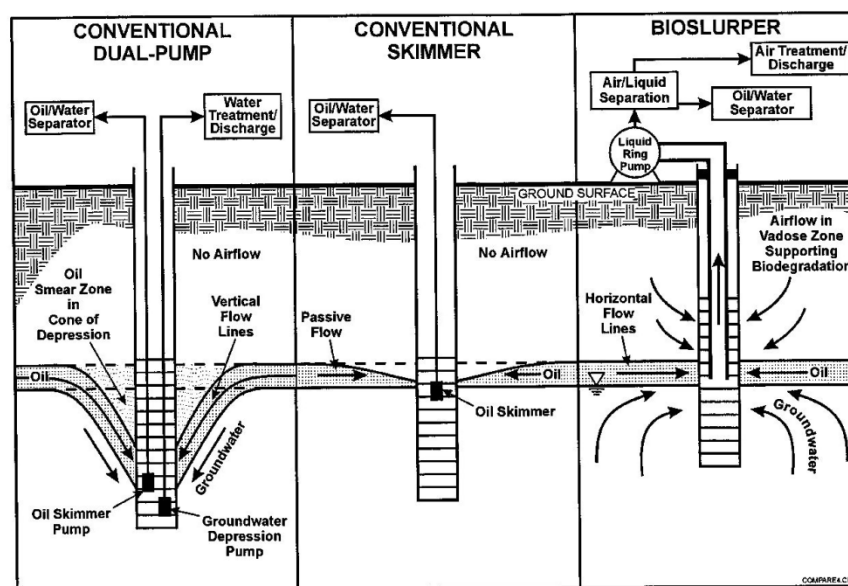


Figure 3: Comparaison des méthodes de pompage, skimming et bioslurping pour l'assainissement des LNAPL
(Extrait de « Principles and Practices of Bioslurping » Matthew C. Place et al., Battelle Press, 2001)

4. Objectifs poursuivis : panache versus noyau

La technique du pompage et traitement de l'eau souterraine appliquée seule s'adresse principalement au panache de pollution présent dans une nappe aquifère. Comme déjà mentionné, l'objectif poursuivi peut être le traitement du panache ou la limitation de son extension par confinement hydraulique ou bien encore son interception.

Les variantes à cette technique à savoir pompage et traitement accompagné de flushing par injection d'eau, avec ou sans adjonction d'agent chimique stimulant, le pompage biphasé et le bioslurping s'adressent plus particulièrement au noyau de pollution où la charge en polluant est importante, constituée de produit pur ou de quantités importantes de produits adsorbés.

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

La technique de pompage et traitement peut être appliquée pour le traitement d'une nappe aquifère avec des résultats favorables lorsque les circonstances suivantes sont rencontrées :

- Le polluant à traiter est 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 vers la nappe est définitivement interrompue ;
- Couche aquifère de bonne conductivité hydraulique ;
- Puissance de la couche aquifère suffisante et fluctuations saisonnières peu importantes ;
- Couche aquifère homogène ou si présence de différentes couches et lentilles, propriétés hydrodynamiques des différentes couches peu différentes, absence de voies d'écoulement 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 hydrophobes ;
- Charge polluante répartie de manière homogène, absence de phase libre surnageante ou plongeante, ou emprisonnée dans des cavités, de sorte que la chute des teneurs dans la nappe suit une allure prévisible sans phénomène de retard, palier asymptotique et/ou rebond après fermeture du dispositif de pompage.

Le **Tableau 1** : inspiré du document de l'OVAM Code van Goede Praktijk – Pump and Treat, résume l'appréciation qualitative (caractéristique du polluant et structure de l'aquifère) de la faisabilité d'une intervention par pompage & traitement.

Tableau 1: Echelle de faisabilité d'un traitement de la nappe par pompage et traitement de l'eau souterraine					
Hydrologie	Polluant				
	Soluble et mobile Ex: BTEX dans un sol sableux	Soluble mais fortement adsorbé Ex: Hydrocarbures aromatiques dans un sol tourbeux	Non soluble et fortement adsorbé Ex: PCB dans un sol tourbeux	Phase libre surnageante LNAPL	Phase libre plongeante DNAPL
Une seule couche homogène	1-2	2-3	4	2-3 *	3 *
Plusieurs couches mais homogène	1-2	2-3	4	2-3 *	3 *
Hétérogène, une seule couche	2	3	4	3 *	4 *
Hétérogène, plusieurs couches	2	3	4	3 *	4 *
Matériaux fracturé : calcaire, ...	3	3	4	4 *	4 *

1, 2, Echelle de faisabilité allant de 1 = aisé à 4 traitement difficile peu réaliste

* : le traitement par pompage doit être accompagné par une variante ou une autre technique

Lorsque la variante pompage + flushing (avec ou sans stimulation chimique) est appliquée, les circonstances les plus favorables sont :

- Débit d'infiltration suffisant au niveau des puits ou des tranchées ;
- Absence de colmatage des installations d'infiltration suite à la précipitation de composés présents dans l'eau injectées (oxydes de fer, de manganèse, carbonates, matières en suspension...) ou suite à l'activité bactérienne ;
- Faible proportion relative en micropores de sorte que le déplacement du produit pur de la frange capillaire est possible compte tenu de la vitesse de migration de l'eau dans le sol ;
- En cas d'utilisation d'agents tensio-actifs, possibilité d'intercepter la totalité ou la quasi-totalité des polluants (effet sur le caractère miscible des polluants huileux).

Lorsque le traitement implique la mise en œuvre de la variante pompage biphase, un aspect favorable supplémentaire est à prendre en compte :

- La viscosité du produit pur est faible de sorte que sa vitesse de migration sera élevée.

Lorsque le traitement implique en outre une composante d'extraction de l'air du sol par venting et bio-venting, les éléments suivants sont à considérer comme des circonstances favorables :

- Présence de la zone polluée dans la zone insaturée à une profondeur supérieure à 1,5 – 2 m ou présence d'un revêtement imperméable à la surface du sol ;
- Polluant volatil (tension de vapeur et constante de Henry élevée) pour le venting ;
- Polluant facilement biodégradable en présence d'oxygène et de nutriments pour la flore bactérienne.

N.B. Les aspects ayant trait aux techniques de l'extraction des vapeurs du sol (Soil Vapour extraction) et de bio-venting font l'objet d'un Code de Bonne Pratique distinct, de sorte que ces aspects ne seront pas développés dans le présent document.

6. Examen a priori de la faisabilité technique

Pour rappel dans cette section il sera fait appel aux concepts suivants (les unités sont données dans le système international d'unités - SI) :

- La vitesse de Darcy d'un fluide dans un milieu poreux, en m/s :

$$V = K \cdot \frac{\Delta H}{\Delta L}$$

où K représente la conductivité hydraulique du milieu en m/s et le terme $\Delta H/\Delta L$ représente le gradient hydraulique en m/m.

- La vitesse de circulation de l'eau souterraine dans les pores, en m/s :

$$V_p = \frac{V}{n_e}$$

où n_e est la porosité efficace c'est-à-dire le volume relatif du sol participant effectivement à la circulation de l'eau souterraine.

- Le coefficient de partition solide liquide K_d exprimé en L/kg_{solide}:

$$K_d = \frac{C_s}{C_w}$$

où C_s représente la teneur du composé ou de l'élément dans la fraction solide du sol et C_w représente la teneur du même composé (élément) dans la fraction liquide du sol.

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).

- La vitesse de migration d'un polluant dans le sol est donnée par la relation (en m/s) :

$$V_c = \frac{V_p}{R}$$

où R est le facteur de retard estimé comme suit :

$$R = 1 + \rho_b \cdot \frac{K_d}{n}$$

où le terme ρ_b représente la densité apparente du sol en kg/m³ et le terme n la porosité totale du sol (m³/m³).

6.1. Caractéristiques limites du ou des polluants

La limite de solubilité d'un composé qu'on veut éliminer d'une nappe aquifère par pompage est un paramètre difficile à préciser. En effet, pour les hydrocarbures et autres composés organiques hydrophobes, les teneurs mesurées dans l'eau souterraine sont très souvent supérieures (de plusieurs ordres de grandeurs) aux limites de solubilité, en raison de la présence de suspensions diffuses résultant, entre autres, de l'activité microbienne. Pour les composés organiques et minéraux ionisables (tels que les composés phénoliques, par exemple), la solubilité dépend des conditions de pH de l'eau souterraine. Pour les composés métalliques, la solubilité dépend de la spéciation, elle-même dépendant de paramètres tels que le pH, le potentiel rédox EH, la présence d'ions et molécules complexant, ... Par ailleurs, un composé faiblement soluble ne sera pas présent dans l'eau souterraine à des teneurs importantes susceptibles de dépasser la valeur objectif du traitement.

Déterminer la valeur limite du facteur K_d n'est également pas un exercice aisé et ce pour les mêmes raisons que celles-exposées ci-dessus. La présence d'émulsions ou de « nuages diffus » dans les aquifères explique la présence de teneurs pour les hydrocarbures largement supérieures aux teneurs prédites sur la base des valeurs de K_{oc} obtenues au laboratoire. Pour les composés susceptibles d'être rencontrés sous différentes formes chimiques (étage d'oxydation, charge, complexation, ...) les valeurs de K_d telles qu'influencées par les paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine peuvent, par contre, être estimées par différentes équations prédictives faisant intervenir le pH, le potentiel rédox, ... Il est cependant utile de tenir compte du paradoxe suivant : une molécule caractérisée par un faible K_d sera mobile dans le sol et susceptible d'être déplacée et éliminée suite au traitement par pompage tandis qu'une molécule caractérisée par un K_d important ne sera pas mobile mais n'est pas susceptible de représenter une menace compte tenu des teneurs très faibles qui seront mesurées dans l'eau souterraine.

De manière réaliste, il tombe sous le sens qu'un traitement de la nappe par pompage peut être envisagé si le composé à éliminer est caractérisé, dans des conditions « standards » par un facteur de retard par rapport à l'eau souterraine inférieur à 10. En effet, l'obtention des objectifs de traitement par pompage n'est généralement atteinte dans des limites de temps raisonnable qu'après pompage d'un volume équivalent à 5 – 50 volumes poreux. Pour un facteur de retard supérieur à 10, le nombre de volumes poreux à pomper sort de cet intervalle « raisonnable » et le respect de délais réalistes ne peut alors être obtenu qu'en multipliant le nombre des puits ou des tranchées de prélèvement. Dans des conditions de sol standards (densité apparente de 1.600 kg/m³, porosité totale = 0,4) un facteur de retard <10 implique une valeur de $K_d < 2,25 \cdot 10^{-3}$ m³/kg.

Pour la variante pompage biphase, le paramètre viscosité dynamique est également à prendre en compte. En effet, la migration d'une phase surnageante peut être estimée à partir des relations suivantes :

$$V_n = K_n \cdot k_m (S_w, S_n) \cdot I_n$$

où : V_n représente la vitesse de Darcy pour la phase surnageante en m/s ;

K_n est la conductivité de l'aquifère pour la phase libre en m/s ;

k_m est le facteur de conductivité relative dépendant de la saturation de la couche capillaire respectivement en eau S_w et en produit pur S_n , variant de 1 (100 % saturation par la phase libre) à 0 (100 % de saturation par l'eau). La variation de la conductivité relative avec le taux de saturation dans la couche capillaire est représentée dans le graphique de la **Figure 4** ;

$\ln$ est le gradient de hauteur pour le toit de la couche surnageante en m/m.

Le terme K_n est quant à lui calculé à l'aide de la relation suivante :

$$K_n = K_w \cdot \frac{\rho_n}{\mu_n} \cdot \frac{\mu_w}{\rho_w}$$

où : K_w représente la conductivité hydraulique de la couche aquifère en m/s ;

ρ_n et ρ_w représentent la masse spécifique de la phase libre et de l'eau respectivement en kg/m³ ;

μ_n et μ_w représentent la viscosité dynamique de la phase libre et de l'eau respectivement en Pa.s.

Le paramètre de conductivité relative dépendant de la distribution de la taille des pores, (de la courbe d'humectation du sol), du degré de saturation en eau et phase libre de la couche capillaire, de l'épaisseur de la couche libre, ... Est un paramètre malaisé à déterminer de manière précise et requiert des analyses en laboratoire sur des échantillons de sol à structure conservée.

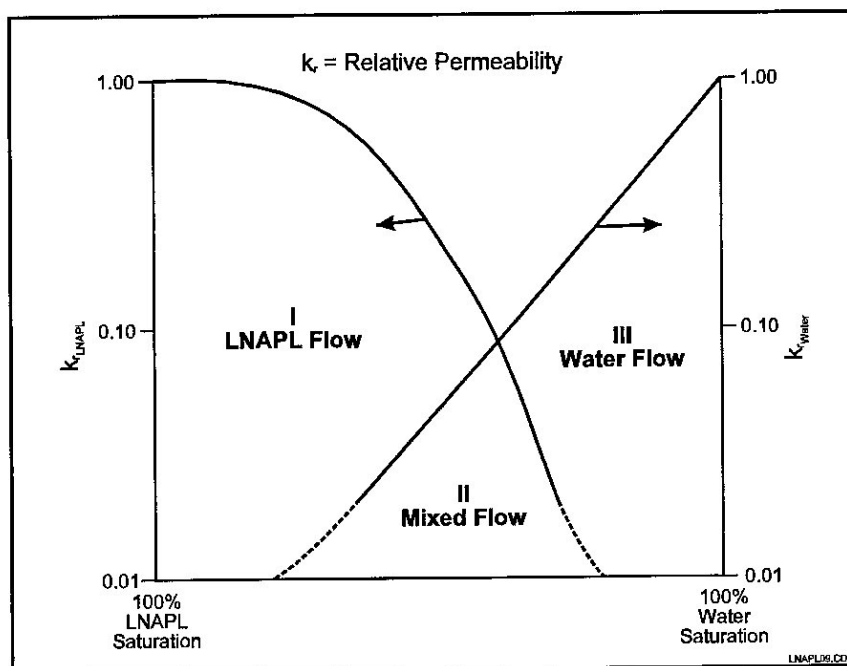


FIGURE 4. Hypothetical relative permeability curves for water and LNAPL in a porous medium (Modified from U.S. EPA, 1995)

(Extrait de « Principles and Practices of Bioslurping » Matthew C. Place et al., Battelle Press, 2001)

Le **Tableau 2** ci-après présente le ratio K_n/K_w pour différents composés couramment rencontrés sous forme de phases libres surnageantes.

Tableau 2 : Viscosité de différents composés organiques et conductivité de la couche aquifère pour leur phase libre

Composé	Viscosité dynamique en Pa.s	Masse volumique en Kg/m ³	K_n/K_w
Eau 20 °c	1.00E-03	1.00E-03	1.00E+00

Essence	5.29E-04	7.50E-04	1.42E+00
Kérosène JP5	1.50E-03	8.20E-04	5.47E-01
Benzène	6.40E-04	8.80E-04	1.38E+00
Toluène	5.90E-04	8.70E-04	1.47E+00
Gasoil	1.25E-02	8.90E-04	7.12E-02
Fuel lourd	4.00E-01	9.30E-04	2.33E-03
Huile graissage SAE 10	8.80E-02	9.30E-04	1.06E-02

Il tombe sous le sens que, en conditions standards, la faisabilité d'un traitement par pompage biphasé d'une phase libre surnageante est compromise si cette phase est caractérisée par un rapport μ/p (viscosité cinématique) 10 à 20 fois supérieur à celui de l'eau.

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.

Tableau 3 : Paramètres critiques du sol permettant d'envisager un traitement par pompage

Propriété du sol	Paramètre	Unité	Valeur limite
Conductivité hydraulique de la couche aquifère (couche homogène)	Conductivité hydraulique K	m/s	$> 5 \cdot 10^{-7}$
Différence de conductivité hydraulique des différentes couches si l'aquifère est hétérogène	Ratio entre le différent conductivité K1/K2	-	< 10 à 20
Puissance de la nappe aquifère	Puissance	m	$> 1,5$
Fluctuations saisonnières	Variations saisonnière de la hauteur piézométrique	m	< 1 m en valeur absolue
Profondeur du toit de la nappe	Hauteur piézométrique par rapport à la surface du sol	m	< 40
Lentilles ou couches tourbeuses à fort pouvoir d'adsorption des polluants à éliminer	Présence de tourbe		Couches ou lentilles tourbeuses absentes
Teneurs en Fer, Manganèse, carbonates de l'eau pompée impliquant un risque de colmatation des installations de traitement	Teneurs en Fer, Mn, carbonates	mg/l	Risques de précipitation selon les paramètres pH, Eh, ... à calculer via des logiciels géochimiques

Le **Tableau 3** requiert les commentaires suivants :

- La valeur limite de profondeur de la nappe aquifère à traiter n'est pas fixée sur base de considérations techniques mais sur la base de considérations de coûts énergétiques pour remonter l'eau contaminée vers la surface.

