

## Code de Bonne Pratique 3

### Oxydation chimique *in situ*

Bruxelles Environnement



## Contenu

### Table des matières

1.	Introduction.....	4
2.	Description de la technique et des principes technologiques mis en œuvre .....	5
2.1.	Description générale.....	5
2.2.	Les réactifs oxydants .....	5
2.2.1.	L'eau oxygénée et le réactif de Fenton .....	7
2.2.2.	Le percarbonate de soude ( $2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2$ ) .....	9
2.2.3.	Le permanganate de potassium et de Sodium.....	9
2.2.4.	Le persulfate de Sodium.....	11
2.2.5.	L'ozone .....	12
2.2.6.	L'ozone combinée à l'eau oxygénée.....	13
2.2.7.	Remarques générales sur les oxydants.....	13
2.2.8.	Association de l'oxydation chimique avec d'autres techniques de traitement.....	14
2.3.	Les méthodes d'apport des réactifs oxydants.....	14
2.3.1	Infiltration active et injection directe sous pression.....	15
2.3.2	Infiltration passive.....	17
2.3.3	La recirculation ou circulation forcée.....	18
2.3.4	L'incorporation au sol par mélange in-situ .....	19
2.3.5	L'injection d'ozone dans la couche saturée (sparging).....	20
3.	Description des variantes .....	21
3.1.	L'oxydation chimique stimulée par apport d'agents tensio-actifs.....	21
3.2.	L'oxydation chimique associée au chauffage du sol par injection de vapeur chaude.....	21
4.	Objectifs poursuivis : panache versus noyau .....	22
5.	Polluants et situations les plus favorables (notions qualitatives) .....	23
6.	Examen a priori de la faisabilité technique .....	24
6.1	Choix d'un oxydant eu égard aux types et aux quantités de polluants présents.....	24
6.2	Caractéristiques limites du sol à traiter.....	25
6.2.1.	Les caractéristiques physiques du sol .....	25
6.2.2.	Hydrogéologie locale .....	26
6.2.3.	Propriétés physico-chimiques du sol .....	26
6.3	Caractéristiques limites du site à assainir ou gérer .....	27
7.	Examen spécifique de la faisabilité du traitement.....	28
7.1	Paramètres du polluant, du sol et du site à mesurer .....	28
7.2	Nécessité d'essais préalables en laboratoire .....	32
7.3	Nécessité d'un test pilote et caractéristiques minimales de ce test.....	35
8.	Description d'une installation type.....	40
8.1.	Infiltration active ou passive.....	40
8.2.	Infiltration (active ou passive) + recirculation.....	40
8.3.	Injection directe sous pression .....	41
8.4.	Injection d'ozone dans la couche saturée.....	41
8.5.	Oxydation in-situ + chauffage du sol (par injection de vapeur) .....	42
8.6.	Schéma conceptuel.....	43
9.	Descriptif de l'installation mise en place .....	44
10.	Limitation des incidences du projet sur l'environnement : odeurs, bruits, poussières, ... ..	47
10.1.	Points à prendre en compte .....	47
10.2.	Risques liés à la nature dangereuse ou toxique des réactifs utilisés.....	47
10.3.	Nuisances pour la qualité de l'air (en cas de traitement par l'ozone).....	48
10.4.	Risques d'incendie et d'explosion.....	48
10.5.	Risques de dissémination des substances oxydantes .....	49
10.6.	Nuisances acoustiques.....	49

10.7.	Risques pour les installations de captage voisines.....	49
10.8.	Conformités aux cadres légaux existants.....	49
11.	Supervision du traitement.....	51
11.1	Mesures de surveillance : dispositif type .....	51
11.1.1.	Infiltration active ou passive.....	51
11.1.2.	Infiltration (active ou passive) + recirculation .....	51
11.1.3.	Injection directe .....	51
11.1.4.	Mélange au sol.....	52
11.1.5.	Injection d'ozone dans la zone saturée + extraction des gaz de la zone insaturée 52	
11.1.6.	ISCO + Variante chauffage du sol par injection de vapeur .....	53
11.2.	Mesures de supervision : paramètres de supervision du traitement et fréquences.....	53
12.	Rapportage, optimisation et mesures correctives.....	61
12.1	Rapportage.....	61
12.2	Mesures correctives et optimisation .....	63
13.	Mesures de validation et schéma décisionnel arrêt-prolongation du traitement .....	65
14.	Monitoring à long terme éventuel : dispositif et type de mesures.....	67
15.	Santé, sécurité et organisation.....	69
15.1	Check-list succincte pour les entrepreneurs.....	69
15.2	Check-list succincte pour les experts en pollution du sol .....	73
16.	Sources bibliographiques.....	76

# 1. Introduction

La technique d'intervention s'intitule « Oxydation chimique in-situ ». Cette technique est fréquemment mentionnée dans la littérature sous le vocable ISCO (In Situ Chemical Oxidation).

Elle vise principalement la prise en charge d'une pollution du sol et/ou des eaux souterraines par apport de réactifs chimiques oxydants aptes à réagir avec les composés polluants et à les dégrader rapidement pour donner naissance à des produits de réaction inoffensifs et naturellement présents dans le sol. Elle peut être appliquée aussi bien dans les couches saturées que non saturées du sol. Elle est utilisée pour traiter les zones sources de pollution où les teneurs en polluants sont élevées et également les panaches de pollution où les pollutions sont diluées.

De manière indirecte, la mise en œuvre de cette technique induit la libération d'oxygène dans le sol, ce qui favorise la dégradation aérobie des composés polluants par voie biologique dans le sol (atténuation naturelle).

En cas de présence de quantités importantes de produit pur, surnageant LNALP ou plongeant DNALP, l'élimination de cette phase doit être opérée en préalable à la mise en œuvre de l'oxydation chimique sans quoi il y aurait lieu d'injecter des quantités très élevées de réactifs de sorte que les faisabilités financière et technique de l'opération seraient médiocres.

## Remarque

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

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

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

### 2.1. Description générale

Cette technique **de traitement** vise au traitement d'une tache de pollution du sol et/ou de l'eau souterraine, par l'oxydation chimique des composés polluants suite à l'addition de réactifs oxydants.

L'objectif poursuivi est donc de réduire et, dans le meilleur des cas, faire disparaître la charge polluante présente dans les couches saturées et/ou insaturées au sein d'une tache de pollution. La charge polluante traitée pouvant être adsorbée sur la phase solide, ou sous forme de produit pur dans les pores du sol, sous forme dissoute dans l'eau souterraine ou en couche libre (peu importante) en surface de la nappe (LNALP). Idéalement, les produits de la dégradation chimique des polluants sont le  $\text{CO}_2$ , le  $\text{SO}_4^-$ , le  $\text{Cl}^-$ , l' $\text{H}_2\text{O}$ ... produits inoffensifs et naturellement présents dans le sol. Cependant, lorsque la réaction d'oxydation n'a pas été menée jusqu'à son terme (par manque d'oxydant par exemple), des produits intermédiaires peuvent être formés et demeurer quelques temps dans le sol. En règle générale, ces produits intermédiaires sont moins nocifs que les polluants d'origine et sont nettement plus susceptibles d'être dégradés dans le sol par voie biologique. Par exemple, en cas d'oxydation incomplète du PCE, la littérature rapporte la présence des composés suivants :

PCE → Acide dichloroacétique → acide formique (méthanoïque).

Typiquement, la mise en œuvre de cette technique implique les étapes suivantes :

- L'adjonction de réactifs oxydants dans la tache de pollution du sol: adjonction par mélange au sol, infiltration active ou passive, injection dans le sol de solutions liquides ou de gaz.
- Un dispositif de contrôle et de supervision du traitement permettant de suivre la distribution de l'agent dans le sol et de suivre le progrès de la destruction des polluants.
- Un dispositif de contrôle et de supervision du traitement permettant de suivre les risques d'accidents: dispersion et migration des réactifs vers les infrastructures sensibles, risque d'explosion et d'incendie...
- En cas d'apport de l'oxydant sous forme gazeuse (ozone) la mise en œuvre d'un dispositif de collecte des gaz du sol. Un dispositif de traitement des gaz extraits du sol adapté aux débits attendus et aux polluants à traiter. Eventuellement, un dispositif de traitement ou prise en charge des condensats liquides.

### 2.2. Les réactifs oxydants

Les oxydants couramment utilisés sont :

- L'eau oxygénée (ou peroxyde d'hydrogène) utilisée seule ou dans le réactif de Fenton ;
- Le permanganate de sodium ou potassium ;
- Le persulfate de sodium et le persulfate activé ;
- L'ozone.

Il est fréquent d'utiliser des peroxydes sous forme solide (peroxyde de Ca et de Mg). Ces produits sont caractérisés par une bonne stabilité dans le sol et sont appliqués en qualité de source régulière et lente d'O<sub>2</sub> dans le sol. Ils ne sont donc pas utilisés à des fins d'oxydation chimique des polluants, mais bien pour favoriser l'atténuation biologique grâce à l'approvisionnement régulier en O<sub>2</sub> qu'ils assurent. L'utilisation de ces composés fait l'objet d'un autre code de bonne pratique (L'atténuation biologique stimulée).

Outre les oxydant mentionnés dans la liste ci-dessus, il convient de mentionner les réactifs suivants :

- Le percarbonate de sodium ;
- Les combinaisons d'oxydants : eau oxygénée + ozone ;
- Le fer hexavalent (ion ferrate) présentant de nombreux avantages (faible nuisance environnementale, haut pouvoir oxydant, longue rémanence et stabilité dans le sol) mais dont le prix élevé limite actuellement l'utilisation.

La réaction d'oxydo-réduction peut se produire de deux manières :

- Une réaction selon une voie directe : l'oxydant attaque les liaisons chimiques du contaminant qui est détruit pour donner naissance à des produits inoffensifs tels que CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> ;
- Une réaction faisant intervenir les radicaux libres. Ceux-ci sont extrêmement réactifs en raison de la présence d'un ou deux électrons célibataires dans la couche électronique périphérique, de sorte que leur rémanence dans le sol est limitée à quelques secondes. Leur migration au sein du sol est donc très réduite.

Les propriétés de ces réactifs sont résumées dans le **tableau 1**.

**Tableau 1: Propriétés des principaux oxydants utilisés pour l'oxydation in situ**

Oxydant	Eau Oxygénée	Permanganate de Potassium et de Sodium	Persulfate de Sodium	Ozone	Perozone	Percarbonate de Sodium
Formule chimique	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	KMnO <sub>4</sub> / NaMnO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>3</sub>	2Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Etat physique lors de l'acquisition	Liquide	Solide / liquide	Solide ou liquide	Gaz	Gaz	Solide ou liquide
Potentiel d'oxydation en Volt	1,8 - 2,8	1,7	2,1 - 2,6	2,1	2,1	1,7
Catalyseur - facteur activant	Fe(II), Fe(III)	Néant	Fe(II), Fe(III), chaleur, pH	Néant	O <sub>3</sub>	Fe(II), pH
Agent actif	OH <sup>•</sup> , O <sub>2</sub> <sup>•-</sup> , HO <sub>2</sub> <sup>•</sup> , HO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>•-</sup>	O <sub>3</sub> , OH <sup>•</sup>	O <sub>3</sub> , OH <sup>•</sup>	HO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
Perte dans le sol (%/jour)	10 -> 95	0,1 - 1	1 - 3	1 - 5	1 - 5	1 - 3
Temps de rémanence dans le sol	Quelques minutes à quelques heures	Quelques semaines à plusieurs mois	Quelques jours à plusieurs semaines	Quelques heures à plusieurs jours	Quelques heures à plusieurs jours	Quelques jours à plusieurs semaines

Méthode d'application courante	Infiltration (active ou passive) dans des puits verticaux	Injection directe	Infiltration (active ou passive) dans des puits verticaux	Sparging	Saparging	Injection directe
--------------------------------	---	-------------------	---	----------	-----------	-------------------

(Extrait et traduit de Code of Good Practice - In situ Chemical oxydation, CityChlor, April 2013, INTERREG IVB )

L'examen plus en détail des propriétés de ces réactifs fait l'objet des sections suivantes.

### 2.2.1. L'eau oxygénée et le réactif de Fenton

L'eau oxygénée est disponible dans le commerce sous la forme d'une solution incolore d'une teneur massique de 30% à 50 %.

L'eau oxygénée se caractérise par un potentiel redox relativement bas et une courte demi-vie, ce qui en fait un réactif moins attractif pour l'oxydation in situ (par exemple, en conditions normales de pression et température, le peroxyde d'hydrogène n'est pas suffisamment puissant pour entraîner la minéralisation des hydrocarbures).

L'eau oxygénée a cependant le potentiel de former des radicaux libres en présence d'un catalyseur. Par exemple, en présence de Fer, différents radicaux libres sont formés dont le radical  $\text{OH}^{\bullet}$  dont la présence induit un potentiel redox d'environ 2.8 V. Ce radical à pouvoir oxydant puissant est non sélectif et disparaît rapidement dans le sol. L'ion sulfate joue également le rôle de catalyseur.

Dans les interventions par oxydation chimique, le catalyseur fer est principalement additionné sous la forme (Fe II), par adjonction de sulfate de fer. Lorsque le peroxyde d'hydrogène est utilisé en présence de fer, ce mélange est communément appelé le réactif de Fenton. Dans ce mélange, la teneur en peroxyde d'hydrogène varie de 5 à 10 % (vol/vol). La composition précise de ce mélange (teneur en peroxyde, en fer) est déterminée lors de l'étape de tests de laboratoire. Ces teneurs dépendent de la masse de polluants à oxyder, des caractéristiques physico-chimiques du sol, de la stœchiométrie de la réaction d'oxydation, de l'humidité et le volume poreux du sol. On notera que d'autres métaux (cuivre, molybdène) peuvent également jouer le rôle de catalyseur, mais le fer leur est préféré pour des raisons de prix et d'impact environnemental évidentes.

De manière à optimiser les teneurs en Fe(II) dissous, deux types de formulation du réactif de Fenton peuvent être mis en œuvre :

- Le réactif de Fenton classique :

Le Fe(II) est injecté sous forme d'une solution de sulfate de fer de teneur allant de 20 à 100 mg/l de fer. Pour maintenir une bonne solubilité du fer, le sol est acidifié par addition d'acide (HCl ou  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) de manière à atteindre le pH optimal du sol défini entre 3,5 et 5. En fonction du pouvoir tampon du sol, ce rabattement du pH est temporaire et au bout de 1 à 3 jours le pH remonte à sa valeur normale.

- Le réactif de Fenton modifié :



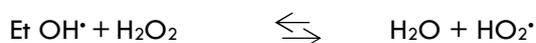
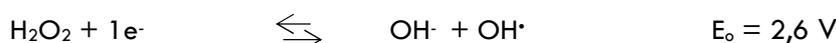
De manière à éviter l'acidification du sol et les risques de mobilisation des métaux lourds associés, le Fe(II) est additionné sous la forme complexée à l'aide d'un composé chélatant : EDTA (composé difficilement biodégradable), triphosphate sodique, ou citrate (moins pénalisant pour l'environnement).

Les réactions qui prennent place lors de l'adjonction de peroxyde d'hydrogène, parfois complexes, sont les suivantes :

- Oxydation directe :



- Réaction des radicaux libres



Les produits résultant de ces réactions, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>, sont inoffensifs et naturellement présents dans les sols.

Le radical OH<sup>•</sup> (hydroxyle) est très réactif de sorte que les réactions d'oxydation sont rapides et peu sélectives. Le réactif de Fenton peut donc être utilisé pour différents types de pollutions. Une autre conséquence de cette réactivité est que de grandes quantités d'oxydant doivent être utilisées.

Le radical hydroxyle est caractérisé par une courte durée de demi-vie de sorte que sa rémanence dans le sol est faible de même que son pouvoir de migration. En conséquence, les méthodes d'apport au sol doivent être telles qu'elles assurent un contact immédiat entre le réactif et le polluant. Les volumes d'oxydants apportés au sol doivent être suffisants pour occuper la totalité de la zone à traiter. Cet oxydant est donc à déconseiller pour les sols à faible perméabilité (temps de migration vers le polluant important) ou lorsque la distribution du polluant dans le sol est hétérogène. En règle générale, une seconde campagne d'injection est nécessaire.

Compte tenu de la vitesse de réaction élevée entre le peroxyde et le fer, lors de l'application du réactif, l'injection de l'eau oxygénée et du fer doit être réalisée dans des puits différents ou en mode alterné dans le même puits. Dans les sols naturellement riches en fer, il est possible de stabiliser la réaction du peroxyde par injection de phosphate. Ce dernier se combine avec le fer dissous le rendant ainsi moins disponible.

L'utilisation des peroxydes dans des sols riches en carbonates est également à déconseiller vu que les carbonates sont responsables de la consommation des radicaux libres. Les sols à réaction acide sont donc davantage propices à l'utilisation des peroxydes.

L'utilisation des peroxydes a également des effets secondaires à prendre en compte. L'oxydation par les radicaux libres est une réaction fortement exothermique. Le dégagement de chaleur combiné à la libération d'oxygène (décomposition) peut générer des situations dangereuses (risque d'explosion ou d'incendie). A cet égard, la vitesse de réaction des peroxydes est généralement contrôlée par l'utilisation du réactif à de faibles teneurs (<11 % vol/vol de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

L'addition d'acide dans le réactif de Fenton peut également avoir comme conséquence une libération et une mobilité accrues des métaux lourds dans le sol. Cette conséquence peut être le résultat de différents processus :

- Augmentation de l'étage d'oxydation, de la mobilité et de la toxicité de certains métaux : par exemple passage du Cr<sup>3+</sup> au Cr<sup>6+</sup>, à l'inverse le passage de l'As<sup>3+</sup> à l'As<sup>5+</sup> entraîne une diminution de la mobilité de l'As ;
- Libération des ions métalliques adsorbés sur la matière organique après oxydation de celle-ci ;
- Augmentation de la solubilité de certains métaux suite à la diminution du pH (dissolution des hydroxydes) ;
- Dissolution des oxydes de Fe et de Mn et libération des espèces métalliques co-précipitées : As.

En cas d'utilisation d'agents complexant (chélates), ces derniers peuvent influencer la mobilité des ions métalliques.

Lors de la réaction d'oxydation, de l'O<sub>2</sub> est libéré dans le sol ce qui peut entraîner les effets suivants :

- Stimulation de la dégradation biologique des polluants organiques ;
- Entraînement des polluants volatiles dans la phase gazeuse et les risques de migration qui en résultent ;
- Déplacement de l'eau souterraine et des polluants dissous ;
- Chute de la conductivité hydraulique du sol du fait de la diminution de la perméabilité relative du sol par rapport à l'eau et vraisemblablement du fait de la perte de structure du sol causée par l'oxydation de la matière organique.

### 2.2.2. Le percarbonate de soude (2Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.3H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

Comme indiqué par la formule chimique, dans ce composé, le carbonate comporte des molécules d'eau oxygénée comme n'importe quelle molécule d'eau d'hydratation.

Le percarbonate de soude est plus stable dans le sol que l'eau oxygénée. Cet oxydant est responsable de la création de conditions alcalines dans le sol. Il n'est donc pas besoin, comme pour le réactif de Fenton, d'acidifier le sol pour favoriser la réaction.

Par rapport aux mécanismes de réaction rapportés pour les conditions acides, à ces pH élevés, des radicaux différents jouent un rôle déterminant, tels que le radical perhydroxyle (HO<sub>2</sub><sup>•</sup>).

### 2.2.3. Le permanganate de potassium et de Sodium

Le permanganate de potassium est disponible sous forme de sel solide tandis que permanganate de sodium est généralement délivré sous la forme d'une solution à 40 % (teneur massique). Les sels de permanganate contiennent naturellement des impuretés à l'origine de teneurs significatives en

chrome et arsenic. Avant utilisation comme oxydant dans le sol, il est donc recommandé de vérifier la composition du produit commercial à appliquer.

L'utilisation du permanganate pour l'oxydation de polluants dans le sol tels que les solvants chlorés (PCE, TCE) et d'autres composés organiques tels que le naphthalène, le phénanthrène, le pyrène et les phénols a été fréquemment rapportée.

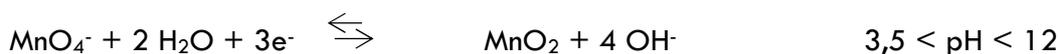
Pour l'oxydation dans le sol, le permanganate de potassium est utilisé sous forme de solutions de teneur massique variant de 0.5 à 2 %, plus rarement jusqu'à 4 %. A de plus fortes teneurs, le permanganate de potassium forme des précipités dans les réservoirs, conduites et puits d'injection. Lors de son utilisation, il faut tenir compte de la diminution de la solubilité avec la baisse de température. Ainsi lors de l'injection dans une nappe d'eau souterraine de faible température, des précipités peuvent être formés, réduisant ainsi la perméabilité du sol.

