

# DÉSORPTION THERMIQUE GTR™ IN SITU (ISTD) ET ON SITE (ESTD)

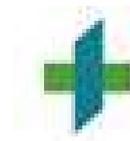
## NOTICE TECHNIQUE



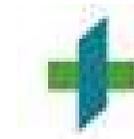


## TABLE DES MATIERES

<b>1. Présentation Générale</b>	<b>5</b>
<b>2. Procédé</b>	<b>6</b>
<b>2.1. Principe général</b>	<b>6</b>
<b>2.2. Principe de traitement</b>	<b>6</b>
<b>2.3. Traitement des polluants</b>	<b>8</b>
<b>3. Chauffage du sol</b>	<b>9</b>
<b>3.1. Eléments chauffants</b>	<b>9</b>
<b>3.2. Brûleur GTR™</b>	<b>10</b>
<b>3.3. Mécanismes de chauffage</b>	<b>10</b>
<b>3.4. Types de sols</b>	<b>11</b>
<b>3.5. Evolution de la température du sol</b>	<b>12</b>
<b>3.6. Bilan énergétique et temps de traitement</b>	<b>15</b>
<b>3.7. Comportement du sol pendant le chauffage</b>	<b>17</b>
3.7.a. Stabilité	17
3.7.b. Séchage des argiles	18
3.7.c. Aspect du sol après traitement	19
<b>4. Traitement des Polluants</b>	<b>22</b>
<b>4.1. Applications</b>	<b>22</b>
4.1.a. Types de polluants traités par le procédé GTR™	22
4.1.b. Les hydrocarbures	23
4.1.c. Les polluants autres que les hydrocarbures	24
<b>4.2. Comportement des polluants pendant le traitement</b>	<b>25</b>
<b>4.3. Mécanismes physiques et chimiques durant le chauffage du sol</b>	<b>26</b>
4.3.a. Principaux mécanismes de traitement thermique	26
4.3.b. Réactions chimiques dans le sol en présence de vapeur d'eau	27
4.3.c. Entraînement du polluant par la vapeur d'eau	28
<b>4.4. Traitement GTR™ des zones saturées</b>	<b>29</b>
<b>4.5. Récupération des polluants</b>	<b>31</b>
<b>4.6. Traitement des gaz</b>	<b>32</b>
4.6.a. Oxydation partielle des polluants dans le sol	32
4.6.b. Traitement des gaz et vapeurs dans la flamme du brûleur	32
4.6.c. Traitement ad-hoc pour les polluants dont la combustion génère des gaz toxiques	33
<b>5. Mise en œuvre</b>	<b>35</b>
<b>5.1. Généralités</b>	<b>35</b>
<b>5.2. In Situ (ISTD)</b>	<b>35</b>
5.2.a. Description générale	35
5.2.b. Eléments chauffants.	37
5.2.c. Tube vapeur	37
5.2.d. Installation du système in-situ	37
5.2.e. Mode opératoire	37
5.2.f. Démobilisation	40
<b>5.3. Ex situ (ESTD)</b>	<b>40</b>
5.3.a. Description générale	40
5.3.b. Pile thermique	40
5.3.c. Montage de la pile thermique	41
5.3.d. Mode opératoire	42

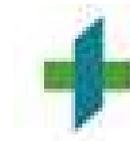


5.3.e.	Suivi du traitement : spécificités ESTD	46
5.3.f.	Démobilisation	47
<b>5.4.</b>	<b>Etanchéité du système</b>	<b>48</b>
<b>6.</b>	<b>Suivi du traitement</b>	<b>49</b>
6.1.	Températures de traitement	49
6.2.	Pressions dans les terres contaminées	51
6.3.	Emissions gazeuses	51
6.4.	Autres analyses	53
6.5.	Validation du traitement	53
<b>7.</b>	<b>Hygiène, Sécurité &amp; Environnement</b>	<b>54</b>
7.1.	Généralités	54
7.2.	Sécurité du personnel	54
7.3.	Sécurité de l'installation	56
7.4.	Objectifs QHSE spécifiques	60
7.5.	Maitrise des Rejets	60
7.6.	Maîtrise des nuisances	62
7.7.	Audits internes et externes	63
7.8.	Gestion des déchets	63
<b>8.</b>	<b>Liste des Figures</b>	<b>64</b>
<b>9.</b>	<b>Liste des tableaux</b>	<b>66</b>
<b>10.</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>67</b>
<b>11.</b>	<b>Annexes</b>	<b>69</b>
11.1.	Surveillance et mesures de sécurité	69
11.2.	Caractéristiques du brûleur NSR	71
11.3.	Certificat de conformité EN du brûleur	72



## LEXIQUE & ABREVIATIONS

C10-C40	Hydrocarbures totaux de 10 à 40 atomes de carbone
CO	Monoxyde de Carbone
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de Carbone
COC	Contaminant of Concern : polluant
Cokéfaction	Réaction de décomposition d'hydrocarbures en hydrocarbures légers et en coke
COT	Carbone Organique Total
COV/VOC	Composé Organique Volatil/Volatil Organic Compound
COSV/SVOC	Composant Organique Semi Volatil/Semi-Volatile Organic Compound
Craquage	Rupture des liaisons d'un composé chimique
DNAPL	Dense Non Aqueous Phase Liquid
Ebullition	Mise rapide en phase vapeur d'un liquide à pression atmosphérique
Elément chauffant	Ensemble tube de chauffe et brûleur
ESTD	Ex-Situ Thermal Desorption : traitement par désorption thermique de terres excavées
Evaporation	Passage progressif d'un état liquide à un état gazeux
GTR™	Gas Thermal Remediation, procédé inventé par TPS
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
Hydrocarbure	Composé d'hydrogène et de carbone
ISTD	In-situ Thermal Desorption : traitement par désorption thermique sur site sans excavation
LNAPL	Light Non Aqueous Phase Liquid
NAPL	Non-Aqueous Phase Liquid
Oxydation	Réaction chimique en présence d'oxygène
Psat	Pression de saturation
PID	Proportionnel Intégral Dérivé : programmation de régulation
Pyrolyse	Décomposition d'un composé chimique sous l'effet de la chaleur en absence d'oxygène ou en atmosphère pauvre en oxygène
SVE	Soil Vapor Extraction : extraction des vapeurs du sol
Teb	Température d'ébullition
TCE	trichloréthylène
TTT	Target Treatment Temperature : température de traitement cible
TTZ	Target Treatment Zone : zone cible de traitement
Tube de chauffe	Ensemble de 2 tubes concentriques utilisés pour le chauffage du sol
Tube vapeur	Tube perforé utilisé pour l'extraction de la vapeur du sol
Vadose	La zone non saturée du sol situé juste au-dessus d'une zone saturée en eau
Viscosité	Propriété d'un fluide qui traduit sa résistance à l'écoulement



# 1. PRESENTATION GENERALE

---

De nos jours, il existe de nombreuses méthodes proposées pour l'élimination des polluants présents dans le sol et les eaux souterraines, comme l'excavation suivie par l'incinération, la vitrification in-situ, le traitement biologique, les additifs chimiques pour la désactivation, la ventilation du sol (SVE<sup>[1]</sup>), l'extraction à la vapeur d'eau, le pompage/l'écumage pour ne citer que quelques exemples. Malgré leur succès dans certaines applications, ces méthodes peuvent être très coûteuses et ne sont pas pratiques si l'accès aux zones contaminées est difficile (en dessous d'un bâtiment par exemple), si la quantité à traiter est très importante ou si le sol est de composition hétérogène (perméabilités variables).

Le traitement des sols pollués par désorption thermique GTR™<sup>[2]</sup> est une nouvelle méthode innovante et durable, inventée par Jan Haemers et Hatem Saadaoui.

Comme pour les traitements par désorption thermique conventionnels, les terres contaminées sont d'abord chauffées à une température suffisante pour que les polluants volatils et semi-volatils s'évaporent (phase de désorption). Ces polluants, une fois en phase vapeur, sont extraits par aspiration (utilisation d'un système d'extraction SVE ad hoc) et font l'objet d'un traitement : incinération directe dans le brûleur GTR™ ou récupération par condensation sous forme de produits.

Le procédé GTR™ représente la dernière génération de traitement par désorption thermique on site et in situ. Il est basé sur deux principes fondamentaux :

- Le sol est chauffé par conduction, ce qui permet de s'affranchir des hétérogénéités inhérentes au sous-sol.
- Les polluants contenus dans les terres sont soit récupérés et recyclés, soit réutilisés comme source de chaleur, contribuant très favorablement au bilan énergétique du procédé.

Cette technologie peut être considérée comme étant la plus économe en énergie de toutes les techniques actuellement proposées en matière de désorption thermique (in situ, on site ou off site).

La technologie GTR™ a été conçue pour pouvoir être appliquée in-situ (sans bouger les terres contaminées / ISTD) ou ex-site (excavation des terres suivi d'un traitement sur site ou hors site / ESTD). Le chauffage des terres s'effectue par conduction, laquelle est peu influencée par l'hétérogénéité du sol (absence de chemins préférentiels). Le procédé garantit donc un résultat optimal du traitement (pas de pollution résiduelle).

---

<sup>1</sup> Soil Vapour Extraction

<sup>2</sup> Gas Thermal Remediation



## 2. PROCÉDE

---

### 2.1. Principe général

Le procédé GTR™ est basé sur les mêmes principes que la désorption thermique conventionnelle, à savoir un traitement en deux phases :

- 1) Evaporation des polluants organiques contenus dans la matrice minérale (i.e. le sol), principalement par élévation de la température et transfert de ces polluants en phase vapeur ;
- 2) Extraction et traitement des polluants contenus dans cette phase vapeur, soit par combustion (transformation en CO<sub>2</sub> et en H<sub>2</sub>O), soit par condensation et adsorption sur charbon actif.

Ces principes, appliqués dans tous les procédés de désorption thermique, sont mis en œuvre par GTR™ de manière très spécifique, ce qui permet de garantir non seulement un matériau totalement propre mais aussi une consommation énergétique minimale et une très forte réduction des autres impacts environnementaux.

### 2.2. Principe de traitement

Le procédé consiste d'abord à placer, selon un maillage ad hoc, un réseau d'éléments chauffants dans la masse de terres polluées à traiter, excavées ou non. Ces éléments chauffant sont constitués de 2 tubes coaxiaux en acier muni d'un brûleur ainsi que d'un tube supplémentaire perforé. Lors du fonctionnement de l'installation, les tubes coaxiaux (éléments chauffants) sont parcourus par des gaz à haute température (700-750°C), résultant de la combustion de propane ou de méthane avec un excès d'oxygène, en provenance du brûleur.

Ces gaz circulent dans les tubes coaxiaux et transmettent leur chaleur par conduction au sol sans jamais y pénétrer : les gaz chauffants restent à l'intérieur des tubes. Ce transfert de chaleur au sol par conduction provoque la vaporisation des polluants volatils et semi-volatils. Un schéma de principe de la technologie GTR™ est présenté à la Figure 1.

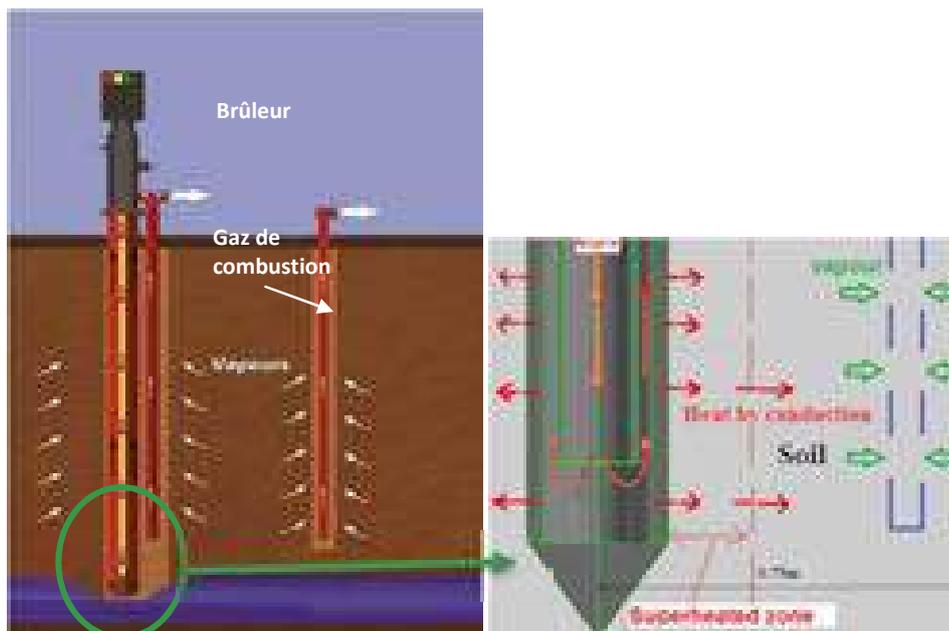
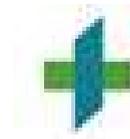


Figure 1- GTR™: Schéma de principe

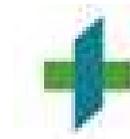
Les polluants sont désorbés grâce à la montée progressive en température de la masse de terres polluées. Ils migrent vers les tubes perforés mis en dépression et sont collectés à la surface. Ce transfert se fait par diffusion et convection. En surface, ces flux sont soit dirigés vers la flamme du brûleur (pour les polluants combustibles), soit acheminés vers une unité de traitement ad hoc. Lorsque les polluants sont combustibles et constitués uniquement des atomes suivants : carbone, hydrogène, oxygène, azote, tels que les hydrocarbures, HAP, etc. ; Ces gaz aspirés du sol vont ainsi contribuer positivement au bilan énergétique du système mis en place.

Dans ce cas, le dispositif est un circuit ouvert physiquement et fermé énergétiquement, permettant de maintenir en permanence une combustion complète tout en garantissant un bilan énergétique optimal. La Figure 2 montre un brûleur utilisé dans le cadre de la technologie GTR™.