Si le traitement de la nappe repose sur la mise en œuvre de la variante injection d'eau avec ou sans agent chimique stimulant, les paramètres suivants sont également critiques :

- La capacité d'infiltration du sol doit être suffisante pour alimenter la nappe en eau et/ou en agent stimulant de manière satisfaisante. Les débits d'injections doivent compenser, au moins partiellement, les débits pompés. Définir une valeur limite de capacité d'infiltration n'est pas réaliste étant donné que différents modes d'injection sont possibles (tranchées perdantes, puits d'injection,) dont les performances sont tributaires de paramètres différents : conductivité du sol insaturé, conductivité hydraulique verticale, conductivité hydraulique horizontale,
- Si la réinjection des eaux pompées et traitées est envisagée, les paramètres physico-chimiques critiques suivants peuvent être pris en compte (Extrait du document de l'OVAM « Code van Goede Praktijk – Pump and Treat ») afin de limiter les risques de colmatage des ouvrages de réinjection :

Tableau 4 : Paramètres critiques des eaux d'infiltration

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

6.3. 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 eaux ainsi que le dispositif de traitement des fluides pompés et éventuellement le dispositif de réinjection des eaux.
- Risque de stabilité : les infrastructures présentes sur le site et les environs immédiats ne sont pas susceptibles de connaître des problèmes de stabilité en cas d'abaissement du niveau de la nappe (cf. code auxiliaire 3, rabattement de nappe) ;
- Cibles sensibles : il n'existe pas sur le site et dans les alentours immédiats de cibles sensibles susceptibles d'être affectées rapidement en cas d'échec des mesures d'interception ou de confinement du panache de pollution ou en cas d'injection d'agent chimiques stimulants.
- 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,
- Possibilité de prendre en charge les eaux traitées et les autres produits résultant du traitement : présence d'accès au réseau d'égouttage, présence d'éléments des eaux de surface,
- 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'eau (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 5A, 5B et 5C** présentent les paramètres, mesurés et/ou quantifiés avant le lancement d'un programme de traitement d'un cas de pollution des eaux souterraines par pompage.

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 risque, **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 indispensable dans tous les cas de figure ;
- Paramètres dont la mesure ou l'estimation est utile.

Deux types de situations sont également pris en compte :

- Petits chantiers d'intervention ;
- Grands chantiers d'intervention.

Cette distinction ne repose pas sur un critère de taille de la parcelle ou de l'installation source de pollution mais bien sur l'échelle de la surface d'intervention. En effet, un petit site tel qu'un atelier de nettoyage à sec ou une station-service par exemple peut être à l'origine d'un panache de pollution très vaste tandis qu'à contrario, un grand site ou une grande parcelle peut renfermer ou être à l'origine d'une contamination d'une extension très limitée. Par surface d'intervention, il faut comprendre l'extension du panache à traiter, confiner ou intercepter (zone où la teneur > Valeur d'intervention ou valeur objectif).

De manière arbitraire, la distinction suivante est faite :

- Petits chantiers d'intervention : extension du panache $\leq 1.000 \text{ m}^2$;
- Grands chantiers d'intervention : extension du panache $> 1.000 \text{ m}^2$.

Outre ce critère de surface, les circonstances aggravantes suivantes sont à prendre en compte :

- Présence d'une installation de captage à des fins de distribution publique susceptible d'être atteinte dans un délai inférieur à 4 ans ;
- Risque avéré de migration verticale vers une couche aquifère à valeur économique dans un délai inférieur à 4 ans.

Les circonstances atténuantes suivantes sont également prises en compte :

- Panache de pollution dont la migration verticale et horizontale est = 0 **et**
- Panache de pollution entièrement circonscrite dans une seule parcelle cadastrale.

Dans ce cas la superficie discriminante du panache est de 5.000 m^2 (gros chantier d'intervention : extension du panache $> 5000 \text{ m}^2$).

Tableau 5A : Paramètres des polluants à mesurer avant lancement d'une opération de pompage et traitement – Chantier de grande taille

Paramètres	Moyens de mesure	Commentaires
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, prélèvements et analyses d'échantillons de sol et tracé des délimitations (p.ex. krigeage)	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Estimation de la charge polluante totale	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 (p. ex. krigeage)	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Spéciation chimique du polluant	Paramètres de la nappe (pH, Eh, autres composants) et diagrammes de stabilité ou logiciels d'examen géochimique	
Facteur de retard	Valeurs du Kd et porosité efficace de l'aquifère	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration longitudinale du polluant (progression du panache selon la direction d'écoulement de l'eau souterraine)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et verticale ... Ou utilisation de modèles numériques	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration longitudinale avérée du polluant (progression du panache selon la direction d'écoulement de l'eau souterraine)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Vitesse de migration latérale dans le sol (extension latérale du panache lors de sa migration)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et verticale Ou utilisation de modèles numériques	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration latérale avérée du polluant (extension latérale du panache lors de sa migration)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Vitesse de migration verticale dans le sol (extension verticale du panache lors de sa migration)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et verticale Ou utilisation de modèles numériques	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration verticale avérée du polluant (extension verticale du panache lors de sa migration)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Présence d'une phase libre		
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 dans les piézomètres	
Mobilité de la phase libre	Tests de récupération sur site et estimation préalables par calcul ou utilisation de modèles	
	Mesures de la viscosité dynamique de la phase libre	

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

= paramètre dont la mesure ou l'estimation est utile

Tableau 5B : Paramètres des polluants à mesurer avant lancement d'une opération de pompage et traitement – Chantier de petite taille

Paramètres	Moyens de mesure	Commentaires
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, prélèvements et analyses d'échantillons de sol et tracé des délimitations (krigeage)	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Estimation de la charge polluante totale	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, prélèvements et analyses d'échantillons, tracé des délimitations (krigeage)	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Spéciation chimique du polluant	Paramètres de la nappe (pH, Eh, autres composants) et diagrammes de stabilité ou logiciels d'examen géochimique	
Facteur de retard	Valeurs du Kd et porosité efficace de l'aquifère	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration longitudinale du polluant (progression du panache selon la direction d'écoulement de l'eau souterraine)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et verticale ... Ou utilisation de modèles numériques	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration longitudinale avérée du polluant (progression du panache selon la direction d'écoulement de l'eau souterraine)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Vitesse de migration latérale dans le sol (extension latérale du panache lors de sa migration)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et verticale ... Ou utilisation de modèles numériques	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration latérale avérée du polluant (extension latérale du panache lors de sa migration)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Vitesse de migration verticale dans le sol (extension verticale du panache lors de sa migration)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et verticale ... Ou utilisation de modèles numériques	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration verticale avérée du polluant (extension verticale du panache lors de sa migration)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Présence d'une phase libre		
Nature chimique de la phase libre	Prélèvement et analyse d'au moins 1 échantillon 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	
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 faites dans les piézomètres	
Mobilité de la phase libre	Tests de récupération sur site	
	Mesures de la viscosité dynamique de la phase libre	

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

Tableau 5C : Paramètres du sol et des eaux souterraines à mesurer avant lancement d'une opération de pompage et traitement – Chantier de grande taille

Paramètre	Moyens de mesure	Commentaires
Paramètres hydrodynamiques du sol		
Stratigraphie du sol : couches(s) aquifères, aquitard, aquicludes, ...	Cartes géologiques, géotechniques, sondages et description des couches de sol	Disponible au terme de l'étude détaillée
Piézométrie de ou des aquifère(s), gradients hydrauliques, sens d'écoulement, caractère confiné ou semi-confiné	Cartes géologiques, géotechniques, sondages et description des couches de sol, placement de piézomètres, mesures piézométriques et calage en altimétrie	Disponible au terme de l'étude détaillée
Puissance de la couche aquifère ou des couches aquifères	Cartes géologiques, géotechniques, sondages et description des couches de sol	Disponible au terme de l'étude détaillée
Variations saisonnières des niveaux piézométriques	Suivi piézométrique lors de campagnes successives	
Conductivité hydraulique, anisotropie, coefficient d'emménagement de la ou des couches aquifères devant faire l'objet d'une intervention	Test de pompage de longue durée avec piézomètres d'observation	
Rayons d'influence d'un puits de pompage	Test de pompage de longue durée avec piézomètres d'observation	
Relation rabattement et débits pompés	Test de pompage de longue durée avec piézomètres d'observation	
Degré de confinement des différentes couches aquifères superposées	Test de pompage de longue durée avec piézomètres d'observation	
En cas de présence d'une phase libre		
Vitesse de récupération de la phase libre par écrémage	Voir essai pilote	
Vitesse de récupération de la phase libre par Bioslurping	Voir essai pilote	
Rayon d'action du bioslurping dans la phase libre	Voir essai pilote	
Caractéristiques physico-chimiques de l'eau pompée		
Paramètres physico-chimiques de l'eau pompée : teneurs en Fer, Manganèse, Arsenic, Carbonates, particules en suspension, pH, Eh, Sulfates,	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	
En cas d'injection d'eau avec ou sans agents chimiques stimulants		
Capacité d'infiltration du sol par injection dans la couche insaturée et/ou dans la couche saturée (puits, drains ou tranchées)	Test d'infiltrations en continu, ou par intermitance sur le terrain	Avec prise en compte de l'influence des adjuvants sur la capacité d'infiltration du sol (stabilité de la structure, ...)
Paramètres physico-chimiques de l'eau pompée et traitée : teneurs en fer, manganèse, arsenic, carbonates, particules en suspension, risque de colmatation	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	
Capacité du dispositif d'intercepter la totalité ou la quasi-totalité des composés injectés et des polluants dont la mobilité est stimulée	Voir essai pilote + simulation à l'aide de modèles d'écoulement et de transport	

Tableau 5D : Paramètres du site d'intervention à évaluer avant lancement d'une opération de pompage et traitement

Paramètre	Moyens de mesure et d'observation	Commentaires
Présence d'impétrants dans le sol au droit du site et ses alentours immédiats	Consultation des concessionnaires des réseaux d'impétrants, commune	Réalisé lors des études de reconnaissance et détaillées
	Détection sur le terrain : pré-fouilles, passage au détecteur CAT, ...	Réalisé lors des études de reconnaissance et détaillées
Présence de cibles aériennes sensibles au bruit, odeurs, vapeurs, ... Sur le site et dans ses alentours immédiats	Inventaire	
Présence de cibles sensibles au niveau de l'aquifère traité et les autres aquifères sous-jacents	Inventaire des installations de captage proches, étude hydrogéologique	Réalisé lors de l'étude détaillée
Accessibilité du site aux équipements et surface disponible suffisante	Inventaire	
Présence d'infrastructures dont la stabilité pourrait être menacée suite au rabattement	Inventaire et étude de stabilité si le rabattement est important, notamment supérieur aux variations saisonnières	
En cas d'injection ou de réinjection avec ou sans agents chimiques stimulants		
Présence d'infrastructures susceptibles d'être menacées par des agents chimiques de stimulation	Inventaire des infrastructures susceptibles d'être impactées par les agents oxydants (conduites métalliques), tensio-actifs (goudrons isolants), acidifiants (Ex: bétons), ...	
Présence d'infrastructures susceptibles d'être impactées par une remontée de la nappe	Inventaire des infrastructures sensibles : voiries, parkings, ...	

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

Tableau 5E : Paramètres du sol et des eaux souterraines à mesurer avant lancement d'une opération de pompage et traitement – Chantier de petite taille

Paramètre	Moyens de mesure	Commentaires
Paramètres hydrodynamiques du sol		
Stratigraphie du sol : couches(s) aquifères, aquitards, aquicludes, ...	Cartes géologiques, géotechniques, sondages et description des couches de sol	Disponible au terme de l'étude détaillée
Piézométrie de ou des aquifères, gradients hydrauliques, sens d'écoulement, caractère confiné ou semi confiné	Cartes géologiques, géotechniques, sondages et description des couches de sol, placement de piézomètres, mesures piézométriques et calage en altimétrie	Disponible au terme de l'étude détaillée
Puissance de la couche aquifère ou des couches aquifères	Cartes géologiques, géotechniques, sondages et description des couches de sol	Disponible au terme de l'étude détaillée
Variations saisonnières des niveaux piézométriques	Suivi piézométrique lors de campagnes successives	
Conductivité hydraulique de la ou des couches aquifères devant faire l'objet d'une intervention	Mesures sur le terrain de courte durée : slug tests, tests de pompage de courte de durée (régime transitoire)	
Relation rabattement - débits pompés	Equation prédictives : Dupuit ...	
Rayons d'influence d'un puits de pompage	Calcul à l'aide d'équations empiriques prédictives (Sichardt, Choultse, ...)	
Degré de confinement des différentes couches aquifères superposées	Prises d'échantillons des différentes couches de sol et mesure de la texture	
	Prise d'échantillons à structure conservée et mesure de la conductivité hydraulique au laboratoire	
En cas de présence d'une phase libre		
Vitesse de récupération de la phase libre par écrémage	Test de l'efficacité de la technique lors de la période de démarrage + analyse des résultats lors du rapport intermédiaire	
Vitesse de récupération de la phase libre par Bioslurping	Test de l'efficacité de la technique lors de la période de démarrage + analyse des résultats lors du rapport intermédiaire	
Rayon d'action du bioslurping dans la phase libre	Test de l'efficacité de la technique lors de la période de démarrage + analyse des résultats lors du rapport intermédiaire	
Caractéristiques physico-chimiques de l'eau pompée		
Paramètres physico-chimiques de l'eau pompée : teneurs en fer, manganèse, arsenic, carbonates, particules en suspension, pH, Eh, Sulfates,	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	
En cas d'injection d'eau avec ou sans agents chimiques stimulants		
Capacité d'infiltration du sol par injection dans la couche insaturée et/ou dans la couche saturée (puits, drains ou tranchées)	Test d'infiltrations en continu ou par intermittence sur le terrain	Avec prise en compte de l'influence des adjuvants sur la capacité d'infiltration du sol (stabilité de la structure, ...)
Paramètres physico-chimiques de l'eau pompée et traitée: teneurs en fer, manganèse, arsenic, carbonates, particules en suspension, risque de colmatation	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	
Capacité du dispositif d'intercepter la totalité ou la quasi-totalité des composés injectés et des polluants dont la mobilité est stimulée	Lors des tests en période de démarrage, piézomètres d'observation	
	Simulation à l'aide de modèles simplifiés d'écoulement et de transport	

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

Ces tableaux appellent les commentaires suivants :

- Source de pollution éradiquée ou non : cuve perdante, canalisation percée, poche de contaminant dans une cave, ... Comme pour toutes les opérations de traitement in situ, ce volet des informations pour le traitement par pompage est capital, sans quoi les délais de traitement risquent de rester très longs et le suivi des opérations se limitera à enregistrer une succession de freins du traitement (stabilisation par paliers) et de rebonds observés lors de l'interruption du pompage. Une certitude quant à l'absence de source de pollution résiduelle doit donc être obtenue avant le lancement d'une opération par pompage.
- De la même manière, les sources secondaires de pollution que constitue par exemple une colonne de sol fortement pollué (avec ou sans produit pur) susceptible d'être à l'origine d'un flux de polluants en direction de la nappe suite à l'infiltration des eaux météoriques, doivent être éradiquées ou prises en compte avant le lancement d'une opération de traitement par pompage. Cette prise en charge peut être faite par un procédé de traitement couplé au pompage : excavation, traitement thermique, confinement physique du noyau de pollution, ... ou par la mise en œuvre d'une variante : infiltration d'eau avec ou sans agents chimiques stimulants.
- Nature chimique de la phase libre : 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 carburants, 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.
- L'extension latérale précise d'une phase libre plongeante ou surnageante ne peut être faite qu'à l'aide d'un réseau de piézomètres (coupants pour la LNAPL). Le placement de piézomètres pouvant être coûteux (nappe profonde), une reconnaissance préalable des limites de cette phase peut être menée à l'aide d'outils d'investigation moins coûteux tels que la mesure des teneurs en composés volatils (BTEX et VOCL) dans les couches insaturées et saturées du sol ou les mesures de teneurs en composés volatils présentes dans la phase gazeuse du sol.
- L'estimation de l'épaisseur de la couche de produit pur présente en surface d'une nappe aquifère (LNAPL) peut être faite sur la base des épaisseurs de produits purs mesurées dans les piézomètres à l'aide, par exemple, de la relation suivante (Lenhard and Parker, 1990):

$$D_o = \frac{\rho_{ro} \beta_{ao} H_o}{\beta_{ao} \rho_{ro} - \beta_{ow} (1 - \rho_{ro})}$$

où : D_o est l'épaisseur réelle de la phase libre dans le sol (en m) ;
 H_o est l'épaisseur de la phase libre dans le piézomètre (en m) ;
 ρ_{ro} est la densité relative de la LNAPL (sans unité) ;

β_{ao} représente l'air/huile « scaling factor » équivalent au ratio : $\frac{\sigma_{aw}}{\sigma_{ao}}$

où : σ_{aw} est la tension superficielle de l'eau en N/m ;
 σ_{ao} est celle de la LNAPL en N /m ;

β_{ow} représente l'huile/eau "scaling factor" équivalent au ration : $\frac{\sigma_{aw}}{\sigma_{ow}}$

où σ_{ow} est la tension interfaciale huile/eau en N/m.

Pour un sol de texture sablo-limoneuse, le **Tableau 6** ci-après donne quelques exemples de ratios calculés entre l'épaisseur mesurée dans les piézomètres et les épaisseurs de produit pur attendues sur le toit de la nappe. Attention doit être attirée sur le fait que ces relations donnent des résultats très différents selon les types de sol (diamètres des capillaires).

Tableau 6 : Relation entre épaisseurs de la LNAPL mesurées dans les piézomètres de contrôle et l'épaisseur attendue sur le toit de la nappe dans le sol

Produit	σ_{wa} N/m	σ_{oa} N/m	β_{ao}	ρ_{pro}	σ_{ow} N/m	β_{ow}	Do/Ho
Essence	0.0728	0.02	3.64	0.79	0.0528	1.3788	1.11
Kérosène JP4	0.0728	0.025	2.912	0.83	0.0478	1.5230	1.12
Diesel	0.0728	0.032	2.275	0.84	0.0408	1.7843	1.18

- Les tests de récupération de la phase libre visent à estimer la viscosité de la phase libre et la faisabilité d'une récupération par écrémage et éventuellement par bio-slurping. Il est recommandé d'effectuer différentes séquences de vidanges et remontée dans les puits/piézomètres d'observation de manière à distinguer entre récupération initiale (vidange du tube et du massif filtrant) et récupération à rythme soutenu.
- Le débit de récupération d'une phase libre surnageante suit l'équation générale suivante :

$$V_n = K_n \cdot k_m (S_w, S_n) \cdot I_n$$

où le gradient de migration I_n prend la forme suivante :

$$I_n = (\Delta H + P_a) / L$$

Où : ΔH est la hauteur de rabattement de la couche libre lors de l'écrémage (m);

P_a est la dépression développée dans le puits en cas de slurping (m);

L est le rayon d'action de l'écrémage ou du slurping au sein de la phase libre (m).

