

Code de Bonne Pratique n° 10

Désorption thermique à moyennes températures

Bruxelles Environnement

Table des matières

1.	INTRODUCTION.....	3
2.	DESCRIPTION DES TECHNIQUES ET DES PRINCIPES TECHNOLOGIQUES MIS EN ŒUVRE.....	5
2.1	DESCRIPTION GENERALE	5
2.2	PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT	6
3	DESCRIPTION DE VARIANTES TECHNIQUES	8
3.1	RECHAUFFEURS ET EXTRACTEURS.....	8
3.2	ENERGIES	9
4	OBJECTIFS POURSUIVIS : PANACHE VERSUS NOYAU.....	11
5	POLLUANTS ET SITUATIONS LES PLUS FAVORABLES (NOTION QUALITATIVES)	12
6	EXAMEN A PRIORI DE LA FAISABILITE TECHNIQUE	13
6.1	ZONE INSATUREE OU SATUREE.....	13
6.2	NATURE DU SOL	13
6.3	CARACTERISTIQUE DES POLLUANTS	15
7	EXAMEN SPECIFIQUE DE LA FAISABILITE.....	20
7.1	EXAMEN DE LA ZONE, DES CONTRAINTES-POINTS D'ATTENTION	20
7.2	EXAMEN DU SOL ET DU POLLUANT	21
7.3	TEST EN LABORATOIRE	22
7.4	TEST PILOTE	22
8	DESCRIPTION D'UNE INSTALLATION TYPE	24
9	DESCRIPTIF DES TRAVAUX QUI SERONT MIS EN ŒUVRE.....	25
10	LIMITATION DES INCIDENCES DU PROJET SUR L'ENVIRONNEMENT : ODEURS, BRUITS, POUSSIÈRES	27
10.1	NUISANCES POUR LA QUALITE DE L'AIR	27
10.2	RISQUES D'INCENDIE ET D'EXPLOSION	27
10.3	NUISANCES ACOUSTIQUES	27
10.4	RISQUES POUR LES INSTALLATIONS DE CAPTAGE VOISINES	28
10.5	RISQUES SANTE-SECURITE DES TRAVAILLEURS	28
10.6	CONFORMITES AUX CADRES LEGAUX EXISTANTS	28
11	SUIVI DES TRAVAUX.....	30
11.1	SUIVI LORS DU TRAITEMENT	30
11.2	MESURE DES REJETS DANS L'ATMOSPHERE	31
11.3	CONTROLE DE L'ATTEINTE DES OBJECTIFS	33
11.3.1.	<i>mesures pendant le traitement (indirectes).....</i>	<i>33</i>
11.3.2.	<i>Mesure des teneurs dans le sol</i>	<i>34</i>
11.3.3.	<i>Mesure des couches LNAPL</i>	<i>35</i>
12	RAPPORTAGE.....	36
13	MESURES DE VALIDATION ET SCHEMA DECISIONNEL ARRET-POURSUITE	37
14	MONITORING A LONG TERME ÉVENTUEL	39
15	RECOMMANDATIONS EN MATIERE DE SANTE, SECURITE ET ORGANISATION	40
15.1	CHECK-LIST SUCCINCTE POUR LES ENTREPRENEURS.....	40
15.2.	CHECK-LIST SUCCINCTE POUR LES EXPERTS	43
16	SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	45

1. INTRODUCTION

Ce code de bonne pratique concerne la technique **de traitement** des sols par désorption thermique.

En vue de clarifier l'étendue du code, il y a lieu de préciser le vocable méthode thermique, qui rassemble de nombreuses techniques de traitements thermiques.

En effet, les méthodes thermiques qui consistent à appliquer de la chaleur pour extraire par volatilisation ou détruire les polluants organiques ou inorganiques volatils et semi-volatils des sols regroupent :

- la **désorption thermique**. Il y a lieu de différencier cette technique de désorption thermique par gamme de températures :
 - o la désorption thermique à basse température, $< 100^{\circ}\text{C}$: cette technique est une variante du venting ou SVE (Soil Vapeur Extraction) qui chauffe le sol par injection de vapeur, d'air chaud ou électrodes en vue de favoriser la volatilisation des composés organiques. Cette technique fait l'objet du code de bonne pratique n°2 ;
 - o la désorption thermique à moyenne température, de 100°C à environ 400°C : cette technique peut se réaliser *in situ*, *on site* ou *ex situ*. Cette technique chauffe le sol par conduction et non par convection (déplacement de matière telle que de l'air chaud ou vapeur dans le sol) ;
 - o la désorption thermique à haute température, $> 320^{\circ}\text{C}$ à environ 560°C . Ce type de traitement est généralement des procédés *on-site* ou *ex-situ* car les terres polluées sont excavées et préparées (tri, criblage séchage...) et ensuite traitées sur site à l'aide d'unités mobiles de traitement ou hors site, dans un centre de traitement. Ce type de traitement est généralement couplé à l'incinération ;
- l'**incinération**. Elle consiste en la combustion aérobie qui permet de détruire les polluants organiques en vapeur d'eau, gaz carbonique et résidus de combustion (cendres). Les sols sont prétraités (tamisage, séchage ...) et seules les particules de quelques centimètres sont acceptées dans le four. Généralement, l'incinération se décompose en deux phases :
 - o une première chambre dans laquelle les polluants sont désorbés et volatilisés (température $> 400^{\circ}\text{C}$) ;
 - o une seconde chambre de combustion dans laquelle les polluants organiques sont détruits (température $> 1\ 000^{\circ}\text{C}$) ;
- la **pyrolyse**. Elle consiste à introduire les terres excavées dans un four afin de les chauffer en présence de peu d'oxygène (car l'absence d'oxygène est impossible) à des températures comprises entre 150 et 540°C . La méthode de traitement est donc très proche de celle utilisée pour l'incinération, la différence réside dans le fait que les conditions d'opération sont réalisées à des températures plus basses et en présence de peu d'oxygène ;
- la **vitrification** *ex situ* est réalisée dans des fours qui permettent d'obtenir des températures extrêmement élevées ($1\ 600$ à $2\ 000^{\circ}\text{C}$) lors de l'introduction des sols pollués. L'élévation de la température peut être réalisée via la fusion électrique, la fusion par induction, la fusion par torche à plasma, la fusion par oxycombustion, les électrobrûleurs, le four à micro-ondes... Les composés organiques ainsi que certains composés métalliques volatils (mercure...) sont pyrolysés et vaporisés à ces très hautes températures. La vapeur d'eau et les produits pyrolysés sont récupérés et dirigés vers les unités de traitement des rejets atmosphériques. Les composés inorganiques mais aussi l'amiante et les radionucléides sont incorporés dans la matrice vitrifiée très stable, inerte et très peu lixiviable. La vitrification *in situ* utilise des électrodes en graphite qui sont introduites dans la source de pollution (zone vadose). Un courant électrique est alors imposé entre les électrodes ; le passage du courant dans les sols génère, par effet Joule, une augmentation importante de la température ($1\ 600$ à $2\ 000^{\circ}\text{C}$), ce qui entraîne la fusion des sols (puis une vitrification lors de son refroidissement). Les électrodes sont enfoncées au fur et à

mesure de la vitrification de la surface du sol vers le bas de la zone à traiter. Les composés organiques sont soit détruits, soit volatilisés avant d'être acheminés vers une unité de traitement spécifique. Pour ce faire, l'ensemble de la zone à traiter doit être placée sous une hotte mise en dépression.

Dans le cadre de ce code de bonne pratique, seule la désorption thermique *in situ* à moyenne température (100 à 400°C) sera développée.

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 DES TECHNIQUES ET DES PRINCIPES TECHNOLOGIQUES MIS EN ŒUVRE

2.1 DESCRIPTION GENERALE

La désorption thermique *in situ* consiste à augmenter la température du sol afin de favoriser la volatilisation des contaminants volatils et semi-volatils.

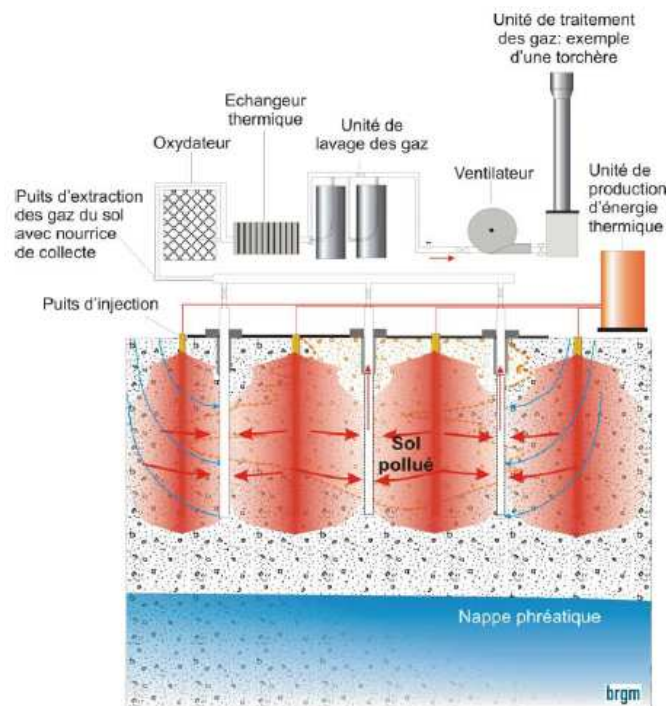
La conduction thermique (figure 1) est un transfert thermique d'une région de température élevée vers une région de température plus basse, et est décrite par la loi dite de Fourier. Le sol en place est chauffé par des réchauffeurs/cannes de chauffe qui provoquent une élévation de la température du sol par conduction ayant pour effet :

- de favoriser la désorption des contaminants adsorbés sur la matrice sol. La désorption est la transformation inverse de la sorption, par laquelle les molécules absorbées se détachent du substrat ;
- d'augmenter la tension de vapeur des composés afin de les volatiliser et les extraire en phase gazeuse. La chaleur modifie la pression de vapeur du polluant, permettant sa volatilisation.

Dans une seconde phase, les émissions gazeuses issues de l'unité de désorption subissent une étape de traitement. Ces gaz peuvent être traités par oxydation thermique (combustion), oxydation catalytique, piégeage sur charbon actif... Pour rappel, le code de bonne pratique AUX 2 est consacré au traitement des gaz extraits du sol.

Le système de désorption thermique *in situ* est constitué de manière globale comme suit :

- de points d'injection verticaux ou horizontaux de chaleur reliés à l'unité de production d'énergie (air chaud) ;
- de points d'extraction verticaux ou horizontaux des gaz et de la vapeur. Les points d'extraction sont le plus souvent reliés entre eux, via une nourrice de collecte permettant la mise en relation des points d'extraction et de la pompe à vide ;
- l'unité de traitement des gaz. Celle-ci dépendra du type de procédé mis en œuvre. Elle pourra dès lors comprendre : un séparateur des condensats, une unité de lavage des gaz, un échangeur thermique si il y a lieu de refroidir les gaz pour protéger le reste de l'installation de traitement, une torchère, unité d'oxydation catalytique ou thermique, un filtre à charbon actif, un biofiltre etc.



Brgm/RP-57708

Figure 1 : schéma de principe de la désorption thermique in situ (procédé à moyenne température – chauffage conductif).

2.2 PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

Le réchauffement du sol se fait par conduction à proximité des éléments de chauffe, appelés réchauffeurs ou cannes de chauffe. Les réchauffeurs tubulaires verticaux (ou horizontaux) sont placés dans le sol au cœur de la pollution selon un maillage en configuration triangulaire équilatérale (figure 2), ce qui permet d'avoir une équidistance entre les réchauffeurs. La distance entre les réchauffeurs est généralement comprise entre 1 et 2,5 m. En vue d'avoir un suivi de la température du sol, des thermocouples sont installés dans le sol à mi-distance entre deux réchauffeurs, ce qui correspond au point froid du dispositif.