Figure 2- Brûleur

Contrairement aux dispositifs de désorption thermique classiques (réacteur, four...) où le temps de séjour du sol dans le four est d'environ 20 minutes, le temps de chauffage d'une installation GTR™ est de quelques semaines. En revanche, de plus grands volumes peuvent être traités en même temps, permettant ainsi d'obtenir des capacités mensuelles de traitement similaires voire supérieures au traitement classique.



Par ailleurs, la technologie étant particulièrement flexible, elle peut s'appliquer à pratiquement tous les volumes et toutes les configurations, allant de quelques tonnes à plusieurs dizaines de milliers de tonnes. Elle peut également traiter des terres avec des concentrations en polluants très élevées.

## 2.3. Traitement des polluants

Lorsque le polluant est composé uniquement des atomes suivants : Carbone, Hydrogène, Oxygène et Azote, le procédé GTR™ offre la possibilité d'utiliser la vapeur du polluant comme combustible et donc comme source secondaire de chaleur pour le chauffage du sol. Dans ce cas, la vapeur récupérée dans la zone couverte par chaque brûleur est réinjectée dans ce dernier, ce qui permet de réduire la consommation [<sup>3</sup>] en propane ou en gaz naturel et d'améliorer le rendement thermique du procédé. Ce mode de fonctionnement réduit aussi la taille et le coût de l'installation (absence de l'unité secondaire de traitement de vapeur).

Pour tous les autres types de polluants, l'extraction puis le traitement des vapeurs provenant du sol s'effectuent dans un circuit secondaire indépendant (unité SVE comme illustré en figure 3.). Ce circuit comprend les éléments suivants :

- une unité de refroidissement et de condensation des vapeurs;
- Des dévésiculeurs pour la séparation gaz/liquide;
- Des filtres pour gaz et eaux ; charbon actif ou tout autres adsorbons;
- Plusieurs réservoirs de stockage/décantation du condensat ;
- Des bacs de rétention.



Figure 3- Mise en œuvre ex-situ on site du procédé GTR™ : unité de chauffage et unité de traitement de la vapeur récupérée

<sup>3</sup> Cette réduction dépend de la concentration initiale du polluant dans le sol.



## 3. CHAUFFAGE DU SOL

### 3.1. Éléments chauffants

Le chauffage du sol s'effectue par le biais d'un réseau d'éléments chauffants. Ces éléments chauffants sont constitués de deux tubes en acier, coaxiaux, à l'intérieur desquels circulent des gaz chauds (le fluide caloporteur), produits par le brûleur.

**Ces gaz chauds restent toujours dans les tubes, sans jamais pénétrer dans le sol.** Il circule à l'intérieur des tubes et transmet la chaleur aux tubes eux-mêmes, puis au sol par conduction. Le chauffage des terres n'est donc aucunement dépendant des chemins préférentiels ni de l'hétérogénéité du sol en place. La chaleur propagée par conduction volatilise les polluants dans le sol. Une fois volatilisés, ceux-ci se dirigent vers les tubes d'extraction séparés grâce à la dépression créée en surface. Là, ils sont soit dirigés vers la flamme du brûleur, où ils sont détruits par oxydation complète (cas de polluants combustibles), soit dirigés vers une unité de traitement ad hoc en surface.

Le réseau d'éléments chauffants est placé en configuration triangulaire équilatérale (voir Figure 4). Cette configuration permet d'avoir un rayon d'action constant pour chaque élément chauffant et donc un temps de traitement prévisible pour l'ensemble de la zone.

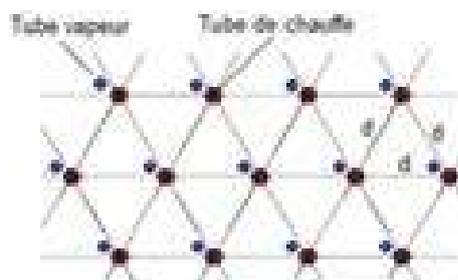


Figure 4- Configuration en triangle équilatéral (tubes chauffants / tubes vapeurs)

De plus, des géométries adaptées à la localisation exacte de la pollution peuvent être mises en œuvre.

Enfin, la technologie GTR™ permet d'adapter la longueur des tubes à la profondeur de la pollution ; les surfaces à traiter sont également variables.

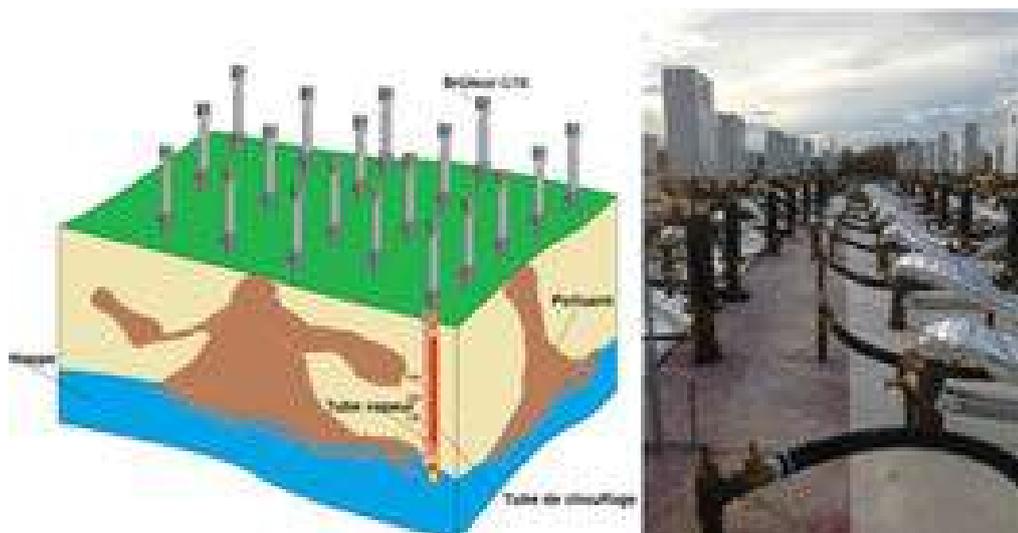
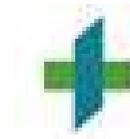


Figure 5- Disposition des éléments chauffants à équidistance l'un de l'autre sur des profondeurs variables

### 3.2. Brûleur GTR™

Le brûleur GTR™ constitue le cœur du procédé, il fournit l'énergie nécessaire au chauffage du sol. Il peut être alimenté en gaz (gaz naturel ou propane) ou en fioul liquide (mazout ou huiles diverses).

Le brûleur est composé de deux parties :

- Le boîtier de commande (partie supérieure comme illustré sur la Figure 6)
- la chambre de combustion en béton réfractaire.

Chaque élément chauffant est équipé d'un brûleur, fixé à son extrémité.

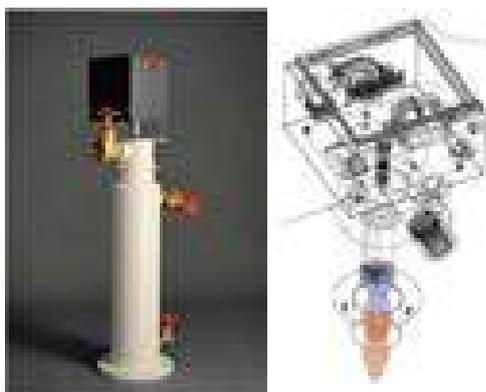
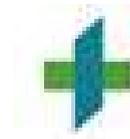


Figure 6- Brûleur GTR™

### 3.3. Mécanismes de chauffage

A l'entrée du tube de chauffage (après brûleur), la température du gaz avoisine les 700°C. A la sortie, la température du gaz est de l'ordre de 400°C (Voir Figure 7). Cette chute de température est due au transfert de la chaleur vers le sol, par **conduction**. Ce mécanisme est assez inhabituel en traitement in situ des sols,



étant donné que la plupart des mécanismes de transfert sont basés sur la diffusion ou la convection (déplacement physique d'un fluide caloporteur au sein de la masse de matériau contaminé).

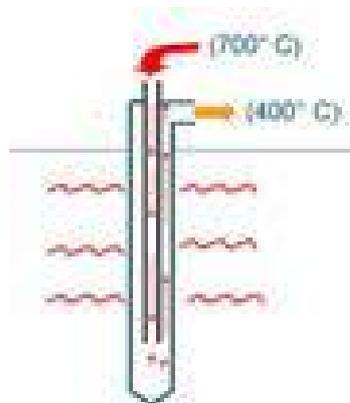


Figure 7- Circulation des gaz chauds dans le tube de chauffage

L'avantage principal de la conduction est que cette propriété n'est pratiquement pas dépendante du type de sol. En effet, la conductivité thermique d'un sable et d'un gravier varie d'un facteur 2 à 3 alors que la perméabilité à l'air par exemple entre ces matériaux varie d'un facteur 100.000 à 1.000.000.

Par conséquent, la durée requise pour atteindre les températures nécessaires à leur évaporation est aisément prévisible, ainsi que la qualité des matériaux après traitement, puisque ces éléments reposent sur des lois physiques claires (température, pression et temps de séjour).

### 3.4. Types de sols

**Le traitement GTR™ permet de traiter tout type de sol.**

Un sol est généralement constitué d'argile, de limon, de sable ou de graviers et cailloux. Ces différents types de sols peuvent être classés en fonction de leur granulométrie, laquelle se base sur le diamètre des particules permet de classer les différents types de sols (voir Figure 8). On distingue ainsi les sols argileux des sols limoneux ou sableux. Les sols sont par ailleurs caractérisés par différentes propriétés : densité, taux d'humidité, indices des vides (porosité), limite plastique, perméabilité, etc.

Suivant que le sol contient de l'argile, du sable et/ou du limon, il sera plus ou moins perméable, comme le montre la Figure 8.



Figure 8- Corrélation entre le type de sol et la perméabilité

Par ailleurs, les sols ont chacun leur humidité propre qui dépend de l’endroit où ils se trouvent. Cette humidité influence fortement leur temps de chauffage puisqu’avant de pouvoir élever la température au-delà de 100°C, il faut évaporer l’eau du sol. C’est pourquoi, dans un profil typique de température lors du chauffage d’un sol par traitement GTR™, on constate un palier plus ou moins long à 100°C.

Le traitement GTR™ par conduction thermique à des températures modérées ( $T < 400^\circ\text{C}$ ) est une solution prometteuse pour les différents cas possibles de contamination des sols et de la nappe. L’équation (1) donne le flux de chaleur par conduction thermique. Ce flux est proportionnel à la conductivité thermique du matériau. Comme le montre le Tableau 1, la valeur de la conductivité thermique est du même ordre de grandeur quel que soit le sol; tandis que la perméabilité varie fortement.

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

Sol	Conductivité thermique, $\lambda$ [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Perméabilité, K [m/s]
Argile sèche	0.4	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-14</sup>
Sable sec	0.5	10 <sup>-2</sup> -10 <sup>-5</sup>

Tableau 1- Propriétés physiques de quelques sols

La perméabilité d’un sol peut être réduite d’un facteur de 1/1 000 000 en passant d’un horizon sableux à un horizon argileux alors que la conductivité thermique ne varie que de trop peu (d’un facteur de 4 au maximum). Dans ces conditions, seul un chauffage par conduction permet d’atteindre de façon homogène l’ensemble d’une zone contaminée.

### 3.5. Evolution de la température du sol

Lors du chauffage par GTR™, la température du sol augmente à partir de 10-12°C jusqu’à la température requise pour obtenir l’évaporation complète des polluants, en passant par un palier à 100°C dû à



l'évaporation de l'eau contenue dans le sol. La température de traitement (TT) à atteindre dépend du type de polluants et du temps de séjour prévu, en fonction des caractéristiques du projet et des objectifs de traitement à atteindre. La Figure 9 représente l'évolution typique théorique de la température dans le sol en fonction du temps, tandis que la Figure 10 représente l'évolution de la température réelle, mesurée dans le sol au cours d'un projet in situ réalisé à Bruxelles.

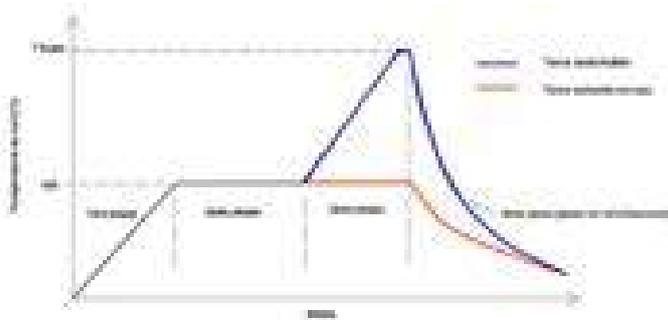


Figure 9- Evolution théorique de la température dans le sol (zone vadose avec quantité d'eau limitée/alimentation continue en eau)

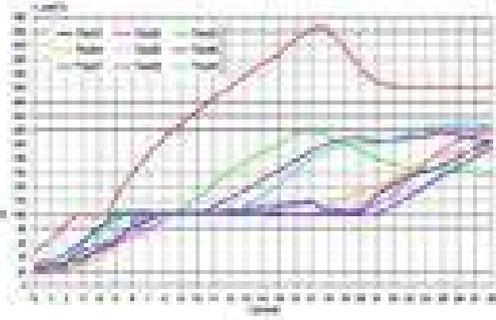


Figure 10- Evolution réelle de la température pour un projet in situ (Bruxelles)

Quand la quantité d'eau présente dans le sol est limitée (pas de nappe phréatique), on peut clairement distinguer les trois phases de chauffage :

- 1) Elévation de la température jusqu'à la température d'ébullition de l'eau (100°C) ;
- 2) Evaporation de l'eau (stable à 100°C) ;
- 3) Elévation de la température jusqu'à la température requise pour obtenir l'évaporation complète des polluants.

Au cours de la première phase, le sol et les liquides qu'il contient (eau et polluants) sont chauffés jusqu'à la température d'ébullition de l'eau. Le temps requis pour cette phase varie légèrement en fonction du type de sol.