Les autres paramètres impliqués ont été préalablement développés à la page 14.

Différents modèles permettent d'estimer la vitesse de migration d'une LNAPL lors d'une opération d'écrémage ou de slurping (MOVER, ...).

- **Tests de pompage de longue durée** : ces tests reposent typiquement sur la mise en place du dispositif suivant: un ou plusieurs puits de pompage équipé(s) d'une pompe avec débitmètre et un dispositif de mesure du niveau piézométrique: mesures récurrentes manuelle à l'aide d'une sonde piézométrique ou utilisations de « Divers » calibrés par un capteur barométrique, des piézomètres d'observations disposés en couronnes concentriques autour du(es) puits de pompage. Ces tests de pompage sont menés en écoulement transitoire de manière à déterminer les paramètres de transmissivité et coefficient d'emménagement de l'aquifère (formule de Theis pour les nappes captives, formule de Jacob pour les nappes libres). En régime permanent, le paramètre conductivité hydraulique est obtenu à partir des formules de Thiem. Pour les puits incomplets (ne s'étendant pas sur toute la puissance de l'aquifère) d'autres formules sont à appliquer en régime permanent (Forchheimer,

Babouchkine et Guirinsky, Porchet, Vibert, ...). Différents logiciels peuvent être utilisés pour interpréter les résultats des tests (Aquifer test, ...)

- Les tests de courte durée: slugtests, tests de percolation (falling head), essai Lefranc demandant quelques heures sont menés en préalable aux chantiers de petite taille. Les résultats sont interprétés à l'aide de formules telles que Hvorslev, ... Différents logiciels existent également pour l'interprétation des résultats de ces tests (Aquifer test, Fallhead 1.0, ...)
- Le rayon d'influence des puits de pompage: il est idéalement mesuré à l'aide de piézomètres d'observation disposés à des distances croissantes du puits de pompage lors de l'exécution de tests de longue durée. Lorsque cette option n'est pas réalisable, ce paramètre est estimé à partir des résultats des tests de pompage (lois de Dupuit) ou à partir de formules empiriques faisant intervenir la conductivité hydraulique : formules de Sichardt, Choultse,
- Les caractéristiques physico-chimiques des eaux pompées et éventuellement réinjectées dans le sol après traitement, doivent impérativement être analysées de manière à anticiper les problèmes de colmatage des infrastructures de traitement et d'infiltration. Ces paramètres sont : pH, Eh, teneurs en fer, manganèse, carbonates, sulfates et matière en suspension.

7.2. Nécessité d'essais préalable au laboratoire

En règle générale, la mise en œuvre d'un traitement de la nappe par pompage n'implique pas l'exécution préalable de tests de laboratoire préalable.

Au cas où la variante injection d'eau + agent chimiques stimulants est utilisée, un test de laboratoire (test de lessivage du sol de l'aquifère à traiter en colonne) est nécessaire afin de démontrer l'intérêt de l'adjonction d'un agent chimique : agents tensio-actif, agent oxydant, agent complexant, ... Le test en colonne visera à déterminer le gain en volumes poreux devant être pompés pour atteindre l'objectif **de traitement** résultant de l'adjonction de l'agent chimique stimulant. Un deuxième intérêt de ce type de test préalable réside dans l'acquisition de données sur les caractéristiques des eaux qui seront pompées et devront être prises en charge : pics de teneurs, composés présents, état physique des polluants : émulsionnés, complexés, ... La difficulté de ce type de test réside dans la nécessité d'effectuer des tests sur des échantillons de sol strictement identiques ou comparables. Dans le cas où les teneurs résiduelles dans le sol sont fluctuantes de place en place, la prise des échantillons et leur préparation avant soumission aux tests revêtent un aspect capital.

Les prescriptions types des tests de laboratoire sont spécifiées uniquement pour les agents tensio-actifs utilisés pour favoriser la mobilité des hydrocarbures dans le sol.

Tableau 7 : Prescriptions pour des tests en laboratoire sur des échantillons de sol de couches aquifères à traiter par pompage + adjonction d'agents tensio-actifs

Modalité	Prescriptions
Type d'agent tensio-actif	Type biodégradable : biodégradabilité primaire >80 % en 21 jours et biodégradabilité secondaire >60 % en 28 jours
Type de sol à tester	Echantillon de sol à structure conservée, 1 set d'échantillons par type de sol rencontré dans la couche aquifère; dans chaque set, 8 échantillons : (1 blanc + 3 traitements) X 2 répétitions
	Teneurs initiales en hydrocarbures dans les échantillons de sol (réalisé sur un tronçon indépendant de l'échantillon)
Type de colonne	Selon les laboratoires et les équipements disponibles ; diamètre de 2" minimum, longueur de 30 cm minimum
Type de test	Test de lessivage en condition saturée, flux ascendant (air piégé)
Paramètres à tester	Types ou teneurs des agents tensio-actifs à utiliser : 3 traitements à tester au minimum.
	Evolution des teneurs en hydrocarbures dans les eaux de percolation : comparaison entre blanc et traitements par adjonction de tensio-actifs, estimation du nombre de volumes poreux pour atteindre les objectifs de traitement
	Importance du phénomène de rebond des teneurs après arrêt de 48 h du lessivage, les conditions de saturation étant maintenues
	Bilans de masse des hydrocarbures dans le sol après traitement
	Evolution des teneurs en agents tensio-actifs et bilan de masse des agents utilisés : quantités introduites - quantités lessivées

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

L'exécution d'un chantier de pompage et traitement de l'eau souterraine, que ce soit en vue de confiner de manière hydraulique, intercepter ou même traiter un panache de contamination, fait appel à une technique éprouvée. Sur la base des dispositions prévues par le chapitre VII 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, il n'y a pas lieu de procéder à un essai pilote, quelle que soit la taille du chantier. Toujours selon ce même chapitre, les données recueillies lors de la phase de démarrage feront l'objet d'un examen lors du (premier) rapport intermédiaire de suivi.

L'utilisation de la variante injection d'eau avec ou sans adjonction d'agent chimique stimulant n'implique pas non plus l'obligation de mettre en place un test pilote vu que le principe même du traitement reste inchangé de sorte que la technique peut encore être considérée comme éprouvée.

Lorsque le chantier de traitement de la nappe aquifère par pompage implique la récupération d'une phase libre par écrémage ou bioslurping, l'exécution d'un test pilote est requise pour les grands chantiers. Pour les petits chantiers, cette étape n'est pas requise compte tenu de son caractère financièrement déraisonnable.

Les paramètres à définir lors de l'exécution du test pilote sont donnés dans le **Tableau 8** reproduit ci-après. Dans le cas d'une phase libre plongeante, les situations rencontrées sont trop particulières que pour faire l'objet d'une généralisation sous forme de tableau.

Tableau 8 : Paramètres et contenu des tests pilotes pour le traitement d'une phase libre surnageante par pompage et bioslurping

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 avec ou sans valve de mise à vide, tube de succion), piézomètres d'observation (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête), dispositif de mesure des débits des différents fluides (type, localisation, ...), dispositif de mesure de la succion en cas de bioslurping (type, localisation), conduite d'amenée des fluides et station de séparation et traitement des fluides pompés	La localisation des différents éléments du dispositif fait l'objet de figures à joindre en annexe 6 du Projet.
Puits	Un ou plusieurs puits localisés au sein de la nappe de surnageant. Longueur crépinée s'étendant jusqu'à 1 m au-dessus du niveau de la couche de produit pur et jusqu'à 1 m sous le niveau maximum de rabattement	
Piézomètres d'observation	Localisés en couronnes concentriques autour du ou des puits de pompage et crépinés comme les puits de pompage. La couronne de piézomètres la plus distante doit permettre de délimiter le rayon d'influence du pompage sur le niveau de la nappe	
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
Ecrémage simple avec skimmer ou pompe à membrane	Mesure des débits de produit pur et d'eau souterraine pompés. Examen périodique de la nature du produit pur. Mesure de la diminution de l'épaisseur de la couche surnageante dans les piézomètres d'observation. Mesure du rayon d'influence de l'écémage sur la couche de produit pur. Mesure du changement éventuel de l'extension de la couche de produit pur. Evaluation des risques de colmatation des installations de traitement. Teneurs en polluants des eaux traitées et nécessité d'une étape complémentaire du traitement (filtre à charbon actif).	
	Bilan de masse : ratio produit pur pompé/produit pur présent sur la période du test. Teneurs résiduelles dans le sol de la couche capillaire	
	Faisabilité technique du traitement : nombre de puits de pompage, durée du traitement, consommation énergétique nécessaire, efficacité de la station de traitement ... Définition des paramètres de suivi	
	Dimensionnement du dispositif de traitement en grandeur réelle : nombre et distance entre les puits, débits de produit pur et d'eau pompés, durée du traitement, dimension et éléments constitutifs de la station de traitement, quantités de fluides traités à rejeter ou valoriser, Définition des paramètres de suivi	
Ecrémage avec rabattement (une seule pompe ou un skimmer + 1 pompe de rabattement)	Mesure des débits de produit pur et d'eau souterraine pompés et nécessité d'un traitement de l'eau souterraine. Examen périodique de la nature du produit pur. Mesure de la teneur en polluants de l'eau pompée. Mesure de la diminution de l'épaisseur de la couche surnageante dans les piézomètres d'observation. Mesure du rayon d'influence de l'écémage sur la couche de produit pur et sur le niveau de la nappe aquifère. Mesure du changement éventuel de l'extension de la couche de produit pur. Evaluation des risques de colmatation des installations de traitement. Teneurs en polluants des eaux traitées et nécessité d'une étape complémentaire du traitement (filtre à charbon actif,...)	
	Bilan de masse : ratio produit pur pompé/produit pur présent sur la période du test. Teneurs résiduelles dans le sol de la couche capillaire	
	Faisabilité technique du traitement : nombre de puits de pompage, durée du traitement, volumes d'eau à prendre en charge, consommation énergétique nécessaire, ...	
	Dimensionnement du dispositif de traitement en grandeur réelle : nombre et distance entre les puits, débits de produits purs et d'eau pompés, durée du traitement, nécessité de traiter l'eau pompée par la pompe de rabattement, dimension et équipements de la station de traitement, quantités de fluides traités à rejeter ou valoriser, ... Définition des paramètres de suivi	
Bioslurping	Mesure des débits de produit pur, d'eau souterraine et de gaz pompés. Examen périodique de la nature du produit pur. Mesure de la teneur en polluants de l'eau et des gaz pompés. Mesure de la teneur en O ₂ et CO ₂ dans les gaz pompés. Mesure de la diminution de l'épaisseur de la couche surnageante dans les piézomètres d'observation. Mesure du rayon d'influence de l'écémage sur la couche de produit pur et sur le niveau de la nappe aquifère. Mesure du vide dans le puits de pompage, les piézomètres d'observation et mesure du rayon d'influence du pompage sur le gaz du sol. Mesure du changement éventuel de l'extension de la couche de produit pur. Evaluation des risques de colmatation des installations de traitement. Teneurs en polluants des eaux et des gaz traités et nécessité d'une étape complémentaire du traitement (filtre à charbon actif,...)	Les aspects ayant trait à la SVE (Soil Vapour Extraction) et au Bio-venting font l'objet d'un code de bonne pratique distinct
	Bilan de masse : ratio produit pur pompé/produit pur présent sur la période du test. Teneurs résiduelles dans le sol de la couche capillaire	
	Faisabilité technique du traitement : nombre de puits de pompage, durée du traitement, volumes d'eau, de produit pur et de gaz à prendre en charge, consommation énergétique nécessaire, ...	
	Dimensionnement du dispositif de traitement en grandeur réelle : nombre et distance entre les puits, débits de produit pur et d'eau pompés, vide à mettre en place, durée du traitement, dimension et équipements de la station de traitement, quantités de fluides traités à rejeter ou valoriser, Définition des paramètres de suivi.	

8. Description d'une installation type et schéma de l'installation

Une installation d'intervention par pompage des eaux souterraines comprend typiquement les éléments suivants.

8.1. L'objectif est l'interception d'un panache migrant vers une cible sensible

- Un ou plusieurs drains ou fossés d'interception et/ou d'un rideau de puits d'interception, localisés en aval hydrogéologique du panache, entre celui-ci et la cible sensible identifiée. Les fossés ou drains d'interception de même que les puits doivent avoir la profondeur suffisante pour être en mesure d'intercepter la totalité de la puissance du panache prévue à l'endroit de l'interception (compte tenu de la dispersion verticale). En cas de panache de puissance importante, le rideau de puits sera composé de puits équipés de crépines situées à des profondeurs différentes et séquentielles. En cas de drains placés par forages dirigés, le placement de drains superposés peut constituer une option. Les distances entre les ouvrages d'interception et l'extension du dispositif sont calculés pour intercepter le panache dans toute son extension.
- Un dispositif de pompage de l'eau interceptée : pompe foulante immergée à flotteur établie dans une chambre de visite établie dans un point bas de la tranchée, pompe immergée dans les puits de pompage, pompe à vide connectée à une ou plusieurs tranchées, un ou plusieurs drains, un ou plusieurs puits, ... De manière à réduire les nuisances acoustiques, les unités de pompage aériennes peuvent être situées dans des enceintes isolées (caissons, containers, ...)
- Un dispositif de régulation du pompage pouvant prendre des formes très variées : systèmes à flotteurs pour les pompes immergées, capteurs électriques (niveau max – niveau min) dans les drains, fossés et puits, capteurs dans les différents éléments de la station de traitement, connectés à un coffret électrique de régulation des pompes, systèmes à horlogerie, systèmes séquentiels assurant le fonctionnement en séquence de différentes zones de pompage, ...
- Des conduites de collecte et d'amenée de l'eau pompée reliant les pompes à la station de traitement. Ces conduites préférentiellement enterrées sont équipées de clapets anti-retour et de débitmètres permettant de suivre en instantané et en cumulé les volumes pompés au niveau des puits individuels ou au niveau des pompes.
- Une station de traitement des eaux pompées. Les installations assurant les différentes étapes du traitement sont : un bac tampon (en cas de pics de débits), un bac débourbeur + un équipement d'injection d'additif (en cas de présence importante de matières en suspension susceptibles de sédimenter et flocculer), un séparateur (+ filtre à coalescence, si présence importante d'une phase libre surnageante), une tour de stripping (en cas de présence de polluants volatiles), une installation de finition du traitement de l'eau si nécessaire (filtre à charbon actif, ...), un ou plusieurs points de rejet dans le réseau d'égouttage public ou les eaux de surface, le cas échéant, une installation de traitement des vapeurs extraites dans la tour de stripping avant leur rejet dans l'atmosphère. La station de traitement est équipée de points d'échantillonnage situés de telle sorte qu'il soit possible d'échantillonner l'eau pompée provenant des différents puits individuels ou des différentes pompes, l'eau issue du traitement avant son rejet, 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 débordements, pannes et dysfonctionnements.

- Un dispositif de suivi et monitoring (voir chapitre 11).

8.2. L'objectif est le confinement hydraulique d'un panache

- Un ou plusieurs drains ou fossés de pompage et/ou d'un maillage de puits de pompage, localisés au sein ou en périphérie du panache à confiner. Les fossés ou drains de pompage de même que les puits doivent avoir la profondeur suffisante pour être en mesure d'intercepter la totalité de la puissance du panache. En cas de panache de puissance importante, le maillage de puits sera composé de puits équipés de crépines situées à des profondeurs différentes et séquentielles. En cas de drains placés par forages dirigés, le placement de drains superposés peut constituer une option. Les débits et les distances entre les ouvrages de pompages seront suffisants pour empêcher la migration des polluants en dehors de la zone de confinement.
- Un dispositif de pompage de l'eau interceptée : voir section 8.1.
- Un dispositif de régulation du pompage : voir section 8.1.
- Des conduites de collecte et d'amenée de l'eau pompée : voir section 8.1
- Une station de traitement des eaux pompées : voir section 8.1.
- Un dispositif de suivi et monitoring (voir chapitre 11).

8.3. L'objectif est le traitement du panache de contamination par pompage de l'eau souterraine

- Un ou plusieurs drains ou fossés de pompage et/ou d'un maillage de puits de pompage, localisés au sein ou en périphérie du panache à traiter. Les fossés ou drains de pompage de même que les puits doivent avoir la profondeur suffisante pour être en mesure d'intercepter la totalité de la puissance du panache. En cas de panache de puissance importante, le maillage de puits sera composé de puits équipés de crépines situées à des profondeurs différentes et séquentielles. En cas de drains placés par forages dirigés, le placement de drains superposés peut constituer une option. Les débits de pompage et les distances entre les ouvrages de pompages sont suffisants pour que la zone de capture couvre l'entièreté du panache.
- Un dispositif de pompage de l'eau interceptée : voir section 8.1.
- Un dispositif de régulation du pompage : voir section 8.1.
- Des conduites de collecte et d'amenée de l'eau pompée : voir section 8.1
- Une station de traitement des eaux pompées : voir section 8.1.
- Un dispositif de suivi et monitoring (voir chapitre 11).

8.4. Les variantes

8.4.1 Pompage + injection d'eau avec ou sans adjonction d'additifs chimiques stimulants

L'installation comprend en plus :

- Un dispositif d'injection d'eau : tranchées d'infiltration ou puits d'injection situés en amont hydrologique du panache ou au sein même de celui-ci en alternance avec les puits de pompage. En cas d'ajout d'additifs, une unité de conditionnement de l'eau injectée est présente en amont du dispositif d'injection : cuve de mélange et stockage

- Ce dispositif est équipé d'un système de régulation des débits d'injection de manière à éviter les inondations et la dispersion des polluants et/ou des additifs.
- Le dispositif de monitoring est à même de détecter la dispersion des additifs éventuels.