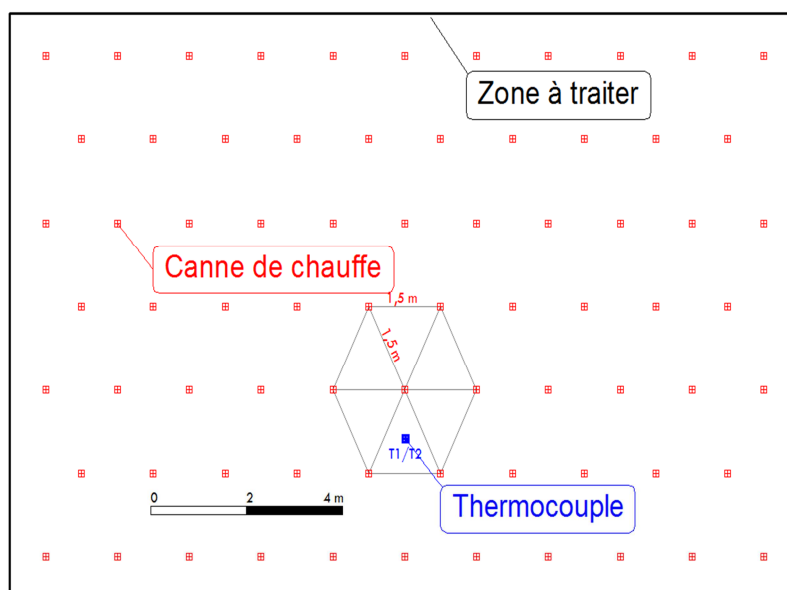


Figure 2 : Disposition optimale des cannes. Disposition triangulaire équilatérale

Les gaz extraits du sol sont dirigés jusqu'à la chambre de combustion (800-900°C) où, en présence d'un excès d'oxygène, ils sont détruits par oxydation thermique en CO₂ et H₂O.

Au-dessus de 100°C, les réactions qui se produisent à proximité des réchauffeurs et dans la chambre de combustion sont les suivantes :

Pyrolyse : $C_xH_y \rightarrow xC \text{ (coke)} + y/2 H_2$

Hydrolyse : $C_xH_y + 2xH_2O \rightarrow xCO_2 + (2x+y/2) H_2$

Oxydation : $C_xH_y + (x+y/4) O_2 \rightarrow xCO_2 + y/2 H_2O$

En fonction du type de polluant traité (solvants chlorés, pesticides etc.), un traitement secondaire sur charbon actif, oxydation catalytique ou lavage acide doit parfois être mis en œuvre si des éléments chimiques tels que S, Cl, Br, Hg ou NO_x se retrouvent dans les gaz d'échappement/de purge.

Le lecteur est donc réorienté vers le code de bonne pratique AUX 2 pour le traitement des gaz.

3 DESCRIPTION DE VARIANTES TECHNIQUES

3.1 RECHAUFFEURS ET EXTRACTEURS

Au niveau des réchauffeurs et extracteurs, plusieurs modèles existent. Les réchauffeurs et extracteurs peuvent être dissociés (figure 3) ou combinés dans un même tube (

Lorsque les réchauffeurs et extracteurs sont dissociés (figures 3), une pompe à vide crée une dépression en vue d'aspirer les contaminants volatilisés et amener ceux-ci en surface pour traitement.

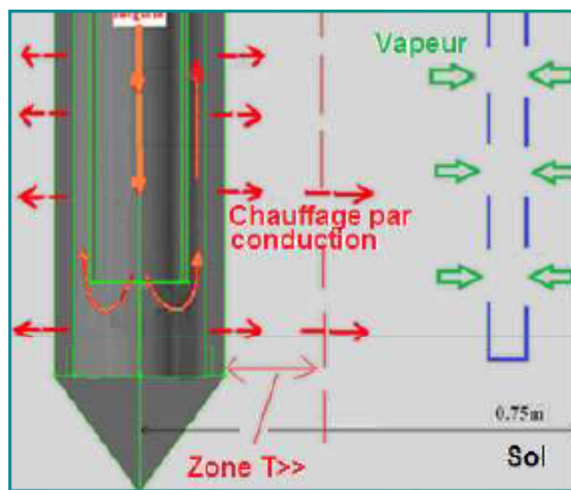


Figure 3 : Illustration du traitement thermique - système dissocié (technologie NSR, TPSTECH)

Lorsque les réchauffeurs et extracteurs sont associés, les éléments chauffants sont constitués de deux tubes en aciers coaxiaux, à l'intérieur desquels circule l'air chaud (figure 4). Le tube intérieur (amenée des gaz chauds) est plein, tandis que le tube extérieur (remontée des gaz) est perforé. Ces gaz chauds restent toujours dans les tubes, sans jamais pénétrer dans le sol. Les gaz circulent à l'intérieur des tubes et transmettent la chaleur aux tubes eux-mêmes et puis par conduction au sol. La chaleur propagée par conduction volatilise les contaminants organiques dans le sol. Ces contaminants volatilisés se dirigent vers les éléments chauffants grâce à la dépression due à l'effet venturi créé par la circulation de l'air chaud. Là, il rencontre la zone surchauffée ($>500^{\circ}\text{C}$), où la majeure partie de la masse du contaminant est détruite in-situ. La partie non détruite est emportée par le gaz vecteur (air chaud) jusqu'à la chambre de combustion ($800-900^{\circ}\text{C}$) où, en présence d'un excès d'oxygène, elle est détruite par oxydation thermique en CO_2 et H_2O .

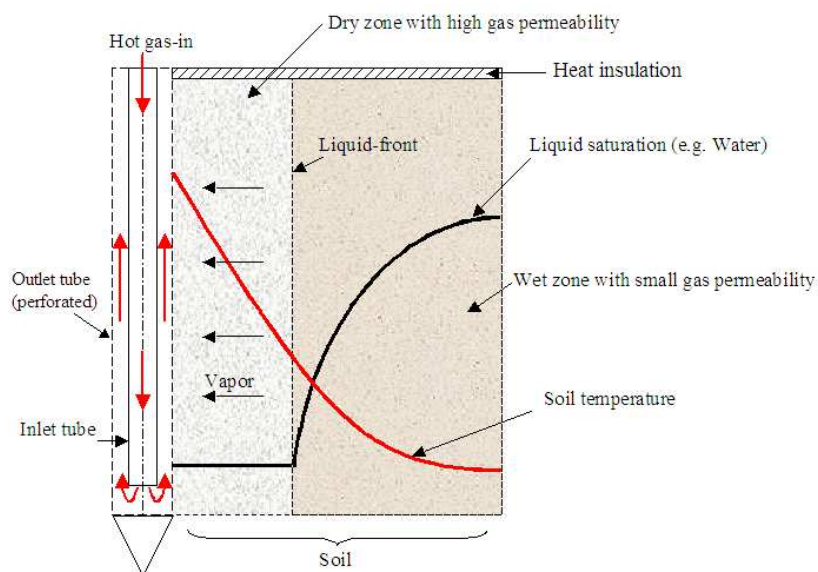


Figure 4 : Illustration du traitement thermique - système associé (Deep-Green)

3.2 ENERGIES

En vue de réchauffer le sol, plusieurs sources d'énergies sont possibles :

- au mazout ;
- au gaz ;
- à l'électricité

De plus, en fonction, par exemple, de l'encombrement du site, il est possible de mettre en œuvre soit une chaudière (figure 5) soit directement des brûleurs sur les réchauffeurs (figure 6).

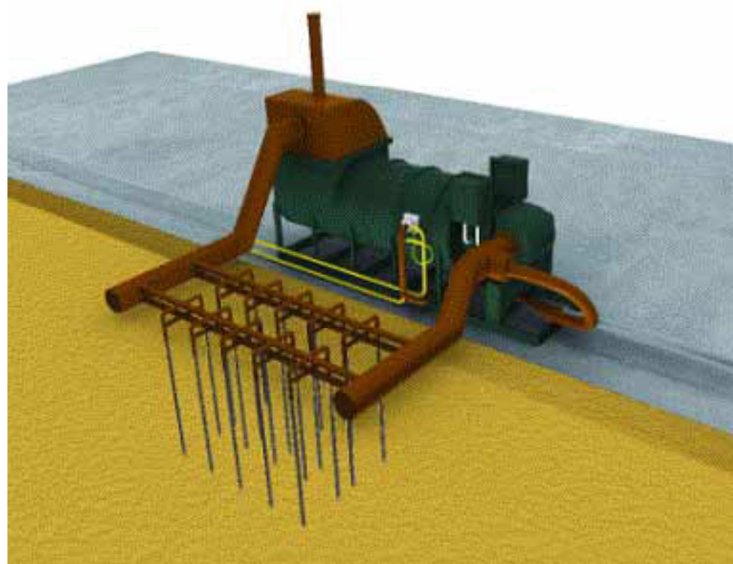


Figure 5 : système Chaudière. Thermopile in situ (Deep-Green).

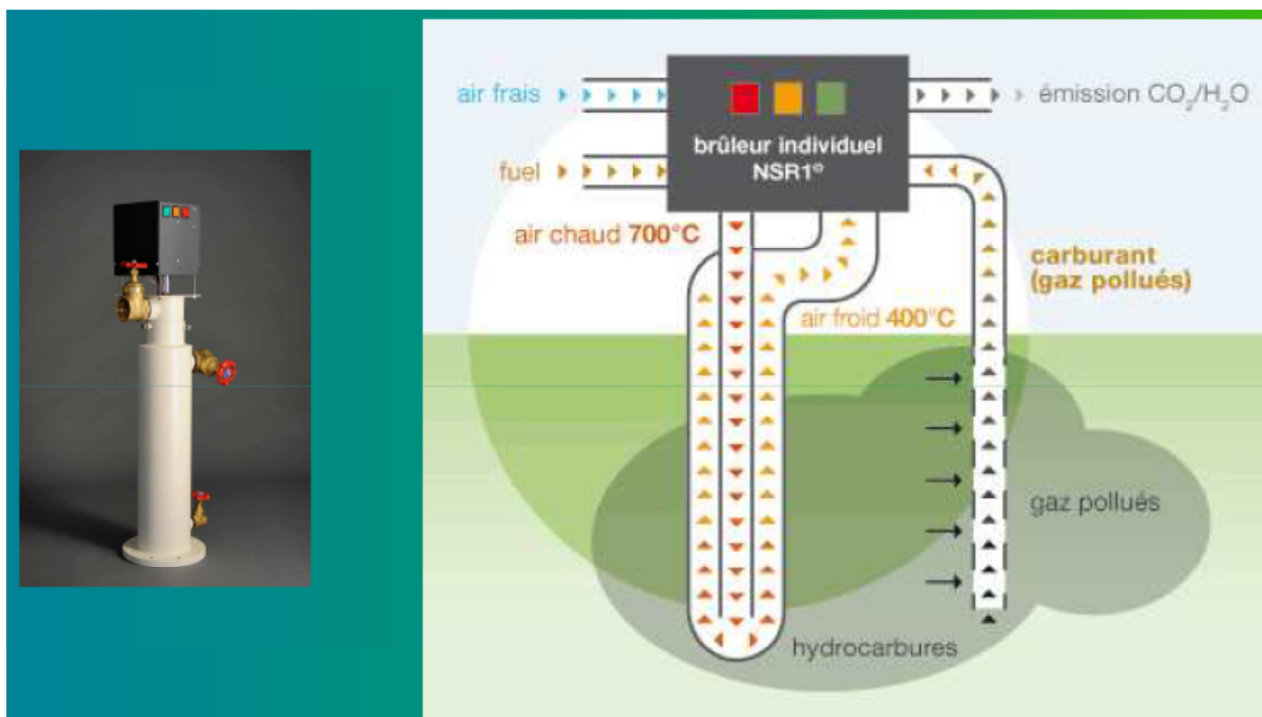


Figure 6 : brûleur individuel placé sur la canne de chauffe (source : traitement thermique des LNAPL. Application du procédé NSR City[®], GTS INTERSOL 2012)

4 OBJECTIFS POURSUIVIS : PANACHE VERSUS NOYAU

La technique du traitement par désorption thermique *in situ* par conduction de chaleur en vue de volatiliser/oxyder/pyrolyser/hydrolyser les polluants s'adresse principalement aux noyaux de pollution présents dans la phase solide du sol, la zone capillaire ou la zone de battement de la nappe.