Pendant la deuxième phase, la température du sol reste aux environs de 100°C afin de permettre le séchage complet du sol. La vitesse à laquelle l'interface liquide/vapeur de l'eau progresse dépend principalement de la quantité d'eau présente dans le sol au départ et de la puissance de chauffe. Lorsque toute l'eau est vaporisée, la température du sol monte rapidement au-delà de 100°C.

Durant la troisième phase, les polluants se volatilisent progressivement et sont dirigés vers les tubes perforés de collecte. Par la suite, le traitement est adapté en fonction de la nature du polluant (combustion, condensation, traitement sur charbon actif...).

Grâce à la zone à haute perméabilité formée autour des tubes perforés suite au séchage thermique du sol, les vapeurs sont conduites aisément vers ces tubes.

La Figure 11 représente les températures typiques de gaz et de sol à la fin de la phase 3 :

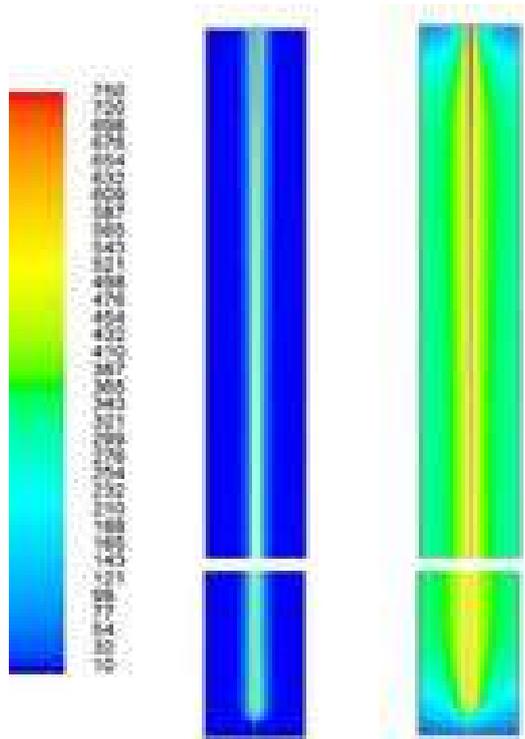


Figure 11- Températures (°C) typiques gaz et sol au début et vers la fin de la phase 3

La figure suivante donne le champ de température du sol après 32 jours de chauffage et avec une distance d entre tubes de 3m.

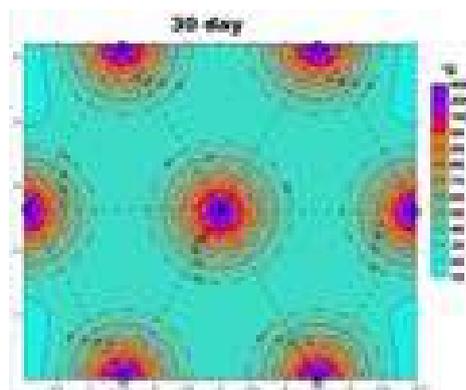
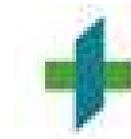


Figure 12- Champ de température après 30 jours de chauffage (distance entre tubes d=3m)

En présence d'une quantité importante d'eau (nappe phréatique par exemple) et à cause de la production d'une quantité importante de vapeur d'eau, la température du sol se stabilise à 100°C. Dans ce cas, le traitement s'effectue en deux phases seulement.

La température cible pour chaque polluant est définie sur base d'une étude cinétique ad-hoc. Le Tableau 2 reprend à titre d'exemple les ordres de grandeur de température cible en fonction du type de polluant.



Polluant	Température cible (°C)
COV : BTEX (Benzène, Toluène...) et solvants chlorés (PCE, TCE,...)	80-100
Essence	100-150
Diesel	200-250
Huiles Moteurs, PCB	250-350

Tableau 2- Températures cibles par type de polluant

### 3.6. Bilan énergétique et temps de traitement

L'exigence minimale d'énergie pour chauffer un sol est indépendante de la technique retenue et basée uniquement sur les caractéristiques du sol. Par exemple, les besoins minimaux en énergie pour chauffer de 10°C à 300°C un mètre cube de terre dans la zone vadose, avec une porosité de 35%, une densité de 1,8 tonnes/m<sup>3</sup> et une teneur en humidité de 15% sont de : 1.22 10<sup>9</sup> J/m<sup>3</sup>.

Calcul selon l'équation 2 :

$$E_{sol} = [(m_{sol}C_{p,sol}\Delta T_{sol}) + (m_{eau}C_{p,eau}\Delta T_{eau}) + (m_{eau}\Delta H_{eau})] \times \rho_{sol} \quad (2)$$

Avec,  $E_{sol}$  [Joules/m<sup>3</sup>] est l'énergie nécessaire pour chauffer le sol de la température initiale ( $T_i$ ) à la température de traitement ( $TT$ ).



Quantité	Définition	Unité	Valeur utilisée	Formule 1	Formule 2
$V_{sol}$	Volume du sol	m <sup>3</sup>	1	—	$m_{sol} C_{p,sol} \Delta T_{sol}$
$f_{sol}$	Porosité du sol		0,15	$\frac{V_{eau}}{V_{sol}}$	
$m_{eau}$	Fraction massique de l'eau		0,15	$\frac{M_{eau}}{M_{particules\ solides}}$	
$D_{sol}$	Densité effective du sol	kg/m <sup>3</sup>	1800	$\frac{M_{sol}}{V_{sol}}$	
$m_{sol}$	Masse du sol	kg		$\frac{D_{sol} \times V_{sol}}{1 + m_{eau}}$	
$C_{p,sol}$	Capacité calorifique des particules solides (sol, sable)	J/kg°C	860	—	
$\Delta T_{sol}$	Différence de température (TT-T)	°C or °K	290	—	
$m_{eau}$	Masse initiale de l'eau dans le sol	kg		$\frac{D_{sol} \times V_{sol} \times m_{eau}}{1 + m_{eau}}$	$m_{eau} C_{p,eau} \Delta T_{eau}$
$C_{p,eau}$	Capacité calorifique de l'eau (H <sub>2</sub> O)	J/kg°C	4180	—	
$\Delta T_{eau}$	Différence de température (T <sub>eau</sub> -T)	°C or °K	90	—	
$\Delta H_{eau}$	Chaleur latente d'évaporation de l'eau	kJ/kg	2260	—	$m_{eau} \Delta H_{eau}$

Tableau 3- Estimation de la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer un sol d'une température initiale à la température du traitement, TT.

La même équation peut être utilisée pour les sols saturés. Dans ce cas, l'énergie nécessaire pour chauffer le sol augmente. Pour le même type de sol décrit plus haut, une augmentation du taux d'humidité d'environ 50% nécessite une quantité minimale d'énergie par mètre cube de terre et sans perte d'énergie de 1.55E 10<sup>9</sup> J/m<sup>3</sup> pour faire passer le sol de 10°C à 300°C.

Le temps de chauffage du sol est lié au nombre de tubes de chauffe et à la puissance injectée dans le sol. Par exemple, pour un sol avec une teneur en eau de 15% massique, et pour atteindre la température de 300°C, avec une distance entre tubes d=1,75 m (voir Figure 13) et une puissance injectée de P<sub>/m</sub>= 1000 W/m (valeur moyenne de la chaleur injectée par mètre de longueur de tube de chauffage) avec des pertes de chaleur vers l'extérieur de PT=20%, le temps de chauffage serait de 42 jours.

$$\text{temps de chauffage (jours)} = \frac{E_{sol} \times \left( \frac{\pi \times 1.75^2}{4} \times 1 \right)}{P_{/m} \times (1 - PT/100) \times 3600 \times 24} \quad (3)$$



Avec,  $V_{\text{sol}/m} = \frac{\pi \times 1.75^2}{4} \times 1$  est le volume du sol autour d'un tube de chauffage de longueur 1m (distance entre tubes,  $d=1,75$  m).

La Figure 13 représente la relation entre la durée de chauffage et la distance entre les tubes, pour un sable contenant 12% d'eau et 1% d'HCT et différentes températures au point froid à atteindre. La puissance de chauffe est de 2000 W/m de tube.

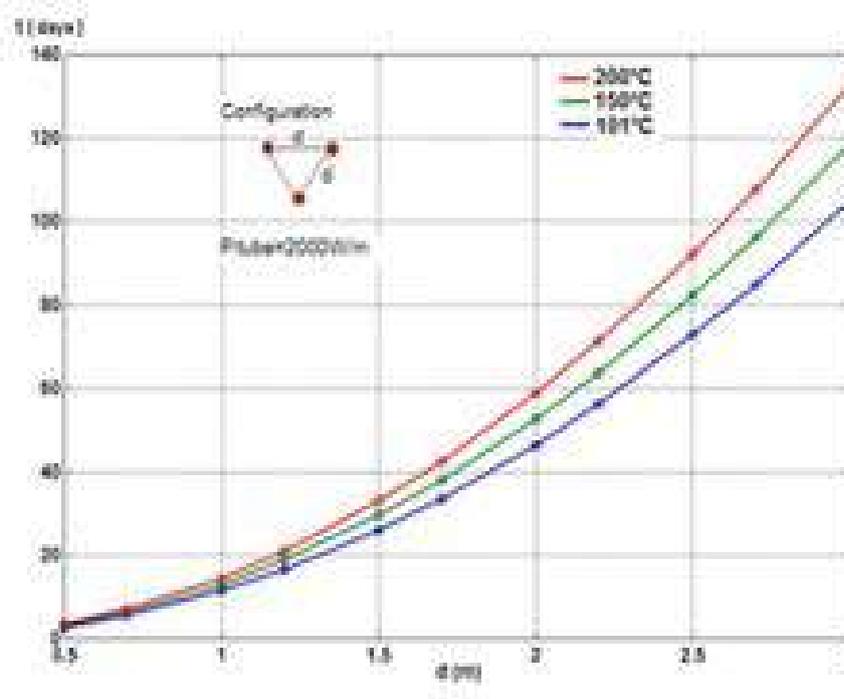


Figure 13- Durée de chauffe en fonction de la distance entre les éléments chauffants

La distance entre les tubes sera donc déterminée en fonction des contraintes du projet (durée imposée, coûts de l'énergie, coût du forage etc.).

## 3.7. Comportement du sol pendant le chauffage

### 3.7.a. Stabilité

La mise en place de plusieurs tubes métalliques épais dans le sol à la profondeur du traitement lors de la mise en œuvre du procédé GTR™ in-situ génère naturellement un renforcement de la stabilité du sol.

En fin de traitement GTR™ in situ, les tubes peuvent être utilisés en tant qu'installation de géothermie (stockage chaud/froid) mais également en tant que pieux creux pour la construction d'un nouveau bâtiment.



Ainsi, les installations de dépollution GTR™ permettent le cas échéant d'économiser à la fois des coûts d'investissement (pieux) et d'énergie (géothermie), tout en réduisant fortement l'impact CO<sub>2</sub> de la dépollution.

### 3.7.b. Séchage des argiles

Lors du chauffage (séchage) d'un sol argileux, la vitesse et le temps nécessaire à l'évaporation de l'eau dépendent de différents facteurs comme la température, l'humidité relative, l'aspiration du sol, la taille des pores, l'épaisseur de la couche... Lors du séchage, la teneur en eau du sol diminue linéairement dans un premier temps et finalement se stabilise, montrant que la vitesse d'évaporation de l'eau est approximativement constante pour tous les éléments au début du séchage et ensuite devient plus lente après un certain temps pour finalement atteindre zéro puisque :

- 1) La disponibilité en eau des composants du sol diminue avec le temps
- 2) L'importante aspiration développée lie les molécules d'eau et les empêche de s'échapper vers l'atmosphère
- 3) Le gradient de pression de vapeur à travers l'interface sol-air diminue avec le séchage.

A la stabilisation, la teneur en eau restante dans un sol chauffé à basse température est plus importante que celle d'un sol chauffé à plus haute température (i.e. à un peu plus de 100°C, température d'évaporation de l'eau).

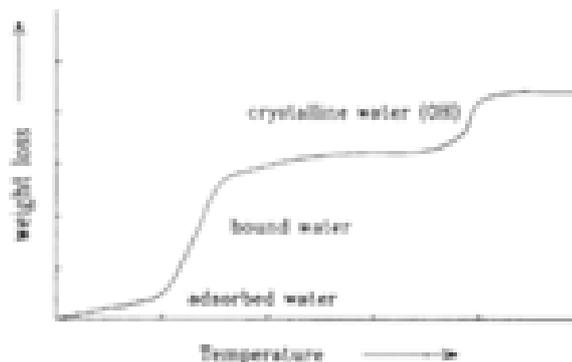


Figure 14- Perte en poids durant le chauffage d'une argile

L'aspiration capillaire créée lors du chauffage du sol engendre un premier réarrangement des particules du sol et donc des changements de volumes significatifs : la couche d'argile subit un rétrécissement. Lorsque le sol atteint sa limite de rétrécissement, les particules ont quasiment atteint leur configuration la plus dense (stabilisation) et le volume interstitiel ne varie plus avec la perte en eau. Pendant l'évaporation de l'eau, l'air commence à entrer dans les couches du sol plus éloignées des tubes de chauffage. Chaque particule de la couche de surface subit alors une contrainte de traction induite par le développement de l'aspiration capillaire. Cette contrainte augmente encore au moment de l'évaporation de l'eau.

Lorsque les contraintes de traction imposées par l'aspiration capillaire aux particules excèdent la résistance à la traction, le sol craque. La fissuration de la couche d'argile démarre près des tubes de chauffage puis se propage plus loin dans le sol.

La surface de craquement augmente rapidement si la teneur en eau diminue fortement au début de la fissuration. La surface de fissuration est donc plus importante à haute température pour une teneur en eau donnée et on observe une proportion finale de vide plus importante (voir Figure 15).