8.4.2. Le traitement biphasé : enlèvement d'une couche de produit pur surnageante

Deux types de dispositif peuvent être mis en œuvre, soit dans des puits de pompage soit dans des tranchées d'interception :

- Un ou plusieurs drains ou fossés de pompage et/ou un maillage de puits de pompage, localisés au sein ou en périphérie de la nappe à traiter. Les fossés ou drains de pompage de même que les puits doivent avoir la profondeur suffisante pour être en mesure d'intercepter la totalité de la puissance de la couche surnageante. Les distances entre les ouvrages de pompage sont suffisamment réduites pour intercepter l'entièreté de l'extension de la phase libre.
- Au niveau de chaque tranchée ou puits, un écrémeur ou skimmers (de type scavenger avec un filtre hydrophobe/oléophile flottant. Pour les nappes superficielles, des écrémeurs à bande ou à corde peuvent être utilisés. Vu les faibles débits pompés ces écrémeurs n'entraînent pas d'abaissement du niveau de la nappe et donc de contamination du sol par la phase libre lors du rabattement. Compte tenu de l'absence de rabattement et de gradient hydraulique au niveau du puits, le rayon d'action du dispositif d'écramage est faible.
- En alternative à l'écrameur opérant seul, un pompage biphasé peut être réalisé au moyen d'une seule pompe immergée située sous le niveau stationnaire du surnageant ou au moyen de deux pompes : une pompe immergée prélevant uniquement de l'eau de manière à créer un cône de rabattement et une zone d'appel et une pompe d'écramage ne pompant que le surnageant. Les quantités d'eau pompée, éventuellement polluée, à prendre en charge sont importantes ce qui entraîne des coûts important par unité de produit pur récupéré.
- Un dispositif de régulation du pompage. En cas de présence d'un écrémeur seul, ce dispositif n'est pas nécessaire vu que seule la couche surnageante est prélevée de sorte que les débits pompés et le rabattement soient faibles. Le dispositif de régulation est cependant nécessaire en cas de présence d'une pompe de rabattement. Les différentes formes que peut prendre ce dispositif sont mentionnées au point 8.1.
- Des conduites de collecte et d'amenée des liquides pompés reliant les pompes à la station de traitement. Voir point 8.1.
- Une station de traitement des liquides pompés. Les installations assurant les différentes étapes du traitement sont : un bac tampon (en cas de pics de débits), un séparateur équipé d'un filtre à coalescence de manière à casser les émulsions créées lors du pompage, une tour de stripping (en cas de présence de polluants volatiles), une installation de finition du traitement de l'eau si nécessaire (filtre à charbon actif, ...), une cuve de stockage du produit pur récupéré (souvent à manipuler comme un déchet dangereux), un ou plusieurs points de rejet de l'eau traitée dans le réseau d'égouttage public ou les eaux de surface, le cas échéant, une installation de traitement des vapeurs extraites dans la tour de stripping avant leur rejet dans l'atmosphère. La station de traitement est équipée de points d'échantillonnage situés de telle sorte qu'il soit possible d'échantillonner l'eau pompée provenant des différents puits individuels ou des différentes pompes, l'eau issue du traitement avant son rejet, 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 débordements, pannes et dysfonctionnements.

- Un dispositif de suivi et monitoring (voir chapitre 11).

8.4.3. Le pompage biphas d'une phase libre plongeante (DNAPL)

Cette opération vise à prélever la phase libre plongeante au moyen de puits de pompage (plus rarement de tranchée).

Cette technique est rarement appliquée compte tenu de la difficulté de délimiter en 3 D l'extension de la DNAPL et de définir la direction de sa migration, surtout lorsqu'elle a atteint des profondeurs importantes.

8.4.4. Le pompage triphase en cas de présence d'une couche de produit pur surnageante (bioslurping)

Le bioslurping consiste à prélever de manière simultanée la LNAPL à la surface d'une nappe aquifère et l'air du sol dans la couche insaturée du sol, par l'application d'un vide dans le puits de pompage. L'installation nécessaire pour cette méthode de traitement se compose typiquement de :

- Un maillage de puits d'extraction comportant une longueur crépinée d'environ 2 m : 1 m au-dessus et 1 m sous le niveau du toit de la nappe. Ces puits sont équipés d'un tube de succion dont la base est située (après ajustement) au sommet de la nappe aquifère. Ils comportent également un couvercle étanche permettant l'installation d'une dépression au sein du puits de pompage.
- Une ou plusieurs pompes à vide connectées aux puits de pompage (une pompe par puits individuels ou connectée à divers puits). De manière à réduire les nuisances acoustiques, les unités de pompage aériennes peuvent être situées dans des enceintes isolées (caissons, containers, ...). Chaque puits individuel (ou groupe de puits connectés à une même pompe) est équipé d'un manomètre permettant de suivre la dépression établie par le pompage.
- Un dispositif de régulation du pompage permettant de moduler la dépression de service au niveau des différentes zones de traitement en fonction des débits de liquide et de gaz recherchés. Ces systèmes peuvent prendre des formes très variées : niveaux de dépression max – min dans les puits, systèmes à horlogerie, systèmes séquentiels assurant le fonctionnement en séquence de différentes zones de pompage, ...
- un réseau d'évacuation acheminant les fluides pompés (produit pur, eau souterraine et les gaz du sol) vers l'installation de traitement. De préférence ces conduites sont enterrées pour éviter les risques d'accident et de gel. Elles sont munies de clapets anti-retour.
- Une installation de traitement assurant la séparation des trois phases pompées (produit pur, eau souterraine et gaz) et ensuite leur traitement avant rejet. Les installations assurant les différentes étapes du traitement sont : un séparateur assurant la séparation entre la phase gazeuse et la phase liquide, un filtre de traitement de la phase gazeuse (charbon actif, précédé ou non d'un filtre biologique) avant son rejet dans l'atmosphère, un séparateur équipé d'un filtre à coalescence séparant la phase libre de l'eau souterraine pompée, une cuve de stockage du produit pur récupéré. L'eau souterraine est traitée à l'aide d'une tour de stripping (en cas de présence de polluants volatiles), une installation de finition du traitement de l'eau si nécessaire (filtre à charbon actif, ...), un ou plusieurs points de rejet dans le réseau d'égouttage public ou les eaux de surface. Le cas échéant, les vapeurs extraites dans la tour de stripping sont traitées dans le filtre assurant le traitement de la phase gazeuse, avant leur rejet dans l'atmosphère. La station de traitement est équipée de points d'échantillonnage situés de telle sorte qu'il soit possible d'échantillonner les gaz et l'eau pompée provenant des différents puits individuels ou des différentes pompes, l'eau issue du traitement avant son rejet, 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 débordements, pannes et dysfonctionnements.

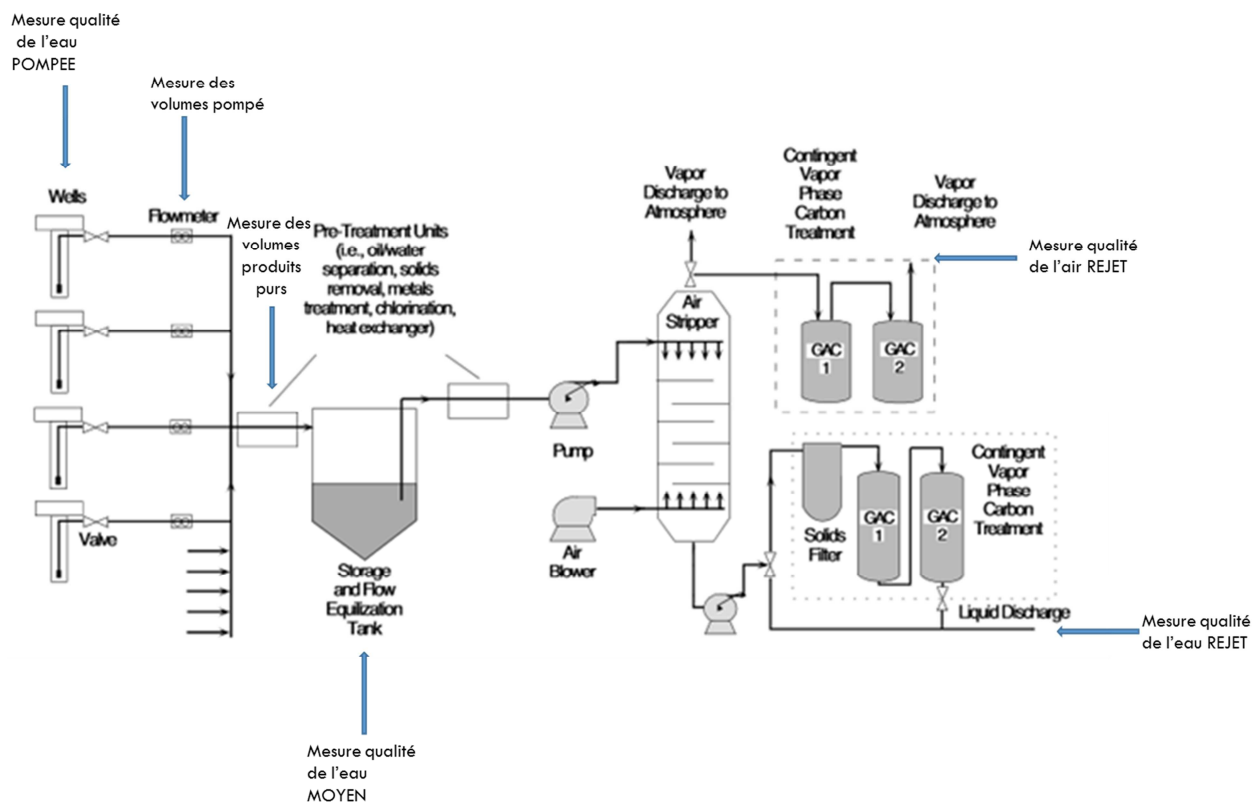
- Un dispositif de suivi et monitoring (voir chapitre 11).

Remarque générale :

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

Schéma conceptuel

La figure ci-dessous illustre le schéma conceptuel d'une installation typique de pump and treat et illustre la localisation des points de prélèvement et de vérification.



(Design Guidelines for Conventional Pump-and-Treat Systems, EPA 1997)

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

Le dispositif qui sera mis en place dans le cadre [du s traitement](#) sera décrit en fournissant, au minimum, les indications suivantes reprises dans le **Tableau 9**. Dans ce tableau, il n'est pas fait de différence entre chantiers de petite et grande taille et entre donnée indispensable et donnée facultative vu que, si d'application, toutes les données sont à considérer comme nécessaires.

Tableau 9 : Données à fournir concernant le système de traitement à mettre en place

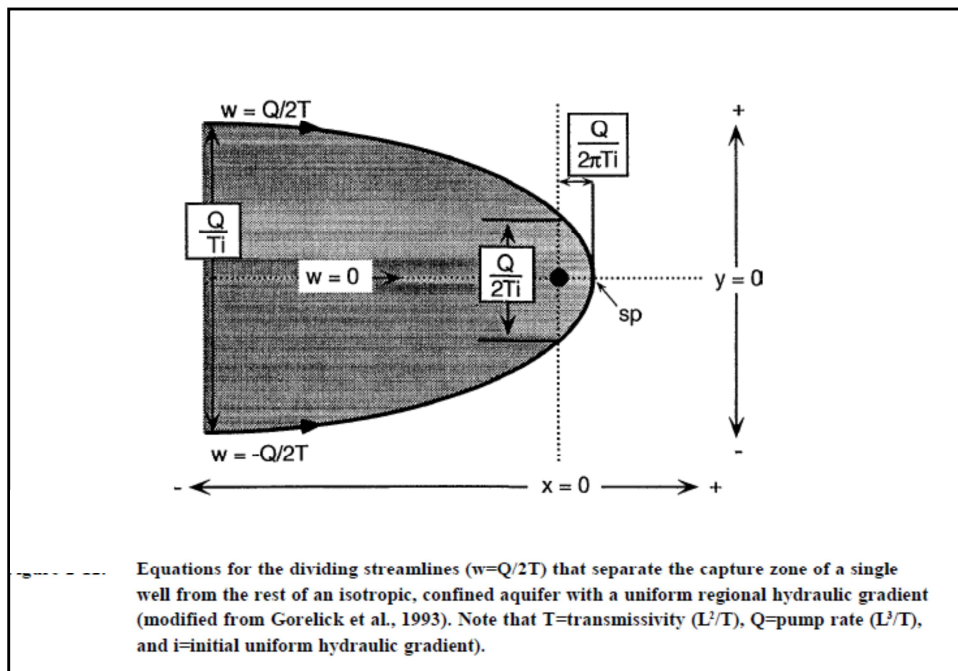
Partie du dispositif	Élément	Données du descriptif	Commentaire
Objectif poursuivi	Si Interception	Distance par rapport au noyau et au front du panache, extension en X,Y et Z du panache au niveau de la barrière d'interception, teneur maximale admise au-delà de la barrière, cible sensible dont la protection est visée (type et position en X, Y et Z). Débits attendus par puits, drains ou tranchées, rabattement	
	Si confinement hydraulique du panache	Extension actuelle en X, Y et Z du panache à confiner, extension ultérieure tolérée du panache en X, Y et Z, teneurs maximales admises à la limite du panache, cible sensible dont la protection est visée (type et position en X, Y et Z). Débits attendus par puits, drains ou tranchées, rabattement.	
	Si traitement de la nappe (panache et/ou noyau)	Objectif de teneurs à atteindre de manière durable dans la nappe et éventuellement le sol (frange capillaire), extension actuelle en X, Y et Z de la contamination. Débits attendus par puits, drains ou tranchées, rabattement. Durée prévue	
Dispositif de prélèvement de l'eau	Tranchée ou drain de pompage ou d'interception	Localisation et dimension (longueur, largeur et profondeur), mode de mise en place (excavation à ciel ouvert avec ou sans remblayage, trancheuse avec mise en place immédiate du drain, forages dirigés horizontaux, ...	Si l'aquifère à traiter comporte différentes couches de perméabilité, le dispositif doit être à même d'assurer le drainage des différentes couches
		Dispositif de récupération de l'eau interceptée : drain à ciel ouvert + fosse de récupération (système passif), drain en PVC perforé + massif filtrant dans l'espace annulaire, tranchée complète d'interception (drain + matériau filtrant sur toute la hauteur mouillée, ...) débouchant dans une chambre de visite	En cas de risque de présence d'une couche surnageante, le dispositif de récupération doit être coupant par rapport au toit de la nappe. A l'inverse, en cas de présence d'une couche plongeante, le dispositif doit être coupant par rapport à la couche rampante
	Puits de pompage	Localisation et distance entre les différents puits, profondeur des tronçons aveugles et crépinés, diamètre et type de tubage, dimensions des ouvertures de la crépine, type et position du massif filtrant, type et position du bouchon imperméabilisant (bentonite), type de tête de puits (étanche si puits en dépression), protection de la tête (trapillon de visite, tube en acier cadénassé, ...)	Si l'aquifère à traiter comporte différentes couches de perméabilités différentes, le dispositif doit être à même d'assurer le drainage des différentes couches
			En cas de risque de présence d'une couche surnageante, le dispositif de récupération doit être coupant par rapport au toit de la nappe. A l'inverse, en cas de présence d'une couche plongeante, le dispositif doit être coupant par rapport à la couche rampante
	Pompe	Type et localisation de la pompe : pompe à flotteur en chambre de visite, pompe immergée dans le puits, pompe à vide située en dehors des puits connectées à 1 ou plusieurs puits, ...	La puissance des pompes doit être calculée par rapport aux débits de crête et les charges hydrauliques maximales
	Ecrémage	Type et caractéristique du dispositif : skimmer, pompe pneumatique ou système ODS. Débit d'écémage escompté	Mesure anti-déflagration nécessaire pour les composés volatils
	Ecrémage + rabattement	Type et caractéristique du dispositif : écrémeur + pompe de rabattement, ... Débit de pompage prévu (eau et produit pur), hauteur de rabattement, ...	
	Biosurping	Caractéristiques du tuyau de succion (diamètre et profondeur par rapport au sol), débit pompé prévu (produit pur, air du sol et eau), dépression de service. Caractéristiques de la pompe à vide : puissance, ...	
	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 dans les puits individuels, ...	En cas de pompage sous dépression opérant sur différents puits, la mise en place d'un système empêchant l'entrée d'air continue au niveau du puits à plus faible rendement est indispensable : pompage séquentiel, ...
Dispositif de collecte des fluides pompés	Conduites d'amenées	Type, dimensions et disposition des conduites d'amenées, 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	
Dispositif anti-nuisances	Mesures antibruit	Type de mesures prévues : mesures anti-cavitation des pompes, isolation acoustique des pompes,	
	Mesures anti-odeur	Eventuelles pour les composés volatiles (acétones, composés aromatiques)	

Les commentaires suivants peuvent être formulés :

- Lorsque l'objectif recherché est l'interception d'un panache de pollution, il convient d'établir dans le projet assainissement ou de gestion des risques, soit **avant l'exécution des travaux ne nécessitant pas de projet spécifique**, que le dispositif mis en place (rideau de puits ou tranchée) est en mesure d'intercepter la totalité ou la quasi-totalité du panache, de sorte qu'en aval du dispositif, les objectifs de teneurs dans la nappe et les objectifs de la protection de la cible la plus sensible soient rencontrés. A cet égard, les paramètres du dispositif (profondeurs d'interception, débits pompés, distances entre les puits, longueur des tranchées, ...) doivent être testés et optimisés en phase de démarrage du chantier.