Comme cette technique s'applique généralement quand les techniques classiques *in situ* ont atteint leur limite, et dans des situations où des contraintes sont présentes (souvent en milieu bâti ou pollution profonde), tout le panache ne peut généralement pas être assaini.

Cette technique permet d'extraire rapidement les composés polluants volatils ou semi-volatils présents en quantité importante dans le sol, sous forme adsorbée ou de produits purs piégés dans les pores du sol ou en couche libre.

5 POLLUANTS ET SITUATIONS LES PLUS FAVORABLES (NOTION QUALITATIVES)

La technique peut être appliquée pour le traitement d'une pollution du sol avec des résultats favorables lorsque les circonstances suivantes sont rencontrées :

- Le polluant à traiter est volatil ; Le polluant n'est pas riche en composés S, Cl, Br, Hg ou NOx ;
- Le polluant n'est pas corrosif, n'est pas un oxydant ou réducteur ;
- Le polluant n'est pas fortement adsorbé par la phase solide du sol ;
- La source de pollution est éradiquée de sorte que l'arrivée du polluant dans le sol est définitivement interrompue ;
- Le sol est meuble ;
- Le sol présente une bonne perméabilité ;
- Le sol présente une bonne conductivité thermique ;
- Le sol contient peu d'eau ;
- Le sol est de composition homogène ;
- Le sol ne risque pas de se rétracter suite à la déshydratation ;
- Absence de lentilles ou couches tourbeuses à fort pouvoir d'adsorption des composés organiques ;
- La zone est aisément accessible ;
- Absence d'impétrans dans le sol ou d'infrastructures sensibles à la chaleur ;
- Données acquises lors de l'étude de caractérisation suffisamment complètes et détaillées ; délimitation verticale sûre et certaine, attention en cas d'impossibilité technique dans certaines directions
- La charge polluante est répartie de manière homogène, absence de produit pur emprisonné dans des cavités ;
- L'énergie est disponible sur le site (gaz).

6 EXAMEN A PRIORI DE LA FAISABILITE TECHNIQUE

Etant donné que ce procédé engendre une augmentation de la t° du sous-sol, il ne pourra pas être mis en œuvre dans les zones occupées par des infrastructures, des fondations ou des impétrants sensibles à la chaleur.

6.1 ZONE INSATUREE OU SATUREE

Le procédé thermique *in situ* par chauffage conductif du sol à des températures comprises entre 100 et 400°C est une technique émergente. De par son coût élevé, il ne s'applique généralement que quand les autres procédés de traitement ne peuvent être mis en œuvre, ou bien que le traitement doit être réalisé dans un délai court (2 à 3 mois) sans que le coût ne soit le facteur déterminant.

Comme ce procédé met en œuvre des températures supérieures au point d'ébullition de l'eau, il est principalement utilisé pour le traitement des polluants volatils ou semi-volatils dans la zone insaturée/vadose. En effet, au plus le taux d'humidité est élevé, au plus de l'énergie supplémentaire est nécessaire pour évaporer dans un premier temps l'eau du sol pour ensuite permettre l'accroissement de la température du sol.

Toutefois, ce procédé peut également s'appliquer :

- au niveau de la zone saturée à condition que la vitesse d'entrée de l'eau dans la zone à traiter soit plus faible que la vitesse d'évaporation de l'eau. Cette variante reste toutefois plutôt de l'ordre de la théorie, puisque l'on optera préalablement à un rabattement de nappe si des couches de sol doivent être traitées en zone saturée. ;
- pour l'évaporation de phase liquide non aqueuse plus légère que l'eau (densité <1) (LNAPL-Light-Non-Aqueous-Phase-Liquid). Dans ce cas, l'extraction des polluants s'effectue par entraînement avec la vapeur d'eau et par évaporation. Etant donné que la chaleur est fournie dans la partie supérieure de la nappe, un rabattement de celle-ci se produit suite à l'évaporation. Le niveau du rabattement devra dès lors être suivi.

6.2 NATURE DU SOL

La technique est la plus efficace lorsque le sol insaturé est de nature homogène, perméable et de bonne conductivité thermique. Toutefois, malgré qu'un sol réunissant toutes ces caractéristiques est rare, la technique peut souvent être envisagée étant donné que :

- le chauffage conductif est efficace même dans les sols peu perméables étant donné que la conductivité thermique varie peu avec la nature du sol. Dans les sols non saturés en eau, la conductivité thermique est généralement comprise entre 0,4 et 1 $W.m^{-1}.K^{-1}$ (tableau 1).
- La chaleur a pour effet de volatiliser l'eau, ce qui entraîne un assèchement des sols qui augmente la perméabilité et parfois favorise la fracturation. Le passage des gaz est dès lors amélioré. La figure 7 illustre les trois phases de l'augmentation de la température d'un sol sableux en zone insaturée.

Durant la première phase de chauffe, la température du sol croît jusqu'à 100°C qui est la température d'ébullition de l'eau. Pendant la seconde phase, la température du sol reste stable jusqu'à ce que l'eau du sol se soit évaporée. La durée de ce plateau sera donc directement

dépendante du taux d'humidité et de la vitesse d'évaporation. Durant cette phase, il y a évaporation de l'eau et entraînement du contaminant par la vapeur. Dans le cas du traitement d'une couche LNAPL, on constate donc un plateau à proche des 100°C en fonction du point d'ébullition du polluant/eau.

La troisième phase, caractérisée par une augmentation de la température du sol au-dessus de 100°C, débute lorsque l'eau a été évaporée. La température monte alors rapidement et permet la volatilisation des contaminants. Dans le cas d'un **traitement** en zone saturée, cette troisième phase n'a pas lieu.

D'une manière simple, le flux de chaleur qui passe dans un solide de manière monodirectionnel s'exprime de la manière suivante :

$$\Phi = -\lambda.S_{nx} \cdot \frac{dT}{dx}$$

Où

- Φ : flux de chaleur en watt (W);
- λ : conductivité thermique du matériau (en $W.m^{-1}.K^{-1}$) (tableau 1) ;
- S_{nx} = Surface perpendiculaire au flux de chaleur (normal à l'axe x considéré) ;
- dT : différence de température (en kelvins) ;
- x : axe considéré.

Tableau 1 : Valeurs de conductivité thermique de quelques terrains meubles. Source : Augsburg Forages (11 mai 2011): Calcul des sondes géothermiques.

Terrain meuble	Conductivité thermique $W m^{-1} K^{-1}$		
	min	max	nominal
Argile sèche	0.4	1.0	0.6
Argile saturée en eau	0.9	2.3	1.4
Sable sec	0.3	0.8	0.5
Sable saturé en eau	1.5	4.0	2.3
Graviers/pierre, sec	0.4	0.5	0.4
Graviers pierres saturé en eau	1.6	2	1.7
Tourbe	0.2	0.7	0.4

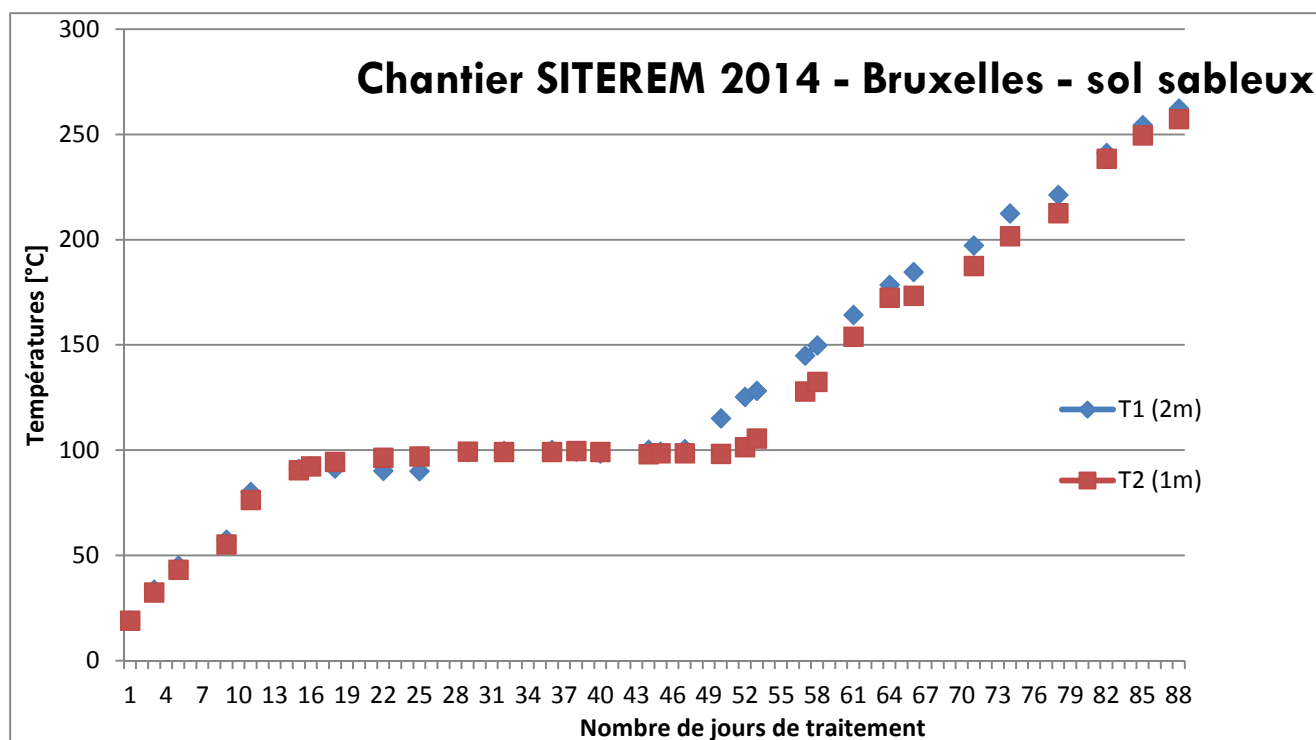


Figure 7 : Evolution de la température à 1 m et 2 m lors d'un traitement d'une pollution par du mazout

6.3 CARACTERISTIQUE DES POLLUANTS

La technique de traitement in-situ par désorption thermique peut être appliquée pour le traitement d'une pollution du sol ou d'une couche LNAPL lorsque le polluant à traiter est un composé organique volatil (COV) ou semi-volatil (SCOV). La technique est inadaptée au traitement des polluants corrosifs, de polluants minéraux (excepté le mercure), d'oxydants et de réducteur. Ce procédé est souvent appliqué aux pollutions par des produits pétroliers.

Un composé organique volatil est défini par la directive européenne n° 1999/13/CE comme « un composé ayant une pression de vapeur de 0,01 kPa ou plus à une température de 293,15 K (soit 20°C) ou ayant une volatilité correspondante dans les conditions d'utilisation particulières. Aux fins de la présente directive, la fraction de créosote qui dépasse cette valeur de pression de vapeur à la température de 293,15 K est considérée comme un COV ».

Comme la pression de vapeur à saturation (ou tension de vapeur) des composés organiques augmente de manière drastique avec la température, le flux de volatilisation est augmenté. La figure 8 illustre cette relation (*Extrait de Vacuum Vapor Extraction, Springer, 1994*).