Le permanganate de sodium beaucoup plus soluble peut être injecté dans le sol sous forme de solution contenant jusqu'à 25 % de produit.

Le permanganate est un oxydant sélectif particulièrement réactif en présence de doubles liaisons. Etant donné qu'un grand nombre de composés organiques présents dans le sol comportent ce type de liaison, l'efficacité d'une injection de permanganate eu égard à un polluant particulier peut être compromise. Une demande en oxydant du sol (DOS) supérieure à 2 (en gr de permanganate/kg de sol humide) est souvent considérée comme la limite supérieure pour garantir une efficacité économiquement acceptable du traitement.

Le permanganate est un oxydant de force moyenne ( $E_0 = 1,68$  V) comparé au réactif de Fenton. Il est par contre beaucoup plus stable dans le sol (demi-vie de loin plus longue). La densité des solutions de permanganate est semblable à celle des solvants chlorés et grâce à sa rémanence dans le sol (jusqu'à quelques mois) le permanganate a la possibilité de migrer tant horizontalement que verticalement. Cet oxydant est donc particulièrement indiqué pour les sols de faible perméabilité

Les réactions qui prennent place lors de l'adjonction de permanganate sont les suivantes :



Les produits de la réaction dans le sol sont donc l'oxyde de manganèse, le  $\text{CO}_2$  et les composés organiques intermédiaires éventuels résultant de l'oxydation incomplète des polluants.

Quelques exemples de réactions stœchiométriques d'oxydation de polluants sont donnés dans le **tableau 2**.

**Tableau 2 : Réactions stœchiométriques de l'oxydation de quelques polluants**

Polluant	Réaction d'oxydation	Demande en oxydant *	Formation de $\text{MnO}_2$ **
PCE	$3\text{C}_2\text{Cl}_4 + 4\text{MnO}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 4\text{MnO}_2 + 6\text{CO}_2 + 12\text{Cl}^- + 8\text{H}^+$	0,96	0,7
TCE	$\text{C}_2\text{HCl}_3 + 2\text{MnO}_4 \rightleftharpoons 2\text{MnO}_2 + 2\text{CO}_2 + 3\text{Cl}^- + \text{H}^+$	1,81	1,32
DCE	$3\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2 + 8\text{MnO}_4 \rightleftharpoons 8\text{MnO}_2 + 6\text{CO}_2 + 6\text{Cl}^- + 2\text{OH}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	3,28	2,39

CV	$3C_2H_3Cl + 10MnO_4 \rightleftharpoons 10MnO_2 + 6CO_2 + 3Cl^- + 7OH^- + H_2O$	6,35	4,64
Phénol	$3C_6H_5OH + 28MnO_4 + 5H_2O \rightleftharpoons 28MnO_2 + 18CO_2 + 28OH^-$	11,8	8,62

\* Demande en oxydant en gr  $MnO_4$  par gr de polluant (sans prendre en compte la matière organique du sol)

\* \* Quantité de  $MnO_2$  (gr) produite par gr de polluant oxydé

L'examen du **tableau 2** montre que la quantité de permanganate nécessaire pour oxyder les éthènes chlorés est inversement proportionnelle au degré de chloration du polluant. On remarque également que les produits de l'oxydation sont essentiellement le  $CO_2$ , le  $Cl^-$ , le  $H^+$  ou le  $OH^-$  et le  $MnO_2$  alors que lors de l'atténuation anaérobie naturelle, la dégradation des composés chlorés résulte en la production de composés intermédiaires selon la séquence PCE → TCE → DCE → CV → Ethène.

La réaction d'oxydation produit du  $MnO_2$  naturellement présent dans les sols. En présence d'une couche plongeante à oxyder, le  $MnO_2$  produit a tendance à former une enveloppe protectrice autour du produit pur résiduel, le protégeant d'une attaque ultérieure par l'oxydant. Cette enveloppe protectrice est susceptible d'être moins efficace avec le temps de sorte que les teneurs en polluants dans la nappe risquent d'augmenter par la suite. Le permanganate n'est donc pas le meilleur choix technique pour le traitement d'une couche plongeante.

La précipitation du  $MnO_2$ , particulièrement à proximité du puits d'injection peut causer une diminution de la conductivité hydraulique du sol par suite de l'encombrement des pores. Une augmentation des débits d'injection permet de diminuer cet effet. L'utilisation de composés stabilisateurs tels que l'hexamétaphosphate diminuant les quantités de  $MnO_2$  précipitées peuvent constituer une réponse.

La précipitation du  $MnO_2$  peut augmenter la capacité de fixation des métaux lourds par le sol. L'As serait principalement concerné par cet effet.

#### 2.2.4. Le persulfate de Sodium

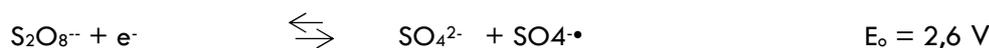
Le persulfate est généralement fourni sous forme de poudre. Il est appliqué dans le sol sous la forme d'une solution de teneur massique d'environ 5 %. Cet oxydant est utilisé dans le sol depuis peu, de sorte que les retours d'expérience sont encore peu nombreux.

Lors de son utilisation, les réactions qui prennent place sont les suivantes :

- Oxydation directe :



- Réaction des radicaux libres (après activation)



Les produits de ces réactions sont le  $CO_2$ , l' $H_2O$  et le sulfate, composés inoffensifs naturellement présents dans le sol.

Le persulfate est un oxydant stable dans le sol avec un pouvoir oxydant relativement élevé. Il est plus réactif que le permanganate et plus stable que le peroxyde.

Le persulfate réagit relativement lentement mais une fois activé à l'aide d'un catalyseur, différents radicaux sont formés dont le  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  et le radical hydroxyle  $\text{OH}^{\cdot}$ . La réaction devient alors plus rapide et moins sélective. Les facteurs activant sont le fer (le plus utilisé) ou d'autres métaux, des chélates métalliques, la chaleur (température du sol  $> 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , injection de vapeur), l'eau oxygénée ou un pH très basique  $> 11$ .

L'application de persulfate au sol a 2 conséquences :

- Une augmentation de la teneur en sulfate du sol. Cet effet peut être atténué dans les sols riches en ion  $\text{Ca}^{2+}$  en raison de la précipitation du sulfate de calcium (Gypse :  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Le sulfate est naturellement présent dans le sol et est non toxique pour la santé et l'environnement.
- Une chute du pH du sol : une molécule de persulfate réduite donne naissance à 1 molécule de sulfate de soude et 1 molécule d'acide sulfurique. L'impact de cette libération dépend du pouvoir tampon du sol (teneur en carbonates et en minéraux altérables).

### 2.2.5. L'ozone

Le procédé consiste à injecter un mélange d'air et d'ozone dans le sol. Les composés volatils présents dans la phase liquide du sol se dirigent vers la phase gazeuse où ils sont oxydés par l'ozone présent.

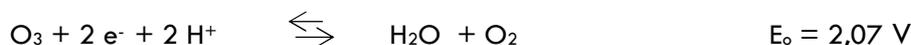
Compte tenu de sa faible durée de demi-vie, l'ozone est toujours produit sur le site d'utilisation à l'aide de générateurs. Ces derniers fonctionnent selon deux modes distincts :

- Rayonnement UV ;
- Décharges de type corona (le plus couramment utilisé).

Lorsque l'ozone est produit à partir d'oxygène, la teneur maximale du mélange produit est de 8 à 10 % (vol/vol) tandis qu'à partir d'air atmosphérique, la teneur maximale est de 1 à 2 %.

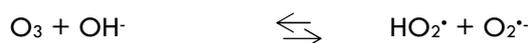
Les réactions qui prennent place lors de l'application d'ozone sont complexes, soit par simple transfert d'électron soit via la formation de radicaux, que ce soit dans la phase aqueuse ou gazeuse du sol. Les réactions sont les suivantes :

- Oxydation directe :



Cette réaction est sélective et vise principalement les liaisons  $\text{C}=\text{C}$ .

- Réaction des radicaux libres



Ces réactions sont moins sélectives.

L'ozone est très réactif et oxyde la plupart des composés organiques. En conditions acides, c'est principalement l'oxydation directe qui prendra place, plus sélective de sorte que tous les composés organiques ne pourront pas être détruits. En milieu neutre et basique, ce seront les réactions radicalaires qui prendront place. La présence de l'ion hydroxyle dans l'eau réduit la période de

demi-vie de l'ozone dans l'eau souterraine (quelques 20 minutes) tandis qu'en phase gazeuse, cette demi-vie est de l'ordre de 3 jours.

L'utilisation de l'ozone, gaz toxique, présente certains risques : migration de l'ozone non utilisé et volatilisation des produits de la réaction en dehors du sol. De ce fait, la mise en œuvre d'un traitement, par injection d'ozone doit nécessairement être accompagnée d'un système d'extraction des vapeurs du sol. Cette exigence est particulièrement justifiée en Région de Bruxelles-Capitale, densément peuplée et dont le sol renferme un nombre important d'infrastructures constituant autant de voies préférentielles de circulation des gaz (expliqué plus loin dans la partie mesures contre le risque).

On s'attachera également à ne pas injecter de l'ozone en dessous de couches ou d'éléments imperméables, ce qui favoriserait la migration de l'ozone et des composés volatiles résultant des réactions avec le sol suivant des chemins préférentiels vers une destination imprévue.

En raison de son pouvoir oxydant, l'ozone peut être très corrosive pour les infrastructures enterrées (câbles, conduites, cuves, ...). Une distance minimale (5 m) entre les infrastructures sensibles et les zones d'application de l'ozone doit être respectée.

L'ozone réagit dans le sol en produisant de l'oxygène, ce qui favorise la dégradation biologique des polluants organiques.

### 2.2.6. L'ozone combinée à l'eau oxygénée

La mise en œuvre de cette combinaison repose sur les réactions chimiques suivantes



Dans ce procédé l'eau oxygénée et l'ozone sont injectés dans un dispositif comprenant un cylindre central, un filtre hydrophobe et un manteau perforé de micropores. L'ozone enrichi en radicaux réactifs par suite de son passage dans l'eau oxygénée est distribué en fines bulles dans l'eau souterraine à la sortie du manteau poreux jouant le rôle de diffuseur.

### 2.2.7. Remarques générales sur les oxydants

Comme déjà mentionné, l'oxydation chimique procède d'une manière totalement différente de l'atténuation naturelle. Cette dernière donne naissance à la production et parfois l'accumulation de produits intermédiaires, parfois plus nocifs que le polluant de départ (chlorure de vinyle résultant de la dégradation du PCE par exemple). L'ISCO par contre, entraîne une destruction totale des composés polluants donnant naissance à des composés naturellement présents dans le sol (CO<sub>2</sub>, Cl<sup>-</sup>, ...). Si, en certaines circonstances, par manque de réactif oxydant par exemple, des produits intermédiaires sont formés, ceux-ci sont peu nocifs pour l'environnement et rapidement dégradés dans le sol.

La création de conditions oxydantes dans le sol peut générer une mobilisation accrue de certains métaux lourds (le Cr par exemple passant de l'étage d'oxydation III à l'étage VI). La production de sels minéraux (sulfates, chlorures, ...) résultant de l'oxydation et de l'emploi de catalyseur peut également augmenter la disponibilité des espèces métalliques désorbées des surfaces solides par

suite de l'augmentation de la force ionique. En fonction du type de sol, cette augmentation des teneurs en éléments métalliques dans la phase liquide du sol s'atténue après 1 à quelques mois.

Après mise en œuvre d'un traitement du sol par oxydation chimique, il n'est pas rare que rapidement les teneurs mesurées dans l'eau souterraine augmentent (effet de rebond). Ce phénomène peut être causé par différents processus :

- Libération de polluants en direction de l'eau souterraine à partir d'une phase résiduelle de produit pur surnageante, plongeante ou emprisonnée dans les pores du sol ;
- Diffusion lente de polluants au travers de couches de moindre perméabilité ;
- Oxydation de la matière organique sur laquelle les polluants étaient adsorbés.

Cet effet rebond peut se produire même si après une campagne d'oxydation dans le sol, une large part de la charge polluante du sol a été détruite (le chiffre de 84 % est repris dans la littérature). L'importance du rebond, peut nécessiter la réalisation d'une seconde campagne de traitement par oxydation chimique, seule ou accompagnée d'une autre technique [de traitement](#).

### 2.2.8. Association de l'oxydation chimique avec d'autres techniques de traitement

L'oxydation chimique possède une capacité démontrée de réduire rapidement et de manière importante la charge polluante du sol. Cependant, cette technique a montré ses limites pour éradiquer complètement et dans des limites budgétaires raisonnables la charge polluante du sol. De plus, dans certaines circonstances, l'oxydation chimique donne naissance à des produits de réaction aisément biodégradables dans le sol. C'est pourquoi il est courant de faire suivre le traitement par oxydation chimique par une atténuation naturelle stimulée.

A cet égard, il convient de noter que l'effet de stérilisation du sol résultant du traitement par oxydation, parfois invoqué dans la littérature sur base d'essais de laboratoire, ne se vérifie pas dans le sol. En effet, ce dernier est à nouveau colonisé par les micro-organismes au terme de quelques mois. A contrario, une stimulation de l'activité bactérienne par effet de stérilisation partielle peut être observée.

## 2.3. Les méthodes d'apport des réactifs oxydants

Ces méthodes poursuivent l'objectif de mettre rapidement en contact étroit les composés polluants à détruire et les réactifs oxydants. Les **tableaux 3A et 3B**, reprennent les principales méthodes d'apport ainsi que leurs avantages et inconvénients respectifs.

**Tableau 3A : Principales méthodes d'apport des réactifs oxydants au sol, avantages et inconvénients**

Méthode d'apport	Description succincte	Inconvénients	Avantages
Infiltration active dans des puits	Injection sous pression de l'oxydant dans des puits (piézomètres) verticaux préexistants ou non	Coût élevé des puits d'injection (matériaux résistants à l'oxydant utilisé)	Simplicité et faible coût d'une seconde campagne d'infiltration.
Infiltration passive	Infiltration passive (gravitaire) de l'oxydant dans des puits verticaux ou des galeries horizontales d'infiltration	Réservé aux sols à bonne perméabilité	Le design des puits verticaux peut être adapté aux conditions spécifiques du terrain. Les galeries horizontales sont moins adaptées aux sols hétérogènes

Injection directe dans le sol sous pression	L'oxydant est apporté dans le sol par injection directe sous pression (procédé Géoprobe® ou autre). La profondeur maximale est limitée à +/- 20 m	En cas de besoin d'une seconde campagne d'injection, besoin d'une nouvelle mobilisation de l'équipement, dont coût élevé. Le rayon d'influence est légèrement inférieur à celui observé pour les puits fixes	Simplicité du traitement de zones particulières à des profondeurs particulières.
Recirculation (circulation forcée)	Combinaison d'une infiltration active ou passive et d'un pompage de l'eau souterraine en aval	Possible dans les sols de bonne perméabilité	Bon contrôle hydrogéologique et assurance d'une bonne distribution de l'oxydant avec des quantités d'apport réduites
Mélange au sol	Mélange mécanique de l'oxydant avec le sol (par exemple à l'aide d'une tarière de grand diamètre)	Réservé aux interventions à faible profondeur (<2 m). Perte de structure du sol.	Assurance d'un bon contact entre le sol et le polluant.
Sparging	Injection d'un gaz (ozone) dans la zone saturée	Limité à l'ozone	Oxydation des composés polluants dans la nappe d'eau souterraine

**Tableau 3B : Technique d'apport appropriée en fonction des paramètres du sol**

Paramètre du sol	Infiltration active (sous pression)	Injection directe	Recirculation	Infiltration passive (puits ou drains)	Mélange au sol
<b>Conductivité hydraulique en m/s</b>					
>10 <sup>-5</sup>	+++	+++	+++	+++	+++
De 10 <sup>-6</sup> à 10 <sup>-5</sup>	++	+++	+	++	+++
DE 10 <sup>-7</sup> à 10 <sup>-6</sup>	+	++	--	-	+++
De 10 <sup>-8</sup> à 10 <sup>-7</sup>	-	+	--	-	+++
< 10 <sup>-8</sup>	--	--	--	--	+++
<b>Profondeur de la couche à traiter en m</b>					
< 5	+++	+++	+++	+++	+++
De 5 à 10	+++	+++	+++	-	+++
De 10 à 25	+++	++	+++	--	-
De 25 à 50	++	+	++	--	--
>50	++	--	++	--	--

Légende : -- = non envisageable, - = mauvais, + = moyen, ++ = bon, +++ = très bon (Code van goede praktijk: In-situ chemische oxidatie – draft)

La description détaillée de ces différentes méthodes fait l'objet des paragraphes suivants.

### 2.3.1 Infiltration active et injection directe sous pression

Selon ces méthodes, le polluant est injecté sous pression dans le sol soit à partir d'un puits ou directement à l'aide d'une sonde d'injection.

Le succès de cette méthode dépend du rayon d'influence de l'injection et donc du nombre de puits/points d'injection nécessaires pour couvrir la zone à assainir.

Ces méthodes ont l'avantage de permettre le traitement sélectif de zones.

Les équipements actuellement disponibles ne permettent pas de descendre en dessous de 20m.

Lors de l'injection sous pression, il est impératif de tenir compte de la capacité de cohésion du sol de manière à éviter les fractures des formations traitées et l'hétérogénéité des injections qui peut s'en suivre. A cet égard, il est recommandé à l'expert d'effectuer une vérification sur base de la mécanique des sols (Loi de Terzaghi).

La forme et l'extension du rayon d'influence d'un point d'injection dépend de différents paramètres tels que : perméabilité du sol, hétérogénéité du sol, débit et pression d'injection de l'oxydant, vitesse de consommation de l'oxydant (stabilité de l'oxydant dans le sol, demande en oxydant du sol, teneur en polluants...).

De manière à éviter une dispersion incontrôlée des réactifs et polluants, il est recommandé de débiter l'injection en périphérie de la zone à traiter pour ensuite continuer le traitement en direction du centre de la tâche.

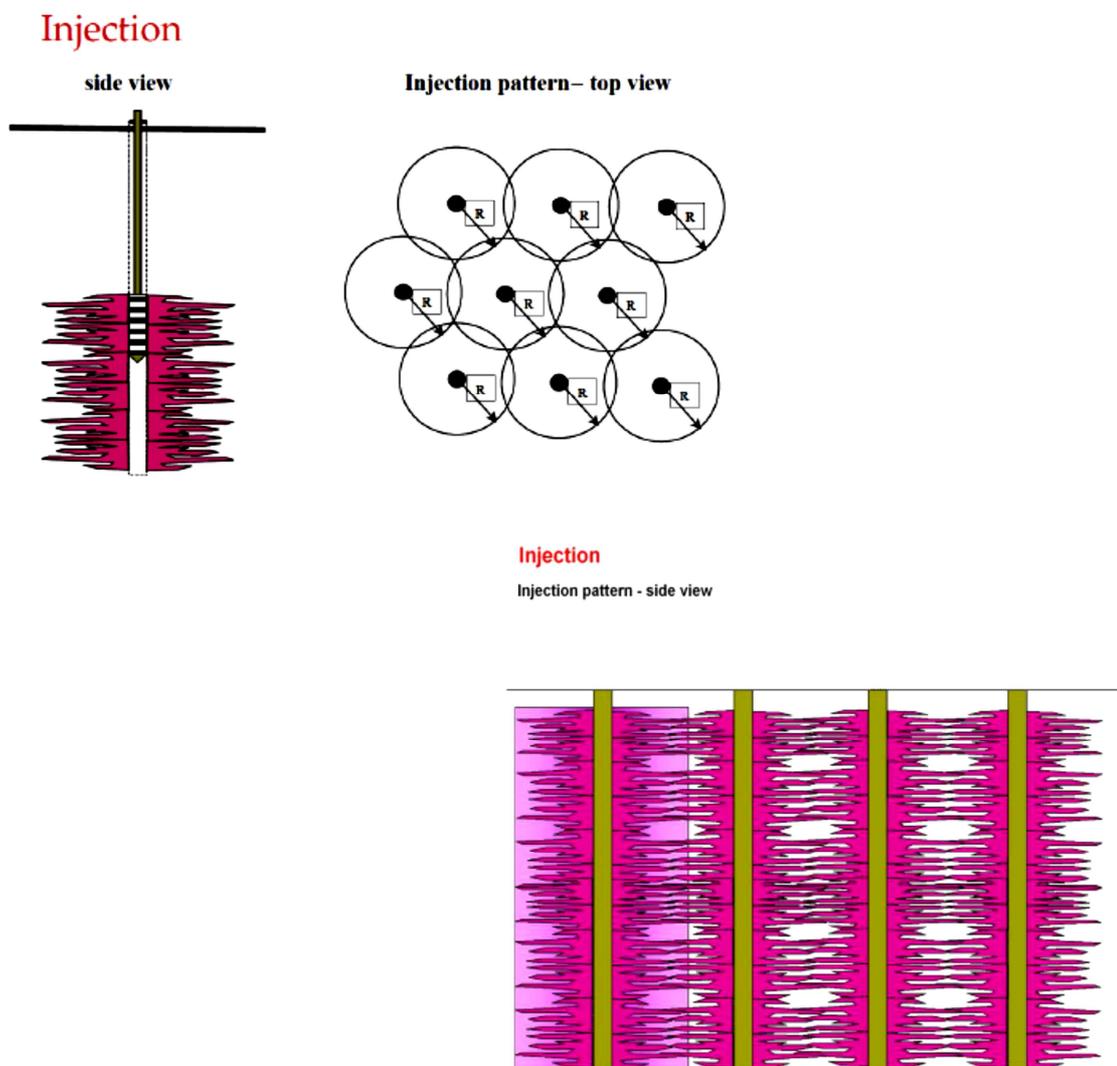
Lors d'une opération d'injection sous pression, il faut tenir compte du risque de dispersion des réactifs et des polluants via les voies d'écoulement préférentielles (égouts, conduites, ...) et en direction de la surface au niveau de piézomètres non suffisamment scellés dans le sol.