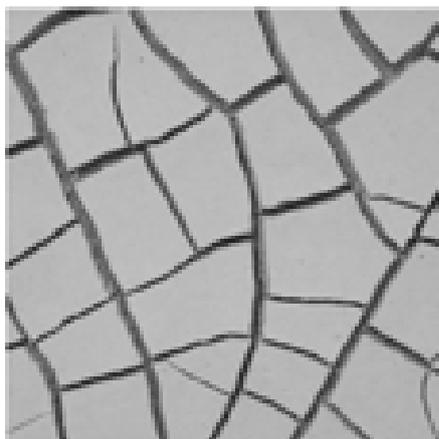
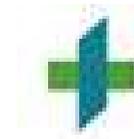


Figure 15- Fissures de l'argile après séchage (TANG, et al., 2010)

La présence de fissures change les propriétés de la surface du sol et modifie la façon dont l'eau peut s'infiltrer ou s'évaporer.

### 3.7.c. Aspect du sol après traitement

Au cours du traitement thermique d'un sol en présence d'hydrocarbures, on distingue deux étapes principales :

1. la phase de séchage qui permet de vaporiser l'humidité contenue dans le sol sans décomposition chimique des hydrocarbures ;
2. la pyrolyse qui transforme ces composés en un mélange de gaz et de coke (dépôt de carbone solide). La pyrolyse est une réaction de décomposition chimique provoquée par une élévation de la température en absence d'agent oxydant (air, O<sub>2</sub>).

Le gaz issu de la pyrolyse est composé essentiellement de deux grandes catégories : les gaz incondensables et les gaz condensables. La composition exacte des gaz incondensables dépend du type du produit initial, mais il s'agit essentiellement de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>, tandis que les gaz condensables sont composés de composés plus lourds. Les produits lourds sont à leur tour craqués en gaz combustibles légers à plus haute température (Loison et al, 1970 [4]).

### Décomposition thermique en absence d'agent oxydant (air ou O<sub>2</sub>)

Principaux paramètres opérationnels pour le processus de pyrolyse

	Pyrolyse lente	Pyrolyse rapide	Pyrolyse Flash
Température de pyrolyse (°C)	300-700	600-1000	800-1000

Tableau 4- Températures de pyrolyse

<sup>4</sup> Loison R., Foch P. et Boyer A., "Le coke", Dunod, (1970).



En absence d'O<sub>2</sub> due à la faible perméabilité du sol, la réaction de décomposition (pyrolyse) se met en œuvre de la manière suivante :

- dès le début du traitement, à une température de l'ordre de 300°C dans la partie du sol situé autour des tubes chauffants
- puis, avec la montée en température, dans la masse du sol.

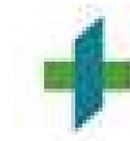
Sachant que le chauffage est lent, la décomposition s'opère sur plusieurs jours voir plusieurs semaines et conduit à la formation des composés légers et au dépôt de carbone sous forme solide dans le sol (coke). En fin du traitement, on obtient un sol de couleur noirâtre comme le montre la photo suivante (voir Figure 16).



A titre d'exemple, prenons un site situé à Bruxelles :

- concentration initiale de 6% massique en carbone, pour un mélange de matière végétale et d'hydrocarbures C10-C40
- traitement à 250°C pendant 3 jours
- Analyses après traitement GTR™ : concentration en carbone total de l'ordre de 2% massique. (Voir Tableau 5).

Échantillon	E1 (initial) ; Avant traitement thermique	E2 (final) ; Après traitement thermique à 250°C pendant 3 jours
Analyse		
Humidité (% mass.)	3,8	<0,1
C10-C20	8336	<25
C20-C30	6915	<25

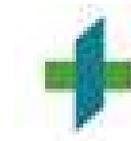


<b>C30-C40</b>	2590	<25
<b>C40-C60</b>	<25	<25
<b>C10-C60 (mg/kg-ms)</b>	17841	<100
<b>COT<sup>[5]</sup> (% mass. MS) Carbone totale</b>	<b>5,3</b>	<b>2</b>

Tableau 5- Exemple d'un projet réalisé : dépôt de carbone dans le sol après traitement thermique à 250°C pendant 3 jours.

---

5 Analyses effectuées par le laboratoire Eurofins. La méthode utilisée pour déterminer le carbone total est la CMA/2/II/A.7 (COT par voie Humide).



## 4. TRAITEMENT DES POLLUANTS

---

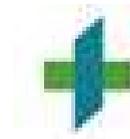
### 4.1. Applications

#### 4.1.a. Types de polluants traités par le procédé GTR™

Le procédé GTR™ peut traiter efficacement tout polluant de la liste ci-dessous :

- Polychlorobiphényles (PCB), Polychlorodibenzo-p-dioxines et furanes (PCDD/F), plus connus sous le nom de dioxines ;
- Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), souvent présents dans la créosote dans l'industrie du bois et du charbon, ainsi que dans les anciennes usines gaz ;
- Solvants chlorés tels que le trichloréthylène (TCE), le tétrachloroéthylène (PCE)... ;
- Autres hydrocarbures halogènes ;
- Pesticides et herbicides ;
- Pétrole et produits dérivés du pétrole tels que le benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes (BTEX) et le méthyl tertio-béthyl éther (MTBE) ;
- Tout autre composé volatil et semi-volatil ;
- NAPL (Non-Aqueous Phase Liquids) lourds (DNAPL) et légers (LNAPL) ;
- Tout autre composé organique ;
- Tout autre composé non organique dont le point d'ébullition est inférieur à 550°C : mercure, cyanure, composés de soufre et de chlore, etc.

On trouvera dans le Tableau 6 ci-dessous les températures d'ébullition (à pression atmosphérique) de la plupart des polluants pour lesquels la désorption thermique GTR™ peut s'appliquer.



Température d'ébullition de certains contaminants	
<b>HAP</b>	
Naphtalène	218 °C
Acénaphylène	290 °C
Acénaphlène	379 °C
Fluorène	295 °C
Phénanthrène	340 °C
Anthracène	342 °C
Fluoranthène	375 °C
Pyriène	363 °C
Benzofluoranthène	482 °C
Chrysen	490 °C
Benzofluoranthène	490 °C
Benzofluoranthène	490 °C
Benzopyrène	571 °C
Benzofluoranthène	580 °C
Indeno[1,2,3-c]pyrène	630 °C
<b>Hydrocarbures</b>	
Essence	221 °C
Diesel	343 °C
Ffuel lourd	440 °C
<b>Autres</b>	
PCB	<360 °C
Phénols	310 °C
THF	300 °C
Cyanide	470 °C
Mercur	320 °C
Sulfure	414 °C
Solvants chlorés	60 °C

Tableau 6- Températures d'ébullition des principaux polluants à pression atmosphérique

#### 4.1.b. Les hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des molécules composées principalement d'hydrogène et de carbone. Leurs températures d'évaporation varient en fonction du nombre d'atomes de carbone qui les composent. Comme règle de base, on peut appliquer le fait que plus l'hydrocarbure possède d'atomes de carbone (on parle d'hydrocarbures plus « lourds »), plus sa température d'évaporation n'est élevée. Les hydrocarbures présents dans les sols pollués vont donc se comporter différemment en fonction de leur poids moléculaire. Plus celui-ci sera élevé, plus la température et/ou le temps de séjour devront être élevés afin de les évaporer.

Parmi les hydrocarbures, on distingue notamment les hydrocarbures aliphatiques, les hydrocarbures mono-aromatiques et les hydrocarbures poly-aromatiques. Les premiers et les seconds se rencontrent souvent dans le cadre de pollutions provenant d'activités liées à des produits issus du pétrole. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) se retrouvent quant à eux le plus souvent dans le cadre de pollutions liées à des produits issus du charbon.

Les hydrocarbures se volatilisent au cours du processus de désorption thermique (procédé GTR™) et de manière générale sont traités dans la flamme du brûleur. Là, en présence d'un excès d'oxygène, ils sont oxydés et dégagent de l'énergie, du CO<sub>2</sub> et de l'H<sub>2</sub>O.



Dans les cas où l'hydrocarbure comporte d'autres éléments que l'hydrogène et le carbone (ex. atome de chlore ou de soufre), le traitement se fait sur un circuit indépendant du brûleur et l'hydrocarbure ne peut être incinéré.

Pour illustration, le tableau suivant montre les résultats obtenus pour un chantier à Bruxelles après dépollution avec la technologie GTR™. Le sol de ce site était contaminé par des hydrocarbures (fioul de chauffage).

Profondeur	0,5	1,5	2,3	3,5	4,5	7,1
Avant (mg/kg)	12.000	15.000	11.700	8.500	8.900	11.800
Après (mg/kg)	< 36	100	150	<36	<50	<50
Objectif	300	300	300	300	300	300
Valid.	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Tableau 7- Concentrations avant et après traitement pour un chantier in situ à Bruxelles

#### 4.1.c. Les polluants autres que les hydrocarbures

D'autres polluants peuvent être présents dans le sol (ex. composés de soufre, de chlore ou de mercure) ; le procédé GTR™ permet également de traiter ces composés.

Par exemple :

- les polluants organiques halogénés (solvants chlorés, PCB, dioxines, furanes, pesticides, etc.)
- les polluants inorganiques traitables, tels le cyanure ou le mercure,
- tout polluant dont le point d'ébullition est inférieur à 550°C.

Les vapeurs de ces polluants font l'objet d'un traitement ad hoc, soit par condensation, soit par adsorption. Il convient d'y apporter une attention particulière afin de ne pas rejeter dans l'atmosphère des éléments polluants.

Certains polluants inorganiques traitables, tels que le cyanure ou le mercure demandent un traitement adapté :

- Les cyanures désorbent très bien (selon les complexes, les températures d'ébullition varient de 300°C à 420°C). Dans la flamme du brûleur, les complexes cyanurés s'oxydent en dioxyde de carbone et en oxydes d'azote. Ces derniers devront être suivis minutieusement afin de s'assurer que leurs concentrations dans les gaz de rejet ne dépassent pas les valeurs limites, sans quoi il convient là aussi de mettre en place un traitement ad hoc.
- Le cas du mercure est tout à fait particulier : si le mercure désorbe sans problème (ses températures d'ébullition varient selon les formes sans jamais dépasser 550°C), il se dépose toutefois dans tout le circuit pendant le traitement, ce qui requiert des unités dédiées et spécifiques.





Huile moteur	Viscosité cinématique ( $\times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ )			
	-17,8°C	0°C	37,8°C	89°C
10W	560	178,5	18,13	1,62
10W	750	240,5	24,60	2,17
10W/20	800	---	26,94	2,35
10W/20	800	---	24,12	2,16
10W/30	1700	---	69,83	12,11
10W/30	2100	---	75,56	13,23
10W*	2500	399	29,73	4,39
10W*	1420	318,8	34,81	5,55
10W/40	2500	---	80,24	12,87
10W/50	6000	---	125,31	18,39
10W*	8500	753,2	51,87	8,68
10W*	8800	714,1	48,11	7,91

Tableau 8- Effet de la température sur la viscosité cinématique des huiles moteur [7]

### 4.3. Mécanismes physiques et chimiques durant le chauffage du sol

#### 4.3.a. Principaux mécanismes de traitement thermique

Pendant le traitement, avec l'augmentation de la température du sol, le polluant sous forme liquide ou solide se transforme par ébullition, par évaporation dans l'air, ou par entraînement à la vapeur d'eau. Dans la zone à haute température (près des tubes chauffants ; épaisseur quelques cm), des réactions de destruction sont mises en œuvre (Hydrolyse/Pyrolyse/Oxydation).

#### Pour $T \leq 100^\circ\text{C}$

- Évaporation
- Traitement à la vapeur d'eau
- Ébullition (pour certains polluants avec  $T_{éb} < 100^\circ\text{C}$ )

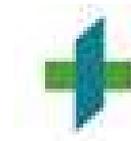
#### Pour $T > 100^\circ\text{C}$

- Ébullition
- Pyrolyse
- Hydrolyse
- Oxydation

En présence de la nappe, le chauffage du sol peut conduire aussi au rabattement de la nappe tout près des tubes, favorisant ainsi l'acheminement de la couche flottante (DNAPL<sup>[8]</sup>) vers la zone de destruction.

<sup>7</sup> B. Partington and al. The effect of lubricants on the starting ability of automobile engines

<sup>8</sup> Light Non-Aqueous Phase Liquid



### 4.3.b. Réactions chimiques dans le sol en présence de vapeur d'eau

Les réactions suivantes explicitent les différents mécanismes mis en œuvre dans le sol pendant le traitement d'un hydrocarbure :

- **Craquage (Cracking) ou pyrolyse et formation de carbone solide (coke):**



- **Vaporéformage (Steam reforming)<sup>[9]</sup>:**



- **Oxydation partielle (Partial oxydation) <sup>[10]</sup> :**



- **Oxydation (oxydation) :**



- **Reformage à sec (Dry reforming):**



$C_nH_x$  représente l'hydrocarbure (huile moteur, mazout, essence,...)

La première réaction est bien visible sur un sol traité : en raison du dépôt du carbone solide sur les grains, la couleur change d'un sol clair à un sol noirâtre en fin du traitement. **Le carbone solide est inerte et ne présente aucun danger pour l'environnement.**

Excepté le charbon (coke), produit de pyrolyse, qui se dépose sur les grains solides du sol, les autres produits des réactions (5-9), sont plus volatils que les composés originaux et plus faciles à extraire par aspiration hors du sol.

---

<sup>9</sup> Réaction entre un hydrocarbure et de la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), produisant de l'hydrogène (H<sub>2</sub>) et du monoxyde de carbone (CO). Le vaporéformage consomme de l'énergie (réaction endothermique).

<sup>10</sup> Réaction d'un hydrocarbure avec l'oxygène (O<sub>2</sub>), générant hydrogène et monoxyde de carbone. Cette réaction génère moins d'hydrogène que le vaporéformage, où l'eau participe à la production d'hydrogène. En revanche, l'oxydation dégage de la chaleur (réaction exothermique).



### 4.3.c. Entraînement du polluant par la vapeur d'eau

En raison du poids moléculaire de l'eau, la vapeur d'eau est un évaporant plus efficace que l'air pour les composés organiques.

Au fur et à mesure que la température grimpe jusqu'au point d'ébullition du mélange, l'entraînement par la vapeur des composés non-miscibles se produit.