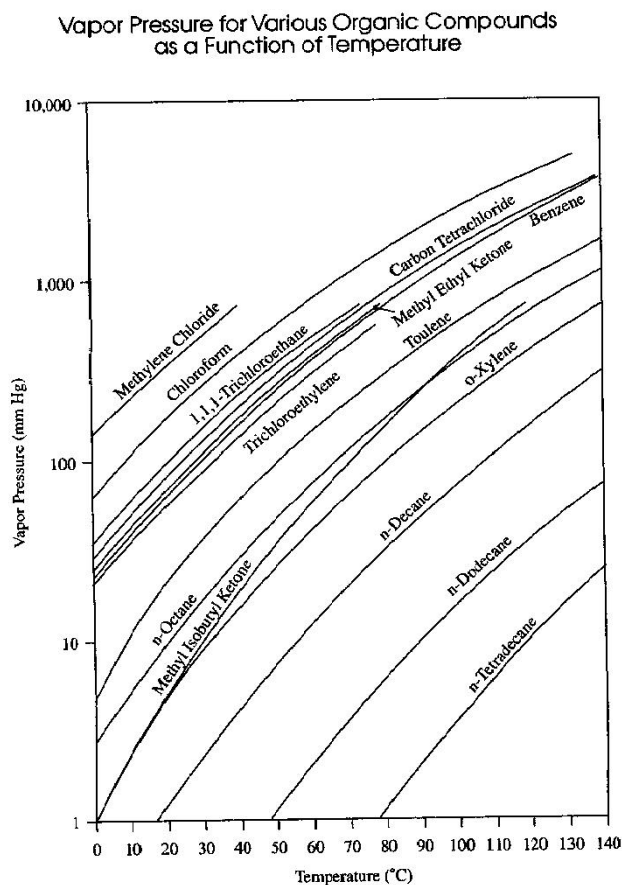


Figure 8 : Relation entre la pression de vapeur et la température pour certains composés organiques

Le calcul approximatif de la pression de vapeur saturante peut se faire à l'aide d'une formule issue de la formule de Clapeyron en prenant comme hypothèses — entre autres — que la vapeur se comporte comme un gaz parfait et que l'enthalpie de vaporisation ne varie pas avec la température dans la plage considérée.

$$\ln \frac{p_{\text{sat}}}{p_0} = \frac{M \cdot L_v}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

avec :

- T_0 : température d'ébullition de la substance à une pression p_0 donnée, en K,
- p_{sat} : pression de vapeur saturante, dans la même unité que p_0 ,
- M : masse molaire de la substance, en kg/mol,
- L_v : chaleur latente de vaporisation de la substance, en J/kg,
- R : constante des gaz parfaits, égale à 8,31447 J/K/mol,
- T : température de la vapeur, en K.

Pour l'eau, par exemple :

- $M = 0,018$ kg/mol,



- $L_v = 2,26 \times 10^6 \text{ J/kg}$,
- $p_0 = 1013 \text{ mbar}$,
- $T_0 = 373 \text{ K}$.

Un autre avantage recherché par le relèvement de la température est l'augmentation de la vitesse de diffusion des composés dans les zones de faible perméabilité.

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

Une autre façon de définir les COV est celle du décret français n° 2006-623 du 29 mai 2006 qui repose sur la température d'ébullition. D'après ce décret, les COV regroupent tous les composés organiques dont le point d'ébullition, mesuré à la pression standard de 101,3 kPa, est inférieur ou égal à 250 °C. De même, la norme NF ISO 16000-6 définit les COV selon leur température d'ébullition et distingue, d'après la classification adoptée par l'OMS en 1989, les composés organiques très volatils, volatils et semi-volatils (OQAI, 2001). Le Tableau 2 présente cette classification.

Tableau 2 : Classification des composés en fonction de la température d'ébullition

Volatilité	Températures d'ébullition
Très volatils	<[50 – 100°C]
Volatils	[50 - 100 °C] à [240 - 260°C]
Semi-volatils	[240 - 260 °C] à [380 - 400°C]

Source OQAI, 2001

La température d'ébullition standard d'un corps, couramment appelée point d'ébullition, est la température à laquelle la pression de vapeur saturante est égale à 1 atm (101,325 kPa). Lorsque la température du liquide devient supérieure à cette valeur, on observe la formation de bulles à l'intérieur de la substance : c'est le phénomène d'ébullition.

La pression de vapeur est la pression sous laquelle le corps placé seul à une température donnée constante, est en équilibre avec sa vapeur. Autrement dit, c'est la pression sous laquelle le liquide bout (ou encore le solide se sublime), à la température considérée.

Comme en [traitement](#) des sols, on est confronté au traitement d'un ensemble de composés chimiques dans une matrice sol complexe et non un liquide pur à volatiliser, l'énergie à mettre en œuvre dépendra des conditions du milieu :

- de la capacité d'adsorption des molécules au sol ;
- du taux de dépression au niveau des puits d'extraction. La mise en dépression du sol favorise l'évaporation, tout autre chose restant égale ;
- de la concentration relative des polluants dans le cocktail. En effet, en fonction du type d'essence ou de diesel, l'on peut avoir des températures d'ébullition et des pressions de vapeur différentes. Pour un carburant, on aura plutôt un intervalle de températures d'ébullition ou de pression de vapeur comme repris dans le tableau 3.

Tableau 3 : gammes de températures d'ébullition ou de pression de vapeur pour des carburants.

carburants	Température	Pression de vapeur
------------	-------------	--------------------

	d'ébullition	
essence	30 - 190 °C	45 - 90 kPa à 37,8 °C
gasoil	180 - 360 °C	<10 kPa à 100°C < 1 kPa à 40°C

(source : <http://autocarbur.free.fr>)

Exhibit II-9 Petroleum Product Boiling Point Ranges	
Product	Boiling Point Range (°C)
Gasoline	40 to 225
Kerosene	180 to 300
Diesel fuel	200 to 338
Heating oil	>275
Lubricating oils	Nonvolatile

(Source : Soil Vapor Extraction, EPA 1994)

D'une manière générale, la température d'ébullition augmente avec le nombre d'atomes de carbone et donc également avec la masse moléculaire du polluant. De plus, la température d'ébullition d'un liquide est en relation avec le "degré" d'association des molécules entre elles dans le liquide.

Dans un sol, les molécules établiront également des liaisons avec la matière organique ou les particules. Dès lors, au plus les molécules sont solidement liées entre elles ou avec le sol, au plus il faut d'énergie pour les séparer et les volatiliser.

Le tableau 4 ci-dessous reprend des températures d'ébullition de la plupart des polluants pour lesquels la désorption thermique *in situ* par conduction peut s'appliquer.

Dans les faits, il est peu réaliste de tenter la désorption thermique classique (200-270°C) pour des composés ayant une masse moléculaire lourde telle que les HAP à plus de 3 cycles ou les huiles minérales à plus de 25-30 carbones. Pour ce type de composés « lourds » la température au point le plus froid (équidistance entre 3 réchauffeurs) devra être de l'ordre de 400 °C voire supérieure. Pour ce type de traitement à température élevée, le traitement se réalisera plutôt *on site* ou *ex situ*.

Tableau 4 : température d'ébullition à pression atmosphérique des principaux polluants (source : Thermopile, livret 1. Dossier technique V07-Août 2007)

Température d'ébullition de certains contaminants	
HAP	
Naphtalene	218 °C
Acenaphtylene	280 °C
Acenaphtalene	279 °C
Fluorene	295 °C
Phenantrene	340 °C
Antracene	342 °C
Fluoranthene	375 °C
Pyrene	393 °C
Benzo(a)Fluranthene	482 °C
Chryseen	488 °C
Benzo(b)Fluoranthene	480 °C
Benzo(k)Fluoranthene	480 °C
Benzo(a)pyrene	371 °C
Benzo(ghi) perylene	550 °C
Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	530 °C
Hydrocarbures	
Essence	221 °C
Diesel	343 °C
Fioul lourd	443 °C
Autres	
PCB	<350 °C
Phenols	310 °C
TNT	300 °C
Cyanide	430 °C
Mercure	320 °C
Sulphure	414 °C
Solvants chlorés	60 °C

7 EXAMEN SPECIFIQUE DE LA FAISABILITE

7.1 EXAMEN DE LA ZONE, DES CONTRAINTES-POINTS D'ATTENTION

Etant donné que le procédé a diverses contraintes, la zone devra faire l'objet d'une analyse spécifique et d'une attention particulière sur les aspects suivants :

- l'élévation de la température du sol implique de vérifier :
 - - o la présence d'impétrants ou tout élément pouvant être endommagé (câbles, canalisation d'égouttage, alimentation en eau, en énergie (gaz, mazout, essence...) ;
 - o la nature du sol. Si le traitement thermique est réalisable aisément dans tous les types de sol, il y a lieu de vérifier l'adéquation en cas de présence de sol argileux ou tourbeux qui vont se rétracter suite à la déshydratation. Des tassements peuvent dès lors avoir lieu et impacter des installations aériennes ou souterraines. La matière organique naturelle commence à se dégrader à partir de 300°C ;
- l'implantation de plusieurs réchauffeurs ou puits d'extraction nécessite de vérifier au préalable :
 - - o la présence d'impétrants ou tous éléments pouvant être endommagés lors de l'exécution des forages (câbles, canalisation d'égouttage, alimentation en eau, en énergie) ;
 - o si l'infrastructure est amovible ou non : la pollution à traiter se situe au droit de celle-ci ? ;
 - o la présence de fondations empêchant les forages ;
 - o l'accessibilité de la zone et la topographie du sol devront être analysées au regard des techniques de forages à mettre en œuvre (accès, place et hauteur plafond) ;
 - o le niveau de la nappe et si un traitement de la couche LNAPL est envisagé, les paramètres de perméabilité de la nappe et le niveau maximal du rabattement (suite à l'évaporation de l'eau) ;
- sources d'énergie (mazout, gaz ou électricité) :
 - - o ce procédé étant gourmand en énergie, il y a lieu de pouvoir s'alimenter directement en énergie (gaz) ou bien d'avoir de la place sur le site (zone plane et accessible) pour mettre des cuves à mazout ou de gaz ;
 - o présence d'eau et d'électricité à proximité ;
- installation d'unités de chauffe (chaudière) et au besoin de traitement de gaz :
 - - o ces installations nécessitent de la place, une surface plane, un accès et une sécurisation ;
 - o l'explosivité de l'air à traiter devra être vérifiée ;
- rejet des gaz :
 - - o les gaz chauds devront être envoyés dans l'atmosphère dans une zone protégée ;
 - o en cas de traitement en milieu « confiné » dans un bâtiment ou parking, les gaz devront être acheminés vers l'extérieur et donc un conduit d'évacuation devra pouvoir être utilisé ou aménagé ;
- encombrement de la zone :
 - - o la zone devra être libérée totalement avant le traitement ;

- o la zone sera non disponible pendant toute la durée du traitement.

Au vu des multiples contraintes et points d'attention, il est conseillé à l'expert en pollution du sol d'analyser la faisabilité avec l'entrepreneur spécialisé dans le traitement par désorption thermique *in situ*, soit lors de la rédaction du projet d'assainissement ou du projet de gestion des risques, soit avant l'exécution de travaux ne nécessitant pas de projet spécifique.

Concernant l'aspect sécuritaire, dans le cas où (1) le traitement se fait (partiellement) sur le trottoir ou si le traitement a des influences pouvant impacter le trottoir abritant des impétrants ou tout élément pouvant être endommagé (câbles, canalisation d'égouttage, alimentation en eau, en énergie (gaz, mazout, essence...), ou (2) dans le cas où des installations spécifiques (liste consultable sur le site web de Bruxelles Environnement : Guide administratif des permis d'environnement) comme p.ex. une installation de combustion, dépôts de récipients fixes, etc. nécessitant un avis du SIAMU, seraient utilisées, il y a lieu d'obtenir et de respecter ledit avis du SIAMU pour l'exécution du traitement.

7.2 EXAMEN DU SOL ET DU POLLUANT

Lorsque la première analyse de faisabilité est réalisée, basée principalement sur la volatilité du polluant (point 6) et les contraintes liées au site (point 7.1), l'expert précisera son analyse sur base, en outre, des données suivantes :

- la répartition spatiale précise de la pollution. Les limites précises de la couche impactée devront être connues en vue de positionner au mieux les réchauffeurs et puits d'extraction ;
- la nature et la charge totale en polluants. La température à atteindre et la durée du traitement dépendent de ces paramètres ;
- la présence de produits purs dans le sol ou d'une couche LNAPL ;
- nature du sol :
 - o couches homogènes ou non homogènes. Des analyses granulométriques permettent à l'entrepreneur de mieux dimensionner l'installation (répartition et nombre de réchauffeurs et de puits d'extraction) ;
 - o teneurs en eau. Au plus la teneur en eau est élevée, au plus de l'énergie supplémentaire doit être fournie pour permettre son évaporation ;
 - o présence d'une nappe. En cas de réchauffement des couches de sol proches de la nappe, un rabattement s'effectuera suite à l'évaporation. L'impact de ce rabattement devra être étudié ;
- les caractéristiques des polluants :
 - o point d'ébullition, pression de vapeur en vue de cibler la faisabilité du procédé ;
 - o température d'auto-inflammabilité, c'est-à-dire la température minimale au-dessus de laquelle le composé s'enflamme spontanément ;
 - o la limite d'inflammabilité ou d'explosivité : la limite inférieure est la concentration minimale en composé pour laquelle le mélange air-composé est explosif. La limite supérieure est la valeur minimale pour laquelle le mélange air-composé ne contient plus assez d'oxygène pour permettre la combustion ;
- présence ou non de composés halogénés ou autres dont le produit de la combustion ne sera pas uniquement du CO₂ et H₂O. La nécessité d'un traitement secondaire des gaz extraits sera fonction des teneurs attendues ;
- présence de composés autres que des COV, SCOVID, TPH et HAP qui impliquent que le système utilisant les mêmes tubes pour le réchauffement et l'extraction des gaz ne peut être appliqué.