Pour les chantiers de petite taille, cette vérification peut être faite à l'aide de modèles semi-analytiques simples tels que celui proposé par Javandel and Tsang en 1986 (Capture-Zone Type Curves, a Tool for Aquifer Cleanup, Ground Water, sept-oct 1986, vol 24, n°5), comme exposé dans les **Figures 6 et 7** ci-après. Cette méthode permet d'estimer rapidement l'extension de la zone de capture d'un polluant à partir des données de transmissivité et de gradient hydraulique naturel de la nappe et de calculer le nombre de puits nécessaires. L'usage de ces modèles semi-analytiques doit prendre en compte les limites de leur validité : valeurs de conductivité hydraulique uniformes et isotropes, puits complets, pas de recharge de l'aquifère et transmissivité constante. Le calcul de la zone de capture peut également être effectué à l'aide de modèles semi-analytiques tels que RESSQC, WHPA (USEPA 1997), ... basés sur les mêmes équations et souffrant des mêmes limites.

Figure 6 : Estimation quantitative de la zone de capture d'un puits individuel



Methods for Monitoring Pump&Treat Performances, USEPA June 1994

Figure 7 : Estimation quantitative de la zone de capture de puits couplés

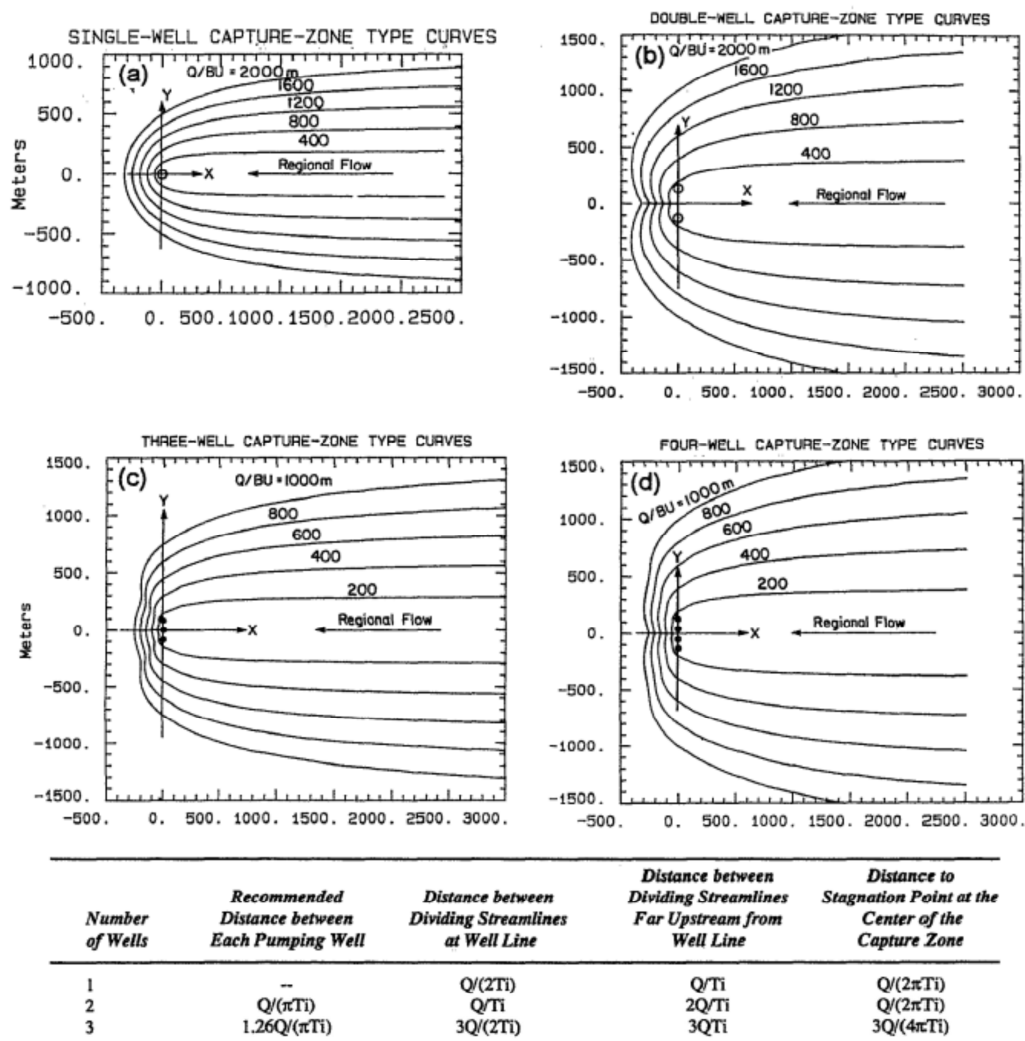


Figure 2-13. Type curves showing the capture zones of 1 (a), 2 (b), 3 (c), and 4 (d) pump wells spaced evenly along the y-axis for several values of Q/BU (where Q = pumping rate (L^3/T), B = aquifer thickness (L), and U = Darcy velocity for regional flow (L/T) (from Javandel and Tsang, 1986). To assess the number of wells, pumping rates, and well spacings needed to capture a plume using evenly spaced recovery wells along a line: (1) Construct a plume map at the same scale as the type curves; (2) Superimpose the 1-well type curve over the plume with the x-axis parallel to the regional flow direction and overlying the center of the plume such that the plume is enclosed by one Q/BU curve; (3) Calculate the required single well pumping rate as $Q=B*U*TCV$ where TCV is the bounding Type Curve Value of Q/BU ; and, (4) If a single well cannot produce the calculated pump rate, repeat the steps using the 2, 3, and 4 well type curves until a feasible single well pump rate is calculated. Use the above equations to determine optimum well spacings. See Javandel and Tsang (1986) for details.

Methods for Monitoring Pump&Treat Performances, USEPA June 1994

Pour les chantiers de grande taille, la vérification doit plutôt être faite à l'aide de modèles numériques tels que MODFLOW, MODPATHS, MT3D, ... permettant de prendre en compte des situations plus complexes : aquifères multicouches, puissances et conductivités variables, recharge de l'aquifère, ... Les essais par traçage peuvent également être utilisés pour donner une image quantitative de l'efficacité de la capture d'un polluant par un dispositif de prélèvement. Il convient de noter que, même dans les circonstances les plus favorables (couche aquifère homogène, de bonne perméabilité à texture grossière), en raison des interactions entre le traceur et la phase solide du sol, le taux de récupération du traceur sont rarement élevés et donnent une image peu optimiste de l'efficacité de l'interception.

- Lorsque l'objectif du traitement est la restauration de la qualité de l'aquifère par la mise en place de puits de pompage établis en maillage régulier, l'équidistance entre les puits L doit être conforme à la relation suivante de manière à garantir un chevauchement suffisant des rayons d'action :

$$L = 1.732 * r$$

où r (en m) est le rayon d'action du puits de pompage tel que mesuré lors des tests de pompage ou calculé à partir de formules empiriques.

L'estimation du temps de traitement de la nappe d'eau souterraine fait également partie du descriptif du dispositif d'intervention :

- Dans le cas d'une opération visant à intercepter la migration d'un panache existant, le temps nécessaire à l'intervention peut être illimité (panache de grande dimension et source primaire ou secondaire encore présente) ou être contrôlé par le temps nécessaire pour que l'entièreté du panache soit intercepté ou par le temps nécessaire à l'atténuation naturelle ou stimulée de la contamination. La durée de l'intervention n'est donc pas tributaire des paramètres du dispositif d'interception.
- Dans le cas d'une opération visant à confiner de manière hydraulique l'extension d'un panache, la durée de l'intervention peut, elle aussi, être illimitée ou être contrôlée par le temps nécessaire à l'atténuation naturelle ou stimulée de la contamination.
- Dans le cas d'une opération visant à restaurer la qualité de l'eau souterraine au sein du panache jusqu'à l'atteinte des teneurs définies comme objectif, la durée du traitement de la nappe par pompage peut être estimée en première analyse par la relation suivante :

$$T = V_v / Q.R$$

où : T est le temps nécessaire pour assainir la nappe (s) ;
 V_v est le volume d'eau contaminée dans le panache (m^3) ;
 Q est le débit de pompage (m^3/s) ;
 R est le facteur de retard (défini plus haut).

Cette équation tient compte des phénomènes de sorption et désorption du polluant en présence de la matrice solide du sol. Ces phénomènes sont considérés comme à l'origine d'une relation linéaire entre teneurs du sol et teneurs dans la nappe. Afin de tenir compte des autres phénomènes intervenant lors du transfert des polluants (dispersion hydrodynamique, hétérogénéité du sol), il convient de multiplier le temps estimé par un facteur de sécurité de 1,5 à 2.

Une autre relation peut être utilisée qui tient compte des rééquilibres successifs entre teneurs de la matrice solide et teneurs dans l'eau souterraine au fur et à mesure que l'eau souterraine est extraite du sol.

$$C_n = C_0 \left[\frac{\rho_g K_d}{\frac{p}{(1-p)} + \rho_g K_d} \right]^n$$

où C_n est la teneur de l'eau souterraine extraite après extraction de n volumes poreux du sol (kg/m^3) ;

C_0 est la teneur initiale de l'eau souterraine (kg/m^3) ;

ρ_g est la densité apparente du sol (kg/m^3) ;

K_d est le coefficient de distribution du polluant dans le sol (m^3/kg) ;

P est la porosité totale du sol (%) ;

n est le nombre de volumes poreux d'eau souterraine extraits lors du pompage.

Dans cette relation, on considère que l'ensemble du volume poreux compris dans la zone d'interception du puits renferme le polluant à une teneur identique et que cette teneur demeure inchangée durant tout le temps nécessaire à l'extraction du volume poreux.

D'autres simulations analytiques existent faisant appel à des pas de temps variables et faisant intervenir des équilibres successifs entre teneurs dans la phase solide et phase liquide du sol sur la base des bilans de masse et des équations de fugacité.

- Pour les chantiers de grande taille, les modèles de simulation numériques (modflow et Modpath) permettent de simuler l'évolution dans le temps des panaches après mise en place des dispositifs de pompage.

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 de stabilité pour le bâti et les infrastructures ;
- Risques pour les installations de captage voisines.

10.1.1. Nuisances pour la qualité de l'air

En cas de traitement de contamination résultant de la présence de polluants volatils (pression de vapeur > 5 Pa à 20 °C tels que hydrocarbures aliphatiques C5-C8, C8-C10, BTEX, MTBE, ...), l'air en contact direct avec les installations de pompage, adduction et traitement des eaux polluées est susceptible d'être contaminé par les vapeurs s'échappant du dispositif. 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 de pompage, adduction et traitement 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 de l'eau souterraine sera effectué si les polluants présents sont de type volatils et 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 éventuels de l'installation de traitement, provenant par exemple d'une installation de stripping, doivent également 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 de traitement de l'eau souterraine par pompage.

10.1.2. Risques d'explosion

Le pompage et le traitement d'eau souterraine contaminée par des composés volatiles peut entraîner des risques d'explosion au sein du dispositif de prélèvement et de traitement des fluides pompés (eau pompée, phase pure et gaz du sol) si des poches de vapeurs de composés inflammables s'accumulent. Des détecteurs de gaz inflammables doivent donc être mis en place à un endroit au moins du dispositif de prélèvement et traitement de manière à mesurer le risque d'explosion du système. Un dispositif d'alerte et d'arrêt du dispositif doit être également prévu en cas de dépassement de la valeur de 10 % de la LEL (Lower Explosive Limit).

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 et du fonctionnement des pompes.

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 si possible des horaires de fonctionnement afin d'éviter les nuisances nocturnes.

10.1.4. Risque de stabilité pour le bâti et les infrastructures voisines

Un rabattement important de la nappe est susceptible de générer des risques pour la stabilité de ouvrages présents dans ou sur le sol : diminution de la densité et de la portance des couches de sol après désaturation. Ce risque est susceptible est encore exacerbé par la présence de lentilles de tourbes d'épaisseurs importantes dont la désaturation entraîne l'apparition de tassements différentiels.

Au cas où [le traitement](#) de la nappe aquifère passe par la mise en place d'un rabattement important du niveau de la nappe (supérieur à la variation saisonnière normale) dans une zone supportant des bâtiments ou d'autres infrastructures susceptibles d'être impactées par des tassements ou changements de densité, une étude de stabilité devra être réalisée de manière à estimer l'importance de ces risques et déterminer l'ampleur maximale tolérable des rabattements.

10.1.5. Risques pour les installations de captage voisines

Les installations de captage utilisées à des fins de distribution publique d'eau de consommation humaines 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. Les impacts possibles sont les suivants :

- Contamination de l'eau pompée par suite de l'interception, le confinement ou le traitement insuffisant du panache en aval de l'installation ;
- Contamination de l'eau pompée suite à la mobilité accrue du polluant suite à l'injection d'agents tensio-actifs ou suite à l'injection d'autres agents chimiques stimulants non interceptés.

Lors de la conception du dispositif de prélèvement de l'eau souterraine le calcul du périmètre d'interception des eaux à traiter avec ou sans adjonction d'agent chimique stimulant doit impérativement établir l'absence de risque significatif pour les installations de captage situées en aval.

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 et traitement de l'eau souterraine 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 intense, zones industrielles, ...) une opération de vérification sera déclenchée si le niveau de contamination de l'air à proximité des installations dépasse le niveau de contamination ambiant mesuré sur une période de 24 h.

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

En matière de nuisances acoustiques, le niveau de bruit tolérable généré par les chantiers de traitement de la nappe aquifère par pompage est réglementé par l'AGRBC du 24 novembre 2002 relatif à la lutte contre les bruits et les vibrations par les installations classées. Les impositions renseignées au permis d'environnement prédélivrées doivent également être respectées. Dans les zones à niveau de bruit ambiant élevé (voiries, zones industrielles actives, ...) il convient de comparer le niveau mesuré de l'impact des installations au niveau de bruit ambiant.

11. Suivi du traitement

11.1. Mesures de surveillance : dispositif type

11.1.1. L'objectif poursuivi est l'interception ou le confinement du panache de contamination

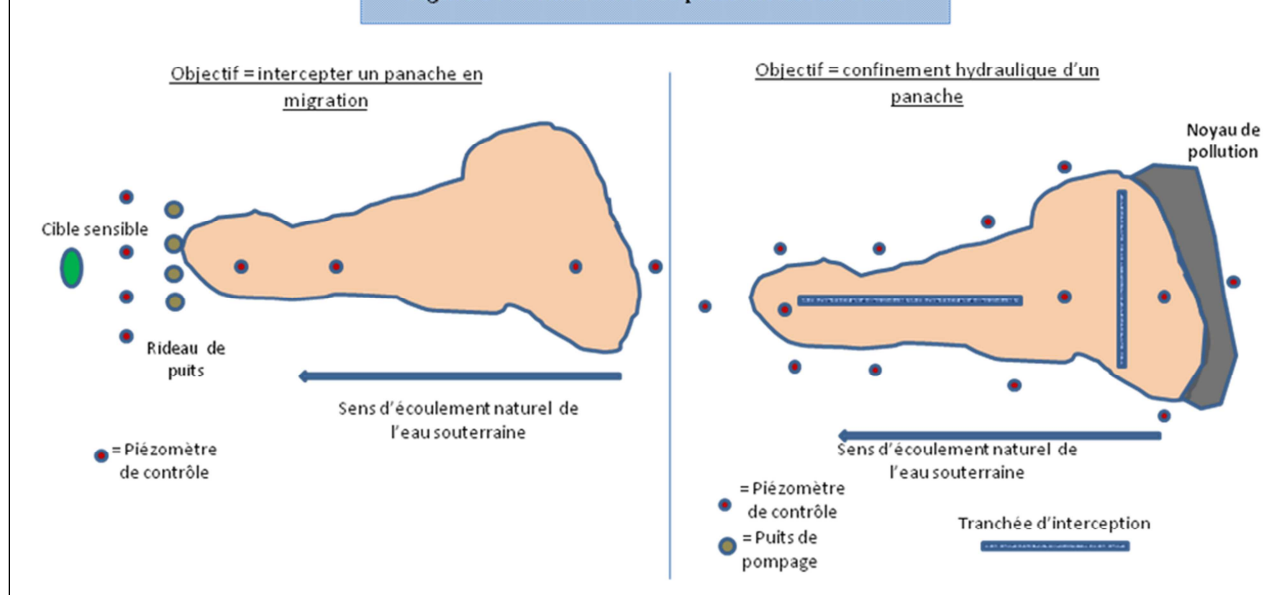
Le dispositif de suivi repose sur les éléments suivants :

- Un réseau de piézomètres d'observation répartis sur la zone impactée et ses alentours visant à suivre l'évolution des niveaux piézométriques ;
- Un réseau de piézomètres principalement situés en dehors du panache de contamination, visant à contrôler l'efficacité du confinement et de l'interception des polluants ;
- Un dispositif de mesure des débits ;
- Un dispositif d'échantillonnage de l'eau traitée avant son rejet.

La **Figure 8**, donne un exemple de disposition possible des piézomètres d'observation.

- La mesure périodique des niveaux piézométriques et le suivi des courbes izopièzes permettent de vérifier que, suite au pompage dans les puits ou l'interception dans les tranchées, le flux de l'eau souterraine contaminée reste bien dirigé vers le dispositif de prélèvement et non pas suivant une direction située en dehors de la zone de capture attendue. Ces cartes isopièzes permettent d'établir un suivi de l'aire d'influence du dispositif de prélèvement. Elles ne fournissent cependant une image précise de l'aire de capture de l'eau souterraine, particulièrement si le gradient hydraulique naturel (avant pompage) est important. L'évolution des cartes isopièzes donnent ainsi une indication de l'efficacité de l'interception mise en place. Le nombre de piézomètres à mettre en place dépend de la taille du chantier. Dans tous les cas de figure, il doit permettre d'établir une image de la direction de l'écoulement au niveau de la totalité du panache.