Ce mécanisme de traitement consiste en un simple lavage des grains solides par la vapeur d'eau. La Figure 18 montre l'acheminement de la vapeur d'eau et l'évaporation du polluant, le perchloroéthylène (PCE).

Ce mécanisme très énergivore nécessite la présence d'une quantité initiale importante d'eau dans le sol.

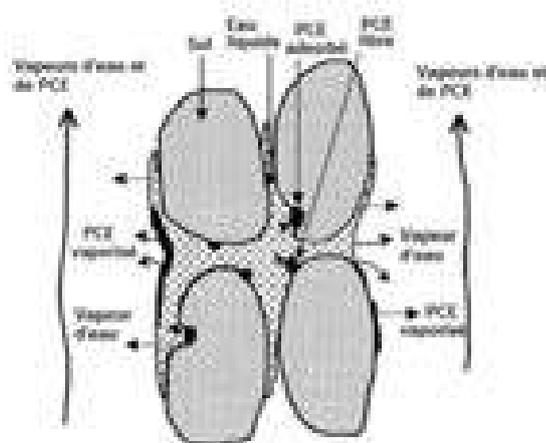


Figure 18- Transfert de masse entre phase liquide et phase gazeuse du PCE et de l'eau

La quantité du polluant présente dans la phase vapeur est déterminée de la manière suivante :

Pour les liquides non-miscibles la fraction massique d'un composé en phase vapeur est donnée par l'expression suivante :

$$y_i = \frac{1}{1 + \frac{M_i P_i^0}{M_i P_i^0} + \dots + \frac{M_{i-1} P_{i-1}^0}{M_i P_i^0} + \frac{M_{i+1} P_{i+1}^0}{M_i P_i^0} + \dots + \frac{M_N P_N^0}{M_i P_i^0}} \quad (10)$$

La pression partielle (ou de saturation),  $P_i^0$ , d'un composant est donnée par la loi de Clapeyron :

$$\ln P_i^0 = A_i + \frac{B_i}{C_i + T} \quad (11)$$

$A_i$ ,  $B_i$  et  $C_i$  sont des constantes.



Pour un mélange binaire (par exemple  $C_xH_y$ /Eau), la fraction massique du composé organique en phase vapeur est donnée par la relation suivante:

$$y_{C_xH_y} = \frac{1}{1 + \frac{M_{eau} P_{eau}^0}{M_{C_xH_y} P_{C_xH_y}^0}} \quad (12)$$

Le tableau suivant donne les fractions massiques du mélange azéotrope eau/PCE à 88.5°C et à pression atmosphérique.

Mélange	$T_{éb\_C2Cl4}$ (°C) à 1atm	$M_{C2Cl4}$ (g/mole)	$T_{éb-m}$ (°C)	$Y_{C2Cl4}$
Perchloroéthylène ; PCE ( $C_2Cl_4$ ) / Eau	121	165.83	88.5	0.83

Tableau 9- Fraction massique en phase vapeur et température d'ébullition du mélange Eau/PCE.

Pour les composés miscibles la pression partielle d'un composé dépend de sa fraction molaire en phase liquide (loi de Raoult).

#### 4.4. Traitement GTR™ des zones saturées

Les NAPL (Non-Aqueous Phase Liquids), tels que les produits pétroliers et les solvants organiques volatils, sont les principaux polluants de l'air, du sol et des eaux souterraines. La pollution du sol par ces produits est généralement accidentelle et provient de plusieurs sources : fuites de réservoir et de tuyauterie de stockage extérieure ou souterraine, flaques d'huile, dépôts des déchets chimiques.

Une fois présents dans le sol, ces polluants non aqueux (NAPL<sup>[11]</sup>) tendent à se déplacer en profondeur par gravité en laissant dans leurs sillages des quantités dans la matrice du sol. La concentration maximale atteinte (dépendant de la nature du sol) est définie sous le nom de saturation résiduelle (Power & Abriola, 1992 ; Mayer & Miller, 1992). Une couche flottante apparaît lorsqu'une certaine quantité de polluant plus légère que l'eau (LNAPL<sup>[12]</sup>) atteint les eaux souterraines. Le liquide s'accumule alors dans la zone capillaire, juste au-dessus du niveau supérieur de la nappe. La couche flottante (ou surnageante) se forme lorsque cette accumulation atteint une valeur critique. Due à la fluctuation de la nappe sur une saison, une partie du LNAPL est piégée sous forme de poches séparées et immobiles dans la zone saturée.

Dans le cas d'un polluant plus dense que l'eau (DNAPL<sup>[13]</sup>), celui-ci continue son chemin dans la nappe phréatique, en laissant dans son sillage des quantités résiduelles dans l'eau (voir Figure 19). Le déplacement vers le bas continue alors jusqu'à rétention totale du polluant dans la matrice du sol.

Selon la texture du sol, la saturation résiduelle varie de 4 à 10% de la quantité totale du polluant dans la zone insaturée (vadose) et dépasse les 20% dans la zone saturée.

<sup>11</sup> Non Aqueous Phase Liquid

<sup>12</sup> Light Non Aqueous Phase Liquid

<sup>13</sup> Dense Non Aqueous Phase Liquid

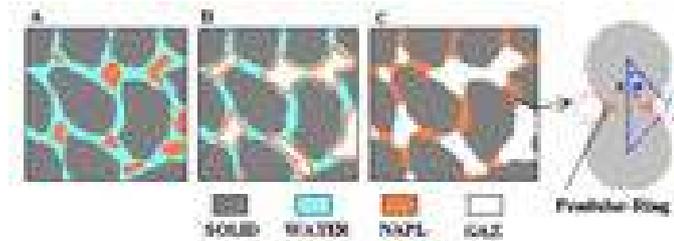


Figure 19- Différentes configurations possibles de rétention du polluant dans la matrice du sol

La Figure 19 montre le comportement des liquides et des gaz dans le sol : dans la nappe ou dans la zone vadose, les liquides mouillants s'étalent sur la surface des grains solides et forment des anneaux entre ces derniers, tandis que l'air et les liquides non mouillants occupent l'espace vide restant.

Le traitement des zones saturées (LNAPL et DNAPL) présente plusieurs difficultés :

- Accès difficile : généralement, la zone polluée se trouve à des profondeurs considérables ce qui nécessite des moyens d'intervention beaucoup plus sophistiqués et donc très onéreux.
- Présence d'eau : la présence des eaux souterraines limite l'efficacité de l'intervention (temps de traitement plus long, persistance de la pollution dans la zone saturée...).

Les méthodes de traitement les plus connues actuellement sont l'excavation, le pompage classique «pump and treat» et l'écémage. Ces méthodes sont trop coûteuses, peu efficaces et ne sont pas toujours physiquement possibles (Oswar, 2002). Le traitement thermique in situ est une alternative recommandable à ces méthodes. En effet, le chauffage du sol mène à des changements brutaux des conditions thermodynamiques du sol et rend le contaminant beaucoup plus mobile (Lingineni & Dhir, 1992). Les principaux effets sont décrits ci-dessous.

A température ambiante, les polluants organiques sont relativement immobiles : les constituants se dissolvent et se vaporisent lentement. Le chauffage du sol aux températures autour du point d'ébullition de l'eau mène à des changements importants des conditions thermodynamiques, rendant le polluant beaucoup plus mobile. Les effets sont détaillés au paragraphe 4.2.

Pendant le traitement GTR™, le polluant sous forme liquide se vaporise par ébullition, évaporation dans l'air, ou entraînement par la vapeur d'eau (distillation par la vapeur).

De plus, dans la zone à haute température (quelques centimètres près des tubes), des réactions de destructions sont mises en œuvre (oxydations/pyrolyses/hydrolyses).

Le rabattement de la nappe tout près des tubes favorise l'acheminement du polluant vers la zone de destruction (voir Figure 20).

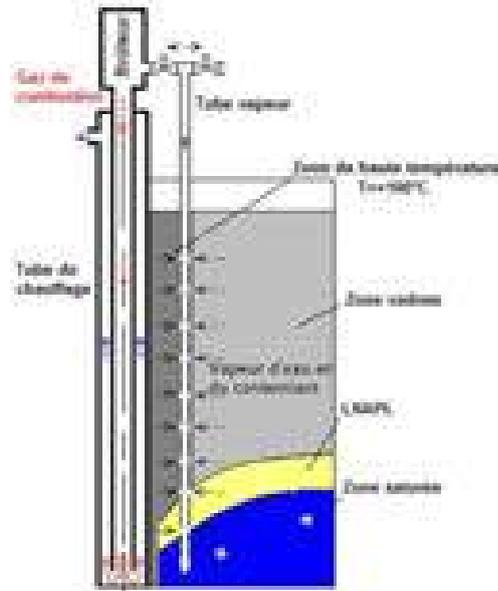


Figure 20- Traitement GTR™ dans une zone saturée

A haute température ( $T \gg 100^\circ\text{C}$ ), la destruction du polluant se fait par oxydation (s'il y a présence d'oxygène), pyrolyse et hydrolyse. Pour plus de détails concernant les mécanismes de traitement thermique, voir paragraphe 4.3.b

En dehors de la zone de haute température et à cause de la présence permanente de la vapeur d'eau, la température du sol se stabilise autour de  $100^\circ\text{C}$ . Dans cette zone, le mécanisme de dépollution est l'évaporation et/ou l'entraînement par la vapeur d'eau (distillation par la vapeur).

Les mécanismes de traitement sont détaillés au paragraphe 4.3.

## 4.5. Récupération des polluants

Lorsque les polluants ont atteint leurs conditions d'évaporation, ils migrent vers les tubes perforés de collecte. Cela se produit au travers de chemins préférentiels, et ce grâce à la dépression générée en surface dans ces tubes au moyen d'un ventilateur ad hoc.

Les polluants volatilisés peuvent suivre, au sein de la matrice de sol, n'importe quel chemin préférentiel, étant donné que tous conduisent vers les tubes perforés de collecte où la dépression est générée. Même dans des sols fortement argileux, des chemins préférentiels se créent en raison de l'assèchement des argiles et entraînent dès lors une perméabilité à l'air suffisante pour acheminer les polluants désorbés.

De plus, la vaporisation de l'eau et des polluants crée localement des surpressions, elles aussi générant un mouvement des gaz désorbés vers les points de basse pression (les tubes perforés de collecte).



## 4.6. Traitement des gaz

Les gaz collectés dans le sol sont amenés en surface puis envoyés soit vers la flamme du brûleur où ils sont oxydés, c'est-à-dire complètement transformés en CO<sub>2</sub> et en H<sub>2</sub>O (pour la fraction hydrocarbonée), soit vers un traitement secondaire ad-hoc.

### 4.6.a. Oxydation partielle des polluants dans le sol

Avant passage dans le brûleur, le CO produit dans le sol est mesuré dans les gaz à la sortie des tubes vapeur. Le CO provient de l'oxydation partielle et sert d'indicateur de l'évolution du traitement.

Il tend vers zéro à la fin du traitement. Les courbes ci-dessous (opération réalisée sur un site situé à Bruxelles) donnent la variation du CO en fonction du temps en sortie de tube vapeur.

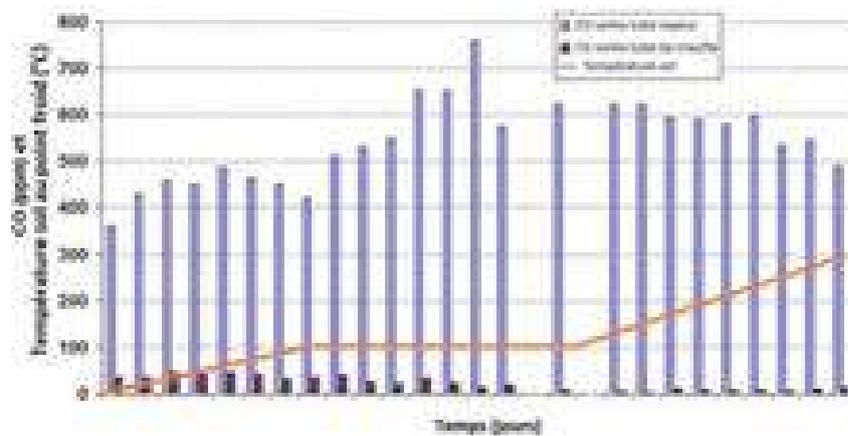


Figure 21- Variation en fonction du temps du CO en sortie de tube vapeur et de la température du sol au point froid : résultats d'un traitement GTR™ sur site

### 4.6.b. Traitement des gaz et vapeurs dans la flamme du brûleur

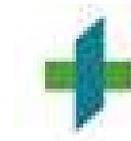
Dans le cas de polluants combustibles ne générant pas de rejet de gaz toxiques (cf. paragraphe 4.1), l'oxydation complète s'effectue dans la flamme du brûleur. Afin d'obtenir une efficacité optimale du traitement des polluants, il convient de tenir compte de trois paramètres principaux :

- la température ;
- le temps de séjour ;
- le mélange (régime d'écoulement turbulent).

Les deux premiers paramètres sont liés par la loi cinétique d'Arrhenius :

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -Ate^{\frac{-E}{RT}}$$

Où :



C/C <sub>0</sub> :	Concentration résiduelle
t :	Temps de réaction
T:	Température
R:	Constante des gaz parfaits
E :	Energie d'activation
A :	Constante dépendant du type de polluant

En présence d'air, les produits d'une combustion d'un hydrocarbure sont : H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO.

Pour une combustion incomplète, la concentration en CO dans les gaz produits est élevée.

Lors du traitement GTR™, la combustion des polluants est suivie à la sortie de chaque tube de chauffe par la mesure du taux de CO, qui pour une combustion complète doit être proche de zéro.

#### 4.6.c. Traitement ad-hoc pour les polluants dont la combustion génère des gaz toxiques

En fonction du type de polluant traité, un traitement secondaire des gaz peut être nécessaire. C'est le cas lorsque des éléments tels que le S, Cl, Br, Hg ou des NO<sub>x</sub> sont présents dans les gaz à traiter en concentrations supérieures aux valeurs admissibles pour les émissions atmosphériques.