Des systèmes dissociés sont recommandés pour le traitement, par exemple, des composés organiques halogénés, du mercure... ;

- présence de matière humique. Ces matières peuvent former des produits de pyrolyse (alcanes, phénols, HAP...) entre 400 et 500°C.

Etant donné que cette technique est un procédé émergeant, qui implique que le dimensionnement repose encore beaucoup sur des données empiriques, l'expert est invité à collaborer avec l'entrepreneur pour dimensionner l'installation.

7.3 TEST EN LABORATOIRE

En vue d'estimer au mieux la traitabilité du polluant, des tests préalables peuvent être menés, par exemple en laboratoire. L'objectif de ce test est de connaître le taux de volatilisation/désorption du polluant en fonction de la température. Comme mentionné, le taux de volatilisation sera dépendant du point d'ébullition du polluant ou du cocktail de polluants et de la nature du sol.

Pour des composés « exotiques » ou cocktails dont on ne dispose pas de données thermodynamiques, un test peut s'avérer utile. Etant donné le coût de réalisation d'un test pilote sur terrain, un test en laboratoire est recommandé.

L'expert jugera de la pertinence ou non de mener au préalable un test sur base des retours d'expérience et des caractéristiques des polluants.

Selon le cahier des charges pour la réalisation d'essais de traitement de l'ADEME (2011), la réalisation d'un test peut se réaliser en plaçant des échantillons de sol (10 gr) dans des récipients en pyrex (40 ml) pesés précisément préalablement à l'introduction dans un four ou une étuve. Compte tenu des quantités souvent limitées de sol utilisées, il est nécessaire de procéder à une séparation granulométrique dans le cas d'un sol présentant une fraction grossière. Les échantillons sont alors exposés à une température fixée et des durées déterminées (par exemple 5, 10 et 15 minutes). Les récipients sont ensuite repesés afin d'évaluer la perte de masse de l'échantillon lors du traitement.

Les échantillons sont ensuite soumis à l'analyse en vue de connaître leur teneur en polluants. Etant donné les faibles quantités généralement utilisées pour les essais, les essais doivent être multipliés afin de compenser les aléas de l'échantillonnage. (NB. Il y a lieu de s'assurer au préalable de la quantité minimale nécessaire pour l'analyse en vue de définir la quantité de sol pour l'essai).

Le taux de désorption peut ensuite s'exprimer comme suit :

$$\text{Taux de désorption (\%)} = \frac{\text{Teneur initiale en polluants} - \text{Teneur finale en polluants}}{\text{Teneur initiale en polluants}} \times 100$$

Si aucune des conditions de température et de temps de séjour ne permet l'extraction des polluants avec l'atteinte des objectifs fixés, alors la mise en œuvre de cette technique est compromise.

7.4 TEST PILOTE

Si dans le cadre de la désorption thermique, il est souvent demandé à l'entrepreneur de garantir les résultats, auquel cas un test pilote ne se justifie pas nécessairement puisque celui-ci se base sur son expérience.

Dès lors, pour les polluants classiques de type essence ou mazout, le test pilote n'est pas nécessaire au vu du retour d'expérience.

Par contre, pour des composés « exotiques » ou des composés ou cocktails dont on ne dispose pas de données thermodynamiques, un test pilote peut s'avérer utile. Etant donné le coût de réalisation d'un test pilote sur terrain, un test préalable en laboratoire est recommandé.

L'expert jugera de la pertinence ou non de mener au préalable ou au démarrage **du traitement** un test pilote sur base des retours d'expérience et des caractéristiques des polluants.

Si l'expert juge qu'un test pilote est pertinent, il est à noter qu'à ce jour, il est difficile voire impossible de suivre l'évolution des teneurs en polluants dans le sol. Dès lors, le procédé **de traitement** devra être mené jusqu'au bout (atteinte de la température maximale définie, soit souvent 250°C et refroidissement) avant de pouvoir évaluer les performances.

Au terme du « test pilote », si les objectifs sont atteints, **le traitement** est finalisé, mais s'ils ne sont pas atteints, l'arbre décisionnel doit être suivi (point 13).

Au regard de ces contraintes, la réalisation d'un test pilote s'avérera, dans les faits, actuellement :

- non réalisable pour les petits sites ;
- possible pour les grandes taches de pollutions où **le traitement** par procédé thermique se réaliserait successivement par zone. Dans ce cas, **le traitement** de la première zone constituera le test pilote.

8 DESCRIPTION D'UNE INSTALLATION TYPE

Une installation type de traitement thermique in situ à moyenne température comprend :

- des réchauffeurs ou cannes de chauffe situées dans le panache de pollution (généralement verticaux, plus rarement horizontaux) ;
- des puits d'extraction (généralement verticaux, plus rarement horizontaux) localisés au sein du panache de pollution. Les puits sont équipés de crépines interceptant la totalité de la puissance de la tache. Les distances entre les réchauffeurs et les puits d'extraction sont calculées pour intercepter les gaz circulant dans l'entièreté de la tache ; un dispositif d'extraction des gaz : pompes à vide, ventilateurs... connectés à un ou plusieurs puits d'extraction. De manière à réduire les nuisances acoustiques, les unités de pompage peuvent être situées dans des enceintes isolées (caissons, containers, ...) ;
- un dispositif d'isolation de la surface du sol, en cas de risque de déperdition trop importante de la température ;
- un dispositif de suivi de la température du sol à différente profondeur : thermocouple placé au point les plus froids, c'est-à-dire à inter-distance entre 3 cannes de chauffe ;
- une unité de production des gaz chauds. Cette unité est soit une chaudière (figure 5), soit des brûleurs individuels placés directement sur les cannes de chauffe (figure 6) ;
- des conduites de collecte des gaz et d'amenée de l'air chaud. Des manomètres sont également établis au niveau des pompes d'extraction, des puits et en différents points de l'installation de manière à vérifier la mise en dépression. En fonction du système d'extraction et de traitement des gaz, un ou plusieurs explosimètres sont implantés ;
- une station de traitement des gaz pompés, si traitement secondaire ;
- 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, d'alarme et mise à l'arrêt en cas de pannes et dysfonctionnements.

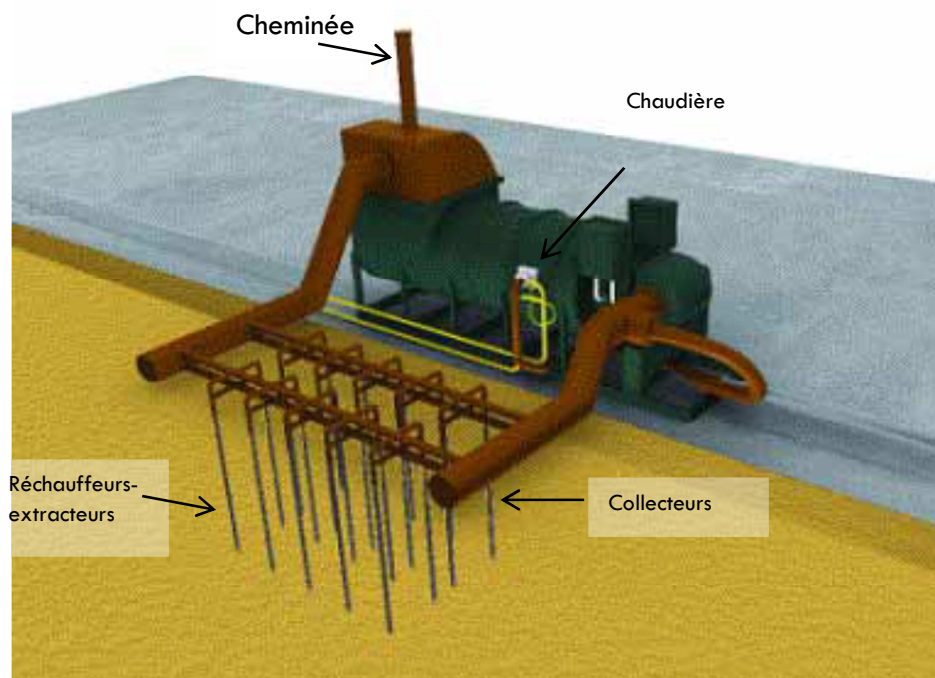


Figure 9 : système Thermopile in situ (Deep-Green).

9 DESCRIPTIF DES TRAVAUX QUI SERONT MIS EN OEUVRE

Le dispositif qui sera mis en place dans le cadre **du traitement** sera décrit en fournissant, au minimum, les indications suivantes reprises dans le **TABLEAU 5** Ces informations seront reprises dans un tableau de synthèse similaire au **TABLEAU 5** et pourront renvoyer à l'une ou l'autre figure.

TABLEAU 5 : DONNEES A FOURNIR CONCERNANT LE SYSTEME DE TRAITEMENT A METTRE EN PLACE

Partie du descriptif	Eléments	Données du descriptif	Commentaires
Sources	Infrastructures polluantes	Présences de citernes enterrées, canalisations qui nécessitent une vidange-nettoyage-dégazage et élimination au préalable	
		Elimination des déchets dangereux	
Zone à traiter	Dimensions	Largeur, longueur, profondeur et épaisseur des couches saines et polluées	Sur base des investigations de sol. Joindre les figures en annexe 9 du PA ou PGR
	Polluants	Nature du polluant. Présence de produit pur	
	Autres polluants	Présence de composés autres que ceux ciblés par les travaux	Exemple : pollution orpheline ou teneurs ne nécessitant pas une intervention
	Nature	Nature des terres (remblai, sable, limon, argile...)	Une analyse granulométrique est recommandée Attention aux fractions grossières qui ne sont pas considérées dans ce type d'analyses granulo et qui influencent le traitement
	Nappe	Un rabattement est-il prévu ? Système de pompage et gestion des eaux ou de produits purs. Contrôle des influents/effluents du dispositif	Voir code de bonnes pratiques. Les mesures de rabattement temporaire de la nappe sont à fournir en annexe 9 du PA ou PGR
Délais	Temps	Temps estimé : - pour les travaux préparatoires - pour le traitement thermique	
Environnement	Bâti	Présence de bâtis à proximité qui nécessitent une attention.	
	Impétrants	Mentionner les impétrants connus	

		à l'issue des études	
Dispositif	Réchauffeurs/extracteurs	Inter-distance prévue/estimée et profondeur	
	énergie	Présence ou pas d'énergie sur le site (gaz ou mazout)	
Réception finale	Stratégie	Définition du nombre d'échantillons à prélever	Tenir compte du durcissement du sol

10 LIMITATION DES INCIDENCES DU PROJET SUR L'ENVIRONNEMENT : ODEURS, BRUITS, POUSSIÈRES ...

10.1 NUISANCES POUR LA QUALITÉ DE L'AIR

Par définition, les opérations de traitement par extraction des vapeurs du sol s'adressent à des pollutions par des composés volatilisables. L'air en contact direct avec les installations de pompage, d'adduction et traitement des gaz pollués est susceptible d'être contaminé par les vapeurs s'échappant du dispositif (trouçons non sous-vide). De manière à prévenir le risque de dissémination de vapeurs nocives ou odorantes vers les cibles sensibles susceptibles d'être présentes sur le site et ses abords immédiats, l'étanchéité des installations fera l'objet d'un soin particulier.