Pour les sols de composition hétérogène, les longueurs de crépine des puits d'injection seront limitées de manière à éviter une migration préférentielle des réactifs dans les couches les plus perméables de sol.

En cas d'injection dans les couches saturées du sol, les puits/points d'injection ne seront pas coupants sans quoi l'injection des réactifs se fera préférentiellement dans les couches insaturées présentant moins de résistance.

La **figure 1** donne une représentation schématique d'un apport de réactif par injection directe.

Figure 1 : Injection directe séquentielle dans le sol (Code of good practice: in situ chemical oxydation, Projet CityChlor, 2013, INTERREG IVB)



### 2.3.2 Infiltration passive

Selon cette méthode, le réactif oxydant est apporté par gravité dans des puits verticaux ou des drains horizontaux d'injection. Les facteurs contrôlant l'efficacité de cette méthode sont la capacité d'infiltration du sol, la vitesse de migration de l'eau souterraine dans le sol et donc la vitesse de dispersion du réactif par advection dans la nappe et la durée de vie de l'oxydant. Des tests d'infiltration dans le sol sont donc nécessaires avant la mise en œuvre de cette technique.

A titre informatif, le **tableau 4** donne des valeurs de capacité d'infiltration (exprimée en épaisseur de lame d'eau infiltrée par unité de temps), pour quelques classes texturales de sol.

**Tableau 4 : Capacité d'infiltration de quelques classes texturales de sol**

Classe texturale du sol	Capacité d'infiltration (m/s)
Sable grossier	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Sable fin	$5,6 \cdot 10^{-6}$

Sable fin limoneux	$3,1 \cdot 10^{-6}$
Limon	$5,8 \cdot 10^{-7}$
Argile légère	$4,2 \cdot 10^{-7}$
Argile moyennement lourde	$1,4 \cdot 10^{-7}$

(Extrait et traduit du document « Code van goede praktijk : In-situ chemische oxidatie, Draft, OVAM 2014)

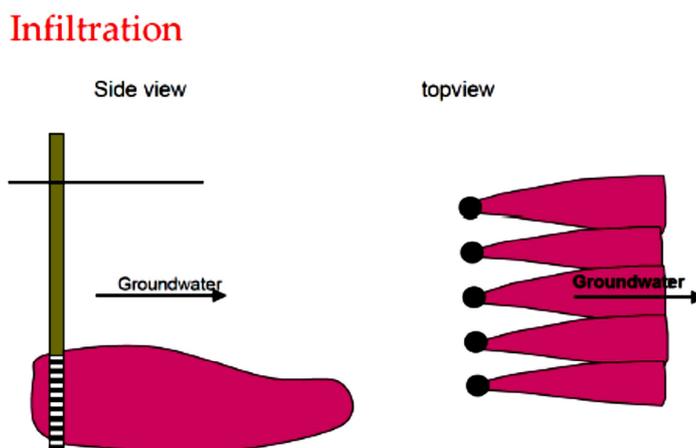
On considère que pour assurer une distribution minimale du réactif dans le sol, la vitesse de circulation de l'eau dans le sol doit au minimum être de  $0,05\text{m/j}$ .

Ce mode d'apport est envisageable dans les conditions suivantes :

- L'oxydant doit rester suffisamment réactif dans le sol de manière à faire disparaître la charge polluante. De manière empirique, la demi-vie du réactif dans le sol doit dépasser le double du temps de réaction.
- L'oxydant doit rester stable dans le sol suffisamment longtemps pour développer un rayon d'influence suffisant. On rappellera que, à volume injecté égal, l'augmentation du débit d'injection entraîne une augmentation du rayon d'influence.
- Les effets néfastes pour la santé et l'environnement d'un séjour prolongé et d'un temps d'injection plus long du réactif doivent être évalués et considérés comme négligeables.

La **figure 2** donne une représentation schématique de ce mode d'apport au sol.

**Figure 2 : Schéma d'apport par infiltration passive: (Code of good practice: in situ chemical oxydation, Projet CityChlor, 2013, INTERREG IVB)**



### 2.3.3 La recirculation ou circulation forcée

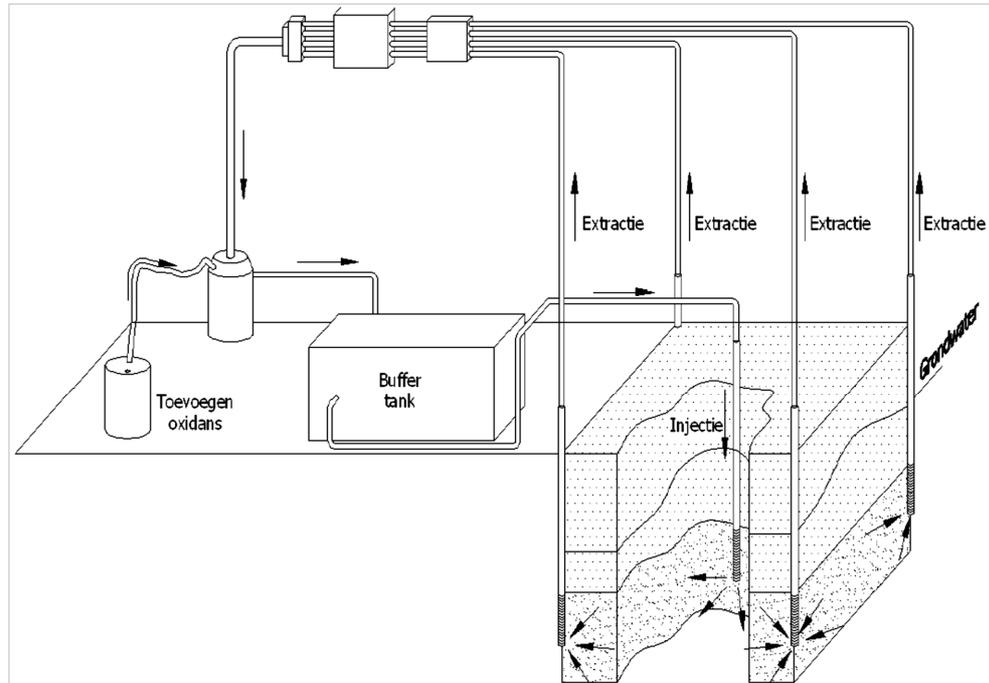
Ce mode d'apport repose sur l'injection du réactif en un point (de manière active ou passive) accompagné d'un pompage + traitement de l'eau souterraine en un autre point. L'eau souterraine traitée peut être rejetée ou infiltrée dans le sol.

Cette méthode présente les avantages suivants :

- Création d'un meilleur gradient et donc d'une circulation accélérée du réactif dans le sol, par rapport à l'injection ou l'infiltration seule ;
- Le rayon d'influence du réactif injecté est agrandi ;
- Meilleur contrôle de la migration des réactifs et des polluants dans le sol, en direction de cibles sensibles notamment.

La **figure 3** donne une représentation schématique d'un système d'apport par recirculation.

**Figure 3 : Vision schématique d'un système d'apport par recirculation (Code van goede Praktijk in situ chemische oxidatie, Draft 2014 OVAM)**



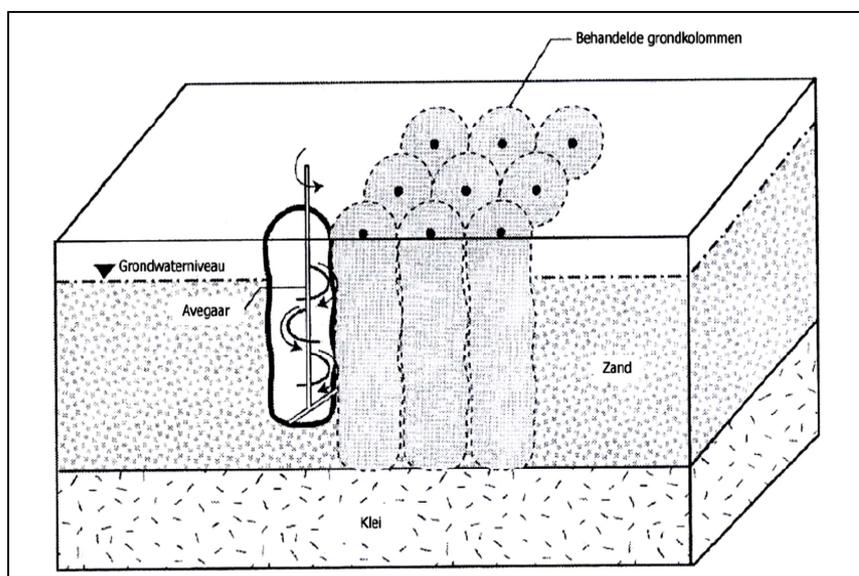
Les aspects pompage et traitement de l'eau souterraine font l'objet du code de bonne pratique n°1 (Pompage de fluides dans la zone saturée du sol).

### 2.3.4 L'incorporation au sol par mélange in-situ

L'incorporation du réactif au sol s'effectue typiquement à l'aide d'une tarière de grand diamètre (1 à 3,5 m) opérant le long de colonnes de sol sécantes comme le montre le schéma de la **figure 4**.

Cette technique présente l'avantage d'assurer un contact optimal entre le réactif oxydant et le sol à traiter. Cette technique n'est applicable qu'à des pollutions superficielles, ne dépassant pas 2 m de profondeur. Au-delà de cette profondeur, les coûts de l'apport au sol augmentent de manière exponentielle. Un autre inconvénient réside dans la perte totale de structure du sol après malaxage, ce qui influence négativement ses propriétés géo-mécaniques.

Figure 4 : Illustration schématique d'apport par malaxage au sol (Code van goede Praktijk in situ chemische oxidatie, Draft 2014 OVAM)



### 2.3.5 L'injection d'ozone dans la couche saturée (sparging)

Cette méthode est exécutée comme une opération classique d'injection d'air dans la couche saturée du sol. Cet aspect est abordé dans le code de bonne pratique n°2 (Pompage de gaz dans la couche insaturée du sol).

Par rapport au sparging classique, l'injection d'ozone requiert des précautions particulières :

- Usage de matériaux non corrosifs (acier inoxydable, téflon, ...) généralement coûteux ;
- Couplage avec une installation d'extraction des gaz du sol.

L'ozone est généralement produit sur site, en continu, par un générateur.

Le rayon d'influence de l'injection d'ozone et le rayon de capture du puits d'extraction des gaz sont déterminés lors des essais pilotes.

Différents modes d'injection d'ozone peuvent être mis en œuvre :

- Puits d'injection simple équipés d'une crépine percée de micropores. L'ozone est injecté dans le sol en très fines bulles se dispersant relativement loin autour du puits d'injection.
- Puits d'injection couplé avec un puits de pompage de l'eau souterraine. Ce dispositif accélère la circulation de l'eau souterraine et augmente ainsi le rayon d'influence de l'ozone injecté.
- Perozone : injection couplée d'ozone et d'eau oxygénée dans un puits équipé d'un manteau de billes de verre et percé de micropores. Ce dispositif vise à la dispersion de microbulles riches en radicaux réactifs.

### 3. Description des variantes

Les différents types d'oxydants utilisés et les différents modes d'apport mis en œuvre constituent autant de variantes de la technique.

Deux techniques particulières quelques fois décrites et utilisées méritent d'être mentionnées.

#### 3.1. L'oxydation chimique stimulée par apport d'agents tensio-actifs

Cette variante est utilisée lorsque l'oxydation doit atteindre des zones comportant du produit pur (surnageant, plongeant ou emprisonné dans les pores du sol). Le succès du traitement de ces zones par oxydation est dépendant de l'importance de la surface de contact entre le polluant et le réactif et des quantités de produit pur présentes.

Pour porter remède à cette limitation, l'oxydant est injecté en association avec des co-solvants (composés alcooliques) et/ou des agents tensio-actifs. Suite à cet apport, les composés polluants sont nettement plus solubles et davantage disponibles pour une attaque chimique. Le type et les quantités d'agents tensio-actifs à injecter sont à déterminer par essais en laboratoire.

Les tests à pratiquer au laboratoire pour les agents tensio-actifs sont repris dans le code de bonne pratique 1 (Pompage de fluides dans la zone saturée).

#### 3.2. L'oxydation chimique associée au chauffage du sol par injection de vapeur chaude

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

La température élevée du sol agit également comme facteur d'activation du persulfate dans le sol.

Les aspects liés à l'injection de vapeur chaude dans le sol sont décrits dans le code de bonne pratique 2 (pompage des gaz dans la couche insaturée du sol).

## 4. Objectifs poursuivis : panache versus noyau

Le traitement de la pollution du sol par oxydation chimique peut poursuivre l'un ou l'autre des objectifs, selon le type de réactif oxydant utilisé.

Au niveau du noyau où des teneurs importantes en polluants sont mesurées et où une phase de produit pur peut être présente, les oxydants caractérisés par une réactivité élevée et un pouvoir d'oxydation important sont les plus indiqués.

A l'inverse, au sein d'un panache de pollution, où en aval du noyau les teneurs sont plus légères, on choisira un oxydant présentant une plus grande stabilité dans le sol capable de se disperser et ayant ainsi une meilleure chance d'entrer en contact avec le polluant.

Le **tableau 5** présente la relation entre teneurs en polluants (échelle qualitative) dans le sol et type d'oxydant adapté au traitement.

**Tableau 5 : Relation entre teneurs présentes et type d'oxydant adapté (Code of good practice: in situ chemical oxydation, Projet CityChlor, 2013, INTERREG IVB)**

Intensité de la pollution	MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	O <sub>3</sub>
Concentration très basse	++	+++	+++	++	+++
Concentration basse	+++	+++	+++	+++	+++
Concentration moyenne	+++	+++	+++	+++	+++
Concentration élevée	++	++	++	++	+
Très forte concentration	++	+	+	++	-

Légende : - = mauvais, += moyen, ++ = bon, +++ = très bon

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

La technique de traitement in-situ par oxydation chimique pour le traitement d'une pollution du sol et de la nappe aquifère aura des résultats favorables dans les circonstances suivantes:

- Le polluant à traiter peut être aisément détruit par l'attaque d'un oxydant. Les polluants métalliques par exemple ne peuvent pas être détruits par ISCO. Certains composés organiques (comme le lindane, par exemple) sont difficilement oxydables dans le sol.
- Le polluant est mobilisable et disponible pour une mise en contact avec l'oxydant et donc n'est pas trop fortement adsorbé par la phase solide du sol. Les PCB par exemple peuvent être éliminés par oxydation chimique mais leur faible disponibilité dans le sol limite l'efficacité du traitement.
- La source de pollution est éradiquée de sorte que l'arrivée du polluant dans le sol est définitivement interrompue.
- Sol présentant une bonne perméabilité et une bonne capacité d'infiltration.
- Sol de composition homogène : absence de couches et de lentilles de texture différentes, absence de voies de circulation préférentielles résultant de la présence d'impétrants et d'infrastructures enterrées (surtout si l'injection d'ozone a été retenue).
- Faible teneur en matière organique, absence de lentilles ou couches tourbeuses à fort pouvoir d'adsorption des composés organiques et occasionnant une forte demande en oxydant du sol.
- Faible teneur du sol en carbonates et phosphates.
- Teneurs limitées en métaux lourds susceptibles d'être mobilisés et libérés suite aux nouvelles conditions créées dans le sol : potentiel redox élevé, pH acide et dissolution des oxydes de fer et manganèse.
- Circulation rapide de l'eau souterraine dans le sol.
- Données acquises lors de l'étude de caractérisation suffisamment complètes et détaillées.
- Charge polluante répartie de manière homogène, absence d'une phase libre importante, surnageante ou plongeante ou emprisonnée dans des cavités, de sorte que les rebonds après arrêt du traitement seront limités.
- Absence dans le sol d'impétrants sensibles susceptibles d'être corrodés ou altérés suite au contact avec le réactif oxydant ou les variations de pH du sol engendrées par le traitement.
- Profondeur limitée de la pollution à traiter sans quoi les budgets d'injection risquent d'augmenter.

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

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

Lorsque le traitement implique la mise en œuvre de la variante oxydation in-situ + addition d'agent tensio-actifs et/ou co-solvants, les aspects favorables supplémentaires suivants sont à prendre en compte : Absence d'éléments enfouis susceptibles d'être abîmés par suite de la présence de ces additifs : conduites, cuves et fondations revêtues de goudrons isolants.

## 6. Examen à priori de la faisabilité technique

### 6.1 Choix d'un oxydant eu égard aux types et aux quantités de polluants présents

Le choix du réactif oxydant dépend de plusieurs facteurs. On peut citer :

- Le type de polluant et les quantités présentes ;
- Les quantités estimées de réactif nécessaire et le prix du réactif ;
- La densité du réactif ;
- Les objectifs **de traitement** à atteindre ;
- Les caractéristiques du sol : pH, teneurs en métaux lourds, teneurs en matière organique ;
- La géologie et l'hydrogéologie locale.

Le **tableau 6** donne une estimation qualitative de la possibilité de traiter différents types de contamination du sol par oxydation chimique in-situ.

**Tableau 6 : Estimation qualitative de la possibilité de destruction par ISCO de différents types de pollution**

Polluants qui peuvent aisément être détruits par oxydation chimique	Polluant qui peuvent être détruits par oxydation chimique mais l'efficacité du traitement est incertaine, souvent en raison des caractéristiques du sol (forte adsorption)	Polluants qui ne peuvent pas être détruits par oxydation chimique
Chloro-éthènes BTEX Huiles minérales HAP Chlorobenzène Phénols MTBE Alcools Cyanures libres	Chloro-éthanes TNT Pesticides (lindane)/herbicides PCB Dioxines	Métaux Sels Nutriments : nitrates, phosphates ...

(Source : Code van goede Praktijk in situ chemische oxidatie, Draft 2014 OVAM)

De manière plus précise, il est possible de fournir une première indication qualitative sur l'efficacité attendue d'un oxydant pour le traitement d'un type particulier de polluant. (voir **tableau 7** )

**Tableau 7 : Efficacité des différents oxydants pour le traitement des différents types de pollution**

Polluant	MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	O <sub>3</sub>
Huiles minérales légères	+	++	++	+++	++
Huiles minérales lourdes	-	+	+	-/++	+
Benzène	--	+++	+++	+++	+++
Toluène, Ethylbenzène et Xylènes	++	+++	+++	+++	+++
MTBE	-	++	++	+++	++
TBA (tertiary-butyl-alcool)	--	+	+	+/++	+
HAP	++	++	++	++	++
Chloro-éthènes	+++	+++	+++	+++	+++
Chloro-éthanes	--	+/++	+	+/++	++
PCBs	--	+	+	+	--
Chloro-benzènes	-	+	+	++/+++	+

Dioxines	--	++	++	+	--
Pentachlorophénol	++	++	++	++	++
Cyanures libres	++	+++	+++	++	+++
Phtalates	+	-	-	++	+++

Légende : -- = non utilisable, - = peu efficace, + = moyennement efficace, ++ = efficace, +++ = très efficace

De manière générale on choisira d'injecter un réactif oxydant dont la densité sera proche de celle du composé polluant. Ce choix permet d'augmenter les chances que le réactif suive les mêmes voies de dispersion que le polluant.

## 6.2 Caractéristiques limites du sol à traiter

### 6.2.1. Les caractéristiques physiques du sol

La composition du sol influence la possibilité de migration du réactif oxydant. Dans la couche saturée, le transport du réactif prend place principalement par advection suite au mouvement de l'eau souterraine. La migration par diffusion revêt une importance dans les couches peu perméables et lors de la mise en solution de polluant à partir d'une phase de produit pur.