Les unités de traitement secondaires (circuit indépendant du circuit de chauffage) sont très variées et dépendent du type de polluant à traiter. Il s'agit de technologies éprouvées pour le traitement de faibles débits de gaz sans poussières, à basse température. Des équipements d'oxydation catalytique, de traitement au charbon actif ou de lavage acide sont les plus communément mis en œuvre.

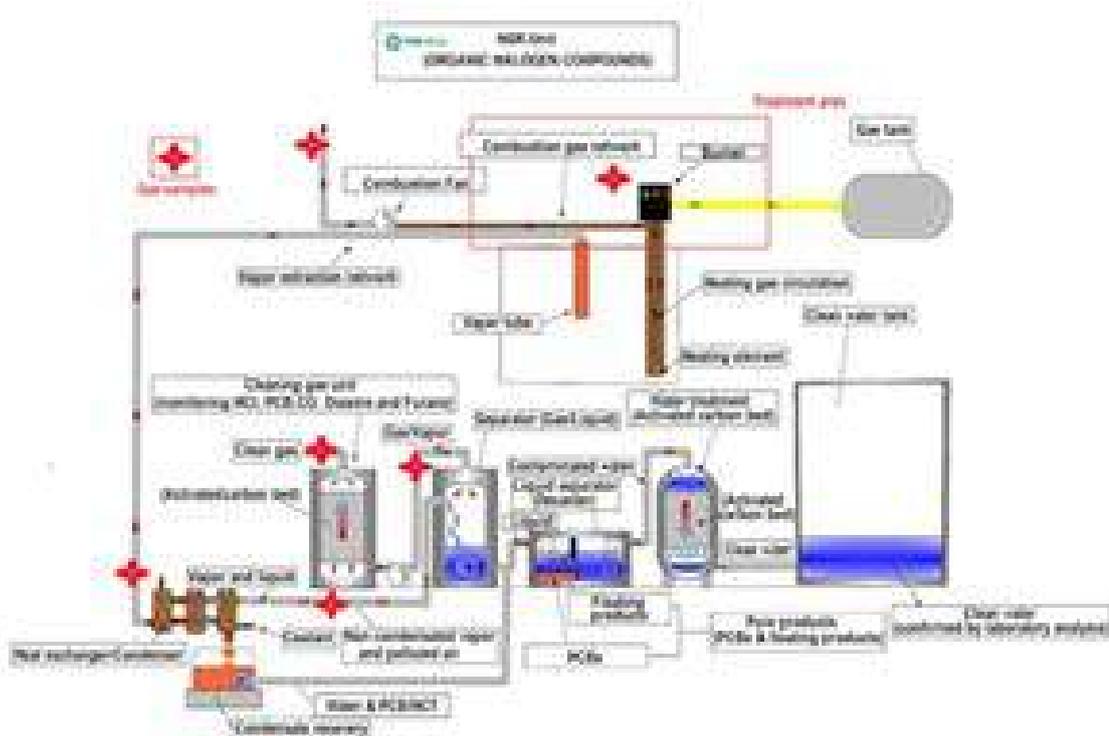
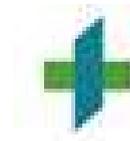


Figure 22- exemple de traitement secondaire GTR™ (cas de PCB)

Le tableau suivant présente les mesures des émissions gazeuses lors d'un chantier in-situ à Bruxelles. Les concentrations en NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> et carbone organique dans les gaz générés par un traitement thermique d'une pollution aux hydrocarbures par GTR™ sont bien en-dessous des normes autorisées.

paramètre	Concentration maximum autorisée (mg/Nm <sup>3</sup> )	Concentration mesurée (mg/Nm <sup>3</sup> )
NO <sub>x</sub>	400	118 (sec) ; 116 (humide)
SO <sub>2</sub>	200	<9 (sec) ; < 8 (humide)
TOC	20	< 2

Tableau 10- Mesure des émissions gazeuses lors d'un traitement thermique GTR™ d'un chantier in situ à Bruxelles (TOC= total organic carbon)



## 5. MISE EN ŒUVRE

---

### 5.1. Généralités

La mise en œuvre de la technologie GTR™ s'effectue selon deux configurations, sélectionnée en fonction des caractéristiques du projet : excavation possible ou non, présence ou non d'une nappe phréatique, profondeur de la pollution, etc.

- ISTD, de l'anglais In Situ Thermal Desorption. Cette méthode consiste à réaliser le traitement sans excaver les terres, ou uniquement de manière partielle dans certains cas pour des raisons d'optimisation (profondeurs variables de la pollution).
- ETSD, de l'anglais Ex Situ Thermal Desorption. Il s'agit dans ce cas d'excaver les terres et de les traiter en piles, sur le site même ou sur un autre site.

Dans les deux configurations, les éléments suivants sont nécessaires au traitement :

- Brûleur
- Extracteur des gaz de combustion
- Circuit de gaz : naturel ou propane
- Circuit électrique
- Éléments chauffants : constitués de deux tubes concentriques ;
- Tubes vapeur : ce sont des tubes perforés destinés à la collecte des vapeurs produites dans le sol ;
- Thermocouples et tubes pression : pour le suivi du traitement.

D'autres éléments sont spécifiques à chaque configuration, tels que le tube échangeur pour l'ESTD. De même, selon la nature du polluant, une unité de traitement ad hoc devra être installée en plus des éléments ci-dessus.

### 5.2. In Situ (ISTD<sup>14</sup>)

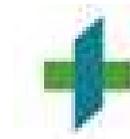
#### 5.2.a. Description générale

La mise en œuvre de la technologie GTR™ peut s'effectuer « in-situ », c'est-à-dire sans devoir excaver ou déplacer les terres. Il est alors possible de dépolluer les sols même sous un bâtiment existant ou dans des endroits difficiles d'accès.

Les éléments chauffants peuvent être placés dans le sol verticalement (pour des profondeurs de plus de 3m par exemple) ou horizontalement (pour de faibles profondeurs). La Figure 23 et la Figure 24 montrent le cas d'une installation in situ verticale. Les éléments chauffants sont placés de manière à couvrir l'ensemble de la zone polluée, selon un maillage ad-hoc ; ils sont constitués de 2 tubes coaxiaux (tube externe en acier et tube interne en inox). Un tube supplémentaire perforé (tube vapeur) est installé pour extraire les polluants du sol.

---

<sup>14</sup> ISTD : In Situ Thermal Desorption



Les éléments chauffants sont placés à des équidistances variant de 1 à 2,5 mètres. Le placement se fait, en fonction de la profondeur et des circonstances locales, au moyen de divers équipements de forage adaptés.



Figure 23- GTR™ en mode "in-situ" vertical sous habitation



Figure 24- Montage du système GTR™ en mode "in situ" vertical sous habitation (Bruxelles)

Dans le cas d'une installation horizontale, une tranchée est creusée afin de forer horizontalement dans le sol contaminé pour y insérer les éléments chauffants. Cette situation est présentée sur la Figure 25.

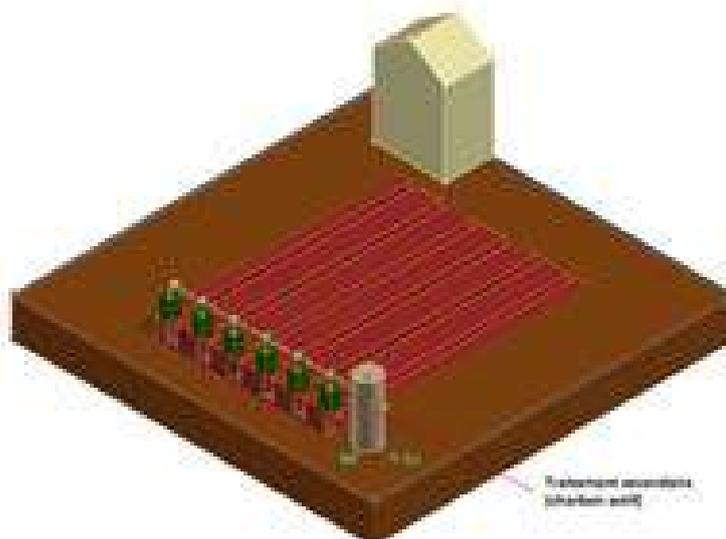
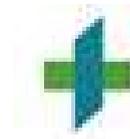


Figure 25- GTR™ en mode "in situ" horizontal avec traitement secondaire



### 5.2.b. Éléments chauffants.

Un élément chauffant est composé d'un tube externe en acier d'épaisseur minimale de 3mm et d'un tube interne en acier inoxydable d'épaisseur identique.



Figure 26- tube externe -tube interne

### 5.2.c. Tube vapeur

Lors du traitement, l'extraction des vapeurs produites dans le sol est effectuée grâce aux tubes vapeur. Il s'agit de tubes perforés de longueur identique à celle de l'élément chauffant, de diamètre compris entre 25 et 60 mm, et de 2 à 3 mm d'épaisseur.

Selon le type de contaminant et donc la configuration retenue, ces tubes sont placés près des éléments chauffants ou au centre de chaque triangle formé par trois éléments chauffants.



Figure 27- Tube vapeur perforé

### 5.2.d. Installation du système in-situ

La mise en œuvre se déroule en plusieurs étapes :

- Forage des puits à la profondeur de la pollution
- Installation des éléments chauffants, des tubes vapeur et des thermocouples/tubes pression, dans les puits
- Placement d'une couche de propreté en béton sur toute la zone traitée
- Installation des brûleurs
- Installation des circuits aériens (gaz, électricité, réseau d'échappement, instruments de suivi...)

### 5.2.e. Mode opératoire

- Creuser un puits de  $\varnothing$  180 à 200 mm dans le sol à l'emplacement voulu et jusqu'à la profondeur décidée.



Forage dans le sol



Figure 28- Forage du sol

- Placer le tube externe et le tube vapeur dans le puits.



Figure 29- Placement du tube externe

- Remblayer avec du gravier (granulométrie de 4 à 10mm) jusqu'à 20 cm du sol.
- Placer le tube interne dans le tube externe.

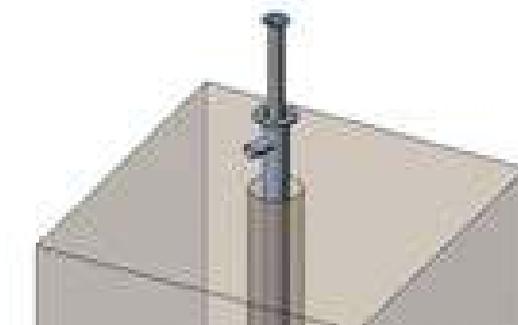


Figure 30- Placement du tube interne dans le tube externe

- Placer une couche de 10 cm minimum de béton sur la surface à traiter.



Figure 31- couche de béton sur la surface du sol au-dessus de la zone à traiter

- Placer un brûleur à l'extrémité de chaque élément chauffant.

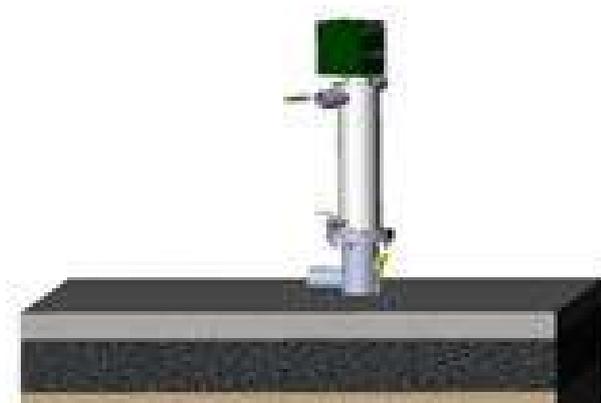
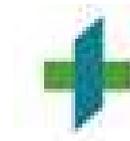


Figure 32- Fixation du brûleur

- Installer le circuit de gaz ou de fioul, les circuits électriques, le circuit d'évacuation et les instruments de mesure pour le suivi du traitement.
- Isoler le sol avec de la laine de verre ou tout autre isolant résistant à de hautes températures (250°C)



Figure 33- Installation ISTD en cours de traitement



## 5.2.f. Démobilisation

A la fin du traitement et après validation des résultats (prise d'échantillons dans le sol, analyse selon la procédure prédéfinie et contrôle des résultats par rapport aux objectifs), l'isolation au sol est retirée et TPS procède au démontage de l'installation, selon la procédure suivante :

- Démontage et rangement de tous les circuits : brûleurs, circuits de gaz (y compris ventilateurs), circuit électrique, etc.
- Extraction<sup>[15]</sup> des tubes du sol (utilisation d'un engin de levage)
- Remblais des puits et obturation avec des bouchons en béton
- Remise en état du site : comblement, nettoyage et évacuation des déchets
- Pour finir, évacuation de tout le matériel.

## 5.3. Ex situ (ESTD<sup>16</sup>)

### 5.3.a. Description générale

L'ESTD consiste à excaver les terres polluées de la zone à traiter selon les précautions imposées et à monter ces terres en pile thermique, dans des conteneurs ou des espaces clos avec murs de soutènement, en y insérant progressivement les tubes de chauffage, les tubes échangeurs, les tubes d'extraction des contaminants volatilisés ainsi que les thermocouples et tubes pression pour le suivi.

La pile thermique est la mise en œuvre la plus rapide : elle requiert peu de préparation sur site. Au contraire, les autres types de mise en œuvre nécessitent des travaux de construction préalables. Toutes ces solutions sont également efficaces et se déterminent en fonction des contraintes présentes sur site.

### 5.3.b. Pile thermique

La pile thermique ne nécessite aucune paroi de soutien. Une pile standard se caractérise par les dimensions suivantes :

- Largeur (au sol)  $\leq 18$  m
- Hauteur :  $\pm 2,8$  m
- Distance entre tubes de chauffe : variable entre 1 et 1,5 m, en fonction du temps de projet ciblé et de la nature du contaminant.

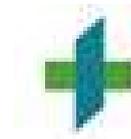
La longueur est adaptée selon la quantité de sol à traiter.