Figure 8 : Localisation des piézomètres de suivi



- La mesure périodique des teneurs en polluants doit être menée en deux catégories d'endroits distincts :
 - o Au sein du panache afin de suivre l'évolution des teneurs en polluants au sein de celui-ci et évaluer l'importance des phénomènes d'atténuation naturelle. L'implantation des piézomètres suivra un maillage lâche : 1 piézomètre en amont, 1 au centre et 1 en aval du panache de manière à suivre l'évolution des teneurs des différents polluants en fonction de leur mobilité.
 - o Au pourtour du panache en cas de confinement hydraulique ou en aval uniquement de celui-ci en cas d'interception. La position et le nombre des piézomètres de suivi doivent permettre de détecter les passages significatifs éventuels de polluants au travers du dispositif d'interception ou l'expansion latérale du panache malgré la présence du pompage de confinement. En première approche, la distance entre ces piézomètres de contrôle établis sur le pourtour du panache (objectif de confinement) ou en aval de celui-ci ne sera pas supérieure à la valeur $L = 2r$, r étant le rayon d'action des puits de pompage. Dans tous les cas de figure, un ou plusieurs piézomètres seront établis sur le trajet de l'écoulement de la nappe situé entre le front du panache et la ou les cibles à protéger.
- Les piézomètres seront établis de manière à investiguer les profondeurs totales attendues de la contamination : au sein du panache ou suivant le parcours de migration anticipé par simulation. Pour le placement des piézomètres, il convient de se référer aux prescriptions du code de bonne pratique de Bruxelles Environnement n° 2 « Installation de piézomètres ». En cas de panache de puissance supérieure à 3 m, le suivi des teneurs sera assuré par plusieurs piézomètres proches (ou des piézomètres multiples) dont les crépines investiguent des profondeurs distinctes. Pour le prélèvement des échantillons d'eau souterraine, il convient de se référer au Code de Bonne Pratique n° 3 de Bruxelles Environnement « Prise d'échantillons de sol, d'eau souterraine, de sédiments et d'air du sol. ... ».
- La mesure des débits pompés sera effectuée en continu à l'aide de débitmètres permettant la mesure des débits instantanés et cumulés. Chaque puits ou groupes de puits (si ces puits sont reliés à la même pompe) sera équipé d'un débitmètre. L'objectif poursuivi est de

connaître l'importance des débits pompés dans les différentes zones du chantier et, le cas échéant, évaluer les possibilités d'augmenter les débits de pompage en cas d'insuffisance d'efficacité dans l'interception ou le confinement, ou au contraire de diminuer ces derniers, uniformément ou par zones si les niveaux piézométriques deviennent trop faibles (assèchement de la nappe) ou si l'intervention n'est plus nécessaire dans une zone particulière suite à la diminution des teneurs en polluants.

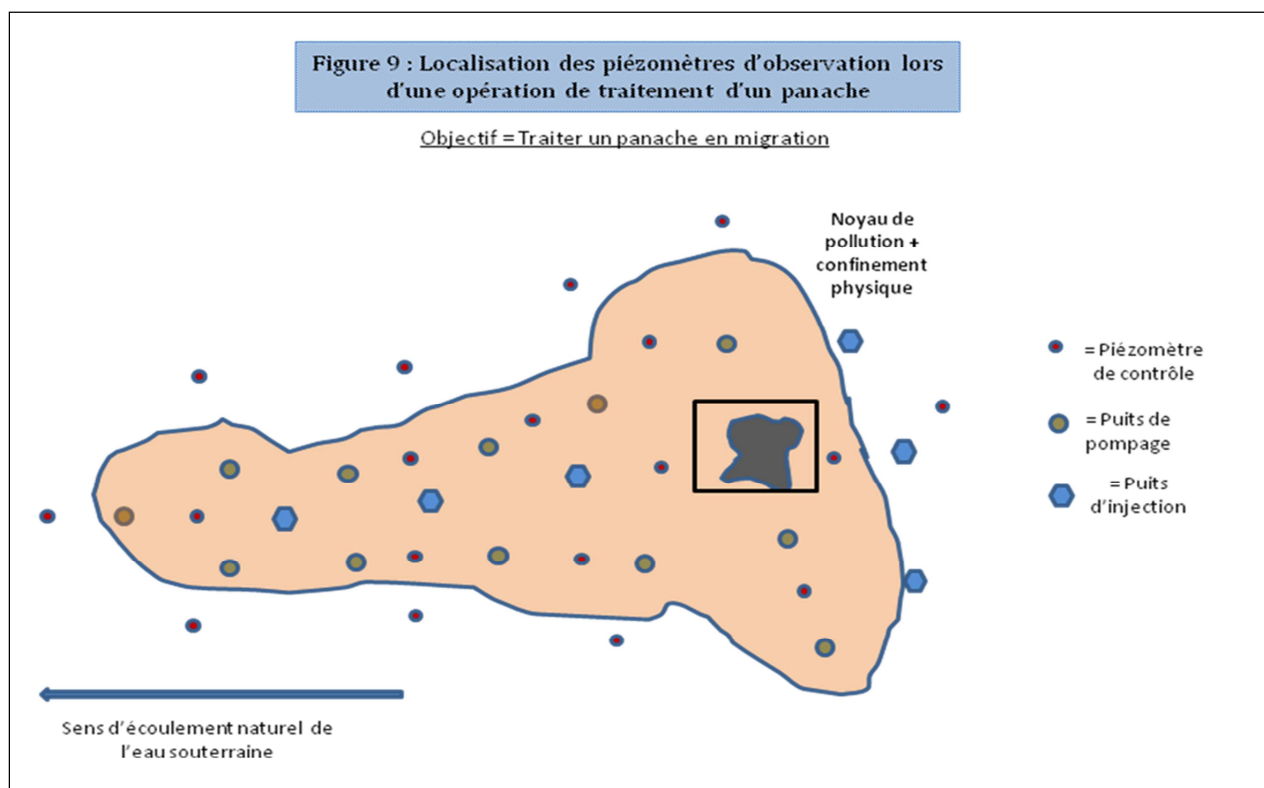
- L'eau traitée par la station de traitement sera échantillonnée et analysée avant son rejet dans le réseau d'égouttage public, les eaux de surface ou sa réinjection dans le sol. L'échantillonnage pourra être effectué à l'aide d'une prise d'eau située directement après la dernière étape du traitement ou au niveau du point de rejet. En cas de traitement de polluants volatiles par colonne de stripping, les vapeurs extraites seront rejetées dans l'atmosphère après traitement. Un point d'échantillonnage sera aménagé en aval de la tuyère de rejet.

11.1.2. L'objectif poursuivi est le **traitement** du panache de contamination

Le dispositif de suivi repose sur les éléments suivants :

- Un réseau de piézomètres d'observation réparti sur la zone impactée et ses alentours visant à suivre l'évolution des niveaux piézométriques et des teneurs en polluants ;
- Un dispositif de mesure des débits.

La **Figure 9** donne un exemple de disposition possible des piézomètres d'observation dans le cas d'un dispositif de pompage + injection.



- La mesure périodique des niveaux piézométriques et le suivi des courbes izopièzes permettent de vérifier que, suite au pompage dans les puits ou l'interception dans les

tranchées, le flux de l'eau souterraine contaminée reste bien dirigé vers le dispositif de prélèvement et non pas suivant une direction située en dehors de la zone de capture attendue. Cette vérification est particulièrement importante lorsque le traitement par pompage est accompagné d'une injection d'eau vers la nappe aquifère (fraîche ou pompée et traitée, avec ou sans additif chimique stimulant). Comme mentionné dans la section suivante, ces cartes isopièzes permettent d'établir un suivi de l'aire d'influence du dispositif de prélèvement. Elles ne fournissent cependant une image précise de l'aire de capture de l'eau souterraine, particulièrement si le gradient hydraulique naturel (avant pompage) est important. L'évolution des cartes isopièzes donnent ainsi une indication de l'efficacité de l'interception mise en place. Le nombre de piézomètres à mettre en place dépend de la taille du chantier. Dans tous les cas de figure, il doit permettre d'établir une image de la direction de l'écoulement au niveau de la totalité du panache et de ses alentours immédiats.

- La mesure périodique des teneurs en polluants doit être menée en trois catégories d'endroits distincts :
 - O Au sein du panache afin de suivre l'évolution des teneurs en polluants au sein de celui-ci et évaluer l'efficacité du traitement par pompage. L'implantation des piézomètres suivra un maillage couvrant la totalité du panache de manière à identifier les zones récalcitrantes au traitement (zones de stagnation).
 - O Au pourtour du panache de contamination de manière à détecter une extension latérale éventuelle de celui-ci. En cas d'injection d'eau additionnée de composés chimiques stimulants, les piézomètres périphériques permettent de contrôler la migration de ces composés en dehors du panache et de la zone de capture en direction de cibles sensibles éventuelles. La position et le nombre des piézomètres de suivi doit permettre de contrôler une extension éventuelle du panache et détecter les passages significatifs de polluants. Dans tous les cas de figure, un ou plusieurs piézomètres seront établis sur le trajet de l'écoulement de la nappe situé entre le front du panache et la ou les cibles à protéger.
 - O Avant et après la station de traitement afin de mesurer les concentrations en polluants extraits et l'efficacité du traitement.
- Les piézomètres seront établis de manière à investiguer les profondeurs totales attendues de la contamination : au sein du panache ou suivant le parcours de migration anticipé par simulation. Pour le placement des piézomètres, il convient de se référer aux prescriptions du Code de Bonne Pratique de Bruxelles Environnement n° 2 « Installation de piézomètres ». En cas de panache de puissance supérieure à 3 m, le suivi des teneurs sera assuré par plusieurs piézomètres proches (ou des piézomètres multiples) dont les crépines investiguent des profondeurs distinctes. Pour le prélèvement des échantillons d'eau souterraine, il convient de se référer au Code de Bonne Pratique n° 3 de Bruxelles Environnement « Prise d'échantillons de sol, d'eau souterraine, de sédiments et d'air du sol. ... ». Au sein du panache de pollution, un piézomètre au moins sera suffisamment profond et crépiné sous la couche contaminée de manière à mettre en évidence la migration verticale éventuelle du polluant. Cette délimitation ne sera pas nécessaire en cas de présence d'une couche imperméable (aquitard) limitant la migration verticale du panache.
- La mesure des débits pompés sera effectuée en continu à l'aide de débitmètres permettant la mesure des débits instantanés et cumulés. Chaque puits ou groupe de puits (si ces puits sont reliés à la même pompe) sera équipé d'un débitmètre. L'objectif poursuivi est de connaître l'importance des débits pompés dans les différentes zones du chantier et, le cas échéant, évaluer les possibilités d'augmenter les débits de pompage en cas d'insuffisance

d'efficacité dans l'interception ou le confinement, ou au contraire de diminuer ces derniers, uniformément ou par zones si les niveaux piézométriques deviennent trop faibles (assèchement de la nappe) ou si l'intervention n'est plus nécessaire dans une zone particulière suite à la diminution des teneurs en polluants. La prise en compte des teneurs mesurées dans l'eau pompée et des débits cumulés débouche sur un bilan de la masse de polluants encore présente au sein des couches aquifères.

- L'eau traitée par la station de traitement sera échantillonnée et analysée avant son rejet dans le réseau d'égouttage public, les eaux de surface ou sa réinjection dans le sol. L'échantillonnage pourra être effectué à l'aide d'une prise d'eau située directement après la dernière étape du traitement ou au niveau du point de rejet. En cas de traitement de polluants volatiles par colonne de stripping, les vapeurs extraites seront rejetées dans l'atmosphère après traitement. Un point d'échantillonnage sera aménagé en aval de la tuyère de rejet.

11.2. Mesures de surveillance : paramètres de suivi et fréquences

Les paramètres de suivi et la fréquence des mesures sont donnés dans le **Tableau 10** suivant :

Tableau 10 : Fréquences et paramètres des opérations de suivi

Paramètres de suivi	Moyen	Paramètre	Fréquence minimale*	Commentaires
Interception et/ou confinement du panache				
Niveau piézométrique /sens d'écoulement	Mesure dans les piézomètres + point de repère altimétrique	Niveau piézométrique relatif + épaisseur de la couche surnageante éventuelle	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	Constitution d'une carte des iso-pièze
Teneurs en polluants au sein du panache	Prélèvement dans les piézomètres au sein du panache et analyse des échantillons	Teneurs des polluants requérant une intervention	Au départ du traitement ensuite fréquence trimestrielle	
Teneurs en polluants en pourtour du panache	Prélèvement dans les piézomètres en périphérie du panache et analyse des échantillons	Teneurs des polluants requérant une intervention	Au départ du traitement, ensuite durant 6 mois fréquence mensuelle, ensuite fréquence trimestrielle	
		Teneurs des polluants requérant une intervention + teneurs des additifs stimulants éventuels en cas d'injection	Au départ du traitement, ensuite durant 6 mois fréquence mensuelle, ensuite fréquence trimestrielle	En cas d'injection
Mesure des débits instantanés et cumulés	Lecture des débitmètres	Débits instantanés et cumulés	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	
Teneurs dans l'eau pompée des puits	Prélèvement de l'eau pompée dans les puits individuels ou les groupes de puits raccordés à une même pompe	Teneurs des polluants requérant une intervention	Au départ du traitement, en phase de lancement 3 mois) fréquence mensuelle, ensuite tous les 3 mois	
		Teneurs en composés déterminants pour le traitement de l'eau : pH, O ₂ , fer, Mn et carbonates, matières en suspension, AOC	Au départ du traitement, ensuite tous les 6 mois	
Teneurs dans les rejets gazeux	Prélèvements après passage dans le filtre de traitement	Teneurs en composés volatiles traités	Au départ du traitement, en phase de lancement (3 mois) fréquence mensuelle, ensuite tous les 3 mois	
Teneurs dans l'eau traitée rejetée ou réinjectée	Prélèvement après la dernière phase du traitement ou au point de rejet	Teneurs des polluants requérant une intervention	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	
Traitement du panache				
Niveau piézométrique /sens d'écoulement	Mesure dans les piézomètres + point de repère altimétrique	Niveau piézométrique relatif + épaisseur de la couche surnageante éventuelle	Premier mois (Phase de lancement) : fréquence hebdomadaire, ensuite fréquence mensuelle	En cas de pompage par intermittence, la fréquence sera augmentée en phase de redémarrage
Teneurs en polluants au sein du panache	Prélèvement dans les piézomètres au sein du panache et analyse des échantillons	Teneurs des polluants requérant une intervention	Au départ du traitement, ensuite fréquence trimestrielle	En cas de pompage par intermittence, les teneurs seront mesurées au début de chaque phase de redémarrage
Teneurs en polluants en pourtour du panache	Prélèvement dans les piézomètres en périphérie du panache et analyse des échantillons	Teneurs des polluants requérant une intervention	Au départ du traitement, ensuite durant 6 mois fréquence mensuelle, ensuite fréquence trimestrielle	
		Teneurs des polluants requérant une intervention + teneurs des additifs stimulants éventuels en cas d'injection	Au départ du traitement, ensuite en phase de lancement (3 premiers mois) 2 fois/mois, trois mois suivants fréquence mensuelle, ensuite fréquence trimestrielle	En cas d'injection
Mesure des débits instantanés et cumulés	Lecture des débitmètres	Débits instantanés et cumulés	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, deux mois suivants (phase de lancement) : 2 fois/mois, ensuite mensuel	
Teneurs dans l'eau pompée dans les puits	Prélèvement de l'eau pompée dans les puits individuels ou les groupes de puits raccordés à une même pompe	Teneurs des polluants requérant une intervention	Au départ du traitement, en phase de lancement (3 mois) fréquence mensuelle, ensuite tous les 3 mois	
		Teneurs en composés déterminants pour le traitement de l'eau : pH, O ₂ , fer, Mn et carbonates, matières en suspension, AOC	Au départ du traitement, ensuite tous les 6 mois	Si l'atténuation naturelle est prise en compte dans la durée du traitement, les paramètres influençant celle-ci et les produits de dégradation sont également analysés : NO ₃ ⁻ , nutriments, méthane, ...
Teneurs dans les rejets gazeux	Prélèvements après passage dans le filtre de traitement	Teneurs en composés volatiles traités	Au départ du traitement, en phase de lancement (3 mois) fréquence mensuelle, ensuite tous les 3 mois	
Teneurs dans l'eau traitée rejetée ou réinjectée	Prélèvement après la dernière étape du traitement ou au point de rejet	Teneurs des polluants requérant une intervention	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	

Le tableau 10 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.
- Les mesures successives des niveaux piézométriques doivent permettre de constituer les cartes isopièzes de la zone de chantier et déterminer les sens d'écoulement de l'eau souterraine. Si le niveau de détail est suffisant, les zones de stagnation (où par absence de gradient l'eau souterraine ne circule pas ou peu) pourront être détectées.
- En cas de présence d'une phase surnageante, le gradient hydraulique fournit une bonne indication de la possibilité de migration du produit pur en direction des puits de récupération.
- La fréquence de mesure des teneurs en polluants au sein du panache lors d'une intervention de traitement de celui-ci, peut être augmentée ou diminuée, en fonction des débits pompés et de la mobilité des polluants. En règle générale, on mesurera les teneurs présentes au moins une fois après pompage d'un volume poreux.
- Lorsque les opérations de traitement par pompage visent également à assainir la fraction solide du sol (frange capillaire par exemple), les teneurs résiduelles dans le sol seront examinées périodiquement à une fréquence proposée par l'expert. Une fréquence minimale correspondant au pompage de 2 volumes poreux est considérée comme standard.