Trois types de sol sont à distinguer du point de vue du mode de transport du réactif :

- Les formations à bonne perméabilité : sables et graviers (conductivité hydraulique  $> 5 \times 10^{-6}$  m/s). La dispersion du réactif est aisée et est réalisée principalement par advection. Tant les oxydants stables que les oxydants instables pourront donner de bons résultats. Compte tenu de la vitesse rapide de dispersion, le risque de migration des oxydants au-delà des limites de la parcelle doit être pris en compte.
- Les formations à faible perméabilité : limons et argiles (conductivité hydraulique  $< 5 \times 10^{-7}$  m/s). Les processus de diffusion prennent une part importante dans la migration des réactifs. Compte tenu de la lenteur de ce mode de dispersion, seuls les oxydants stables (permanganate) sont indiqués. Dans ces conditions, le traitement de la pollution par oxydation chimique est moins indiqué.
- Les formations moyennement et peu perméables : sable limoneux, sable argileux, ... Dans ces formations la migration du réactif résulte des phénomènes d'advection et de diffusion. Le choix de l'oxydant le plus adapté dépend des conditions prévalant sur le site, telles que vérifiées lors de l'étape test pilote.

Le **tableau 8** présente une appréciation qualitative des possibilités d'utilisation des différents réactifs oxydants en fonction de la perméabilité des sols à traiter.

**Tableau 8 : Choix du réactif oxydant en fonction de la perméabilité du sol à traiter**

Propriété du sol	MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	O <sub>3</sub>
Bonne perméabilité	+++	+++	+++	+++	+++
Mauvaise perméabilité	++	-	-/+	++	-
Perméabilité faible à moyenne	++/+++	-	+/+++	++/+++	-

Légende : - = peu efficace, + = moyennement efficace, ++ = efficace, +++ = très efficace (Code of good practice: in situ chemical oxydation, Projet CityChlor, 2013, INTERREG IVB)

## 6.2.2. Hydrogéologie locale

Les réactifs oxydants sont pour la plupart apportés sous forme de solutions ou de suspensions. Ces formulations sont bien adaptées pour le traitement des couches saturées du sol. Si le traitement du sol s'adresse à la couche insaturée du sol, le temps de contact et l'extension de la zone de contact avec le réactif doit faire l'objet d'une attention particulière. L'utilisation d'un réactif sous forme gazeuse (ozone) peut apporter une réponse pour le traitement des couches tant saturées que non saturées.

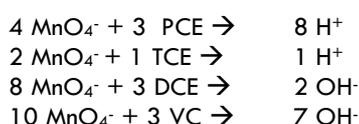
On rappellera que pour l'infiltration passive à l'aide de puits, une vitesse minimum de circulation de l'eau souterraine de 0,05 m/j est nécessaire pour assurer une dispersion satisfaisante du réactif.

Remarque : lors des tests en labo et des test pilots on doit prendre en compte l'hydrologie locale → par couche géologique le demande dans le sol de l'oxidant devra être estimée.

## 6.2.3. Propriétés physico-chimiques du sol

Le pH du sol :

L'oxydation chimique in-situ influence le pH du sol soit en raison d'utilisation de solutions acidifiantes accompagnant le réactif oxydant, soit en raison de la production de protons et d'hydroxydes en résultat de l'oxydation. Par exemple, l'utilisation de permanganate peut influencer le pH du sol selon le type de composé à oxyder, comme le montre les relations suivantes (en nombre de moles) :



L'impact de ces réactions sur l'acidité du sol dépend de son pouvoir tampon, joué principalement par les carbonates. Les carbonates jouant également un rôle de piège à radicaux, ils influencent fortement la cinétique des réactions d'oxydation et pèsent sur la valeur de la DOS (demande en oxydant du sol).

Le **tableau 9** présente de manière succincte le degré d'efficacité des différents réactifs oxydants en fonction du pH du sol.

**Tableau 9 : Efficacité des différents oxydants en fonction de l'acidité du sol**

Acidité du sol pH	MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	O <sub>3</sub>
<5	+++	+++	--	+++	+++
5 - 6	+++	+++	+	+++	+++
6 - 7	+++	++	++	+++	+++
7 - 8	+++	+	+++	++	++
8 - 9	+++	-	+++	+ / ++	++
> 9	++	--	+++	-	+

Légende : -- = non utilisable, - = peu efficace, + = moyennement efficace, ++ = efficace, +++ = très efficace (Code of good practice: in situ chemical oxydation, Projet CityChlor, 2013, INTERREG IVB)

### La teneur en matière organique

Une fois additionnés au sol, les différents oxydants réagissent avec la matière organique du sol et non seulement avec les composés polluants ciblés. Parmi les oxydants, le permanganate se distingue par une forte affinité pour la matière organique du sol. A l'inverse, le persulfate est le réactif présentant le moins d'affinité pour la matière organique.

L'oxydation de la matière organique se traduit par une hausse de la DOS (demande en oxydant du sol) et peut entraîner des conséquences néfastes telles que :

- Perte de structure du sol et donc de la perméabilité ;
- Risques d'incendie (en présence de couche tourbeuse) ;
- Libération de polluants auparavant adsorbés et apparition d'une nouvelle pollution.

A cet égard, il est possible, comme indiqué dans le **tableau 10** de distinguer pour chacun de réactifs oxydants, des plages de teneurs en matière organique plus ou moins propices.

**Tableau 10 : Efficience attendue des différents réactifs oxydants en fonction du pH du sol**

Teneur en Carbone du sol $f_{oc}$ en %	$MnO_4^-$	$H_2O_2$	$2Na_2CO_3 \cdot 3H_2O_2$	$Na_2S_2O_8$	$O_3$
> 3	--	--	--	+	--
1 - 3	-	-	-	++	-
0,3 - 1	++	++	++	+++	++
0,1 - 0,3	+++	+++	+++	+++	+++
< 0,1	+++	+++	+++	+++	+++

Légende : -- = non utilisable, - = peu efficace, + = moyennement efficace, ++ = efficace, +++ = très efficace (Code of good practice: in situ chemical oxydation, Projet CityChlor, 2013, INTERREG IVB)

### 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 stockage et préparation des réactifs, d'injection, de pompage et récupération des gaz (pour le traitement à l'ozone) et des liquides (pour le traitement par recirculation), ainsi que le dispositif éventuel de traitement des gaz pompés, des liquides pompés et, éventuellement le dispositif de préparation vapeur.
- Environnement sensible : il n'existe pas sur le site et dans les alentours immédiats des personnes ou des activités susceptibles d'être gênées par les opérations d'injection et éventuellement de pompage: bruit des compresseurs, pompes et de la station de traitement, odeurs, risques d'émissions de vapeurs, fuites d'ozone ....
- Encombrement du sous-sol : présence peu importante sur le site, ou dans les alentours, d'infrastructures enterrées constituant autant de voies préférentielles pour la circulation des réactifs sous forme liquide ou gazeuse : réseau de distribution du gaz, de l'eau, de l'électricité, des fibres optiques, d'égouttage... ou au contraire constituant des barrières à cette circulation (réseau du métro et des chemins de fer...).
- Absence/présence d'infrastructures enterrées sensibles à la corrosion du fait de l'application d'oxydants ou d'acides, d'agents tensio-actifs éventuels ou encore de l'augmentation de la température du sol : citernes, conduites, plots métalliques ou béton ferrailé...
- Absence/présence d'infrastructures enterrées susceptibles d'occasionner un incendie du fait de la présence d'oxydant, de libération d' $O_2$  et de l'augmentation de température : coffrages en bois ...

## 7. Examen spécifique de la faisabilité du traitement

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

Les **tableaux 11a, 11b et 11c** présentent les paramètres qui doivent être mesurés et/ou quantifiés avant le lancement d'un programme de traitement du sol par oxydation chimique. 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 des risques, ou avant le lancement des tests de laboratoire et du test pilote, **soit avant l'exécution des travaux ne nécessitant pas de projet spécifique**.

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

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

**Tableau 11a : Paramètres des polluants à mesurer avant lancement d'une opération d'oxydation chimique in-situ**

Paramètres	Moyen de mesure	Commentaire
<b>Source de la pollution</b>		
Source de pollution active ou éradiquée	Etude historique, examen des lieux,	Disponible au terme de l'étude de reconnaissance
<b>Teneurs dans le sol</b>		
Teneurs dans le sol : délimitation verticale et horizontale des taches de pollution (contour teneurs > NI et teneurs > NA et > teneurs objectifs)	Forages, prélèvement et analyses d'échantillons de sol et tracé des délimitations (krigeage)	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Estimation de la charge polluante résiduelle	Sur base des volumes estimés et des teneurs moyennes	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Teneurs dans le sol d'autres polluants	Forages, prélèvement et analyses d'échantillons de sol	Pour les autres polluants susceptibles d'être libérés suite à l'oxydation de la matière organique, les conditions oxydantes ou l'acidification. Disponible au terme de l'étude de reconnaissance
<b>Teneurs dans l'eau souterraine</b>		

Teneurs dans le sol : délimitation verticale et horizontale des taches de pollution (contour teneurs > NI et teneurs > NA et > teneurs objectifs)	Placement de piézomètres, prélèvement et analyse d'échantillons, tracé des délimitations (krigeage)	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Vitesse de migration longitudinale du polluant (progression du panache selon la direction d'écoulement de l'eau souterraine)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Doménico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinal, latérale et vertical .... Ou utilisation de modèles numériques	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration longitudinale avérée du polluant (progression du panache selon la direction d'écoulement de l'eau souterraine)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Vitesse de migration latérale dans le sol (extension latérale du panache lors de sa migration)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Doménico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et vertical .... 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 Doménico 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	
<b>Teneurs dans la phase gazeuse du sol</b>		
Teneurs en polluants dans la phase gazeuse au sein du noyau de pollution	Prélèvements et analyses de la composition de la phase gazeuse	Si une oxydation par l'ozone + pompage des gaz est envisagée
<b>En cas de présence d'une phase libre résiduelle (peu importante)</b>		
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.	
	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut	
	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est utile	

**Tableau 11b: Paramètres du sol à mesurer avant lancement d'une opération d'oxydation chimique in-situ**

Paramètres	Moyen de mesures	Commentaires
Stratigraphie du sol : hétérogénéité et variations texturales, couches aquifères (profondeur et puissance), aquitard, aquicludes, ...	Cartes géologiques et géotechniques et sondages et description + analyse des différentes couches de sol	Disponible au terme de l'étude détaillée
Piézométrie de ou des aquifère(s), gradients hydrauliques, conductivité hydraulique, sens d'écoulement, vitesse de circulation, caractère confiné ou semiconfiné	Cartes géologiques et géotechniques et sondages et description des couches de sol, placement de piézomètres, mesures piézométriques et calage en altimétrie	Disponible au terme de l'étude détaillée
Paramètres physico-chimiques : pH, teneur en matière organique, teneurs en Fer et autres catalyseurs naturels, teneurs en carbonates	Forages, prélèvement et analyses d'échantillons de sol	
Capacité d'infiltration du sol	Tests d'infiltration en mode actif ou passif	
Variations saisonnières des niveaux piézométriques et	Suivi piézométrique lors de campagnes successives	
<b>Pompage de l'eau du sol si la recirculation est envisagée</b>		
Conductivité hydraulique	Tests de pompage de l'eau de la nappe	
Rayon d'influence des puits d'extraction	Tests de pompage de l'eau de la nappe	
Paramètres physico-chimiques de l'eau à pomper : Teneurs en Fer, Manganèse, Arsenic, carbonates, particules en suspension, pH, Eh, sulfates,		
<b>Pompage de l'air si l'injection d'ozone est envisagée</b>		
Perméabilité à l'air	Tests de pompage de l'air du sol	
Rayon d'influence des puits d'extraction	Tests de pompage de l'air du sol	
<b>Pour la variante Sparging (injection d'Ozone)</b>		

Caractéristiques de l'eau souterraine : pH, potentiel Redox, teneurs Fe et Mn dissous, teneurs en carbonates	Placement de piézomètres, prélèvement et analyse d'échantillons	
	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut	
	= paramètre dont la mesure ou l'estimation est souhaitable	

**Tableau 11c : Paramètres du site d'intervention à évaluer avant lancement d'une opération d'oxydation chimique in-situ**

Paramètres	Moyen de mesures et d'observation	Commentaires
Présence d'impétrants dans le sol au droit du site et ses alentours immédiats	Consultation concessionnaires réseaux d'impétrants, Commune,	Réalisé lors des études de reconnaissance et détaillées
	Détection sur le terrain : préfourilles, passage au détecteur CAT, ...	Réalisé lors des études de reconnaissance et détaillées
Présence d'infrastructures susceptibles d'être menacées par les réactifs oxydants et l'acidification du sol	Inventaire des infrastructures susceptibles d'être corrodées : conduites, cuves, ferrailage des bétons enfouis, ...	
Accessibilité du site aux équipements et surface disponible suffisante	Inventaire	
Présence de cibles aériennes sensibles au bruit, odeurs, vapeurs, ... Sur le site et dans ses alentours immédiats	Inventaire	
<b>En cas d'utilisation de la variante addition d'agents tensio-actifs</b>		
Présence d'infrastructures susceptibles d'être menacées par l'usage des tensio-actifs	Inventaire des infrastructures susceptibles d'être impactées par l'usage des tensio-actifs : conduites revêtues de goudron, fibres optiques, ...	
<b>En cas d'utilisation de la variante chauffage du sol</b>		
Présence d'infrastructures susceptibles d'être menacées par l'augmentation de température du sol	Inventaire des infrastructures susceptibles d'être impactées par une augmentation de températures : conduites revêtues de goudron, fibres optiques, ...	
	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut	
	= paramètre dont la mesure ou l'estimation est souhaitable	

Ces tableaux appellent les commentaires suivants :

- Source de pollution éradiquée ou non: une certitude quant à l'absence de source de pollution résiduelle doit être obtenue avant le lancement d'une opération par oxydation chimique.
- Comme déjà mentionné, lorsqu'on observe une couche importante de produit pur, celle-ci doit faire l'objet d'une prise en charge préalable au lancement d'une opération de traitement par oxydation chimique, sans quoi les quantités de réactif à injecter et les temps de traitement risquent d'atteindre des valeurs techniquement et économiquement non

acceptables. Cette prise en charge peut être faite par un autre procédé de traitement : excavation, traitement thermique, pompage triphase... Seule la présence d'une phase libre résiduelle peu importante est considérée dans le présent code.

- Nature chimique de la phase libre si présente. Il est recommandé de prélever et analyser au moins 3 échantillons de cette phase : au front de migration, au centre et à la queue du panache de contamination. En effet, pour les polluants constitués de mélanges comme les hydrocarbures, en raison des différences de vitesse de migration des différents composants, la composition de la phase libre est différente selon la position dans un panache en migration. Des analyses multiples assurent également la détection de panaches mixtes résultant de contaminations multiples, comme fréquemment observées dans les stations-service : gasoil + essence + huiles de lubrification.
- Teneurs en composés polluants dans la phase gazeuse du sol (pour le prélèvement des échantillons de l'air du sol, voir le code de bonnes pratiques de Bruxelles Environnement portant sur les prises d'échantillons de sol, d'eaux souterraines, de sédiments et d'air du sol). Cette campagne d'échantillonnage vise à estimer les teneurs en polluants présentes dans les gaz extraits du sol en cas de traitement par injection d'ozone + extraction des gaz dans la couche insaturée du sol. Le nombre d'échantillons à prélever et analyser fera l'objet d'une proposition de l'expert.
- Pour les tests de pompage de l'eau du sol, nécessaires en cas de traitement par injection d'oxydant + recirculation (voir le code de bonne pratique n° 1 : Pompage de fluides dans la zone saturée du sol).
- Pour les tests de pompage de l'air du sol (voir le code de bonne pratique n° 2 : pompage de gaz dans la couche insaturée du sol).
- Concernant la mesure des teneurs dans le sol des polluants susceptibles d'être libérés et de migrer vers la nappe d'eau souterraine par suite de l'oxydation de la matière organique, de l'acidification du sol et de la mise en place de conditions oxydantes, l'expert d'estimera si les résultats analytiques obtenus au terme de l'étude de reconnaissance et détaillée sont suffisants pour apprécier de manière qualitative ce risque ou si des données supplémentaires sont à acquérir : teneurs minimales, maximales, moyennes, distribution spatiale.... avant la mise en œuvre des tests de laboratoire et des tests pilote.

## 7.2 Nécessité d'essais préalables en laboratoire

Compte tenu du nombre important de facteurs pouvant intervenir sur la faisabilité technique (et financière) du traitement par oxydation chimique (type de sol et de polluant, adéquation entre le type de réactif choisi et le polluant, mode d'apport du réactif, quantités à appliquer....) une première étape de screening à l'aide d'une étape de test de laboratoire apparaît comme indispensable.

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

Les paramètres à mesurer et les données à rapporter lors de cette étape sont repris dans le **tableau 12**.

**Tableau 12 : Test de laboratoire de faisabilité de l'oxydation chimique in-situ : paramètres à mesurer et données à rapporter.**

Paramètres à mesurer	Tests à effectuer	Données à rapporter
Caractérisation du matériel sol testé	Après homogénéisation, séchage et broyage éventuel, analyse des caractéristiques physico-chimiques et chimiques : pH, TOC, teneurs en polluants à traiter, teneurs en polluants susceptibles d'être libérés, teneurs en Fer et autres éléments catalyseurs, teneurs en carbonates	Méthodes d'analyses, taille de l'échantillon, et résultats des analyses : pH, TOC, ....
Caractérisation du matériel eau souterraine testé	Analyse des caractéristiques physico-chimiques et chimiques : pH, TOC, teneurs en polluants à traiter, teneurs en Fer et autres éléments catalyseurs, teneurs en carbonates	Méthodes d'analyses, taille de l'échantillon, et résultats des analyses : pH, TOC, ....
Pouvoir tampon du sol	Tests de titration à l'aide d'acides ou de bases diluées	Courbes de titration et pouvoir tampon (quantité d'acide/base à ajouter par unité de masse de sol et par unité de pH)
Pouvoir tampon de l'eau souterraine	Tests de titration à l'aide d'acides ou de bases diluées	Courbes de titration et pouvoir tampon (quantité d'acide/base à ajouter par unité de masse de sol et par unité de pH)
Demande en oxydant du sol	Consommation d'oxydant du sol en l'absence de polluant : tests en batch	Ratio sol /solution oxydante, teneur en oxydant de la solution, durée du traitement, type d'oxydant, pH lors du traitement
Demande en oxydant de l'eau souterraine	Consommation d'oxydant du sol en l'absence de polluant : tests en batch	Ratio eau souterraine /solution oxydante, teneur en oxydant de la solution, durée du traitement, type d'oxydant, pH lors du traitement
Efficacité de l'oxydation pour l'élimination du polluant dans le sol	Teneurs résiduelles dans le sol après le traitement, quantités d'oxydants consommés, effets sur le pH, production de composés intermédiaires, teneurs en produits de la réaction ( $\text{Cl}^-$ et $\text{SO}_4^{2-}$ ) Tests en batch	Teneurs finales en polluants, ratio sol/solution oxydante, teneurs en oxydant de la solution, pH de départ, teneur en catalyseur, pH final, teneurs en composés intermédiaires éventuels, teneurs en produits de réaction, durée et conditions ( $t^\circ$ ) du test. Demande en oxydant du sol pollué. Comparaison avec un "Blanc"
Efficacité de l'oxydation pour l'élimination du polluant dans l'eau souterraine	Teneurs résiduelles dans l'eau après le traitement, quantités d'oxydants consommés, effets sur le pH, production de composés intermédiaires, teneurs en produits de la réaction ( $\text{Cl}^-$ et $\text{SO}_4^{2-}$ ) Tests en batch.	Teneurs finales en polluants, ratio eau /solution oxydante, teneurs en oxydant de la solution, pH de départ, teneur en catalyseur, pH final, teneurs en composés intermédiaires éventuels, teneurs en produits de réaction, durée et conditions ( $t^\circ$ ) du test Demande en oxydant de l'eau polluée. Comparaison avec un "blanc".

Conséquence pour la mobilité accrue d'autres polluants	Teneurs en polluants non considérés comme nécessitant une intervention dans la solution du sol par suite du traitement (Cr, As, composés organiques, ...)	Teneurs finales dans la solution en contact avec le sol en éléments métalliques (Cr, As, ...) et en composés organiques susceptibles de devenir problématiques après traitement. Comparaison avec un "blanc"
Conséquences du traitement sur les propriétés hydrogéologiques du sol	Tests en colonnes : mesures de la conductivité hydraulique avant et après passage d'une solution oxydante	Evolution de la conductivité hydraulique et comparaison avec un test en "blanc". Dimension de la colonne, débits initiaux et finaux, charge hydraulique, durée du traitement, quantités et teneurs des solutions oxydantes, pH initiaux et finaux
Cas particulier du traitement à l'ozone	Traitement ozone (5 %) + eau souterraine polluée et Traitement ozone (5 %) sur un mélange sol humide + eau déminéralisée et Traitement ozone (5 %) sol sec + eau déminéralisée et Traitement oxygène sur un mélange sol humide + eau déminéralisée	Besoin en ozone de l'eau souterraine, besoin en ozone du sol, importance de la dégradation de l'ozone, bilan de masse : dégradation chimique, volatilisation et biodégradation.
<b>En cas de mise en œuvre de la variante addition de tensio-actif</b>		
Quantités optimales de surnageant à ajouter	Lors des tests d'oxydation sur le sol et/ou l'eau souterraine, une variable supplémentaire est testée : la quantité d'agent tensio-actif ajouté	Teneurs finales en polluants, ratio sol (+ eau souterraine) /solution oxydante, teneurs en oxydant de la solution, pH de départ, teneur en catalyseur, pH final, teneurs en composés intermédiaires éventuels, teneurs en produits de réaction, durée et conditions (t°) du test. Demande en oxydant de l'eau polluée. Comparaison avec un "blanc". Quantités initiales et finales de surfactants.