A titre d'exemple, une pile de 2000 m<sup>3</sup> de 14 m de large au niveau du sol aura une longueur de 52 m et devra contenir 75 éléments chauffants (brûleurs, tubes internes et externes) espacés d'environ 1,4 m, 100 tubes vapeur et 25 tubes échangeurs ainsi qu'un système de suivi de traitement (thermocouples, tubes pression et analyseurs de gaz).

---

<sup>15</sup> On n'extrait que les tubes qui peuvent être retirés. Les tubes bloqués seront coupés à ras du sol puis remplis de sable et un bouchon en béton sera déposé au niveau du sol.

<sup>16</sup> ESTD : Ex-Situ Thermal Desorption



Une telle pile mobilisera donc durant toute la durée du traitement le matériel suivant :

- 75 brûleurs ;
- 75 tubes internes ;
- 75 tubes externes ;
- 100 tubes vapeur ;
- 25 tubes échangeurs ;
- quatre ventilateurs standards (4 x 11kW) ;
- Un circuit de gaz (propane ou gaz naturel) ;
- Un circuit électrique ;
- Un circuit d'évacuation des gaz de combustion ;
- Un circuit d'extraction de vapeur ;
- Un système de monitoring (au moins 130 thermocouples, un analyseur de gaz et un ordinateur équipé) ;
- Un isolant thermique ;
- Une couverture étanche, type bâche (contre la pluie) ;
- Du gravier, à placer autour des tubes vapeur, et également autour de la pile si la zone n'est pas bétonnée, pour assurer la propreté du chantier et un accès facilité ;
- Du ciment pour les parois latérales de la pile ;
- Une réserve d'eau.

### 5.3.c. Montage de la pile thermique

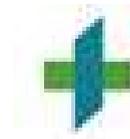
La mise en œuvre d'une telle installation se déroule en plusieurs étapes :

Pour éviter toute migration de la pollution vers le sol, la pile doit être montée sur une surface étanche : surface bétonnée ou bâchée.

- Montage du tas de terres polluées par couches, avec insertion des tubes chauffants, d'extraction et échangeurs, des thermocouples et des tubes pression ;



Figure 34- Construction d'une pile thermique GTR™



- Cimentage des parois latérales ;
- Installation des brûleurs et des ventilateurs ;
- Connexion des tubes de chauffage, des tubes vapeur, du circuit de gaz, du circuit électrique, du circuit d'évacuation des gaz de combustion, du réseau de collecte des vapeurs, du réseau de collecte des condensats si nécessaire et des ventilateurs ;
- Isolation du dessus de la pile et couverture avec une bâche étanche ;
- Connexion des thermocouples et des tubes pression ;
- Test d'étanchéité des circuits ;
- Mise en service des brûleurs et démarrage du traitement par désorption thermique.



Figure 35- Installation GTR™ - ESTD en pile thermique

### 5.3.d. Mode opératoire

Une pile de traitement GTR™ est construite couche par couche.

Les descriptions et les illustrations ci-dessous détaillent pour exemple le montage d'une pile de 800 m<sup>3</sup> avec une distance entre tubes de chauffe de 1,3m. Le montage sera adapté aux spécificités de chaque projet.

La première étape consiste à placer des terres polluées en une couche de 50-70 cm sur toute la surface prévue.



Figure 36- Montage de la première couche d'une pile de 800 m<sup>3</sup>

Ensuite, le restant de la pile sera monté en plusieurs talus égaux, quatre dans notre exemple.

Dans un premier temps, seul le premier quart de la pile sera monté (soit 6-7 m de large) Sur le quart de la première couche, 5 tubes de chauffage et 5 tubes vapeurs seront déposés à l'aide d'un engin de levage et seront distancés de 1,3 m ici.

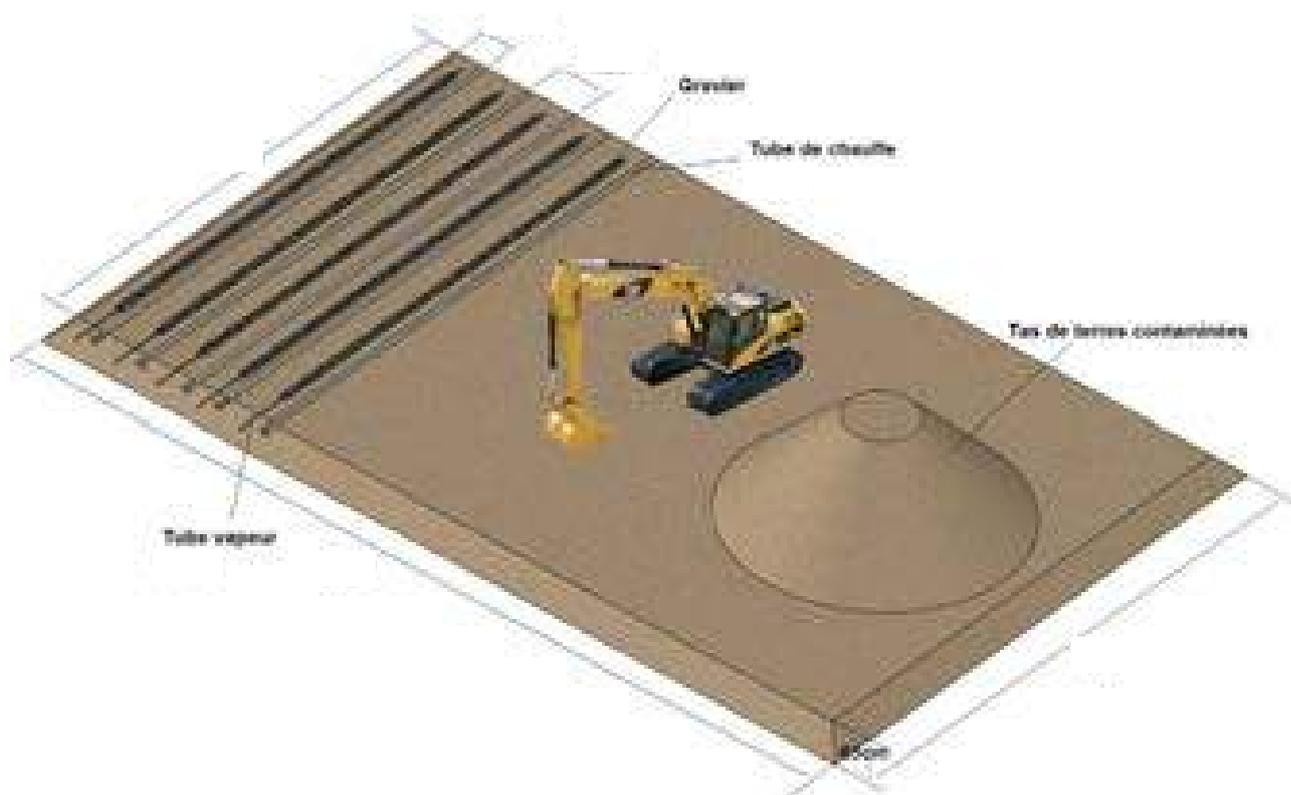


Figure 37- Montage du premier quart de la pile

Une nouvelle couche de terres de 75cm d'épaisseur sera ajoutée. Trois tubes échangeurs et trois tubes vapeur avec gravier seront déposés avec le manitou et distancés de 1,3m.



Des thermocouples sol peuvent être ajoutés entre les tubes échangeurs.

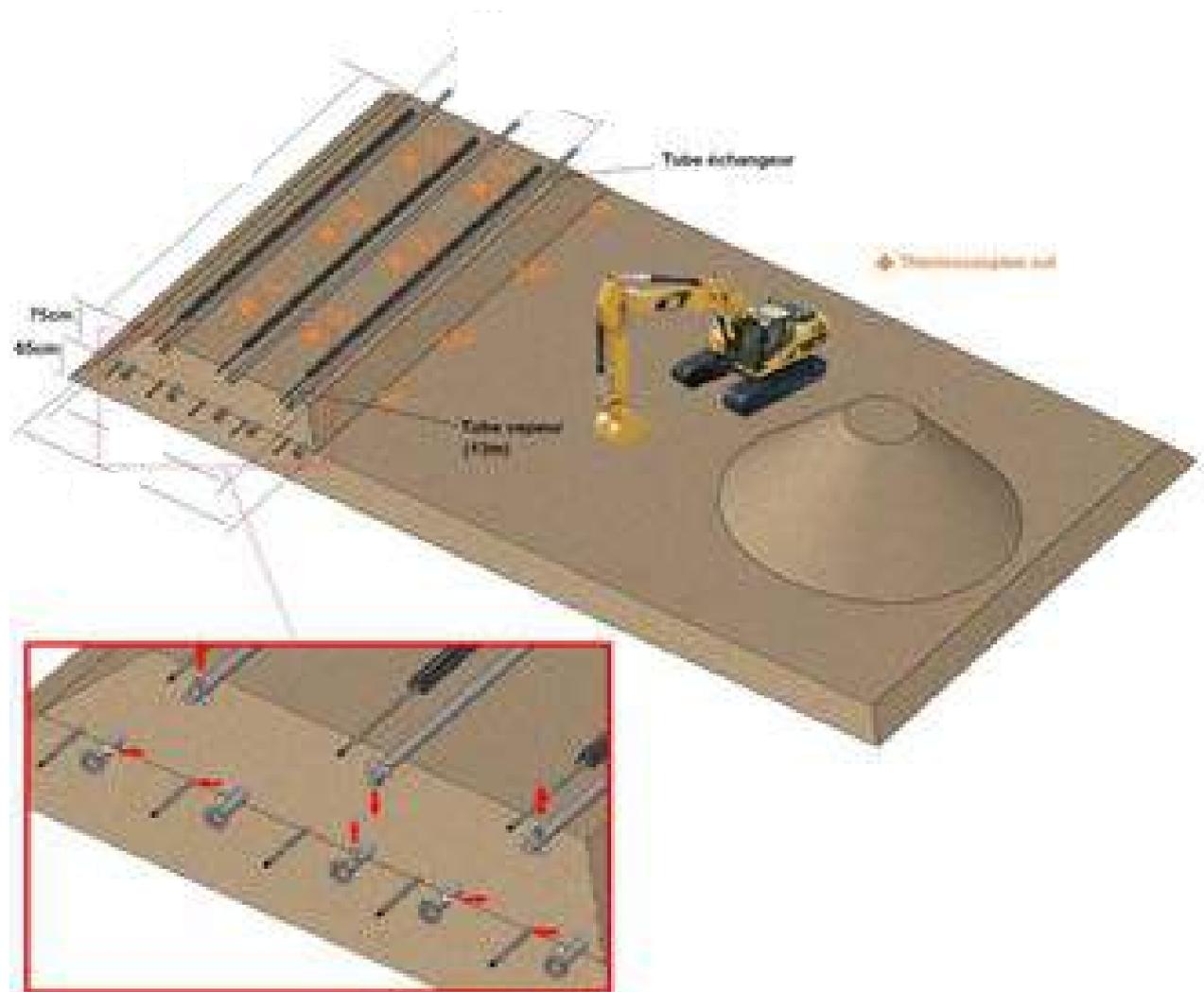


Figure 38- Montage de la première couche du premier quart

Une nouvelle couche de terres de 75cm d'épaisseur sera ajoutée. Trois tubes de chauffe et trois tubes vapeur avec gravier seront déposés avec le manitou, distancés de 1,3m.

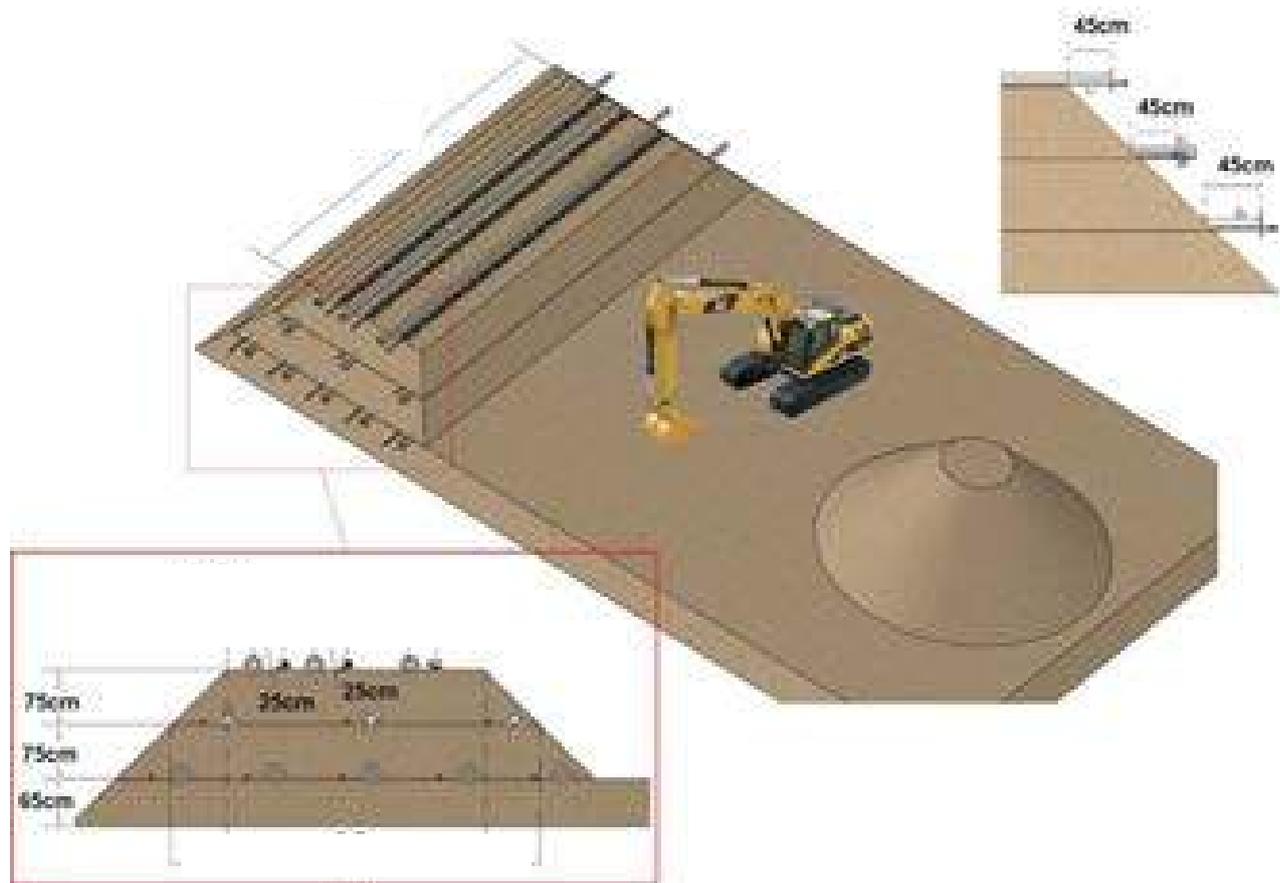
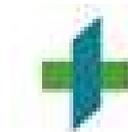


Figure 39- Montage de la deuxième couche du premier quart

Enfin, on dépose des terres polluées sur 65cm (de préférence et si possible, on finira les vingt derniers centimètres de la pile par de terres faiblement polluées).