Comme le procédé par traitement thermique développé dans ce code traite les vapeurs extraites dans la chambre de combustion, le risque d'odeur ou de rejet du polluant dans l'atmosphère est négligeable. 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 alors intervenir.

Les rejets gazeux résultant du traitement des gaz extraits doivent faire l'objet d'un suivi périodique. L'émission de poussières n'est pas susceptible de résulter de la mise en opération d'un dispositif d'extraction des gaz du sol.

10.2 RISQUES D'INCENDIE ET D'EXPLOSION

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

L'extraction des gaz dans la couche insaturée du sol devant être réalisée en continu, 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...

L'élévation de t° dans un milieu confiné devra également être évalué.

10.3 NUISANCES ACOUSTIQUES

Des nuisances acoustiques pour les personnes résidant aux alentours du chantier peuvent résulter du fonctionnement des pompes et de la chaudière.

Les mesures aptes à minimiser ces nuisances doivent être prises :

- mise en place des installations à une distance raisonnable des zones d'habitat ;
- maintenance de l'installation ;
- mise en place des installations bruyantes dans des caissons ou conteneurs acoustiquement bien isolés ;

10.4 RISQUES POUR LES INSTALLATIONS DE CAPTAGE VOISINES

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

Si le traitement vise le retrait d'une phase libre, ces installations sont susceptibles d'être impactées par suite du traitement insuffisant de l'eau souterraine au niveau du noyau de pollution et la création d'un panache migrant vers les sites de captage.

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

10.5 RISQUES SANTE-SECURITE DES TRAVAILLEURS

Dans le cadre des chantiers de traitement thermique, les risques les plus élevés sont ceux liés à la santé et à la sécurité des travailleurs.

Les travaux de mise en place des infrastructures et les opérations de chauffage du sol nécessitent une attention particulière pour la santé et la sécurité des travailleurs.

En sus des prescriptions de sécurité et propreté définies dans la déclaration de conformité du projet, les points d'attention suivants sont relevés :

- la présence d'impétrants. Avant le démarrage du chantier, l'entrepreneur devra inventorier tous les impétrants. Au besoin, des tranchées de reconnaissance seront réalisées manuellement.
- le balisage de la zone pour éviter les chutes suite à la présence des tuyaux et les brûlures ;

10.6 CONFORMITES AUX CADRES LEGAUX EXISTANTS

Pour les nuisances atmosphériques, les normes à l'émission pour les gaz rejetés dans l'atmosphère sont données dans le code de bonne pratique '[Normes de rejet dans le cadre des travaux d'assainissement et des mesures de gestion du risque](#)'.

Les normes de qualité de l'air à l'immission dans l'air extérieur pour mesurer l'importance de la contamination résultant de la mise en service d'un dispositif de pompage des gaz du sol ne sont pas disponibles en Région de Bruxelles-Capitale. Dans une première approche, les teneurs mesurées en polluants volatils sont comparées aux valeurs [disponibles sur la plateforme S-Risk © \(Substance data sheets, <https://s-risk.be/documents>\)](#). En cas de dépassement de celles-ci, une vérification de l'étanchéité des installations s'impose. Dans les zones sujettes à un niveau élevé de pollution atmosphérique ambiante (voies à trafic intenses, zones industrielles, ...) une opération de vérification sera déclenchée si le niveau de contamination de l'air à proximité des installations dépasse le niveau de contamination ambiant mesuré sur une période de 24 h.

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

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

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

11 SUIVI DES TRAVAUX

11.1 SUIVI LORS DU TRAITEMENT

Lors du traitement, les paramètres suivants sont suivis d'office par l'entrepreneur :

- température du sol à l'aide de thermocouples implantés à différentes profondeurs ;
- débit et température de l'air injecté ;
- ratio air/combustible de l'unité de chauffe ;
- mesure des CxHy à la sortie des puits d'extraction avant traitement. La fréquence est généralement d'une fois par semaine, mais cette mesure donne peu de résultats exploitables ;
- mesure du CO, CO₂, O₂, SO₂, NOx et CxHy dans les gaz de combustion rejetés dans l'atmosphère. La fréquence est souvent d'une fois par semaine ;
- taux de dépression au niveau des collecteurs ;
- explosivité de l'air à traiter ;
- niveau piézométrique de la nappe en cas de reprise d'une couche LNAPL
- niveau de piézométrique de la nappe en cas de rabattement de celle-ci en vue [du traitement](#) du sol.

En cas de traitement dans des bâtiments, une attention particulière sera portée également sur la teneur des gaz dans l'air ambiant (CO, CO₂, O₂, NOx et CxHy) en sus des mesures sur les influents et effluents.

Etant donné que lorsque ce type de traitement est mis en œuvre, il est demandé à l'entrepreneur de garantir les rendements et l'atteinte des objectifs fixés, le suivi du bureau d'études est limité et se résume essentiellement à une mission de supervision.

L'expert réalisera quelques visites de supervision à certains moments clés du traitement tels que :

- lors de la pose des réchauffeurs et puits d'extraction ;
- au début du démarrage du réchauffement du sol. Des mesures des rejets seront réalisés en vue de vérifier les effluents et au besoin adapter le système de traitement ;
- lors de la phase de traitement. Tout au long de la phase de traitement, l'entrepreneur communiquera les données collectées à l'expert, si ces données ne sont pas collectées par celui-ci. Une analyse de celles-ci sera réalisée en vue d'adapter au besoin l'installation ;
- à chaque fois que l'entrepreneur le souhaite ;
- à chaque fois que l'expert le juge nécessaire.

En cas de traitement d'une couche LNAPL ou de sol d'une couche saturée, les niveaux piézométriques seront relevés en vue de suivre le rabattement de la nappe.

Si un traitement particulier ou secondaire doit être réalisé sur les gaz extraits, des mesures de suivi spécifiques devront être réalisées en fonction des polluants à traiter (voir code de bonne pratique n°2).

Tableau 6 : fréquence et paramètres de suivi.

Paramètres de suivi	moyen	Fréquence minimale	commentaires

Température du sol	thermocouple	hebdomadaire	
Débit et température de l'air chaud	Débitmètre et sonde de température	hebdomadaire	
Rejets en CO, CO ₂ , O ₂ , SO ₂ , NOx et CxHy	Analyseur de gaz portable	hebdomadaire	Gaz de combustion rejetés dans l'atmosphère
Teneurs dans l'air en CO, CO ₂ , O ₂ , SO ₂ , NOx et CxHy	Analyseur de gaz portable	2 x par semaine	En cas de traitement d'une pollution dans un bâtiment
Dépression du système	manomètre	hebdomadaire	
Épaisseur du LNAPL	Sonde biphase ou échantillonneur de couche liquide	Tous les 15 jours	Couche LNAPL
Niveau piézométrique de la nappe	Sonde piézométrique	hebdomadaire	En cas de rabattement de la nappe

11.2 MESURE DES REJETS DANS L'ATMOSPHÈRE

Les paramètres à mesurer dans les fumées d'échappement sont les suivants : CO, CO₂, O₂, SO₂, NOx et CxHy. La mesure est effectuée à l'aide d'un analyseur de gaz (exemple à la figure 10) qui dispose d'un certificat de calibration délivré par l'organisme de contrôle. La pastille de calibration doit être apposée sur l'appareil afin de pouvoir contrôler la date de validité de la calibration.

L'analyseur de gaz est introduit au niveau du circuit d'échappement, via un conduit prévu à cet effet (figure 11) ou directement à la cheminée. Le prélèvement à la cheminée est déconseillé :

- suite à la haute température des gaz et donc au risque de brûlures ;
- suite, généralement, à son inaccessibilité (en hauteur) (figure 11).

Si un traitement particulier ou secondaire doit être réalisé sur les gaz extraits, des mesures de suivi spécifiques devront être réalisées en fonction des polluants à traiter (voir code de bonne pratique n°2).

Les normes à l'émission pour les gaz rejetés dans l'atmosphère sont données dans l'« Info-fiche Sol » de février 2011.

Il convient de préciser que la norme définie pour le CO₂ (9100 mg/Nm³) n'est pas réaliste, et ce quelle que soit l'opération de traitement nécessitant une combustion. Seul un énorme excès d'air, entraînant dès lors un gaspillage énergétique inutile, peut permettre d'atteindre le taux de 0,5 % équivalent au 9100 mg/Nm³ préconisés.

Un réglage correct d'une chaudière fuel est obtenu avec un taux de CO₂ minimal de l'ordre de 12 % à 14 % et pour une chaudière gaz, on est dans la gamme 8 à 10 %. Ceci découle des caractéristiques même du carburant et des équations de combustions stœchiométriques. Il est recommandé de respecter ces taux de CO₂, puisque ces taux de CO₂ dans les fumées sont, par ailleurs, imposés par Bruxelles Environnement dans le guide sur le contrôle périodique des chaudières.

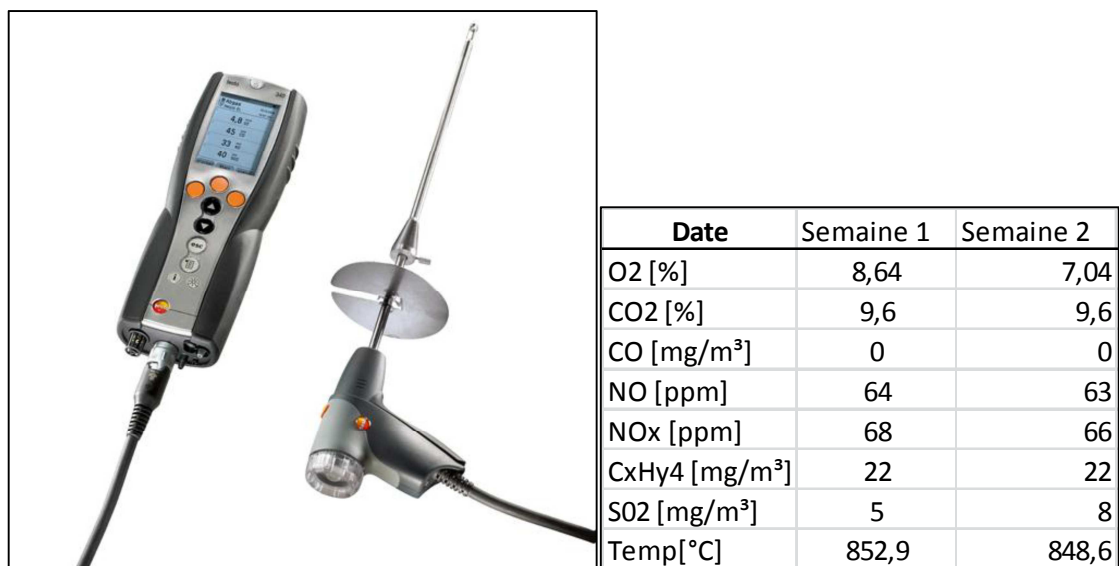


Figure 10 : exemple d'un analyseur de gaz (source : Testo) et type de données récoltées. Normes de rejets dans l'atmosphère – cas particulier de l'oxydation thermique.



Mesure dans le conduit de rejet



Figure 11 : illustration des points de prélèvements des gaz rejetés dans l'atmosphère (photo SITEREM, 2014).

En vue d'une confrontation avec les normes reprises dans le code de bonne pratique 'Normes de rejet dans le cadre des travaux d'assainissement et des mesures de gestion du risque', les mesures doivent être exprimées en mg/Nm³. Cependant, les analyseurs fournissent certains résultats en ppm. Dans ce cas, la conversion peut se faire selon l'équation suivante :

Concentration (mg/m³) = concentration (ppm) x masse moléculaire (g/mol) / volume molaire (l)

A titre d'exemple, le volume molaire du gaz d'échappement d'une chaudière alimentée par du mazout est de 24,45 l.

Pour obtenir des Nm³ (normaux m³), il est nécessaire de ramener la concentration à une température de 0°C et une pression atmosphérique.

$$V \text{ (Nm}^3\text{)} = V \text{ (m}^3\text{)} \times P_{\text{abs}} \text{ (bar)} / 1,01325 \times 273 / (T \text{ (}^\circ\text{C)} + 273)$$

Généralement, la différence de pression entre point de mesure et la pression atmosphérique est négligeable de sorte que $V \text{ (Nm}^3\text{)} = V \text{ (m}^3\text{)}$.