Ce tableau appelle les commentaires suivants :

- Il est très rare que le traitement par oxydation chimique d'adresse aux seuls polluants présents sous forme dissoute dans l'eau souterraine. En règle générale, c'est la couche saturée (matrice solide + eau souterraine) qui est visée par le traitement. La séparation faite dans le **tableau 12** entre effet du traitement sur le sol et effet sur l'eau souterraine est donc théorique. Dans la pratique, c'est un mélange de sol + eau souterraine (en proportions variables à rapporter) qui est testé.
- Les notions suivantes sont à fixer
  - Consommation en oxydant = (Quantité d'oxydant introduit – Quantité d'oxydant résiduel)/unité de masse de sol
  - Demande globale en oxydant du sol = (Consommation en oxydant – perte d'oxydant par décomposition)/unité de masse du sol. La perte en oxydant par décomposition, volatilisation ... est estimée par un traitement en « blanc », faisant intervenir la même quantité d'oxydant et reproduisant les mêmes conditions expérimentales mais en absence de sol.
  - La demande globale en oxydant du sol regroupe elle-même deux quantités différentes : la demande en oxydant du sol (telle qu'estimée en soumettant un échantillon de sol non pollué au traitement) et la demande en oxydant du polluant.

- Les tests de titration du sol et de l'eau souterraine ou du mélange des deux donnent une indication des quantités optimales d'acides ou de bases à apporter au sol pour le déroulement de l'oxydation.
- Lors de l'estimation de l'efficacité du traitement par oxydation, il y a lieu de comparer les résultats obtenus avec des tests « blancs » dans lesquels le sol pollué (avec ou sans eau souterraine) est soumis aux mêmes conditions expérimentales mais en l'absence d'oxydant. Seule cette efficacité réelle permet de juger de l'intérêt d'appliquer le traitement par oxydation en comparaison d'une atténuation naturelle stimulée, par exemple.
- La recherche et l'analyse de produits intermédiaires de la réaction d'oxydation doit être orientée sur la base de données de la littérature. L'expert justifiera les choix et options retenus à cet égard.
- D'une manière générale, on s'attachera à choisir des conditions expérimentales s'approchant des conditions prévalant dans le sol à traiter : conditions de  $t^{\circ}$ , durée du traitement correspondant à la durée de rémanence du polluant dans le sol... Estimer, par exemple, la demande en permanganate du sol, au terme d'un traitement de 2 ou 3 jours, donnera des résultats peu représentatifs de la réalité du terrain. En cas de chauffage du sol par injection de vapeur, la température expérimentale devra, bien évidemment, s'approcher de la température attendue dans le sol lors du traitement.
- L'intérêt d'effectuer des tests en colonnes pour estimer la chute de conductivité hydraulique du sol suite au traitement (perte de structure, précipitation de  $MnO_2$ , ...) est laissée à l'appréciation de l'expert, compte tenu du degré variable de représentativité de ce type de tests, en fonction du type de sol et des conditions expérimentales.

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

Dans la mesure où les résultats obtenus lors de la phase test de laboratoire sont prometteurs, il y a lieu de mettre en œuvre une étape de test pilote sur le terrain afin d'obtenir une estimation plus fiable des résultats susceptibles d'être obtenus.

En cas de présence d'une phase libre surnageante importante, cette dernière fera l'objet d'une prise en charge préalable avant l'exécution du test pilote.

Les paramètres à définir lors de l'exécution du test pilote sont donnés dans le **tableau 13**.

**Tableau 13 : Paramètres et contenu des tests pilotes pour le traitement par oxydation chimique in-situ**

Rubrique	Paramètres et quantité à mesurer	Commentaires
<b>En cas d'un dispositif par infiltration (passive ou active)</b>		
Description du dispositif mis en œuvre	Description des éléments du dispositif : puits d'infiltration (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête), piézomètres d'observation (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête), dispositif de mesure des débits infiltrés (type, localisation, ...), dispositif de mesure de la hauteur piézométrique à proximité des puits d'infiltration,	La localisation des différents éléments du dispositif fait l'objet de figures à joindre en annexe 6 du Projet .

Paramètres du traitement	Type d'oxydant, composition de la solution d'injection : teneur en oxydant, en catalyseur, en acide (base), en agent tensio-actif éventuel. Débits et pression d'infiltration	
Paramètres mesurés	Débits et volumes cumulés des solutions infiltrées, niveaux piézométriques à proximité des puits d'injection. Paramètres mesurés dans l'eau souterraine au niveau des piézomètres d'observation : teneurs en O <sub>2</sub> , en oxydant, agents tensio-actifs éventuels, catalyseurs, en polluants à traiter, en produits de réaction (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , ...), en produits intermédiaires, en autres polluants, pH, Eh, T°. Prélèvement et analyse des teneurs résiduelles en polluant dans le sol.	
Paramètres calculés	Rayon d'influence des puits d'infiltration. Consommation en oxydant dans le sol (et l'eau souterraine). Bilan de masse : diminution de la charge polluante dans le sol dans le volume influencé par l'oxydant, quantité d'oxydant nécessaire pour éliminer la charge polluante totale, volumes de solution à injecter, nombre de puits et débits d'infiltration optimum. Estimation du temps de traitement	

**En cas d'un dispositif par infiltration (active ou passive) + recirculation**

Description du dispositif mis en œuvre	Description des éléments du dispositif : puits d'infiltration et puits d'extraction (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête), piézomètres d'observation (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête), dispositif de mesure des débits infiltrés et des débits pompés (type, localisation, ...), dispositif de mesure de la hauteur piézométrique dans la zone de traitement, conduites d'aménées de l'eau pompée (type et localisation), station de traitement de l'eau pompée (localisation, description, débits traités), localisation du point de rejet de l'eau traitée	La localisation des différents éléments du dispositif fait l'objet de figures à joindre en annexe 6 du Projet.
Paramètres du traitement	Type d'oxydant, composition de la solution d'injection : teneur en oxydant, en catalyseur, en acide (base), en agent tensio-actif éventuel. Débits et pression d'infiltration, débits d'extraction	
Paramètres mesurés	Débits et volumes cumulés des solutions infiltrées, débits et volumes cumulés de l'eau extraite, niveaux piézométriques dans la zone à traiter. Paramètres mesurés dans l'eau souterraine au niveau des piézomètres d'observation et des puits d'extraction : teneurs en O <sub>2</sub> , en oxydant, agents tensio-actifs éventuels, catalyseurs, en polluants à traiter, en produits de réaction (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , ...), en produits intermédiaires, en autres polluants, pH, Eh, T°. Prélèvement et analyse des teneurs résiduelles en polluant dans le sol. Teneurs en polluants de l'eau rejetée.	

Paramètres calculés	Rayon d'influence des puits d'infiltration et des puits de pompage. Vitesse de circulation de l'eau souterraine et des réactifs oxydants, Consommation en oxydant dans le sol (et l'eau souterraine). Bilan de masse : diminution de la charge polluante dans le sol dans le volume influencé par l'oxydant, quantité d'oxydant nécessaire pour éliminer la charge polluante totale, volumes de solution à injecter, nombre de puits d'infiltration et débits d'infiltration optimum, nombre de puits d'extraction et débits de pompage optimum, Estimation du temps de traitement	Etablissement de courbes isopièzes dans la zone pilote
<b>En cas d'un dispositif par injection directe sous pression dans le sol (couche saturée)</b>		
Description du dispositif mis en œuvre	Description des éléments du dispositif : piézomètres d'observation (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête), dispositif de mesure des débits injectés, dispositif de mesure de la hauteur piézométrique à proximité des puits d'infiltration.	La localisation des différents éléments du dispositif fait l'objet de figures à joindre en annexe 6 du Projet .
Paramètres du traitement	Type d'oxydant, composition de la solution d'injection : teneur en oxydant, en catalyseur, en acide (base), en agent tensio-actif éventuel. Débits et pression d'injection.	
Paramètres mesurés	Débits et volumes cumulés des solutions injectées, niveaux piézométriques à proximité des puits d'injection. Paramètres mesurés dans l'eau souterraine au niveau des piézomètres d'observation : teneurs en O <sub>2</sub> , en oxydant, agents tensio-actifs éventuels, catalyseurs, en polluants à traiter, en produits de réaction (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , ...), en produits intermédiaires, en autres polluants, pH, Eh, T°. Prélèvement et analyse des teneurs résiduelles en polluant dans le sol.	Rapportage des "incidents" : remontée des solutions injectées à la surface, blocage des pores du sol à proximité des points d'injection ou, à l'inverse, rupture de la formation ou voies d'écoulement préférentielles.
Paramètres calculés	Rayon d'influence des puits d'injection. Consommation en oxydant dans le sol (et l'eau souterraine). Bilan de masse : diminution de la charge polluante dans le sol dans le volume influencé par l'oxydant, quantité d'oxydant nécessaire pour éliminer la charge polluante totale, volumes de solution à injecter, nombre de puits et débits d'injection optimum. Estimation du temps de traitement	
<b>En cas d'un dispositif d'injection d'ozone dans la couche saturée du sol (Sparging)</b>		
Description du dispositif mis en œuvre	Description des éléments du dispositif : puits d'injection de l'ozone dans la couche saturée et puits d'extraction des gaz dans la couche insaturée (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête), points d'observation (nombre, localisation, diamètre, équipement et profondeur de celui-ci : manomètres, sondes piézométriques, points de prélèvements, sondes température), dispositif de mesure des débits de	La localisation des différents éléments du dispositif fait l'objet de figures à joindre en annexe 6 du Projet .

	gaz injectés et des débits de gaz pompés (type, localisation, ...), conduites d'amenée des gaz pompés (type et localisation), station de traitement de l'eau pompée (localisation, description, débits de gaz et de condensats traités), localisation du point de rejet des gazs traités	
Paramètres du traitement	Teneur en ozone du gaz injecté, débits et pression d'injection. Dépression dans les puits d'extraction, débits d'extraction. Addition éventuelle d'eau oxygénée (perozone)	
Paramètres mesurés	Débits et volumes cumulés de l'injection d'ozone, débits et volumes cumulés des gaz extraits, niveaux de (dé)pression, niveaux piézométriques dans la zone à traiter. Paramètres mesurés dans les points d'observation : teneurs en O <sub>2</sub> , en polluants à traiter, en produits de réaction (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> , ...), en produits intermédiaires, en autres polluants, pH, Eh, T°. Prélèvement et analyse des teneurs résiduelles en polluant dans le sol. Teneurs en polluants des gaz extraits et des gaz rejetés après traitement. Quantités et teneurs en polluants dans les condensats.	En cas de présence de cibles sensibles à proximité de la zone de test, mesure de teneurs en ozone et polluants volatiles dans l'air ambiant.
Paramètres calculés	Rayon d'influence des puits de sparging et des puits de pompage des gaz. Consommation en oxydant dans le sol (et l'eau souterraine). Bilan de masse : diminution de la charge polluante dans le sol dans le volume influencé par l'oxydant, quantité d'oxydant nécessaire pour éliminer la charge polluante totale, volumes de gaz enrichi en ozone à injecter, nombre de puits de sparging et débits (pression) d'injection optimum, nombre de puits d'extraction des gaz et débits (dépression) de pompage optimum, Estimation du temps de traitement	
<b>Variante : chauffage du sol par injection de vapeur</b>		
Description du dispositif complémentaire mis en œuvre	Description des puits d'injection de vapeur : localisation, profondeur de la crépine d'injection.	
Paramètres complémentaires mesurés	Température de la vapeur injectée, pression d'injection, débits et volumes cumulés de vapeurs injectés.	
<b>Conclusions du test pilote</b>		
	Faisabilité technique du traitement : nombre de puits d'infiltration, d'extraction, d'injection, durée du traitement, volumes de liquide ou de gaz extraits, de condensats, de produits pur à prendre en charge, volumes de solutions oxydantes, d'ozone et/ou de vapeur à injecter, consommation énergétique nécessaire, ...	

	Dimensionnement du dispositif de traitement en vrai grandeur : nombre et distance entre les puits d'injection, d'infiltration, d'extraction des liquides et des gaz, débits des solutions oxydantes ou d'ozone à injecter, débits des liquides et des gaz à extraire du sol, (dé)pression et éventuellement températures à mettre en place, durée projetée du traitement, dimension et équipements de la station de traitement, quantités de fluides à traiter et à rejeter, ... Définition des paramètres de suivi.	
	Bilans de masse et résultats attendus : masse de polluants oxydés, masse et teneurs en polluants résiduelles	

Le **tableau 13** appelle les commentaires suivants :

- Le tableau constitue une check-list des paramètres devant être **a priori** pris en compte, mesurés et rapportés lors de l'exécution du test pilote. Il appartient à l'expert de définir et justifier les modalités de l'exécution du test pilote, sur la base de cette check-list.
- La durée d'un test pilote est variable en fonction de la durée de vie de l'oxydant introduit dans le sol et de la vitesse de migration du réactif.
- La fréquence des mesures des paramètres lors des tests pilote fera l'objet d'une proposition de l'expert.
- Lors du suivi du test pilote, le calcul des volumes cumulés de gaz injectés et pompés et des teneurs en oxydant et polluants dans les gaz sera systématiquement effectué après correction des données par rapport aux conditions standards de pression et de volume.

## 8. Description d'une installation type

Une installation d'intervention par oxydation chimique in-situ comprend typiquement les éléments suivants.

### 8.1. Infiltration active ou passive

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

### 8.2. Infiltration (active ou passive) + recirculation

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

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

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

**NB.** Un code de bonnes pratiques distinct traite des opérations de traitement en surface des eaux et autres fluides pompés du sol.

### 8.3. Injection directe sous pression

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

### 8.4. Injection d'ozone dans la couche saturée

- Une unité de fabrication du gaz enrichi en ozone (procédé UV ou par décharge corona).
- Un ou plusieurs puits d'injection du gaz oxydant dans la couche saturée du sol et un dispositif de mise sous pression équipé de manomètres, débitmètres et sondes de température. La pression et les débits d'injection sont établis sur la base des résultats du test pilote. La construction des puits d'injection fait intervenir des matériaux résistants à la corrosion : acier inox, téflon, ...
- Un ou plusieurs puits d'extraction des gaz dans la couche insaturée du sol. Les distances entre les puits d'extraction sont calculées pour intercepter la totalité des gaz générés par l'injection d'ozone (ozone non réduit, produits d'oxydation gazeux, autres gaz mis en circulation en résultat de l'injection).
- Un dispositif d'extraction des gaz : pompes à vide, ventilateurs ... connectés à un ou plusieurs puits d'extraction. De manière à réduire les nuisances acoustiques, les unités de pompage peuvent être situées dans des enceintes isolées (caissons, containers, ...)
- Un dispositif de régulation de l'injection d'ozone et du pompage des gaz, pouvant prendre des formes très variées : censeurs électriques (niveau max –niveau min) dans les piézomètres surveillant la remontée de la nappe, censeurs reliés aux manomètres présents dans les différentes sections du dispositif, censeurs 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 et d'injection , ...
- Des conduites de collecte et d'amenée des gaz extraits reliant la(les) pompe(s) aux puits d'extraction et ensuite celle(s)-ci à la station de traitement. Ces conduites préférentiellement enterrées sont équipées de clapets anti-retour et lors de leur mise en place, attention est portée sur l'absence de sections à contre-pente où les condensats pourraient s'accumuler.

Des débitmètres permettant de suivre en instantané et en cumulé les volumes extraits au niveau des puits individuels ou au niveau des pompes. Des manomètres sont également établis au niveau des pompes d'extraction, des puits et en différents points de l'installation de manière à vérifier l'efficacité des pompes et dépister les points d'entrée d'air. Un ou plusieurs explosimètres sont établis avant le passage des gaz dans les pompes. Avant leur passage dans celles-ci, les gaz circulent dans un séparateur air/eau pour la récupération des condensats et au travers d'un filtre à particules.

- Une station de traitement des gaz pompés. Le traitement du gaz avant son rejet dans l'atmosphère fait le plus souvent appel à une filtration par charbon actif. En cas de teneurs importantes d'autres procédés peuvent être utilisés : oxydation catalytique, oxydation thermique, passage sur bio-filtres, adsorption sur résines, ....
- Un dispositif d'échantillonnage comportant des points de prélèvement des gaz au niveau des différents puits individuels ou des différentes pompes ainsi qu'au niveau de la station de traitement de manière à échantillonner les gaz traités avant leur rejet dans l'atmosphère. La station est également équipée de dispositifs de régulation, alarme et mise à l'arrêt en cas de pannes et dysfonctionnements.
- Un dispositif de supervision du traitement.

## 8.5. Oxydation in-situ + chauffage du sol (par injection de vapeur)

En plus des infrastructures liées à l'addition de l'oxydant dans la couche saturée du sol :

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

Le dispositif de supervision du traitement comportera en outre des sondes de température au niveau des points de contrôle dans le sol et des puits d'extraction.

### Remarque générale

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

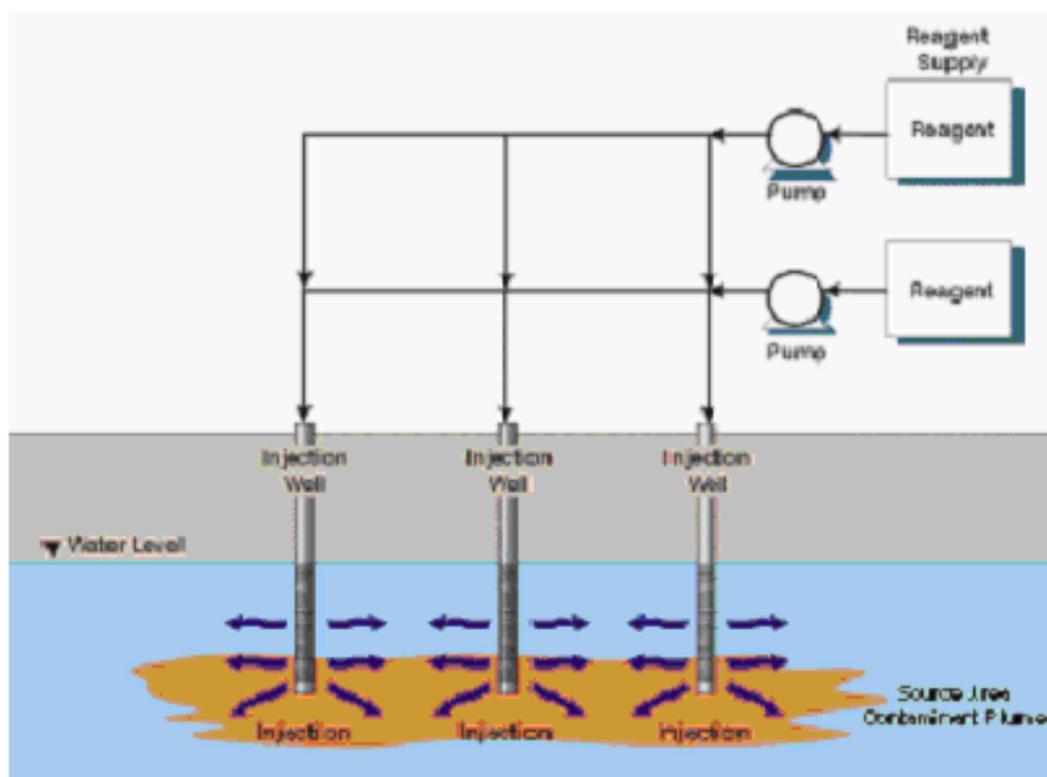
Pour l'injection directe, cependant, les équipements sont disponibles selon des gammes de dimensions fixées : diamètre des cannes, longueur des éléments individuels, pompe d'injection (pression et débits), puissance des marteaux de battage... La profondeur maximum d'injection, techniquement et économiquement réalisable dépend du type de sol : présence d'éléments ou couches indurées, couches denses, ... En sol meuble, au-delà de 25 m de profondeur, la faisabilité technique du procédé devient aléatoire.

Pour l'injection d'ozone par sparging, les unités de fabrication d'ozone sont de capacité définie. Le dimensionnement de l'équipement devra tenir compte de cette contrainte.