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

Les paramètres de suivi ayant trait aux nuisances font l'objet du **Tableau 10bis** suivant :

Tableau 10 BIS: Fréquences et paramètres des opérations de suivi ayant trait aux nuisances

Paramètres de suivi	Moyen	Paramètre	Fréquence minimale	Commentaires
Teneurs 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 ou PID, FID	Teneurs en composés volatiles	Lors du lancement, ensuite après 2 semaines et ensuite tous les 3 mois	Si présence de composés volatils et présence de cibles sensibles
Mesure de bruit	Présence d'un réseau de mesures	Niveau de bruit	En cas de plainte des riverains	

Mesure des odeurs	Présence d'un réseau de mesures	Niveau des odeurs	En cas de plainte des riverains	Si présence de composés volatiles et présence de cibles sensibles
-------------------	---------------------------------	-------------------	---------------------------------	---

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 la nappe aquifère implique la remise à Bruxelles Environnement de un ou plusieurs rapports intermédiaires :

- Rapport intermédiaire clôturant l'étude pilote ou la phase de démarrage si celle-ci n'a pas été rapportée dans le projet. On estime à trois mois un délai normal d'exécution d'une phase de démarrage. Sur proposition justifiée de l'expert, ce délai peut être modifié, par exemple pour prendre en compte le calendrier d'aménagement du site (excavations englobant le noyau de pollution dans le sol exécutées simultanément au pompage dans le panache).
- 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 ou tranchées, abandon de puits ou de tranchées, extension du réseau de piézomètres d'observation en résultat de l'extension du panache, installation ou modification d'un dispositif d'injection d'eau, ...

Le contenu du premier rapport intermédiaire comprendra au minimum les informations reprises dans le **Tableau 11**.

Tableau 11 : Informations au minimum présentes dans le premier rapport intermédiaire

Rubrique	Paramètres et quantité à mesurer	Commentaires
Description du dispositif mis en œuvre (as built) pour le test pilote ou pour la première phase	Description des éléments du dispositif : puits de pompage (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête avec ou sans valve de mise à vide, tube de succion), piézomètres d'observation (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête), dispositif de mesure des débits des différents fluides (type, localisation,...), dispositif de mesure de la succion en cas de bioslurping (type, localisation), conduite d'amenée des fluides et station de séparation et traitement des fluides pompés	La localisation des différents éléments du dispositif fait l'objet de figures à joindre en annexe rapport intermédiaire
Pompage simple de l'eau souterraine	-Niveaux piézométriques mesurés avant et après lancement du pompage et après modification éventuelle des débits (données et cartes des isopièzes) - Rayon d'influence des différents puits - Vérification de l'extension de la zone de capture - Débits pompés dans les différents puits (valeurs instantanées et valeurs cumulées) - Teneurs mesurées dans l'eau pompée et si possible bilan de masse des polluants présents - Teneurs dans les piézomètres d'observation au départ et après démarrage du pompage (au sein du panache et en périphérie de celui-ci) - Teneurs en polluants des eaux traitées et rejetées ou réinjectées - Nécessité d'adjoindre une étape supplémentaire à l'installation de traitement - Débits d'injection éventuels - Durée projetée du traitement sur base des données acquises - Faisabilité de l'intervention - Mesures correctives à apporter	
Ecrémage simple avec skimmer ou pompe à membrane	-Niveaux piézométriques mesurés avant et après lancement du pompage et après modification éventuelle des débits (données et cartes des isopièzes) - rayon d'influence des différents puits - Vérification de l'extension de la zone de capture - débits pompés en eau souterraine et en produit pur dans les différents puits (valeurs instantanées et valeurs cumulées) - teneurs mesurées dans l'eau pompée et si possible bilan de masse des polluants présents- teneurs dans les piézomètres d'observation au départ et après démarrage du pompage (au sein du panache et en périphérie de celui-ci) - Mesure de la diminution de l'épaisseur de la couche surnageante dans les piézomètres d'observation -Mesure du rayon d'influence de l'écémage sur la couche de produit pur - Mesure de l'extension de la couche de produit pur - Teneurs en polluants des eaux traitées et rejetées ou réinjectées - Nécessité d'adjoindre une étape supplémentaire à l'installation de traitement - Evaluation des risques de colmatation des installations de traitement - Débits d'injection éventuels - Durée projetée du traitement sur base des données acquises - Faisabilité de l'intervention - Mesures correctives à apporter.	
Ecrémage avec rabattement (une seule pompe ou un skimmer + 1 pompe de rabattement)	-Niveaux piézométriques mesurés avant et après lancement du pompage et après modification éventuelle des débits (données et cartes des isopièzes) - rayon d'influence des différents puits - Vérification de l'extension de la zone de capture - débits pompés en eau souterraine et en produit pur dans les différents puits (valeurs instantanées et valeurs cumulées) - teneurs mesurées dans l'eau pompée et si possible bilan de masse des polluants présents - Nécessité de traiter l'eau souterraine pompée - Teneurs dans les piézomètres d'observation au départ et après démarrage du pompage (au sein du panache et en périphérie de celui-ci) - Mesure de la diminution de l'épaisseur de la couche surnageante dans les piézomètres d'observation -Mesure du rayon d'influence de l'écémage sur la couche de produit pur - Mesure de l'extension de la couche de produit pur - Teneurs en polluants des eaux traitées et rejetées ou réinjectées - Nécessité d'adjoindre une étape supplémentaire à l'installation de traitement - Evaluation des risques de colmatation des installations de traitement - Débits d'injection éventuels - Durée projetée du traitement sur base des données acquises - Faisabilité de l'intervention - Mesures correctives à apporter.	
Bioslurping	-Niveaux piézométriques mesurés avant et après lancement du pompage et après modification éventuelle des débits (données et cartes des isopièzes) - rayon d'influence des différents puits - Vérification de l'extension de la zone de capture - débits pompés en eau souterraine, en produit pur et en gaz dans les différents puits (valeurs instantanées et valeurs cumulées) - teneurs mesurées dans l'eau pompée et dans les gaz pompés et si possible bilan de masse des polluants présents - Mesure de la teneur en O2 et CO2 dans les gaz pompés - Teneurs dans les piézomètres d'observation au départ et après démarrage du pompage (au sein du panache et en périphérie de celui-ci) - Mesure de la diminution de l'épaisseur de la couche surnageante dans les piézomètres d'observation -Mesure du rayon d'influence de l'écémage sur la couche de produit pur - Mesure du vide dans le puits de pompage, les piézomètres d'observation et mesure du rayon d'influence du pompage sur le gaz du sol - Mesure de l'extension de la couche de produit pur - Teneurs en polluants des eaux traitées et rejetées ou réinjectées - Teneurs mesurées dans les gaz rejetés - Nécessité d'adjoindre une étape supplémentaire à l'installation de traitement - Evaluation des risques de colmatation des installations de traitement - Débits d'injection éventuels - Durée projetée du traitement sur base des données acquises - Faisabilité de l'intervention - Mesures correctives à apporter.	Les aspects ayant trait à la SVE (Soil Vapor Extraction) et au Bio-venting font l'objet d'un code de bonne pratique distinct

12.2. Mesures correctives et optimisation

Les mesures correctives à apporter à une intervention par pompage couvrent de nombreux aspects. Les situations rencontrées le plus fréquemment sont reprises aux points suivants.

12.2.1 L'objectif poursuivi est le confinement ou l'interception du panache de pollution

Problème :

Le dispositif mis en place n'est pas en mesure d'empêcher l'extension du panache latéralement ou verticalement ou longitudinalement vers l'aval, comme indiqué par les cartes isopièzes et/ou les teneurs mesurées dans les piézomètres de contrôle situés en périphérie ou aval du panache et à l'intérieur de celui-ci (extension verticale)

Solutions correctives possibles :

- Augmenter les débits de pompage dans les puits individuels afin d'accroître les zones d'influence et de capture ;
- Augmenter la densité des puits de pompage (au sein du panache) ou d'interception (en périphérie ou en aval du panache) ;
- Vérifier et modifier la profondeur des crépines des puits de pompage de manière à pomper au sein de l'entièreté des couches aquifères polluées ;
- En cas de débits de pompage trop importants (nappes alluviales circulant dans des sables grossiers et des galets) coupler le pompage d'interception avec d'autres techniques : murs de confinement + barrières de traitement, ...
- Vérifier la présence de voies de passage préférentiel (réseau d'impétrants, ...) et les colmater.

12.2.3 L'objectif poursuivi est le traitement du panache de pollution

Problème :

La nappe aquifère est de faible puissance et suite au pompage, le niveau de la nappe chute et les débits pompés deviennent négligeables. En cas de présence d'une phase libre flottante (LNAPL), la chute du niveau piézométrique risque d'augmenter l'épaisseur de la couche aquifère impactée par une phase libre résiduelle.

Solutions correctives possibles :

- Diminuer les débits de pompage (et ainsi augmenter la durée prévue du traitement) ;
- Effectuer le pompage par intermittence de manière à diminuer le battement du niveau de la nappe (ce qui augmentera la durée prévue du traitement) ;
- Procéder à une injection d'eau en amont ou au sein du panache de manière à maintenir les débits de pompage. Attention, l'impact de l'injection sur la migration et la capture des polluants doit être documentée lors de la phase pilote ou lors de la phase de démarrage.

Problème :

Les teneurs en polluants mesurées dans l'eau pompée des différents puits sont très différentes de sorte que le ratio entre quantités de polluants interceptés et volumes pompés est plus faible que prévu ce qui entraîne un supplément de coût.

Solutions correctives possibles :

- Moduler les débits de pompage en fonction de la position des différents puits au sein du panache ou en périphérie. Cette modification peut être mise en place en variant les débits de pompage individuels ou en variant les durées d'opération en cas de pompage séquentiel.
- Vérifier la profondeur des crépines des puits en activité par rapport à la profondeur effective du panache. Le cas échéant, placer de nouveaux puits avec une position de la longueur crépinée adaptée.

Problème :

Les teneurs résiduelles en polluant dans l'eau souterraine mesurées dans les piézomètres d'observation chutent moins vite qu'anticipé sur la base du nombre de volumes poreux pollués à prendre en charge et les teneurs « rebondissent » après arrêt du pompage.

Solutions correctives possibles :

De manière typique les teneurs résiduelles au sein d'un panache de contamination lors d'une opération par pompage suivent une tendance telle qu'illustrée dans la **Figure 2**.

La décroissance des teneurs se produit avec retard et lors du pompage les teneurs se stabilisent à un niveau pouvant dépasser les objectifs [du traitement](#). Après interruption du pompage les teneurs regrimpent et peuvent se stabiliser à un niveau plus élevé. Les causes de ce comportement sont diverses : présence d'une phase libre de contaminant ou d'une phase solide dont la mise en solution progressive contrôle le niveau de teneur, la désorption progressive d'une charge importante de polluant adsorbée sur la phase solide du sol (sols argileux et/ou à forte teneur en matière organique développant une surface spécifique élevée), la présence dans l'aquifère de couches de perméabilités fort différentes de sorte que les teneurs se stabilisent en fonction de la vitesse de diffusion des polluants au travers des couches peu perméables vers les couches assurant une vitesse de circulation élevée.

De manière à limiter les coûts liés à l'extraction et le traitement de grandes quantités d'eau, les débits de pompage peuvent être diminués après la phase de décroissance des teneurs ou même le pompage peut être mené en intermittence. Les battements du niveau de la nappe ainsi créés permettent de mobiliser les polluants immobilisés dans les couches désaturées du sol.

La neutralisation des zones renfermant du produit pur par confinement à l'aide de barrières physiques ou par excavation et enlèvement ponctuel peut s'avérer une alternative séduisante du point de vue économique.

Problème :

Lors d'un bioslurping, les mesures de CO₂ dans l'air du sol décroissent et se stabilisent à niveau background démontrant l'absence de dégradation significative des polluants.

Solutions correctives possibles :

Bioaugmentation, stimulation par ajout de nutriment NPK

Problème :

Chute des débits pompés alors que les niveaux piézométriques n'ont pas diminué.

Solutions correctives possibles :

Inspection des puits et des conduites afin de vérifier l'absence de colmatage. Les puits colmatés par des dépôts, des précipitations (Fer ou carbonates) ou des colonies bactériennes sont nettoyés par injection d'acides, de vapeur ou d'agents biocides. Les conduites bouchées par les sédiments sont purgées, ...

Problème :

Croissance brusque et soutenue des teneurs en cours de pompage.

Solution corrective possible :

Le pompage et le gradient hydraulique qu'il induit attire un panache de contamination voisin de même nature non identifié lors de l'étude de caractérisation. Cette hypothèse est vérifiée par l'exécution de nouveaux forages et prélèvements. Le cas échéant, une nouvelle étude détaillée et un nouveau projet doit être introduit par le titulaire de l'obligation de cette deuxième pollution.

Une autre alternative est la création d'une nouvelle source de pollution à partir des fuites et pertes au niveau des pompes, cuves de stockage et séparateurs de la station de traitement. En ce cas, la source est immédiatement éradiquée et si nécessaire le dispositif de traitement est modifié.

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

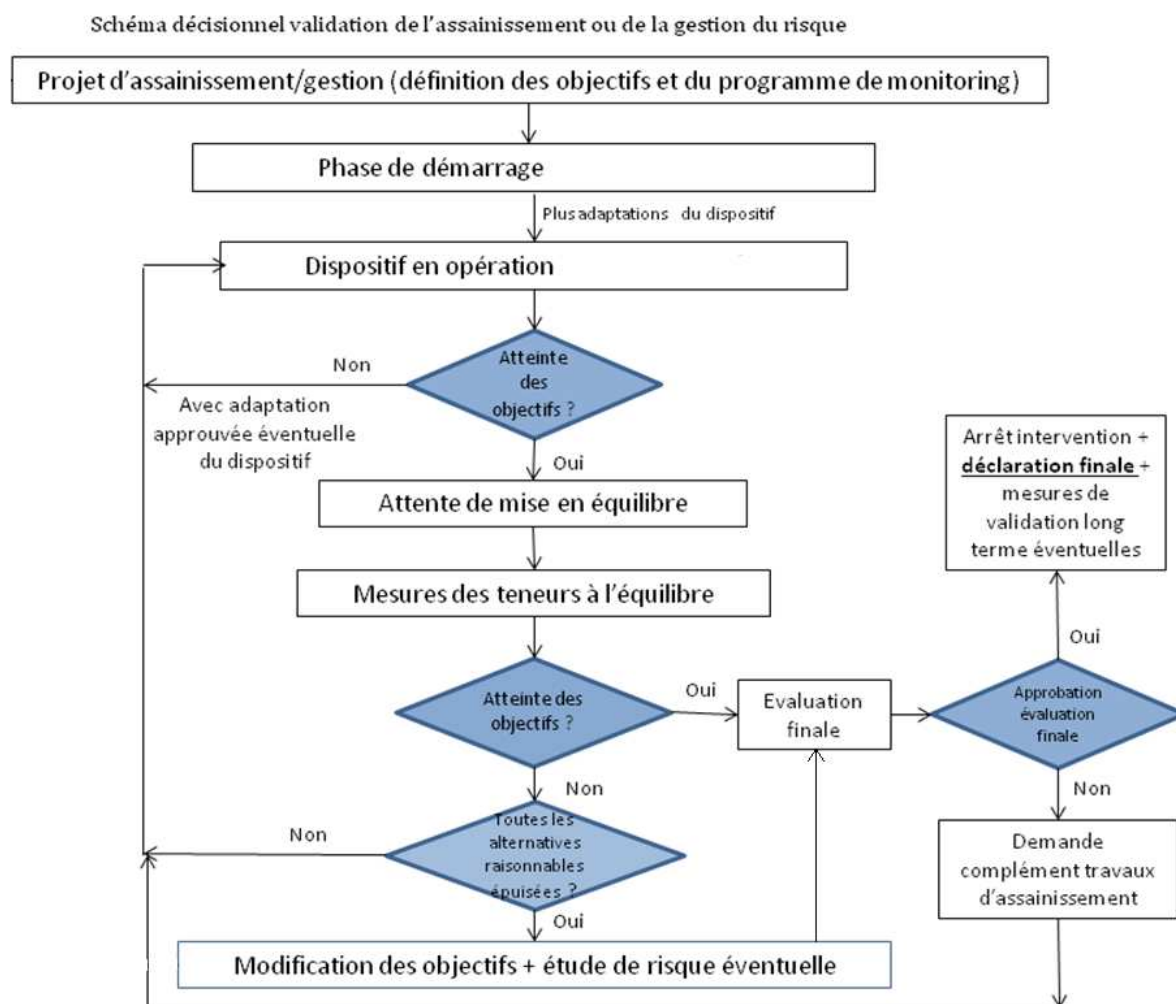
Les mesures de validation visent à préciser si les objectifs [du traitement](#) sont atteints de manière durable de sorte que les opérations [de traitement](#) peuvent être considérées comme terminées. Ces mesures consistent en :

- Mesure des teneurs en polluants dans les piézomètres de contrôle et, éventuellement dans les puits de contrôle si l'échantillonnage y est possible compte tenu de leur équipement. Cette mesure est effectuée lorsque le dispositif de pompage est en activité. 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 valeurs d'intervention définies dans [l'AGRBC du 29/03/2018](#). Le cas échéant, ces valeurs d'intervention sont à considérer comme des valeurs objectifs de teneur complémentaires à prendre en compte.
- En cas d'atteinte des objectifs, la mesure est répétée après interruption du pompage¹ de manière à vérifier la durabilité des résultats acquis. Le délai entre la fin du pompage et la mesure des teneurs fera l'objet d'une proposition de la part de l'expert. Il variera de trois mois à 6 mois maximum.
- En cas de maintien des niveaux de teneurs en équilibre sous les valeurs objectifs, [le traitement](#) peut être considérée comme accompli et le dispositif peut alors être démantelé.
- Dans le cas contraire, le dispositif de pompage est remis en marche.
- Cette démarche concernera l'entièreté de la zone d'intervention (c'est-à-dire tous les points d'échantillonnage) pour les petits chantiers. Pour les grands chantiers, la démarche pourra être appliquée de manière modulaire selon les teneurs mesurées dans les différentes zones du chantier.
- En cas de zones de pollution résiduelle, il peut être utile de cartographier les teneurs mesurées et déterminer par krigeage les courbes d'iso-concentration de manière à aisément identifier les poches de pollution résiduelle. L'aide de logiciels de géo-statistique tels que SURFER s'avère à cet effet d'une grande utilité (la prise en compte en périphérie du panache de valeurs fictives, égales aux teneurs background mesurées lors des travaux d'étude, permet d'éviter les effets de bordures). Ces poches résiduelles peuvent alors faire l'objet d'un traitement particulier avec, si nécessaire, l'adjonction de nouveaux puits de pompage de manière à accélérer la clôture du chantier.
- Si [le traitement](#) par pompage vise également à traiter les teneurs dans le sol dans les couches saturées ou la frange capillaire de l'aquifère, les mesures de validation comprendront également une 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 mesurées seront comparées aux valeurs objectifs. En cas de non atteinte des objectifs de teneurs, le dispositif de pompage est maintenu en activité après mise en place de mesures correctives éventuelles : pompage intermittent, injection d'eau avec ou sans adjuvants chimiques stimulants, ... Une fois encore, pour les grands chantiers, l'examen des teneurs peut être modulé en fonction des différentes zones.