Enfin, sachant que 1% correspond à 10000 ppm, il est aisé de convertir les % en mg/m³.

A titre d'exemple, pour le CO₂

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ (mg/m}^3\text{)} &= \text{CO}_2 \text{ (ppm)} \times 44 \text{ g/mol} / 24.45 \text{ l} \\ 1 \text{ ppm CO}_2 &= 1.8 \text{ mg/m}^3 \text{ CO}_2 \\ 1\% \text{ CO}_2 &= 18000 \text{ mg/m}^3 \end{aligned}$$

11.3 CONTROLE DE L'ATTEINTE DES OBJECTIFS

11.3.1. MESURES PENDANT LE TRAITEMENT (INDIRECTES)

- atteinte des t° voulues au point froid signifie que toute la zone est bien chauffée

- mesure ponctuelle du CO à la sortie des tubes d'aspiration : indicateur de combustion incomplète ou de t° pas assez élevée

11.3.2. MESURE DES TENEURS DANS LE SOL

Lorsque l'entrepreneur considère que les objectifs sont atteints, l'expert doit effectuer le contrôle :

- des teneurs résiduelles en polluants dans le sol ;
- de la reprise totale de la couche LNAPL (point 11.3.2).

Etant donné que le procédé a été mis en œuvre pour des composés volatils ou semi-volatils, le prélèvement des échantillons doit s'effectuer dans des conditions qui permettent de garantir la situation réelle de terrain.

Dès lors, l'échantillonnage se réalisera conformément aux guides de bonnes pratiques si la température du sol est sous 20°C.

Dans le cas où la température du sol est supérieure à 20°C, il y aura lieu d'attendre le refroidissement du sol jusqu'à une température adaptée au mode de prélèvements des échantillons non remaniés (steekbus, liners...). Comme la pression de vapeur à saturation (ou tension de vapeur) des composés augmente avec la température, le flux de volatilisation est fortement augmenté. Dès lors, tout prélèvement au-delà de 20°C doit se réaliser directement dans des liners en PVC ou téflon ou dans des carottiers en acier inoxydable (Les bouchons seront immédiatement appliqués sur les deux extrémités du tuyau et le découpage de la section souhaitée pour l'envoi de l'échantillon au laboratoire.

Le prélèvement à une température inférieure à 55°C est recommandé pour la prise des échantillons en liners PVC car le PVC est généralement caractérisé par une température de ramollissement Vicat située entre 65 et 85°C et une température de fléchissement sous charge entre 55 et 70°C. Pour des liners en téflon, les résistances à la chaleur sont nettement supérieures.

La résistance à la chaleur des outils de prélèvements dictera donc la température et donc le délai du prélèvement après l'arrêt du chauffage du sol.

Toutefois, il est important de veiller également aux risques de brûlures de l'opérateur et du préleveur. L'aspect sécurité peut également être le critère déterminant le moment du prélèvement. Des EPI adaptés devront être mis.

La figure 12 illustre la courbe de décroissance non active de la température d'un sol après arrêt des réchauffeurs. Etant donné que les infrastructures ne seront totalement démantelées qu'après contrôle de l'atteinte des objectifs, une réduction de la période de refroidissement peut être souhaitée. Il est possible d'accélérer de manière active la réduction de la température du sol par circulation d'air ambiant. Le lancement de cette opération est à évaluer, au cas par cas, avec le titulaire de l'obligation, l'entrepreneur et l'expert.

Les prélèvements de sol s'effectueront dans les couches polluées à raison au minimum d'un échantillonnage dans le noyau.

Le prélèvement s'effectuera dans la zone du point froid définie par l'inter-distance entre 3 réchauffeur/extracteur lorsqu'ils sont associés. En cas de réchauffeur et puits d'extraction dissociés (non placés dans le même trou de forage), le prélèvement dans la zone de mi-distance est privilégié.

L'expert pourra néanmoins motiver le choix d'autres emplacements qui permettraient une meilleure représentativité de la qualité du sol et en fonction des contraintes de terrain.

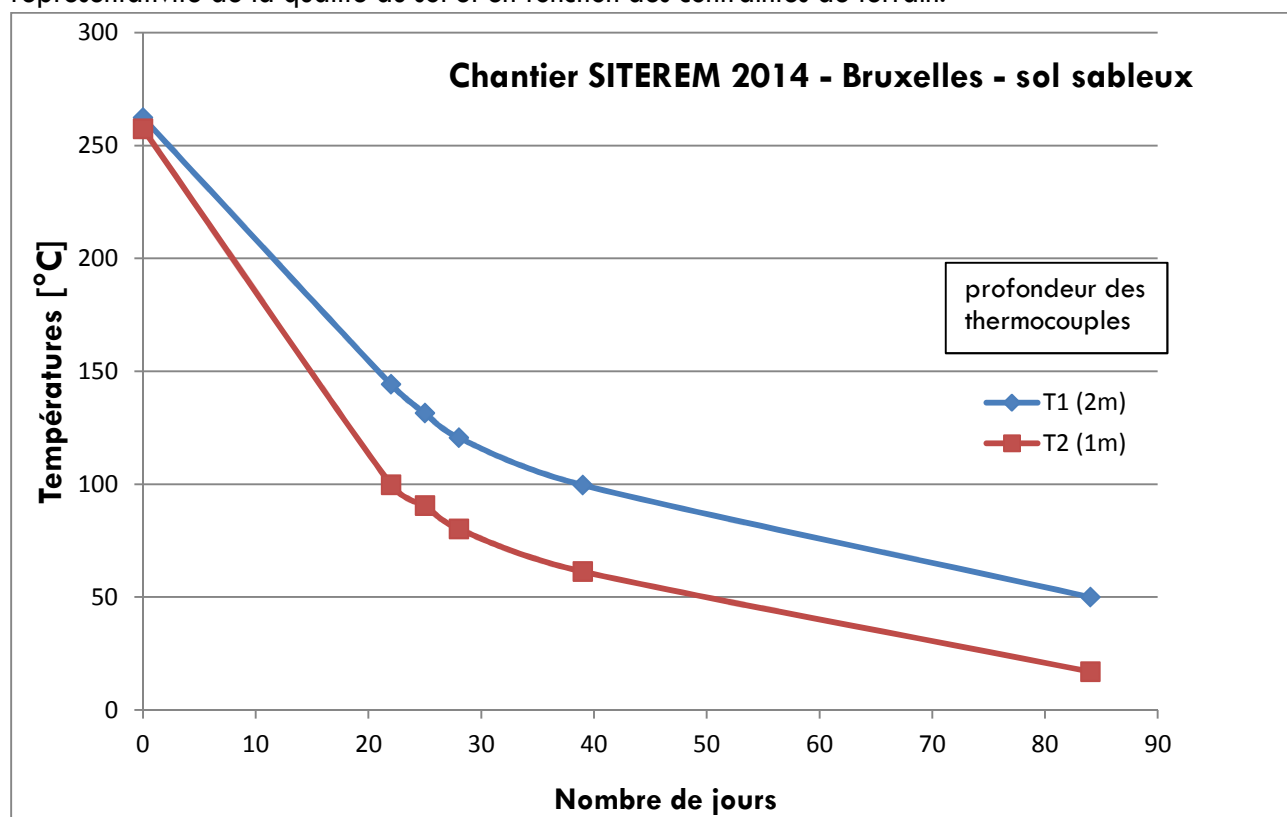


Figure 12 : décroissance non active de la température d'un sol sableux chauffé à 250°C

11.3.3. MESURE DES COUCHES LNAPL

La mesure des couches LNAPL s'effectuera dans la zone où la couche était la plus importante avant traitement. Toutefois, l'un ou l'autre contrôle en bordure du panache sera réalisé pour vérifier l'absence de migration pendant le traitement. Le contrôle s'effectuera lorsque la température de l'eau est revenue à sa température initiale puisque la solubilité des composés augmente avec la température.

12 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'un traitement in situ par désorption thermique implique, le cas échéant, la réalisation d'une étude pilote avant la réalisation du PA ou PGR. Comme il sera souvent techniquement impossible ou financièrement déraisonnable d'effectuer l'étude pilote avant la réalisation du projet, l'expert devra définir clairement si une étude pilote est pertinente ou non. Il définira le type de rapports et les délais dans lesquels ces rapports peuvent être rendus à l'Institut.

La remise à Bruxelles Environnement de un ou plusieurs rapports intermédiaires peut se justifier :

- lors de la reprise d'un surnageant.
- lorsque la zone polluée est traitée en plusieurs étapes.

La vitesse de réduction de l'épaisseur du surnageant ou les résultats de la première étape de traitement fourniront une évaluation de l'efficacité du traitement.

Un rapport intermédiaire sera d'office soumis à l'approbation de Bruxelles Environnement lorsque sur la base des données collectées, des modifications significatives dans le dispositif d'intervention sont nécessaires.

13 MESURES DE VALIDATION ET SCHEMA DECISIONNEL ARRET-POURSUITE

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.

Dans le cadre du traitement par désorption thermique, les mesures de validation consistent à prélever des échantillons de sol ou mesurer la qualité de la nappe au droit du panache conformément aux stratégies définies au point 11.3.

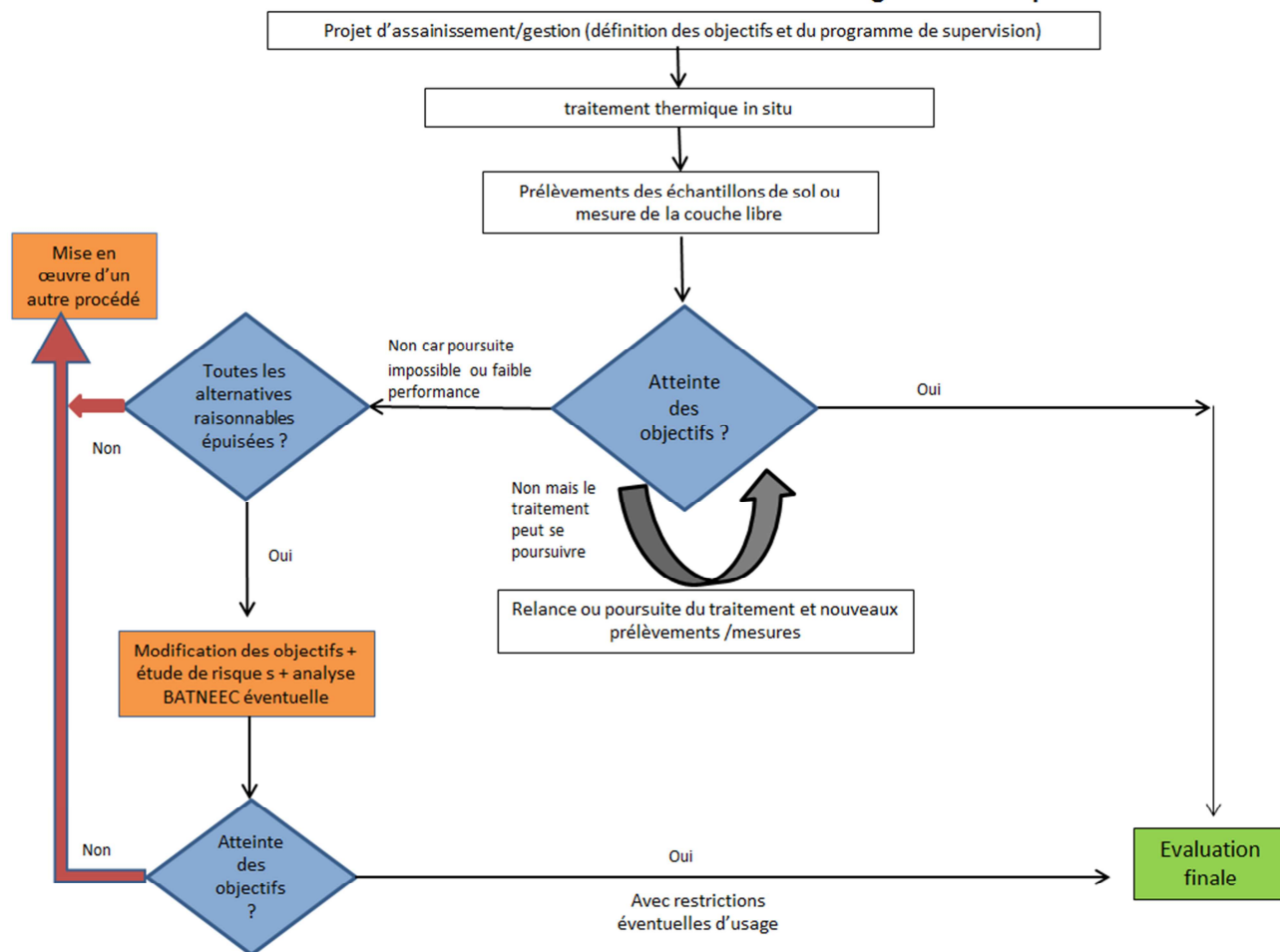
En ce qui concerne le sol, cette campagne d'analyses portera au minimum sur tous les polluants dont la présence a requis une intervention. Il peut s'avérer utile de vérifier la teneur d'autres composés qui ne nécessitaient pas une intervention, mais qui pourraient suite aux traitement présenter en fin de travaux des teneurs inférieures et ainsi modifier la catégorie de l'état du sol.