## 8.6. Schéma conceptuel

La figure 5 ci-dessous présente le schéma d'une unité d'oxydation chimique des polluants in situ (<http://emis.vito.be/techniekfiche/concept-situ-chemical-oxidation?language=en>)

Figure 5 : unité d'oxydation chimique



## 9. Descriptif de l'installation mise en place

Le dispositif mis en place dans le cadre [des travaux](#) sera décrit en fournissant, au minimum, les indications reprises dans le **tableau 14**. L'installation sera décrite par l'expert à l'aide d'un schéma technique de type.

**Tableau 14 : Données à fournir concernant le système de traitement à mettre en place**

Partie du dispositif	Élément	Données du descriptif	Commentaire
Oxydant à utiliser	Type d'oxydant	Type d'oxydant, teneur dans le réactif injecté, quantités d'oxydant prévues sur base de la DOS et de la charge polluante,	
	Additifs	Types d'additifs : catalyseurs, acidifiants, alcalinisant, teneurs dans la solution d'apport...	
	Dispositif de préparation des réactifs	Localisation. Description	
	Ozone	Appareil de fabrication d'ozone. Teneur dans le gaz injecté. Avec ou sans eau oxygénée (perozone)	
Dispositif d'apport	Infiltration passive ou active	Localisation et distance entre les différents puits, profondeur des tronçons aveugles et crépinés, diamètre et type de tubage, dimensions des ouvertures de la crépine, type et position du massif filtrant, type et position du bouchon imperméabilisant (bentonite), type de tête de puits(étanche si infiltration sous pression), protection de la tête(trapillon de visite, tube en acier cadénassé, ...). Position des manomètres, des débitmètres. Débits d'infiltration. Pression d'infiltration.	
	Infiltration + recirculation	Localisation et distance entre les différents puits d'infiltration et de pompage. Pour tous les puits : profondeur des tronçons aveugles et crépinés, diamètre et type de tubage, dimensions des ouvertures de la crépine, type et position du massif filtrant, type et position du bouchon imperméabilisant (bentonite), type de tête de puits(étanche si infiltration sous pression), protection de la tête(trapillon de visite, tube en acier cadénassé, ...). Position des manomètres, des débitmètres. Débits d'infiltration et de pompage. Pression d'infiltration.	

	Injection directe	Localisation et distance entre les points d'injection. Profondeur de l'injection, description de l'équipement (tubage, crépine, ...), mode d'injection (unique ou séquentiel). Pression et débits d'injection. Quantité injectée par point.	
	Injection d'ozone	Localisation et distance entre les différents puits d'infiltration et d'extraction des gaz. Pour tous les puits : profondeur des tronçons aveugles et crépinés, diamètre et type de tubage, dimensions des ouvertures de la crépine, type et position du massif filtrant, type et position du bouchon imperméabilisant (bentonite), type de tête de puits, protection de la tête (trapillon de visite, tube en acier cadenassé, ...). Position des manomètres, des débitmètres et des sondes de température. Débits et pression d'injection. Débits et dépression dans les puits d'extraction. Mode permanent ou intermittent.	
	Mélange au sol	Description du dispositif de mélange (tarière, ...) diamètre des passages individuels, profondeur de mélange, quantités incorporées par m <sup>3</sup> de sol,	
<b>Pompes</b>	Pompes pour l'infiltration active, l'injection directe, le pompage pour la recirculation, l'extraction des gaz, le sparging d'ozone.	Types et localisations des pompes : pompe à vide, ventilateurs, ... connectées à 1 ou plusieurs puits, séparateur air/liquide, filtres à particules. Niveau de la pression et de la dépression mise en œuvre. Mode opérationnel : continu - intermittent	La puissance des pompes doit être calculée par rapport aux débits d'injection/d'extraction retenus en fonction de la durée souhaitée du traitement et des (dé)pressions réalistement applicables
<b>Système de régularisation</b>	Régulation du traitement	Système de pompage travaillant en continu ou par période (battement recherché du niveau de la nappe), pompage simultané ou séquentiel dans les différentes sections du dispositif, repères de déclenchement ou d'interruption selon les niveaux de la nappe et selon les pressions mesurées	
<b>Objectif poursuivi</b>	Traitement de la couche insaturée du sol	Objectifs de teneurs à atteindre de manière durable dans le sol, extension actuelle en X, Y et Z de la contamination. Durée prévue	
	Traitement de la couche saturée du sol	Objectif de teneurs à atteindre de manière durable dans la nappe et éventuellement le sol (frange capillaire), extension actuelle en X, Y et Z de la contamination. Durée prévue	

<b>Variante chauffage du sol</b>	Injection de vapeur	Localisation des points d'injection et descriptif (diamètres profondeurs, distances, ...). Températures de la vapeur injectée, Pressions et débits d'injection.	
<b>Dispositif de collecte des fluides pompés</b>	Conduite d'amenées des gaz et/ou de l'eau pompée	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 et des manomètres des sondes de température.	
<b>Station de traitement des fluides pompés</b>	Cette rubrique fait l'objet d'un autre code de bonne pratique		
<b>Objectif de qualité des fluides pompés et traités avant leur rejet</b>	Condensats et eaux traités	Les normes de qualités pour les eaux traitées à rejeter dans le réseau d'égouttage public ou les eaux de surface correspondent aux normes d'assainissement de <a href="#">l'AGRBC du 29/03/2018</a> déterminant les normes d'intervention et les normes d'assainissement.	
	Phases pures séparées	Prise en charge selon le type de produit et la législation en vigueur : prise en charge en qualité de déchets, déchets dangereux, valorisation énergétique, ...	
	Gaz traités	Selon la Fiche Info sol fixant les normes d'émission des effluents gazeux résultant d'un <a href="#">traitement</a> de sol.	
<b>Dispositif anti-nuisances</b>	Mesures anti-bruit	Type de mesure prévue : mesures anti-cavitation des pompes, isolation acoustique des pompes, ....	
	Mesures anti-odeur	Eventuelles pour les composés volatiles (acétones, composés aromatiques)	

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

### 10.1. Points à prendre en compte

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

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

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

Les risques à prendre en compte découlent du stockage, de la manipulation et de la mise en œuvre de composés dangereux et/ou toxiques. Ces risques doivent être identifiés et évalués lors de la préparation du projet, **ou avant l'exécution des travaux ne nécessitant pas de projet spécifique.**

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

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

Les mesures particulières à prendre lors de l'exécution du chantier doivent être décrites lors de la rédaction du projet, **ou doivent être évaluées avant les travaux (si pas de projet nécessaire).** Ces mesures doivent, entre autre, porter sur :

- Le stockage et la manipulation des substances dangereuses ou toxiques : risque de dispersion, fuites...
- La neutralisation des substances quittant le site ;
- Le risque d'exposition pour les personnes : inhalations, contact dermique ;
- Mesures de protection des personnes : EPI (équipement de protection individuelle), mesure de détection dans l'air ambiant ;
- Information et formation des personnes amenées à travailler près de ou avec ces substances dangereuses ou toxiques.

### 10.3. Nuisances pour la qualité de l'air (en cas de traitement par l'ozone)

L'air en contact direct avec les installations de fabrication et d'injection d'ozone peut être contaminé par ce gaz susceptible d'occasionner des irritations et des lésions permanentes des poumons et des yeux à des teneurs dépassant 2 ppm (vol/vol).

Les gaz extraits du sol en cas de traitement par l'ozone sont également susceptibles d'être dispersés en cas de non étanchéité du dispositif de collecte et de transport vers la station de traitement. Pour prévenir le risque de dissémination de vapeurs nocives ou odorantes vers les cibles sensibles sur le site ou ses abords immédiats, l'étanchéité des installations fera l'objet d'un soin particulier.

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

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

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

### 10.4. Risques d'incendie et d'explosion

Les réactions d'oxydation, surtout en présence de catalyseurs, génèrent des quantités de chaleur appréciables. La libération d'oxygène qui accompagne ces réactions dans certains cas peut être responsable de conditions propices à l'apparition d'incendies en cas de présence d'objets inflammables dans le sol : infrastructures en plastique, panneaux en bois, revêtements en goudron, remblais charbonneux...

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

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

## 10.5. Risques de dissémination des substances oxydantes

Les risques de dispersion non contrôlée des réactifs oxydants infiltrés ou injectés au travers des voies de circulation préférentielles (conduites, égouts, pertuis...) sont à prendre en compte. Les réactifs oxydants sont en effet susceptibles de causer des dégâts aux infrastructures enterrées sensibles à la corrosion (conduites métalliques, cuves...). En cas d'addition de surfactants, les risques de dissolution des enveloppes de protection goudronnées sont également à considérer. L'apparition inattendue de poches d'ozone dans des zones d'accumulation fréquentées par des personnes, en cas de déficience du système d'extraction de gaz du sol, est également un risque à envisager.

## 10.6. Nuisances acoustiques

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

Des mesures pour minimiser ces nuisances doivent être prises :

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

## 10.7. Risques pour les installations de captage voisines

Les installations de captage utilisées à des fins de distribution publique doivent être considérées comme des cibles prioritaires. Les autres installations de captage utilisées à des fins privées doivent également être prises en compte si elles risquent d'être impactées par les opérations de traitement par oxydation chimique in-situ.

Ces installations sont susceptibles d'être impactées par suite du traitement insuffisant de l'eau souterraine au niveau du noyau de pollution et/ou du panache migrant vers les sites de captage. Le risque de migration des réactifs oxydants (oxydants, catalyseurs, acidifiants, agents tensio-actifs) en dehors de la zone d'intervention est également à prendre en compte.

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

## 10.8. Conformités aux cadres légaux existants

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

Les normes de qualité de l'air à l'immission dans l'air extérieur pour mesurer l'importance de la contamination résultant de la mise en service d'un dispositif d'injection d'ozone et de pompage des

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

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

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

Les impositions renseignées au permis d'environnement prédélivrées doivent également être respectées. Dans les zones à niveau de bruit ambiant élevé (voiries, zones industrielles actives, ...) il convient de comparer le niveau mesuré de l'impact des installations au niveau de bruit ambiant.

## 11. Supervision du traitement

### 11.1 Mesures de surveillance : dispositif type

#### 11.1.1. Infiltration active ou passive

Le dispositif de supervision repose sur les éléments suivants :

- Un réseau de piézomètres visant à suivre l'évolution de la piézométrie et des paramètres de l'eau souterraine en cours de traitement : au sein de la tache de pollution, en amont et en aval de celle-ci. Dans tous les cas de figure, en cas de cibles sensibles identifiées en aval hydrogéologique de la tache de pollution, des piézomètres d'observation seront établis entre la tache de contamination et les cibles identifiées.
- Un dispositif permettant de mesurer les débits et les volumes cumulés de réactifs infiltrés.
- Un dispositif permettant de contrôler les pressions d'infiltration des réactifs (en cas d'infiltration active).
- En cas d'injection de réactif + catalyseur susceptible de générer de la chaleur (réactif de Fenton, par exemple), des sondes de température permettant de suivre la température du sol, dans les puits d'injection et les piézomètres de suivi.

#### 11.1.2. Infiltration (active ou passive) + recirculation

- Un réseau de piézomètres visant à suivre l'évolution de la piézométrie et des paramètres de l'eau souterraine en cours de traitement, au sein de la tache de pollution, en amont et en aval de celle-ci ; et en cas de cibles sensibles identifiées en aval hydrogéologique de la tache de pollution, des piézomètres d'observation seront établis entre la tache de contamination et les cibles identifiées.
- Un dispositif permettant de mesurer les débits et les volumes cumulés de réactifs infiltrés.
- Un dispositif permettant de contrôler les pressions d'infiltration des réactifs (en cas d'infiltration active).
- Un dispositif permettant de mesurer les débits et volumes cumulés de l'eau souterraine pompée au niveau des puits individuels ou groupes de puits (si reliés à la même pompe).
- Des points d'échantillonnage de l'eau pompée situés à la sortie des puits individuels ou groupes de puits (si reliés à la même pompe), à l'entrée de la station de traitement et à la sortie de celle-ci.
- En cas d'injection de réactif + catalyseur susceptible de générer de la chaleur (réactif de Fenton, par exemple), des sondes de température permettant de suivre la température du sol, dans les puits d'injection et les piézomètres de supervision.

#### 11.1.3. Injection directe

- Un réseau de piézomètres visant à suivre l'évolution de la piézométrie et des paramètres de l'eau souterraine en cours de traitement : au sein de la tache de pollution, en amont et en aval de celle-ci ; et en cas de cibles sensibles identifiées en aval hydrogéologique de la tache de pollution, des piézomètres d'observation seront établis entre la tache de contamination et les cibles identifiées.
- Un dispositif permettant de mesurer les débits et les volumes de réactifs injectés dans chaque point d'injection.

- En cas d'injection de réactif + catalyseur susceptible de générer de la chaleur (réactif de Fenton, par exemple), des sondes de température permettant de suivre la température du sol, les piézomètres de suivi ou si nécessaire d'autres points d'observation.

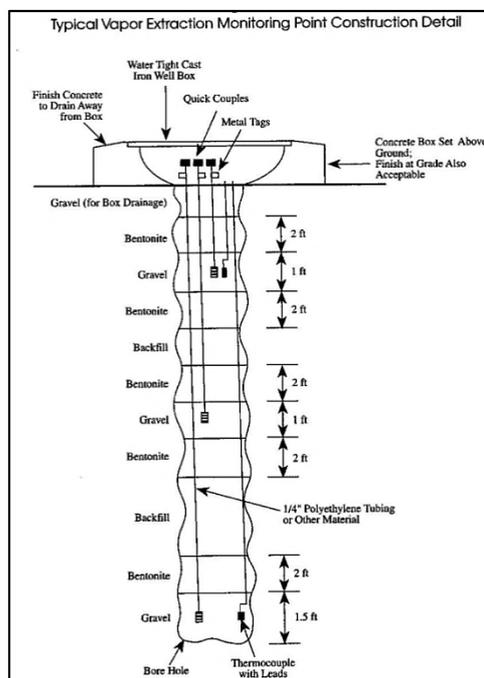
#### 11.1.4. Mélange au sol

- Un dispositif permettant de suivre les quantités d'oxydants incorporés dans chaque passe (cylindre) de mélange.

#### 11.1.5. Injection d'ozone dans la zone saturée + extraction des gaz de la zone insaturée

- au niveau des puits d'injection, des débitmètres mesurant les débits et les volumes cumulés d'ozone injectés, des manomètres indiquant la pression d'injection de même que des jauges de température.
- A proximité des puits d'injection, des points d'observation équipés de manomètres et de sonde d'échantillonnage de gaz permettant de suivre l'influence de l'injection sur la pression et les teneurs en  $O_2$  à des distances discrètes des puits d'injection.
- Un réseau de points d'observation répartis sur la zone impactée visant à suivre l'évolution des paramètres : pressions, teneurs dans les gaz du sol et éventuellement température. Un exemple de point d'observation est reproduit à la **figure 6** (Extrait de *Vacuum Vapor Extraction*, Springer, 1994)

Figure 6 : Exemple d'équipement d'un point d'observation



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

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

### 11.1.6. ISCO + Variante chauffage du sol par injection de vapeur

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

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

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

Les paramètres de supervision du traitement et la fréquence des mesures sont donnés dans le **tableau 15**.

**Tableau 15 : Fréquences et paramètres des opérations de supervision du traitement**

Paramètres de suivi	Moyen	Paramètre	fréquence minimale*	Commentaires
<b>Infiltration active et passive</b>				
Débits de réactif infiltrés par puits d'infiltration	Débitmètre au niveau des puits	Débit (m <sup>3</sup> /s) et volume cumulés	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	Si infiltration de longue durée
Suivi piézométrique	Mesures du niveau de l'eau souterraine dans les piézomètres de contrôle	Sonde piézométrique (m)	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	Etablissement d'une carte des iso-pièzes et sens d'écoulement

Paramètres de l'eau souterraine	Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine	Teneurs en polluants faisant l'objet de l'intervention, produits de la réaction partielle d'oxydation, oxydants résiduels, catalyseurs, et autres stimulateurs/stabilisateurs, pH, Eh, O <sub>2</sub> dissous, conductivité électrique, T°, TOC, Métaux dont la mobilité est influencée par les conditions Redox, produits de réaction : Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ,	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	Paramètres et fréquences en fonction de l'oxydant utilisé
Température du sol dans les points d'observation	Sondes de température dans les points de contrôle	T° en °C	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	Si risque de réchauffement important du sol (réactif de Fenton)
Teneurs résiduelles dans le sol	Forages et prélèvements de carottes de sol et analyse des polluants requérant une intervention	Teneurs des polluants requérant une intervention (kg/Kg ou kg/m <sup>3</sup> )	Au lancement des opérations et ensuite tous les 3 mois	
Estimation des quantités de polluants détruites par oxydation	Teneurs résiduelles moyennes dans le sol et les eaux souterraines dans la zone d'intervention	Bilan de masse : quantités de polluants initiales, quantités résiduelles et quantités détruites (Kg)	Tous les 3 mois	
<b>Injection directe sous pression</b>				
Quantité de réactif injecté par point d'injection	Débitmètre dans le dispositif d'injection	Quantité par point d'injection	Lors de l'injection	
Paramètres de l'eau souterraine	Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine	Teneurs en polluants faisant l'objet de l'intervention, produits de la réaction partielle d'oxydation, oxydants résiduels, catalyseurs, et autres stimulateurs stabilisateurs, pH, Eh, O <sub>2</sub> dissous, conductivité électrique, T°, TOC, Métaux dont la mobilité est influencée par les conditions Redox, produits de réaction : Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ,	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	Paramètres et fréquences selon l'oxydant utilisé
Température du sol dans les points d'observation	Sondes de température dans les points de contrôle	T° en °C	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	Si risque de réchauffement important du sol (réactif de fenton)

Teneurs résiduelles dans le sol	Forages et prélèvements de carottes de sol et analyse des polluants requérant une intervention	Teneurs des polluants requérant une intervention (kg/Kg ou kg/m <sup>3</sup> )	Au lancement des opérations et ensuite 2 mois après injection	
Estimation des quantités de polluants détruites par oxydation	Teneurs résiduelles moyennes dans le sol et les eaux souterraines dans la zone d'intervention	Bilan de masse : quantités de polluants initiales, quantités résiduelles et quantités détruites (Kg)	Au lancement des opérations et ensuite 2 mois après injection	
<b>Infiltration (active ou passive) + recirculation</b>				
Débits de réactif infiltré par puits d'infiltration	Débitmètre au niveau des puits	Débit (m <sup>3</sup> /s) et volume cumulés	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	Si infiltration de longue durée
Suivi piézométrique	Mesures du niveau de l'eau souterraine dans les piézomètres de contrôle	Hauteur piézométrique (m)	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	Etablissement d'une carte des iso-pièzes et sens d'écoulement
Paramètres de l'eau souterraine	Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine	Teneurs en polluants faisant l'objet de l'intervention, produits de la réaction partielle d'oxydation, oxydants résiduels, catalyseurs, et autres stimulateurs stabilisateurs, pH, Eh, O <sub>2</sub> dissous, conductivité électrique, T°, TOC, Métaux dont la mobilité est influencée par les conditions Redox, produits de réaction : Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ,	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	Paramètres et fréquences selon l'oxydant utilisé
Température du sol dans les points d'observation	Sondes de température dans les points de contrôle	T° en °C	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	Si risque de réchauffement important du sol (réactif de Fenton)
Teneurs résiduelles dans le sol	Forages et prélèvements de carottes de sol et analyse des polluants requérant une intervention	Teneurs des polluants requérant une intervention (kg/Kg ou kg/m <sup>3</sup> )	Au lancement des opérations et ensuite tous les 3 mois	
Estimation des quantités de polluants détruites par oxydation	Teneurs résiduelles moyennes dans le sol et les eaux souterraines dans la zone	Bilan de masse : quantités de polluants initiales, quantités résiduelles et quantités détruites (Kg)	Tous les 3 mois	

	d'intervention			
Débits extraits par puits de pompage	Débitmètre au niveau des puits	Débit (m <sup>3</sup> /s) et volume cumulés	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	
Teneurs mesurées dans l'eau pompée	Echantillonnage de l'eau pompée	Teneurs en polluants faisant l'objet de l'intervention, produits de la réaction partielle d'oxydation, oxydants résiduels, catalyseurs, et autres stimulateurs stabilisateurs, pH, Eh, O <sub>2</sub> dissous, conductivité électrique, T°, TOC, Métaux dont la mobilité est influencée par les conditions Redox, produits de réaction : Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ,	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	Paramètres et fréquences selon l'oxydant utilisé
Teneurs mesurées dans l'eau de rejet	Echantillonnage à la sortie de la station de traitement	Teneurs en polluants faisant l'objet de l'intervention, produits de la réaction partielle d'oxydation, métaux dont la mobilité est influencée par les conditions Redox, produits de réaction : Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	