¹ En cas d'injection d'adjuvant (complexant, oxydant, tensio-actif,), le délai prend cours dès le moment où l'effet de l'adjuvant prend fin.

- Si les opérations de traitement visent seulement à assainir ou gérer le niveau de contamination de l'eau souterraine, il peut être utile de connaître le niveau de contamination résiduelle du sol après traitement dans les couches aquifères de manière à préciser la catégorie de la parcelle sur la base du classement introduit à l'article 3 de l'Ordonnance du 5 mars 2009. A cet effet, une campagne de prélèvement et analyse d'échantillons de sol pourra être effectuée.
- En cas de présence d'une couche de produit pur, les différentes campagnes de prélèvement dans les piézomètres de contrôle incluront nécessairement une identification de la présence d'une couche de surnageant (LNAPL) et si possible d'une couche de produit plongeant (DNAPL). La présence d'une telle couche exclut tout arrêt du traitement en cours. La cartographie des zones encore impactées par une couche de produit pur pourra être exploitée pour élaborer les mesures correctives adéquates.

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



14. Monitoring à long terme éventuel : dispositif, types de mesures et schéma décisionnel

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

Le dispositif de validation à long terme comporte les éléments suivants :

- Certains des piézomètres d'observation établis au sein du panache traité et en aval de celui-ci ;
- Certains des anciens puits de pompage et des anciennes tranchées d'interception si la localisation des piézomètres d'observation disponibles n'est pas adéquate.

Contrairement aux mesures de suivi et de validation, les mesures de validation à long termes n'impliquent pas l'échantillonnage et l'analyse de la qualité des eaux souterraines au niveau de tous les piézomètres d'observation (et éventuellement les puits et les tranchées) mais un certain nombre d'entre eux représentatifs de l'état du panache traité et de la situation en aval de ce dernier ou, pour les grands chantiers, représentatif de la zone des travaux pour laquelle une incertitude persiste quant à la pérennité des résultats de l'intervention. Dans tous les cas de figure, un ou plusieurs piézomètres d'observation situés sur le parcours du panache traité, en amont des cibles sensibles identifiées sera(ont) inclu(s) dans les campagnes de prélèvement et d'analyses.

Les paramètres qui seront relevés seront :

Les teneurs résiduelles en polluants. 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 teneurs résiduelles en composés chimiques stimulants éventuellement injectés ;
- La présence d'une phase libre surnageante ou plongeante de polluants ;
- 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 Bonne Pratique n° 3 de Bruxelles Environnement « Prise d'échantillons de sol, d'eau souterraine, de sédiments et d'air du sol. ... ». Pour l'analyse des échantillons d'eau souterraine, il convient de se conformer au Code de Bonne Pratique n° 4 « Code de Bonne Pratique pour les méthodes d'analyse ... », de Bruxelles Environnement.

La durée et la fréquence des mesures de validation 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 objectif **de traitement**. L'interprétation des valeurs s'effectue comme suit :

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

15. Recommandation pour la santé, sécurité et organisation

15.1. Check-list succincte pour les entrepreneurs

La check-list à destination des entrepreneurs est la suivante. 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 12** et ayant trait à la sécurité sont d'office systématiquement d'application.
- La check liste du **Tableau 12** est valable pour les entrepreneurs et leurs sous-traitant 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 bi-mensuelle ;
- Pour les conduites de collecte et d'amenée des eaux pompées, on privilégiera de manière systématique, les conduites enterrées de manière à éviter les accidents, l'incidence du gel et les actes de vandalisme ;
- Les points de rejet dans le réseau d'égouttage feront l'objet d'un raccord enterré accessible par une chambre de visite ;
- En cas de pompage d'eau polluée par des composés volatils, lorsque les installations du chantier (puits et station de traitement) sont proches de bâtiments, des analyses de l'air pourraient être prévues au sein de ces bâtiments de manière à mesurer l'importance des teneurs en composés volatils.
- Lorsqu' un risque d'explosion est avéré au niveau des puits de pompage, des conduites ou de la station de traitement, le risque d'explosion (LEL) sera mesuré en continu et le système sera mis en sauvegarde dès mesure de dépassements de 10 % de la LEL ;
- En cas de stockage temporaire de terres polluées sur site des mesures seront prises pour éviter la contamination du sol et des eaux souterraines sous-jacentes.

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

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

Tableau 12 : check-list à destination des entrepreneurs

Rubrique	Vérification
Informations préalables complètes et suffisantes (cahier de charge, descriptif des travaux, ...)	
Vérification du dimensionnement compte tenu du matériel spécifique et de l'expérience de l'Entrepreneur	- Vérification du dimensionnement du réseau de pompage en fonction des caractéristiques hydrogéologiques (nombre de puits, rayon d'influence, distance entre chaque puits, profondeur de la nappe...), - Vérification de l'adéquation entre le matériel utilisé et les polluants recensés, - Evaluation du risque de colmatage (présence de Fe, Ca, ...), - Evaluation de la perte de charge du réseau, - Vérification du nombre de filtres connecté par collecteurs (attention si >8 filtres)
A	Demandes auprès des exploitants des réseaux effectuées et réponses adéquates obtenues
Etude de stabilité des ouvrages aériens	Etudes de stabilité adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser
Etude de stabilité des infrastructures enfouies	Etudes de stabilité adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser
Cibles sensibles	Cibles sensibles présentes aux alentours du chantier bien identifiées
Sources d'énergie	Disponibilité des sources en énergie et en fluides nécessaires aux travaux vérifiée
Points de rejets	Points de rejet des eaux usées et des gaz traités issus du traitement identifiés et compatibles avec les caractéristiques du site. Autorisations demandées et obtenues
Accessibilité aux équipements	Accessibilité du chantier aux équipements vérifiée et nuisance de l'acheminement évaluée
Aspect techniques du cahier des charges ou descriptif des travaux suffisants	Les quantités prévues pour le pompage, l'injection, le rabattement sont réalistes. Les mesures de perméabilité sont fiables. La nature des produits à manipuler, injecter ou/stocker est connue
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, rejets gazeux, ...
Les lignes de communication sont définies	identités et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'expert, des autorités compétentes sont connues
Informations devant être présentes dans le plan santé et sécurité, et prévention de l'entrepreneur	
Identification et nature des risques	Risques pour les bâtiments et les infrastructures aériennes du fait du rabattement (étude de stabilité) - Mesures préventives pour éviter les tassements - Mesures de contrôle des tassements
	Risques pour les infrastructures enterrées du fait du rabattement - Mesures préventives pour éviter les tassements - Mesures de contrôle des tassements
	Risques pour les infrastructures aériennes du fait de l'injection en cas d'inondation
	Risques d'explosion en cas de création de poches de produits volatiles inflammables

	Risque électrique : respect du RGIE, conformité des installations et rapport de contrôle
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de produits dangereux et/ou polluants
	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 de dispersion des polluants et/ou des produits chimiques stimulants en cas d'injection
	Risques pour la santé du personnel du fait de la présence de produits volatiles et/ou dangereux
	Risques d'accidents en général : chute, incendie, électrocution
	Risques climatiques : gel des conduites,
	Risques liés à la circulation pour les infrastructures présentes sur la voie publique
Identification et nature des risques	Risques liés à l'intrusion sur le chantier de personnes non autorisées : risque de vandalisme et risque pour la santé
	Risques en cas de travail en milieu confiné (caves, fosses, ...) liés à la mauvaise qualité de l'air du milieu
	Risques d'effondrement lors de l'excavation de drains et fossés : risque pour le personnel et les infrastructures aériennes et enterrées
Mesures préventives	Pour chacun des risques identifiés, identification et mise en place des mesures préventives y inclus la formation du personnel
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacun des risques identifiés : préparation des mesures corrective et d'intervention (en urgence si nécessaire)
Personnes et services à contacter en cas de problème	Pour chacun de risques identifiés, identité et coordonnées des personnes et/ou service à contacter : service incendie, commune, protection civile, exploitant des réseaux ...
Identification des nuisances possibles	Odeur pour le voisinage en cas de manipulation de matières volatiles
	Niveau des nuisances sonores : pompes, groupes électrogènes, ...
	Encombrement des voiries
	Salissement des voiries
Mesures préventives	Pour chacune des nuisances identifiées, identification et mise en place des mesures préventives
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacune des nuisances identifiées : préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence si nécessaire)
Plan de monitoring et d'entretien	Planning des visites de contrôle
	Planning des visites d'entretien
Identification des pannes et problèmes techniques susceptibles de se produire	Défectuosité des équipements et de l'installation (fuites).
	Chutes des pressions ou dépression ou des débits suite au colmatage des puits et conduites
	Epuisement prématuré des matériaux utilisés pour la filtration
	Débordements dans la station de traitement
Mise en place de systèmes d'alarme et de mise à l'arrêt et sauvegarde	Contrôle du fonctionnement du système de gestion à distance éventuel
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
Points d'attention spécifiques aux techniques de pompage mises en œuvre	
Toutes techniques	Mesure du niveau piézométrique dans les puits de pompage, Vérification de l'étanchéité du réseau de pompage lors de la mise en service de l'installation, Vérification de l'étanchéité du réseau de pompage en pleine charges, Vérification de la productivité de chaque puits, après démarrage de l'installation de pompage, Suivi des débits des pompes en régime.
Impétrants	Compléter éventuellement le repérage des réseaux par une prospection géophysique, Excavation manuelle préalable à proximité des canalisations ou des endroits à risques potentiels.
Pompage par refoulement	Mesure spécifique pour éviter la mise à sec, Mesure pour éviter la formation d'émulsion en cas de présence produits purs
Pompe aspirante	Vérification de la profondeur de la nappe (attention si profondeur > 5 m-ns), Evaluation du risque de cavitation, Evaluation du risque d'explosion (volatilité des polluants, matériel ATEX, ...)
Pompage multi-phases	Vérification de la profondeur de la nappe (attention si profondeur > 5 m-ns), Mise en place d'une installation de traitement de l'air extrait, Mise en place d'un système d'étanchéification des puits, Evaluation du risque d'explosions (volatilité des polluants, matériel ATEX, ...), Mesure de la dépression
Pompage sélectif de produits purs	Contrôle de la viscosité de la phase libre, Contrôle de variation du niveau de la nappe, Evaluation du risque d'explosions (volatilité des polluants, matériel ATEX, ...)
Réinjection	Mesures de suivi du risque de dispersion de la pollution liée au positionnement des puits de rejets (en collaboration avec l'Expert).

Tableau 13 : Check-list à l'intention des experts

Rubrique	Vérification
Informations préalables complètes et suffisantes (études préalables, cahier de charge, descriptif des travaux, ..)	
Caractéristiques du sol et des couches aquifères 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 hydrodynamiques du sol : mesures de la conductivité hydraulique, tests de pompage, mesures piézométriques et sens d'écoulement, variations saisonnières de la piézométrie, puissance de l'aquifère, isolation des différentes aquifères éventuels, estimation des facteurs de retard. Capacité d'infiltration si réinjection prévue. 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 (facteur de retard), présence d'une phase libre surnageante ou plongeante, présence d'une phase précipitée solide ou amorphe, évolution naturelle attendue des teneurs (évolution mesurée, potentiel d'atténuation naturelle)
Caractéristiques des infrastructures sur le site et son voisinage immédiat	Inventaire et cartographie des bâtiments et infrastructures aériennes. Inventaire et cartographie des infrastructures enterrées et impétrants.

Etude de stabilité des ouvrages aériens	Etudes de stabilité nécessaire ? Si oui, sont-elles adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser
Etude de stabilité des infrastructures enfouies	Etudes de stabilité nécessaire ? Si oui, sont-elles adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser
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, drains, localisation, dimension, ...), établissement des quantités : débits, pressions, dépressions, types de pompes...
	Mode de fonctionnement du dispositif : continu vs intermittent. Risques de colmatage. Actions correctives et d'optimisation possible.
	Vérification a priori de la performance du dispositif : sens et mode de la circulation de l'eau souterraine, extension de la zone de capture, efficacité de l'interception des polluants dissous, efficacité de l'interception de la phase libre, ...
	Vérification qu'éventuellement un mode de traitement distinct doit être suivi pour la source et le panache de pollution respectivement
	Objectifs du traitement sont bien identifiés
	Estimation de la durée du traitement et nécessité de faire appel à des procédés complémentaires : produits chimiques stimulants, ...
Points de rejets	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, phase libre, ...) ?
	Points de rejet des eaux usées et 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 pratiques et les autres recommandations de Bruxelles Environnement
Identification des procédures particulières à respecter	Identifier les procédures particulières et vérifier que leur respect est bien pris en compte dans le cahier des charges ou le descriptif des travaux : transport des déchets dangereux, rejets gazeux, ...
Les lignes de communication sont définies	identité et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'agent de Bruxelles Environnement, des autorités compétentes sont connues
Identification et nature des risques	Risques pour les bâtiments et les infrastructures aériennes du fait du rabattement (étude de stabilité)
	Risques pour les infrastructures enterrées du fait du rabattement
	Risques pour les infrastructures aériennes du fait de l'injection en cas d'inondation
	Risques d'explosion en cas de création de poches de produits volatiles inflammables
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de produits dangereux et/ou polluants
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de sol pollué sur site (lors de l'exécution des puits ou des fossés).
	Risque de dispersion des polluants et/ou des produits chimiques stimulants en cas d'injection
	Risques climatiques : gel des conduites, ...
	Risques liés à la circulation pour les infrastructures présentes sur la voie publique
	Risques d'effondrement lors de l'excavation de drains et fossés : risque pour le personnel et les infrastructures aériennes et enterrées
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 pour le voisinage en cas de manipulation de matières volatiles
	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 de systèmes d'alarme et de mise à l'arrêt et sauvegarde	
Planning et contenu des opérations de suivi, de validation et de validation à long terme (post-gestion)	
Dispositif de suivi	Descriptif, localisation et cartographie du dispositif de suivi : piézomètres de contrôle, points d'échantillonnage de l'eau pompée et traitée, points d'échantillonnage des gaz rejetés, échantillonnage de l'air ambiant éventuel, débitmètres, ... Prise en compte des cibles sensibles à protéger.
Paramètres du suivi	Mesures piézométriques et cartes isopièzes, débits pompés, teneurs dans l'eau pompée, bilan de masse de la charge polluante, teneurs résiduelles en polluants et en produits de dégradation (si délétères) dans la nappe et répartition, calcul de l'extension des zones de capture, teneurs des eaux pompées à l'entrée et la sortie de la station de traitement, teneurs des gaz pompés à l'entrée et la sortie de la station, présence et puissance de la phase libre, débits d'injection, extension latérale et verticale du panache, migration du panache vers les cibles sensibles
Paramètres d'optimisation	Horaire du pompage, modulation des débits selon les zones, optimisation de la dépression de service (bioslurping), injection de produits stimulants, placement de nouveaux puits (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 panache, rebond des teneurs, bilan de la charge masse polluante
Etude de risque si modification des objectifs	Les données recueillies sont-elles suffisantes pour la réalisation de cette étape ?
Validation à long terme (post-gestion)	Dispositif de suivi : piézomètres (ou puits) 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

16. Bibliographie

Lors de la rédaction du code, les sources bibliographiques suivantes ont été consultées :

- Methods for Monitoring Pump and Treat Performances, Robert M. Cohen et al., USEPA, June 1994
- LNAPL Distribution and Recovery Model (LDRM), Volume 1 : Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media, Regulatory and Scientific Affairs Department, ARI Publication 4760, January 2007
- Ground Water Issue, Suggested Operating Procedures for Aquifer Pumping Tests, Paul S. Osborne, USEPA, 1993
- Estimation of Free Hydrocarbon Volume from Fluid Levels in Monitoring Wells, R.J; Lenhard and J.C. Parker, 1990, Ground Water, Vol 28, N° 1
- Capture-Zone Type Curves : A Tool for Aquifer Cleanup, Iraj Javandel and Chin-Fu Tsang, 1986, Ground Water, Vol 24, N° 5
- Principles and Practices of Bioslurping, Matthew C. Place et al., 2001, Battelle Press.
- Achilles, Veiligheid, gezondheid en milieuzorgsysteem voor on –site bodemsaneringwerken, OVAM 2001
- Code van goede praktijk – Pump and Treat, Deel 1, Grondwateronttrekkingsaspecten, OVAM 2002.