En cas de non atteinte des objectifs, le traitement est poursuivi. S'il est impossible de poursuivre le traitement suite, par exemple, à une faible performance ou un impact financier excessif, 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) et, le cas échéant, d'une analyse BATNEEC.

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 par la mise en place d'un autre type de traitement.

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



14 MONITORING A LONG TERME ÉVENTUEL

Ce monitoring à long terme pourrait être mis en place si après un traitement thermique en vue de la reprise d'une couche LNAPL, l'un ou l'autre piézomètre indiquait encore localement la présence d'une certaine contamination.

Sur suggestion de l'expert et/ou à la demande de Bruxelles Environnement, un monitoring (validation à long terme ou post gestion) peut être demandé au titulaire de l'obligation après la clôture des travaux. Ce suivi vise à confirmer que les résultats des travaux et notamment la rencontre des objectifs d'assainissement sont acquis de manière durable. Selon toute logique, ce suivi à long terme se justifie s'il existe une incertitude quant à la pérennité des résultats obtenus : variation importante des teneurs mesurées dans les piézomètres de contrôle, niveaux de teneur stabilisés à une valeur proche des objectifs [de traitement](#), circonstances particulières défavorables...

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

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

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

Les paramètres qui seront relevés seront :

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

15 RECOMMANDATIONS EN MATIERE DE SANTE, SECURITE ET ORGANISATION

15.1 CHECK-LIST SUCCINTE POUR LES ENTREPRENEURS

La check-list à destination des entrepreneurs est reprise dans le **TABLEAU 7**. Cette liste vise à aider les entrepreneurs dans la rédaction de leurs offres en réponse aux cahiers de charge rédigés par les experts. Compte tenu de la grande diversité des situations rencontrées, cette liste ne saurait être exhaustive.

Les remarques suivantes peuvent être faites :

- pour les entrepreneurs certifiés VCA ou de manière équivalente, les mesures énumérées dans le **TABLEAU 7** et ayant trait à la santé et sécurité sont déjà systématiquement d'application ;
- la check-list du **TABLEAU 7** 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 hebdomadaire ;
- pour les conduites d'air chaud et collecteur de gaz, on privilégiera une isolation de celle-ci en vue de limiter les risques de brûlures et la déperdition d'énergie ;
- lorsqu'un risque d'explosion est avéré au niveau des cannes, conduites ou de la station secondaire de traitement, le risque d'explosion (LEL) sera mesuré en continu et le système sera mis en sauvegarde dès un dépassement de 10 % de la LEL (entrée d'air et alarme) ;
- en cas de stockage sur site de mazout, des mesures seront prises pour éviter la contamination du sol et des eaux souterraines sous-jacentes.

Tableau 7 : Check-list à destination des entrepreneurs

Rubrique	Vérification
Informations préalables complètes et suffisantes (cahier de charges, descriptif des travaux...)	
Impétrants	Demande auprès des exploitants des réseaux effectuée et réponse adéquate obtenue
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	L'entrepreneur est-il en mesure de garantir la stabilité suite à l'augmentation de la température du sol ?
Cibles sensibles	Cibles sensibles présentes sur et aux alentours du chantier bien identifiées.
Energies et fluides	Le site dispose-t-il d'électricité (220-360 Volt) d'eau, de gaz ou de mazout ?
Aspects techniques des cahiers des charges ou du descriptif des travaux	Descriptif des travaux à mettre en œuvre (localisation, profondeur...) et éventuellement rabattement de la nappe (types de pompes, type de traitement des eaux pompées...)
Aire disponible	les installations pourront-elles être implantée sur site ?
mise à l'arrêt du chantier	Le donneur d'ordre a-t-il prévu une phase d'arrêt en vue du prélèvement des échantillons (temps de refroidissement du sol)
Identification des autorisations nécessaires et des cadres normatifs à respecter	Vérifier que les autorisations nécessaires ont été demandées par le donneur d'ordre et que les travaux seront exécutés conformément aux législations 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...
Points de rejets	Points de rejet des eaux traitées issus du rabattement éventuel de la nappe
Les lignes de communication sont définies	Les identités et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'expert, de l'agent de Bruxelles Environnement, des autorités compétentes sont connues
Informations devant être présentes dans le plan de santé et sécurité, et prévention de l'entrepreneur	
Identification et nature des risques	Risques pour les infrastructures enterrées
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de produits dangereux et/ou polluants (exemple : mazout pour la chaudière)
	Risques pour la santé du personnel du fait de la présence de produits volatils et dangereux
	Risques de brûlures
	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
	Risques climatiques : gel des conduites si un pompage est effectué pour rabattre la nappe
	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
	Bruit des équipements : pompes, groupes électrogènes, chaudière...
	Encombrement des voiries
Mesures préventives	Pour chacune des nuisances identifiées, identification et description des mesures préventives. Par exemple, mise en place d'explosimètres.
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacune des nuisances identifiées, préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Planning des interventions	
Planning des phases	un planning sera fourni au maître d'ouvrage afin de connaître le phasage des travaux
Délais	un délai sera fourni au maître d'ouvrage en vue de connaître la durée de l'inaccessibilité de la zone
Remblai	Prévoir le planning pour la validation des résultats
Identification des pannes et des problèmes techniques susceptibles de se produire	Défectuosité des équipements et de l'installation
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacun des problèmes susceptibles de se produire : préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Rapports de surveillance de l'expert	Prise en compte des rapports de suivi de l'expert et mise en place concertée des mesures correctives ou d'optimisation.

15.2. CHECK-LIST SUCCINTE POUR LES EXPERTS

La check-list à destination des experts est fournie au **TABEAU 8**. 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.

TABEAU 8 : CHECK-LIST A DESTINATION DES EXPERTS

Rubrique	Vérification
Informations préalables complètes et suffisantes (études préalables, cahier de charge, descriptif des travaux, ..)	
Caractéristiques du sol insaturé	Composition du sol : succession et caractéristiques des couches, présence de couches de perméabilités différentes.
Zone polluée	Densité des observations suffisante pour définir le positionnement des réchauffeurs/extracteurs
Nappe	Un rabattement de la nappe est-il nécessaire ?
Couche LNAPL	Le suivi de cette couche pourra-t-il être effectué ? Comment ? Un rabattement sera-t-il occasionné ?
Polluants présents	Nature et caractéristiques des polluants présents, répartition des teneurs, source encore active ? Evaluation de la charge polluante dans les différentes couches du sol, présence d'une phase pur dans le sol ?
	Présence de composés qui nécessitent un traitement secondaire des gaz
Caractéristiques des infrastructures sur le site et son voisinage immédiat	Inventaires et cartographie des bâtiments et infrastructures aériennes. Inventaire et cartographie des infrastructures enterrées et impétrants connus à l'issue des études
Cibles sensibles	Cibles sensibles présentes sur et aux alentours du chantier bien identifiées.
Energies et fluides	Le site dispose-t-il d'électricité (220-360 Volt) d'eau, de gaz ou de mazout ?
Aspects techniques du cahier des charges ou du descriptif des travaux	Descriptif des travaux à mettre en œuvre (localisation, profondeur...) et éventuellement rabattement de la nappe (types de pompes, type de traitement des eaux pompées...). Un suivi efficace pourra-t-il être réalisé (accessibilité aux points d'entrée et de sortie des eaux)
Aire disponible	les installations pourront-elles être implantées sur site ?
Identification des autorisations nécessaires et des cadres normatifs à respecter	Vérifier que les autorisations nécessaires ont été demandées par le donneur d'ordre et que les travaux seront exécutés conformément aux législations 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...
Les lignes de communication sont définies	Les identités et coordonnées du maître d'œuvre, de l'entrepreneur, du titulaire de l'obligation, de l'agent de Bruxelles Environnement, des autorités compétentes sont connues
Identification et nature des risques	Risque de dommages des infrastructures enterrées.
	Risques pour la santé du personnel du fait de la présence de produits volatils et dangereux
	Risques de brûlures
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de produits dangereux et/ou polluants

	Risques climatiques : gel des conduites si un pompage est effectué pour rabattre la nappe
	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
	Bruit des équipements : pompes, groupes électrogènes, chaudière...
	Encombrement des voiries
Mesures préventives	Pour chacune des nuisances identifiées, identification et description des mesures préventives. Par exemple, mise en place d'explosimètres.
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacune des nuisances identifiées, préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Planning et contenu des opérations de suivi, de validation	
plan as built	Plan précis reprenant la localisation de la zone traitée
Présence de l'expert	A quel moment l'expert doit être impérativement présent ? L'entrepreneur en est-il averti ?
Paramètres du suivi du sol	Les composés analysés suivis sont-ils suffisants ? Les teneurs mesurées répondent-elles aux objectifs définis dans le projet ?
Paramètres du suivi des eaux	Relevé des niveaux piézométriques, analyses des eaux pompées et rejetées. Sont-elles conformes ?
Attestations et certificats	Quand les certificats ou attestations me seront-elles délivrées et par qui ?
Rapportage	Planning pour la soumission du rapport intermédiaire éventuel et du rapport d'évaluation finale.
Etape de validation des résultats, des attestations, des certificats.	Les données recueillies sont-elles suffisantes pour la réalisation de cette étape ?
Etude de risque et (BATNEEC) si modification des objectifs	Les données recueillies sont-elles suffisantes pour la réalisation de cette étape ?

16 SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Thermopile, août 2010. Livret 1 Dossier Technique V07.
- Traitement thermique des LNAPL. Application du procédé NSR City[®], GTS. Claude Cedou INTERSOL 2012.
- www.selectdepol.fr. Outil interactif de pré-sélection des techniques de dépollution Brgm/Ademe.
- Dioxines et furannes – août 2011. Bruxelles environnement-Dep. Planification air, climat et énergie et observatoire des données de l'environnement.
- Dossier INRS, Les solvants. 21/10/2010 extrait du site www.inrs.fr
- Directive n° 1999/13/CE du Conseil européen du 11 mars 1999 relative à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certaines activités et installations.
- Décret 2006-623 du 29 mai 2006 relatif à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certains vernis et peintures et dans les produits de retouche de véhicules.
- Composés organiques volatils (COV), décembre 2007, Etat des lieux : définition, sources d'émissions, exposition, effets sur la santé. Observatoire régional de santé d'Ile-de-France
- Infos fiches pour les experts en pollution du sol. Normes d'émission assainissement gestion du risque du 22/02/2011.
- Traitabilité des sols pollués. Guide méthodologie pour la sélection des techniques et l'évaluation de leurs performances, ADEME avril 2011.
- OQAI. Inventaire des données françaises sur la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments. 2001, 174 p.
- Sol Vapor Extraction, EPA octobre 1994
- Innovative Site Remediation Technology Vol. 8, Paul C. Johnson et al., Springer 1994