**Tableau 15 (suite): Fréquences et paramètres des opérations de supervision du traitement**

Paramètres de suivi	Moyen	Paramètre	fréquence minimale*	Commentaires
<b>Mélange au sol</b>				
Quantités incorporées au sol	Crépines d'alimentation	Quantités d'oxydant s incorporés (kg/m <sup>3</sup> sol)	Lors du mélange	
Teneurs résiduelles dans le sol	Forages et prélèvements de carottes de sol et analyse des polluants requérant une intervention	Teneurs des polluants requérant une intervention (kg/Kg ou kg/m <sup>3</sup> )	Au lancement des opérations et ensuite 2 mois après l'apport	
Estimation des quantités de polluants détruits par oxydation	Teneurs résiduelles moyennes dans le sol et les eaux souterraines dans la zone d'intervention	Bilan de masse : quantités de polluants initiales, quantités résiduelles et quantités détruites (Kg)	2 mois après l'apport	

Paramètres de l'eau souterraine	Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine	Teneurs en polluants faisant l'objet de l'intervention, produits de la réaction partielle d'oxydation, oxydants résiduels, catalyseurs, et autres stimulateurs stabilisateurs, pH, Eh, O <sub>2</sub> dissous, conductivité électrique, T°, TOC, Métaux dont la mobilité est influencée par les conditions Redox, produits de réaction : Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ,	Au lancement des opérations et 2 mois après l'apport	Paramètres et fréquences selon l'oxydant utilisé. Si l'eau souterraine est rencontrée à faible profondeur sous la zone de mélange
<b>Sparging avec ozone + extraction des gaz</b>				
Mesure des débits de gaz injectés et des pressions d'injection au niveau des puits d'injection	Debitmètres et manomètres au niveau des puits	Débits et volumes cumulés d'ozone injectés	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	
Mesure des pressions dans les points de contrôle disposés près des puits d'injection	Manomètres au niveau des points de contrôle	Pression dans la couche saturée et contrôle du rayon d'influence	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	Suivi de l'efficacité du Sparging
Mesure de l'O <sub>2</sub> dans les points de contrôle disposés près des points d'injection	Prélèvement et analyse de l'O <sub>2</sub>	Teneur en O <sub>2</sub> et contrôle de la circulation de l'air dans la couche saturée	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	Suivi de l'efficacité du Sparging
Suivi piézométrique	Mesures du niveau de l'eau souterraine dans les piézomètres de contrôle	Sonde piézométrique (m)	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	Etablissement d'une carte des iso-pièzes - Sens d'écoulement
Paramètres de l'eau souterraine	Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine	Teneurs en polluants faisant l'objet de l'intervention, produits de la réaction partielle d'oxydation, oxydants résiduels, catalyseurs, et autres stimulateurs stabilisateurs, pH, Eh, O <sub>2</sub> dissous, conductivité électrique, T°, TOC, Métaux dont la mobilité est influencée par les conditions Redox, produits de réaction : Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ,	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	Paramètres et fréquences selon l'oxydant utilisé
Température du sol dans les points d'observation	Sondes de température dans les points de contrôle	T° °C	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire,	

			ensuite mensuel	
Teneurs résiduelles dans le sol	Forages et prélèvements de carottes de sol et analyse des polluants requérant une intervention	Teneurs des polluants requérant une intervention (kg/Kg ou kg/m <sup>3</sup> )	Au lancement des opérations et ensuite tous les 3 mois	
Estimation des quantités de polluants détruits par oxydation	Teneurs résiduelles moyennes dans le sol et les eaux souterraines dans la zone d'intervention	Bilan de masse : quantités de polluants initiales, quantités résiduelles et quantités détruites (Kg), quantités extraites dans les gaz pompés	Tous les 3 mois	Estimation du temps de traitement
Débits extraits par puits d'extraction	Débitmètre au niveau des puits	Débit (m <sup>3</sup> /s) et volume cumulés	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel	
Dépression et température au niveau des puits d'extraction	Manomètre et sonde de température au niveau des puits	Dépression (Pa) et Température ( °C)	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire , ensuite mensuel	Pour le calcul des volumes extrait en unités normalisées (T° et Pressions standard)
Teneurs en polluants dans les gaz extraits par chacun des puits	Prélèvement au niveau des puits d'extraction et analyse des échantillons. Cartouche à charbon actif, cartouche Dräger, PID, FID	Teneurs des polluants requérant une intervention	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	
Estimation des quantités de polluants prélevées par puits et totales	Somme des quantités prélevées pour les différentes périodes de contrôle	Bilan de masse : quantités de polluants extraites et quantités résiduelles (Kg)	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	
Teneurs dans les rejets gazeux	Prélèvement des gaz à l'entrée et la sortie de l'installation de traitement et analyse des teneurs en polluants : cartouche à charbon actif, Dräger, PID, FID	Teneurs des polluants requérant une intervention (kg/m <sup>3</sup> )	Premier mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel puis trimestriel	

Quantités de charbon actif consommées	Quantités de charbon actif utilisées dans le filtre	Kg	Selon les livraisons + bons de prise en charge	
Quantité et teneurs en polluants des condensats	Quantités de liquide récupéré dans le séparateur et teneurs en composés polluants	m <sup>3</sup> et kg/m <sup>3</sup>	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	Identifier la filière de traitement sur ou en dehors du site
<b>SVE + Variante chauffage du sol Paramètres complémentaires</b>				
Débits et pression d'injection de la vapeur dans les points d'injection	Débitmètre et manomètre au niveau des points d'injection	Débits injectés (m <sup>3</sup> /s) et Pression d'injection (Pa)	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	
Mesure des températures au niveau des puits d'injection de vapeur	Sondes de température dans les puits d'injection	T °en °C	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	
Mesure de la température du sol dans les points d'observation	Sondes de température dans les points de contrôle	T °en °C	Deux premiers mois (Phase de lancement) : hebdomadaire, ensuite mensuel	

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

Ce tableau appelle les commentaires suivants :

- L'analyse des teneurs en polluants dans les gaz sera réalisée au laboratoire après prise d'échantillons sur des cartouches à charbon actif ou dans des ballons. L'expert pourra cependant proposer de réaliser des mesures directes de teneurs à l'aide d'appareil FID, PID ou de cartouches Dräger, s'il démontre qu'il existe une bonne correspondance entre les mesures directes et les analyses de laboratoire. Pour les polluants présents sous forme de mélanges tels que les hydrocarbures, compte tenu de l'évolution de la composition des mélanges lors de l'avancement du traitement, la correspondance entre mesures directes et analyses de laboratoire devra faire l'objet de réajustements périodiques selon une fréquence proposée par l'expert. Les mesures de teneurs en O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> dans les gaz pourront faire l'objet de mesures directes.
- Les échantillons de contrôle prélevés dans le sol et l'eau souterraine peuvent encore contenir des réactifs oxydant susceptibles de continuer l'oxydation des composés à analyser durant la période de stockage et transport vers le laboratoire. De manière à les neutraliser, il convient d'ajouter un réducteur à l'échantillon dès son prélèvement (du thiosulfate de sodium par exemple).
- Il n'est pas rare d'observer une légère augmentation des teneurs en polluants au départ du processus d'oxydation in-situ. L'oxydation de la matière organique, parfois plus rapide que celle des polluants, explique cette observation en résultats de la désorption de polluants adsorbés.

- La périodicité des campagnes de prélèvement et d'analyse des échantillons de sol et d'eau souterraine, pourra être modifiée sur proposition de l'expert, sur base de la durée de la réactivité de l'oxydant dans le sol.

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

Les paramètres de supervision du traitement ayant trait aux nuisances font l'objet du **tableau 16**.

**Tableau 16 : Fréquences et paramètres de supervision du traitement ayant trait aux nuisances**

Paramètres de suivi	Moyen	Paramètre	fréquence minimale	Commentaires
Teneurs en O <sub>3</sub> et polluants dans l'air ambiant	Prélèvement de l'air à proximité de la station de traitement ou des zones sensibles et analyse des échantillons, cartouche à charbon actif, cartouche Dräger, PID, FID	Teneurs des polluants requérant une intervention (kg/m <sup>3</sup> )	Lors du lancement, ensuite après 2 semaines et ensuite tous les 3 mois	
Mesure de bruit	Mise en place d'un réseau de mesures	Niveau de bruit	En cas de plainte des riverains	
Mesure des odeurs	Mise en place d'un réseau de mesures	Niveau des odeurs	En cas de plainte des riverains	

## 12. Rapportage, optimisation et mesures correctives

### 12.1 Rapportage

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

- Rapport intermédiaire clôturant la phase de démarrage. On estime à deux mois un délai normal d'exécution d'une phase de démarrage. Sur proposition justifiée de l'expert, ce délai peut être modifié.
- Autres rapports intermédiaires si les travaux s'étendent sur plusieurs années (peu courant pour l'oxydation in-situ). 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 base des données collectées lors des différentes campagnes de supervision, des modifications significatives dans le dispositif d'intervention sont nécessaires et soumises à l'approbation de Bruxelles Environnement : implantation de nouveaux puits d'extraction ou d'infiltration, abandon de puits, extension du réseau de piézomètres d'observation en résultat de l'extension du panache, mise en œuvre d'autres techniques de traitement ...

Le contenu du premier rapport intermédiaire comprendra au minimum les informations reprises dans le **tableau 17**.

Tableau 17 : Informations à présenter dans le premier rapport intermédiaire

Rubrique	Paramètres et quantité à mesurer	Commentaires
<b>Description du dispositif mis en œuvre (as built) pour la première phase, toutes techniques d'apport de l'oxydant confondues et tous types d'oxydant confondus</b>	Type d'oxydant, catalyseur et/ou stabilisateur utilisés (teneurs et caractéristiques des réactifs). Description des éléments du dispositif : puits d'infiltration et/ou d'extraction (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête), points d'injection directe (nombre, localisation, profondeurs), piézomètres d'observation (nombre, localisation, description, profondeur, massifs filtrants, bouchons de l'espace annulaire, tête, sonde de t°), dispositif de mesure des débits d'infiltration et/ou d'extraction (réactifs, eau souterraine, gaz du sol), dispositif de mesure de la dépression (si ozone), conduites d'amenée des fluides extraits, station de traitement de l'eau ou du gaz pompé, points d'échantillonnage de l'eau et des gaz pompés (localisation), points d'échantillonnage du sol (localisation, profondeur).	La localisation des différents éléments du dispositif fait l'objet de figures à joindre en annexe rapport intermédiaire

<b>Description des installations complémentaires si mise en oeuvre de variante</b>	Description des éléments complémentaires : Puits d'injection de la vapeur (nombre, localisation, diamètre, profondeur, longueur crépinée, massifs filtrants, bouchons bentonitiques, tête), dispositif de mesure des débits injectés), dispositif de mesure des températures dans le sol (localisation des sondes). Si variante = addition de tensio-actifs : type et quantités apportées et localisation des points d'apport.	
<b>Paramètres à rapporter si apport par infiltration active ou passive</b>	Débits infiltrés et pressions appliquées dans les différents puits, vérification de l'extension de la zone d'influence de l'infiltration. Niveaux piézométriques et carte des iso-pièzes (sens d'écoulement). Teneurs mesurées dans l'eau souterraine au niveau des piézomètres de contrôle : polluants, produits de la réaction (intermédiaires ou finaux), oxydants résiduels, catalyseurs, pH, Eh, O <sub>2</sub> dissous, conductivité électrique, métaux réagissant aux conditions redox, Teneurs résiduelles dans le sol et bilan de masse des polluants à traiter et charge polluante résiduelle (quantités initiales, quantités résiduelles et quantités détruites). Vérification de la DOS. Durée projetée du traitement sur base des données acquises. Faisabilité de l'intervention - Mesures correctives à apporter	
<b>Paramètres complémentaires à rapporter si infiltration + recirculation</b>	Débits d'eau souterraine pompée. Rayon d'influence et de capture des puits de pompage. Teneurs en polluants (polluant requérant l'intervention + produits de réaction intermédiaires+ métaux lourds) de l'eau souterraine extraite. Teneur en polluants de l'eau traitée avant rejet.	
<b>Paramètres à rapporter si apport par injection directe</b>	Pression d'injection et quantités de réactifs injectés dans les différents points. Rayon d'influence des points d'injection, Teneurs mesurées dans l'eau souterraine au niveau des piézomètres de contrôle : polluants, produits de la réaction (intermédiaires ou finaux), oxydants résiduels, catalyseurs, pH, Eh, O <sub>2</sub> dissous, conductivité électrique, métaux réagissant aux conditions redox, Teneurs résiduelles dans le sol et bilan de masse des polluants à traiter et charge polluante résiduelle (quantités initiales, quantités résiduelles et quantités détruites). Vérification de la DOS. Faisabilité de l'intervention (Nombre de campagnes d'injection). Mesures correctives à apporter	

<b>Paramètres à rapporter si injection d'ozone + extraction des gaz du sol</b>	<p>Débits et pression d'injection de l'ozone, teneur en ozone du gaz injecté, vérification de l'extension de la zone d'influence des puits. Niveaux piézométriques et carte des iso-pièzes (sens d'écoulement). Teneurs mesurées dans l'eau souterraine au niveau des piézomètres de contrôle : polluants, produits de la réaction (intermédiaires ou finaux), oxydants résiduels, catalyseurs, pH, Eh, O<sub>2</sub> dissous, conductivité électrique, métaux réagissant aux conditions redox. Dépression et débits dans les puits d'extraction. Vérification du rayon d'influence des puits d'extraction. Teneurs en polluants (polluants requérant l'intervention + autres polluants), O<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> dans les gaz extraits. Teneurs résiduelles dans le sol et bilan de masse des polluants à traiter et charge polluante résiduelle (quantités initiales, quantités résiduelles, quantités extraites et quantités détruites). Teneurs en polluants dans les gaz traités avant leur rejet. Vérification de la DOS. Durée projetée du traitement sur base des données acquises. Faisabilité de l'intervention - Mesures correctives à apporter</p>	
<b>Paramètres à rapporter si mélange au sol</b>	<p>Quantités de réactif incorporées au sol. Teneurs en polluants résiduelles dans le sol (polluants requérant l'intervention, produits de la réaction intermédiaires et finaux). Teneurs résiduelles en oxydant. pH, Eh du sol. En cas de présence d'eau souterraine à faible profondeur, teneurs dans l'eau souterraine en oxydants, catalyseurs, polluants, produits de la réaction, métaux réagissant aux conditions redox. pH, Eh et O<sub>2</sub> dissous de l'eau souterraine.</p>	
<b>Paramètres complémentaires à rapporter si variante injection de vapeur</b>	<p>Débits, t° et pression d'injection de vapeur. Quantités injectées. Températures mesurées du sol.</p>	
<b>Paramètres complémentaires à rapporter si variante injection de tensio-actifs</b>	<p>Quantités injectées de tensio-actifs, teneurs en tensio-actifs dans l'eau souterraine dans les piézomètres de contrôle.</p>	

## 12.2 Mesures correctives et optimisation

Les principales difficultés rencontrées lors de la mise en œuvre de l'oxydation chimique in-situ résultent de :

- Le manque d'efficacité du réactif oxydant en raison de la sous-estimation de la DOS. La mesure corrective passe par l'augmentation des quantités d'oxydant à appliquer, dans des limites techniquement et financièrement acceptables.
- Le manque d'efficacité du réactif oxydant compte tenu des conditions prévalant dans le sol. La modification de ces paramètres peut favoriser l'action de l'oxydant : pH, T°, teneurs en fer et manganèse solubles (addition d'un agent complexant) ...

- Le manque de mobilité du réactif en raison de la faible conductivité hydraulique du sol. La circulation du réactif peut être activée par l'augmentation de la pression d'infiltration, la mise en place d'un gradient hydraulique (recirculation), l'augmentation de la densité des points d'infiltration/injection.
- La chute de la conductivité hydraulique lors du traitement par oxydation, en raison de la perte de structure du sol (disparition de la matière organique) ou de la précipitation de  $MnO_2$ . Le maintien de la structure du sol peut être favorisé par la mise en place d'un bon ratio entre cations divalents et monovalents et d'une force ionique suffisante dans la solution du sol. L'effet du  $MnO_2$  peut être atténué par l'addition d'un agent stabilisateur (hexamétaphosphate).

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

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

Ces mesures consistent en une dernière campagne d'échantillonnage et d'analyse des couches de sols et de l'eau souterraine impactées. Cette campagne d'analyse portera sur tous les polluants dont la présence a requis une intervention, leurs produits de dégradation intermédiaires éventuels et les autres polluants susceptibles d'avoir été libérés suite à la digestion de la matière organique et le changement des conditions Redox du sol (Cr, As, ...).

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

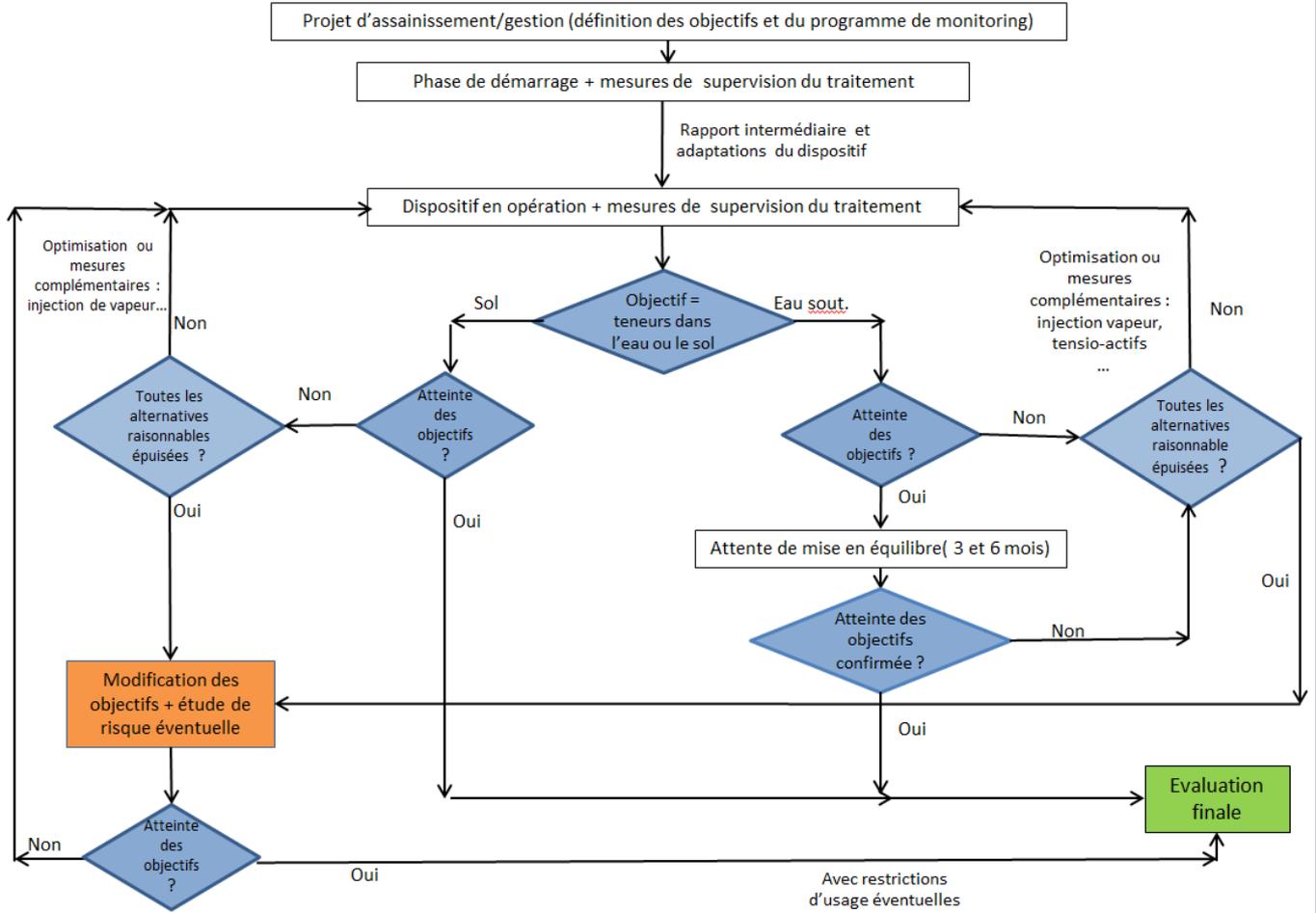
En cas de maintien des niveaux de teneurs en équilibre sous les valeurs objectifs, **le traitement** peut être considérée comme accomplis, le dispositif peut alors être démantelé et un rapport d'évaluation finale introduit.

En cas de non atteinte des objectifs de teneurs, le dispositif de traitement par oxydation chimique est maintenu en activité ou renouvelé (nouvelle campagne d'injection directe, par exemple) après mise en place de mesures correctives éventuelles (adjonction de puits d'infiltration/injection complémentaires, aménagement des conditions de pH, de t°, addition de catalyseur, d'agent surfactants...) ; et/ou après mise en place de mesures complémentaires (excavation du noyau...).

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

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

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



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

Sur suggestion de l'expert et/ou à la demande de Bruxelles Environnement, des mesures de 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. Ces mesures se justifient s'il existe une incertitude quant à la pérennité des résultats obtenus : variation importante des teneurs mesurées dans les piézomètres de contrôle, niveaux de teneur stabilisés à une valeur proche des objectifs **de travaux**, circonstances particulières défavorables...

Lorsque les objectifs **de traitement** portent sur la qualité des eaux souterraines, le dispositif de suivi peut porter sur certains des piézomètres d'observation établis au sein de la zone polluée et en aval de celle-ci.

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

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

Les paramètres relevés seront :

- Les teneurs résiduelles en polluants dans l'eau souterraine (polluants dont la présence a justifié l'intervention + produits de dégradation intermédiaires à pouvoir délétère sur la santé humaine et l'environnement, métaux sensibles aux conditions redox du sol).
- 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, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, méthane, nitrate, sulfate, nutriments, Fe, Mn, ... selon les processus responsables de l'atténuation naturelle escomptée.

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

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

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

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

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

## 15. Santé, sécurité et organisation

### 15.1 Check-list succincte pour les entrepreneurs

La checklist à destination des entrepreneurs fait l'objet du **tableau 18**. Cette liste vise à aider les entrepreneurs dans la rédaction de leurs offres en réponse aux cahiers de charge rédigés par les experts. Compte tenu de la grande diversité des situations rencontrées, cette liste ne saurait être exhaustive.

**Tableau 18 : Check-list à destination des entrepreneurs**

Rubrique	Vérification
<b>Informations préalables complètes et suffisantes (cahier de charges, descriptif des travaux ...)</b>	
Impétrants	Demande auprès des exploitants des réseaux effectuées et réponse adéquates obtenues
Caractéristiques des infrastructures sur le site et son voisinage immédiat	Inventaires et cartographie des bâtiments et infrastructures aériennes. Inventaire et cartographie des infrastructures enterrées et impétrants.
Etude de stabilité des infrastructures enfouies	Etudes de stabilité adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser
Etude de stabilité des ouvrages aériens	Etudes de stabilité adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser (en cas de rabattement important de la nappe)
Cibles sensibles	Cibles sensibles présentes sur et aux alentours du chantier bien identifiées
Aspects techniques du cahier des charges ou du descriptif des travaux	Descriptif du dispositif de pompage (puits, localisation, dimension, ...) et éventuellement d'injection : établissement des quantités : débits, pressions, dépressions, types de pompes....
Identification des autorisations nécessaires et des cadres normatifs à respecter	Vérifier que les autorisations nécessaires ont été demandées par le donneur d'ordre. Vérifier la cohérence des performances demandées avec les cadres normatifs en vigueur.
Identification des procédures particulières à respecter	Identifier les procédures particulières et vérifier que leur respect est bien pris en compte dans le cahier des charges ou le descriptif des travaux : transport des déchets dangereux (condensats), rejets gazeux, .....
Points de rejets	Points de rejet des gaz traités issus du traitement identifiés et compatibles avec les caractéristiques du site. Autorisations demandées et obtenues
Les lignes de communication sont définies	Identités et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'agent de Bruxelles Environnement, des autorités compétentes sont connues
Formation et qualification du personnel	Formation et/ou qualification à la manipulation des produits chimiques pour les travailleurs présents sur le chantier.
<b>Informations devant être présentes dans le plan de sécurité - Hygiène et prévention de l'entrepreneur</b>	

Identification et nature des risques	FDS (fiche de données de sécurité) et phrase de risque et de sécurité des substances utilisées. Risque lors du stockage, de la manipulation et de la mise en œuvre des différentes substances : risque pour le personnel (inhalation, contact dermique), risque d'incendie, risque de dispersion.
	Risque d'explosion dans les canalisations de collecte des gaz compte tenu de l'inflammabilité des composés extraits
	Risque d'incendie dans le sol en raison de l'augmentation de la t° et de la présence d'O <sub>2</sub>
	Risque de pulvérisation et de diffusion de poussières
	Risque pour les infrastructures enterrées si contact avec les oxydants et les acidifiants, notamment en cas de chauffage du sol par injection de vapeur ou en cas de fuite.
	Risques d'explosion en cas de création de poches de produits volatiles inflammables dans le sol
	Risque électrique : respect du RGIE, conformité des installations et rapport de contrôle
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de produits dangereux et/ou polluants
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de sol pollué sur site (lors de l'exécution des puits ou des fossés).
	Risques pour la santé du personnel du fait de la présence de produits volatils et dangereux/toxique sur le site. Risque de dégagements gazeux toxiques (ozone) dans l'atmosphère lors de l'injection, risque de présence de composés volatils dangereux dans l'atmosphère lors du pompage et traitement des gaz du sol
	Risques d'accidents en général : chutes, incendie, électrocution
	Risques liés à l'intrusion sur le site de personnes non autorisées : vols, vandalisme et risque pour la santé
	Risque en cas de travail en milieu confiné (caves, fosses,...) liés à la mauvaise qualité de l'air du milieu
	Risques climatiques : gel des conduites si beaucoup de condensats et si fonctionnement discontinu....
	Risques liés à la circulation si infrastructures présentes sur la voie publique
Mesures préventives	Pour chacun des risques identifiés, identification et mise en place des mesures préventives (matériel électrique anti-déflagrant), y inclus la formation du personnel
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacun des risques identifiés, préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Personnes et services à contacter en cas de problème	Pour chacun de risques identifiés, identités et coordonnées des personnes et/ou service à contacter : service incendie, commune, protection civile, exploitant des réseaux .....
Identification des nuisances possibles	Odeur et vapeurs dangereuses pour le voisinage en cas de fuites et pertes à partir des installations
	Nuisances sonores des équipements : pompes, groupes électrogènes, ...
	Encombrement des voiries
	Salissement des voiries
Mesures préventives	Pour chacune des nuisances identifiées, identification et description des mesures préventives. Par exemple, mise en place d'explosimètres, de systèmes d'alarme et de mise à l'arrêt et de

	sauvegarde (entré d'air dans les canalisations)
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacune des nuisances identifiées, préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
<b>Planning des interventions</b>	
Plan de monitoring et d'entretien	Planning des visites de contrôle : fréquence mensuelle minimum
	Planning des visites d'entretien
Identification des pannes et des problèmes techniques susceptibles de se produire	Défectuosité des équipements et de l'installation : défaut d'étanchéité
	Risque de colmatage des puits d'extraction et d'injection : chute des débits, des pressions et dépressions
	Epuisement prématuré des matériaux utilisés pour le traitement des gaz (charbon actif)
Mise en place de systèmes d'alarme, de mise en sauvegarde, et de mise à l'arrêt	
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacun des problèmes susceptibles de se produire : préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Rapports de surveillance de l'expert	Prise en compte des rapports de suivi de l'expert et mise en place concertée des mesures correctives ou d'optimisation.
<b>Points d'attention spécifiques aux techniques mises en œuvre</b>	
Vérification du dimensionnement compte tenu du matériel spécifique et de l'expérience de l'Entrepreneur	Confirmation de la zone d'influence (y compris volumes injectés) des filtres ou forages, Analyse de l'information des tests pilotes ou similaires effectués par l'Expert.
Stabilité	Conformité du terrain à la lithologie présumée (découverte de lentilles de tourbe par exemple)
Contrôle de la qualité du matériel d'injection employé	Pour la mise en place de filtres : PEHD / PVC : certification adéquate, être résistant à la contamination présente et aux oxydants injectés Le sable de filtration, l'argile, le grout utilisé portent le certificat adéquat. Les composantes correspondent aux spécifications exigées. Tous les matériaux en contact avec la contamination décrite doivent être résistants à cette contamination. L'étanchéité des canalisations doit être testée.
Impétrants	Compléter éventuellement le repérage des réseaux par une prospection géophysique, Excavation manuelle préalable à proximité des canalisations ou des endroits à risques potentiels.
Inondations (reflux) et contamination croisée lors de l'injection directe	Lors de l'injection, il se peut que du produit pur / eaux et boues contaminées jaillissent du puits. Il se peut aussi qu'une quantité de produit pur contamine la nappe phréatique ou soit dispersée. La propagation de l'eau souterraine contaminée peut être accélérée sous l'influence du débit injecté. En conséquence, injecter à un débit suffisamment faible afin d'éviter les contaminations croisées et/ou le reflux de produit.
Pompes, conduites et réservoirs	On prévient à tout moment les fuites de produits réactifs dans les pompes, conduites et réservoirs. Les fuites doivent être collectées.

	<p>Les raccords et vannes ne peuvent pas fuir.</p> <p>L'inspection avant la mise en service comprend un test des tuyauteries pour vérifier les fuites et la perte de pression éventuelle sur les pompes.</p> <p>On sonde le filtre après la pose et lors de la première inspection.</p> <p>Les pompes à vide sont pourvues d'un filtre à air.</p> <p>Les pompes sont sécurisées ou résistantes à une surcharge et au fonctionnement à sec.</p> <p>En cas de coupure imprévue de la pompe, une alarme s'enclenche.</p> <p>Un compteur doit permettre d'établir le moment de la coupure.</p> <p>Le système de pompage doit être équipé par pompe d'un débitmètre cumulatif calibré.</p> <p>La pompe sera équipée d'un compteur d'heures de fonctionnement.</p> <p>Contrôle / enregistrement automatique et continu des paramètres de process pertinents (tels que pressions, débits, heures de fonctionnement, ...) afin de détecter rapidement des ruptures / des dysfonctionnements.</p> <p>Les flexibles sont résistants aux influences atmosphériques et à la plupart des substances polluantes.</p> <p>Les flexibles sont adaptés pour le transport d'air, d'eau et de produit.</p>
Emissions de produits volatils et/ou explosifs	<p>Installation des instruments de mesure adéquats sur place, Mesure en continu pendant les travaux de forage.</p> <p>Tant que le trou est ouvert, les instruments de mesure restent en place et on effectue un échantillonnage toutes les 6 heures.</p> <p>Les mesures sont effectuées à l'aide d'un explosimètre ou si possible un appareil de mesure des composantes Individuelles.</p> <p>Port d'une combinaison chimique, avec bottes de sécurité, masque facial, lunettes et gants.</p> <p>Si les valeurs mesurées sur place dépassent les normes acceptables (RGPT), le port du masque est obligatoire.</p>
Contamination chimique par produits non volatils (substances actives : persulfates, ozone...)	Port des équipements de protection individuelle adéquats
Prévention du colmatage des filtres et des conduites	<p>Contrôle régulier des composantes présentant un risque de colmatage (fréquence à adapter en fonction de la nécessité).</p> <p>En cas de colmatage, les solutions / mesures suivantes sont possibles:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- réparation</li> <li>- traitement à l'acide</li> <li>- remplacement</li> </ul> <p>Demander à l'Expert l'évaluation des mesures de Fe, Mn, bilan de carbonate, Ca, ....</p> <p>Demander à l'Expert l'évaluation d'autres facteurs potentiels d'obstruction (matière organique, impuretés)</p>

Les remarques suivantes peuvent être faites :

- Pour les entrepreneurs certifiés VCA ou de manière équivalente, les mesures énumérées dans le **tableau 18** et ayant trait à la sécurité sont systématiquement d'application.
- La check-list du **tableau 18** est valable pour les entrepreneurs et leurs sous-traitants dans leurs domaines d'intervention respectifs.
- En règle générale, les visites d'inspection à mener sur le chantier sont à exécuter au minimum sur une base bimensuelle.
- Pour les conduites de collecte et d'amenée des gaz et des liquides pompés, on privilégiera de manière systématique, les conduites enterrées de manière à éviter les accidents, l'incidence du gel (condensats) et les actes de vandalisme.

- Lorsque les installations du chantier (puits et station de traitement) sont proches de bâtiments, des analyses de l'air pourraient être prévues au sein de ces bâtiments de manière à mesurer l'importance des teneurs en composés volatils.
- Lorsqu'un risque d'explosion est avéré au niveau des puits de pompage, des conduites ou de la station de traitement, le risque d'explosion (LEL) sera mesuré en continu et le système sera mis en sauvegarde dès mesure de dépassements de 10 % de la LEL ;
- En cas de stockage temporaire de terres polluées sur site des mesures seront prises pour éviter la contamination du sol et des eaux souterraines sous-jacentes.

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

La check-list à destination des experts est présentée dans le **tableau 19**. 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 19 : Check-list à l'intention des experts**

Rubrique	Vérification
<b>Informations préalables complètes et suffisantes (études préalables, cahier de charge, descriptif des travaux, ..)</b>	
Caractéristiques du sol (couches insaturées et saturées) à traiter	Composition du sol : succession et caractéristiques des couches, présence de couches de perméabilités différentes, capacité d'adsorption, homogénéité. Densité des observations suffisante ?
	Caractéristiques de perméabilité à l'air et à l'eau sol, tests de pompage, mesures piézométriques et sens d'écoulement de l'eau souterraine, variations saisonnières de la piézométrie, puissance de l'aquifère, isolation des différents aquifères éventuels. Densité et détail des données suffisants ?
Polluants présents et/ou à traiter	Nature des polluants présents et/ou à traiter, répartition des teneurs, source encore active ?, évaluation de la charge polluante dans les différentes phases du sol, potentiel de migration, présence d'une phase libre surnageante ou plongeante, évolution naturelle attendue des teneurs (évolution mesurée, potentiel d'atténuation naturelle)
Caractéristiques des infrastructures sur le site et son voisinage immédiat	Inventaires et cartographie des bâtiments et infrastructures aériennes. Inventaire et cartographie des infrastructures enterrées et impétrants.
Cibles sensibles	Cibles sensibles présentes sur et aux alentours du chantier bien identifiées
Aspects techniques de l'intervention et descriptif technique des travaux	Descriptif du dispositif d'infiltration ou d'injection ou de mélange au sol. Descriptif du dispositif de pompage de l'eau ou des gaz (puits, localisation, dimension, ...). Estimation des quantités : débits, pressions, dépressions, types de pompes....
	Mode de fonctionnement du dispositif : continu vs intermittent. Risques de colmatage. Actions correctives et d'optimisation possibles.
	Vérification a priori de la performance du dispositif : capacité du réactif de dégrader les polluants, paramètres du sol favorables à la réaction, temps de réaction, quantités de réactif suffisantes pour rencontrer la DOS et détruire la charge polluante. Sens et mode de la circulation de l'eau souterraine et des gaz du sol, extension de la zone d'influence des puits d'infiltration et des points d'injection, extension de la zone de capture des puits d'extraction de l'eau souterraine et des gaz, ...

	Objectifs du traitement bien identifiés pour le sol et les eaux souterraines
	Estimation de la durée du traitement et nécessité de faire appel à des procédés complémentaires : chauffage du sol par injection de vapeur, injection d'agents tensio-actifs
	Vérifier que le descriptif de la station de traitement est suffisamment détaillé. Les quantités physiques des installations (volumes, taille, performances, ...) sont-elles cohérentes avec les paramètres du chantier (débits, teneurs prévues, condensats ...) ?
Points de rejets	Points de rejet de l'eau et des gaz traités identifiés et compatibles avec les caractéristiques du site. Autorisations demandées et obtenues
Identification des autorisations nécessaires et des cadres normatifs à respecter	Vérifier que les autorisations nécessaires ont été demandées par le donneur d'ordre. Vérifier la cohérence des performances demandées avec les cadres normatifs en vigueur. Les procédures prévues sont-elles en conformité avec les codes de bonne pratique et les autres recommandations de Bruxelles Environnement ?
Identification des procédures particulières à respecter	Identifier les procédures particulières et vérifier que leur respect est bien pris en compte dans le cahier des charges ou le descriptif des travaux : stockage, manipulation et transport de substances dangereuses/toxiques, rejets gazeux, .....
Les lignes de communication sont définies	Identité et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'agent de Bruxelles Environnement, des autorités compétentes sont connues
Identification et nature des risques	Risque d'explosion dans les canalisations de collecte des gaz compte tenu de l'inflammabilité des composés extraits
	Risque pour les infrastructures enterrées par suite de l'augmentation de t° résultant de la réaction et le chauffage du sol éventuel.
	Risque d'incendie dans le sol du fait du dégagement de chaleur et de la libération d'O <sub>2</sub>
	Risques d'explosion en cas de création de poches de produits volatiles inflammables dans le sol
	Risque pour la santé du personnel, des riverains et des visiteurs du fait de la présence sur le chantier et de la manipulation de substances dangereuses et toxiques, des remontées possibles de réactifs vers la surface lors de l'injection, de libération vers l'atmosphère de gaz et vapeurs dangereux/toxiques (ozone, polluants volatiles).
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de produits dangereux/toxiques et/ou de polluants. Risque d'écoulement sur le sol de réactif lors de l'infiltration
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de sol pollué sur site (lors de l'exécution des puits).
	Risques climatiques : gel des conduites si beaucoup de condensats ....
	Risques liés à la circulation si infrastructures présentes sur la voie publique
Mesures préventives	Pour chacun des risques identifiés, identification et mise en place des mesures préventives y inclus la formation du personnel
Personnes et services à contacter en cas de problème	Pour chacun de risques identifiés, identité et coordonnées des personnes et/ou service à contacter : service incendie, commune, protection civile, exploitant des réseaux .....
Identification des nuisances possibles	Odeur et vapeurs dangereuses pour le voisinage en cas de fuites et pertes à partir des installations
	Bruit des équipements : pompes, groupes électrogènes, ....
	Encombrement des voiries
	Salissement des voiries

Mesures préventives	Pour chacune des nuisances identifiées, identification et description des mesures préventives
	Mise en place d'explosimètres, de systèmes d'alarme et de mise à l'arrêt et de sauvegarde (entrée d'air dans les canalisations)
<b>Planning et contenu des opérations de supervision du traitement, de validation et de suivi à long terme (post-gestion)</b>	
Dispositif de supervision du traitement	Descriptif, localisation et cartographie du dispositif de supervision : Débitmètres, manomètre et sondes de $T^{\circ}$ au niveau des puits d'extraction, des puits d'infiltration et d'injection, piézomètres de contrôle, points d'observation dans le sol et points d'échantillonnage des gaz du sol et des gaz extraits et traités, échantillonnage de l'air ambiant ... Prise en compte des cibles sensibles à protéger.
Paramètres de la supervision du traitement	Mesures des débits et des pressions d'infiltration et d'injection, dépressions et des débits d'extraction des gaz et de l'eau souterraine, mesure des dépressions dans le sol, mesures piézométriques, teneurs dans l'eau et les gaz pompés, bilan de masse de la charge polluante, teneurs résiduelles en polluant et en produits de dégradation (si délétères), des métaux lourds (réagissant au potentiel redox) dans le sol et la nappe et répartition, calcul de l'extension des zones d'influence des puits et points d'infiltration ou d'injection, extension des zones de capture de l'eau souterraine et des gaz, teneurs de l'eau souterraine et des gaz pompés à l'entrée et la sortie de la station de traitement, présence et puissance d'une phase libre, $T^{\circ}$ des fluides injectés, extraits et $T^{\circ}$ du sol, migration des polluants dans la nappe vers les cibles sensibles
Paramètres d'optimisation	Modification des conditions du sol (pH, $T^{\circ}$ ), pompage et injection en mode intermittent, recirculation de l'eau souterraine, chauffage du sol, injection d'agents tensio-actifs, placement de nouveaux puits d'extraction ou d'injection (zones de stagnation), adéquation de la profondeur des crépines, ...
Rapportage	Planning pour la soumission du premier rapport intermédiaire et des rapports intermédiaires suivants.
	Les données recueillies sont-elles suffisantes pour la rédaction de ces rapports ?
Etape de validation des résultats	Les données recueillies sont-elles suffisantes pour la réalisation de cette étape : teneurs résiduelles dans le sol et les eaux souterraines, rebond des teneurs, bilan de la charge polluante
Etude de risque si modification des objectifs	Les données recueillies sont-elles suffisantes pour la réalisation de cette étape ?
Suivi à long terme (post-gestion)	Dispositif de suivi : piézomètres d'échantillonnage
	Paramètres du suivi : teneurs en polluants et produits de dégradation, paramètres permettant de suivre l'atténuation naturelle si prise en compte de cette dernière

## 16. Sources bibliographiques

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

- Code van goede praktijk : in-situ chemische oxidatie – Draft , OVAM, 2014
- Code of Good Practice : In-situ Chemical Oxidation, CityChlor, April 2013, Interreg IVB
- Achilles, Veiligheid, gezondheid en milieuzorgsysteem voor on-site bodemsanering werken, OVAM 2001.
- Standaardprocedure Bodemsaneringwerken, Eindevaluatieonderzoek en Nazog-versie oktober 2011, OVAM