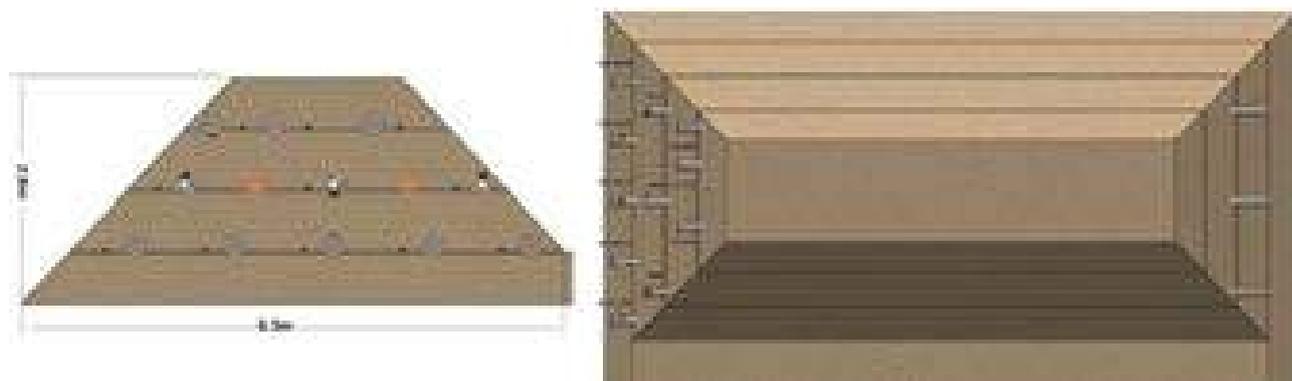


Figure 40- Montage de la dernière couche du premier quart

Les trois autres quarts seront montés à l'identique du premier quart.

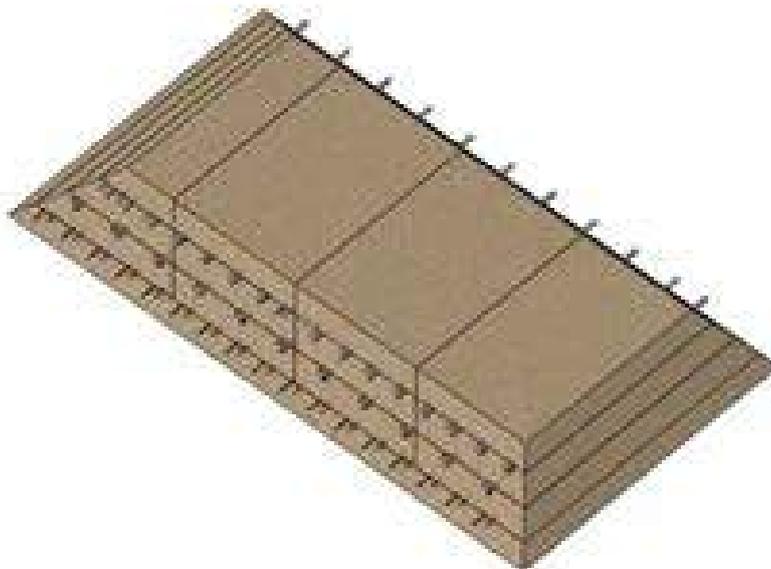
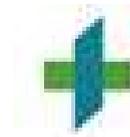


Figure 41- Illustration de la pile terminée

Une fois le montage de la pile terminé et afin de réduire les pertes thermiques vers l'extérieur (de facto améliorer le temps de traitement), du béton sera déposé sur les parois latérales et de l'isolation thermique couvrira le dessus de la pile avec en plus une bâche étanche.

Tous les brûleurs, les circuits de gaz (gaz naturel ou propane et ligne d'évacuation), le circuit électrique et les ventilateurs seront placés après le montage de la pile.

### 5.3.e. Suivi du traitement : spécificités ESTD

#### TEMPERATURES

Les thermocouples utilisés par TPS pour le suivi des températures sont de type K. Les thermocouples seront placés :

- aux points les plus froids (au milieu de deux tubes échangeurs)
- aux extrémités de la pile
- sur le circuit de chauffe et à la sortie cheminée.

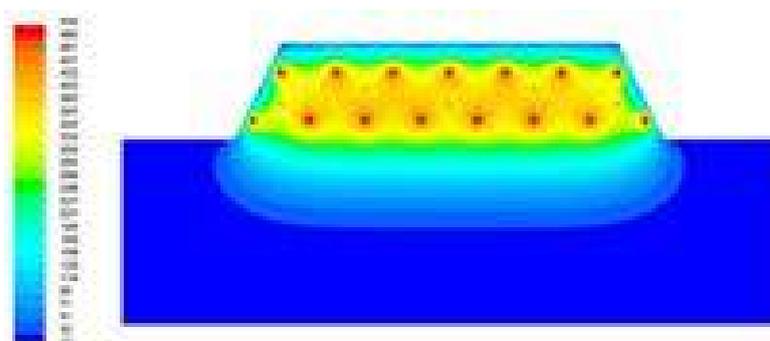


Figure 42- Champ de température dans une pile thermique (coupe transversale)



## PRESSIONS DANS LE SOL

La mesure de la pression dans la pile assurera le bon fonctionnement du procédé. Pour contrôler la pression, plusieurs tubes perforés (deux pour une pile de 800 m<sup>3</sup>) seront placés dans le sol à plusieurs endroits de la pile, loin des tubes vapeur (à l'endroit le plus défavorable pour l'aspiration de vapeurs). Les mesures peuvent être effectuées ponctuellement ou automatiquement.

En général, TPS utilise un tube de diamètre un demi-pouce et d'une longueur de 2m, perforé à son extrémité sur 10 cm. Il sera équipé à l'autre extrémité d'une vanne et d'un flexible et placé horizontalement côté brûleur. Les tubes seront déposés lors du montage de la pile au niveau des tubes échangeurs.

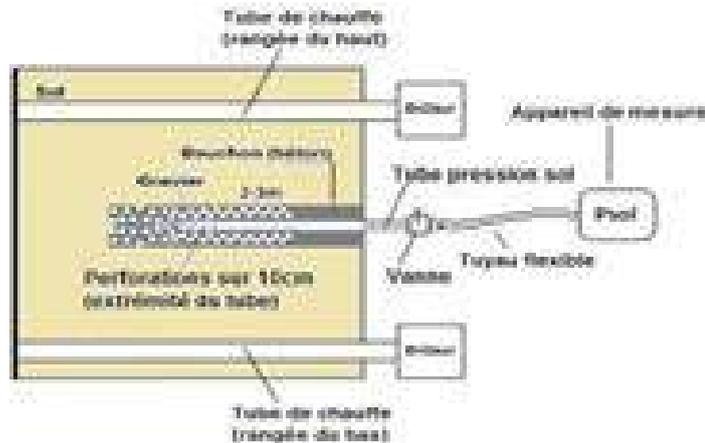


Figure 43- Montage des tubes pression-sol

## EMISSIONS GAZ ET AUTRES ANALYSES

Le suivi du traitement GTR™ respecte les procédures habituelles chez TPS, voir paragraphes 6.3 et 6.4.

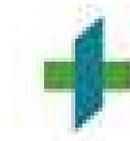
### 5.3.f. Démobilisation

A la fin du traitement et après validation des résultats, la bâche puis l'isolation sont retirées et TPS procède au refroidissement des terres décontaminées, selon deux méthodes :

- Par circulation forcée d'air frais dans le circuit de chauffe ;
- Par aspersion d'eau sur la pile.

Dès que la température des terres atteint 100°C, le démontage de la pile peut débuter. La pile sera démontée selon la procédure suivante :

- Démontage et rangement de tous les circuits : brûleurs, circuits de gaz (y compris ventilateurs), circuit électrique, etc.
- Ensuite, le béton sera retiré
- La démobilisation se poursuit avec le déplacement des terres de la couche du dessus jusqu'aux tubes.
- Les tubes seront retirés et rangés par un engin de levage
- L'opération se poursuit de la même manière pour les couches suivantes, jusqu'au démontage de toute la pile.



- Pour finir, tout le matériel sera évacué et le site sera rangé et nettoyé.

## 5.4. Etanchéité du système

L'étanchéité du système est garantie par :

- Pour une installation ISTD, le placement du béton (7 à 10 cm) sur toute la zone du traitement et pour une installation ETSD, sur les parois latérales de la pile. Cette protection nous permet à la fois d'assurer la propreté et la protection des eaux météoriques, mais également d'empêcher d'éventuelles émissions fugitives.
- La mise en dépression de la zone à traiter et le suivi en continu de la dépression créée dans le sol ;
- avant (et pendant le traitement), une vérification de l'étanchéité de tous les réseaux (gaz, vapeurs, condensats...) et des bacs de stockage des effluents (bac de récupération des condensats, séparateur) ;
- l'utilisation de bacs de rétention pour les circuits liquides (cf. Figure 10) et pour les citernes condensats (citerne pour eaux après traitement, cubis de stockage du produit pur...).



## 6. SUIVI DU TRAITEMENT

---

### 6.1. Températures de traitement

Le temps de traitement d'un sol pollué est déterminé par TPS en fonction des paramètres principaux suivants :

- la distance entre les tubes,
- le type de sol,
- la profondeur de la pollution
- le taux d'humidité du sol
- la puissance de chauffe

Néanmoins, s'il est possible d'obtenir une bonne estimation, le temps de traitement réel diffère souvent. Afin de déterminer si le sol est décontaminé ou non, TPS s'appuie sur les données de températures et le temps de traitement nécessaire à l'élimination d'un polluant ; données dont TPS dispose par son expérience et/ou dans la littérature. La mesure de la température dans le sol pendant le traitement est donc l'indicateur de son bon déroulement.

La mesure de la température se fait à l'aide de thermocouples types K, connectés à des interfaces d'acquisition de données. Elles permettent d'enregistrer en continu la mesure de température à des points stratégiques. Si une connexion Internet est disponible sur site, l'enregistrement sera accessible à distance.

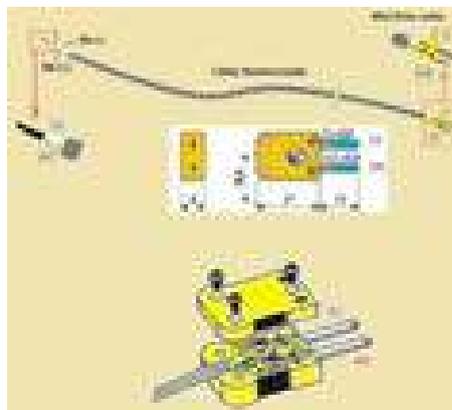


Figure 44- Préparation d'un thermocouple type K



Figure 45- Connexion d'un thermocouple

La mesure de température aux points stratégiques (points froids ; voir Figure 46) dans le sol permet de se rendre compte de l'avancée du traitement. Un point froid est situé au centre du triangle formé par trois tubes de chauffe ; la température le long du tube est uniforme, excepté à ses extrémités, comme le montre la Figure 46.



Figure 46- Point froid

Outre les points froids, des thermocouples sont connectés à la sortie de chaque tube de chauffe ; ils permettent de contrôler le bon fonctionnement des brûleurs.

La Figure 47 montre la disposition des thermocouples utilisée lors d'un chantier de décontamination in situ.

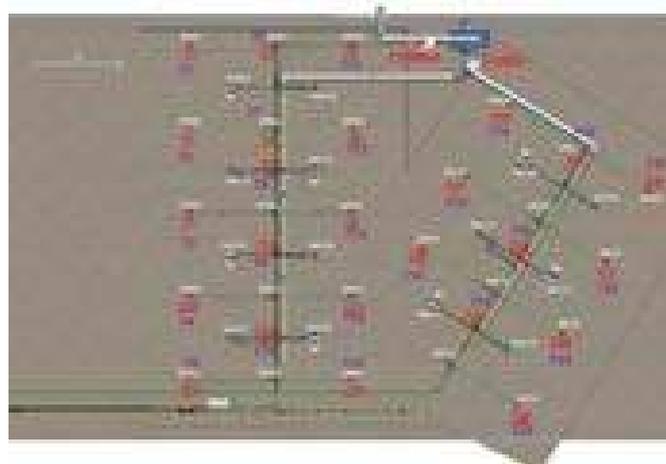
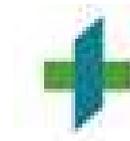


Figure 47- Position des thermocouples sur un chantier in situ



## 6.2. Pressions dans les terres contaminées

La mesure de la pression dans les terres pendant le traitement est un moyen complémentaire de s'assurer de son efficacité : le bon fonctionnement du procédé nécessite la création, dans les terres de la zone de traitement, d'une pression inférieure à la pression atmosphérique.

Pour contrôler cette pression, des tubes perforés sont placés dans les terres à plusieurs endroits de la zone du traitement. Ces tubes sont connectés à des capteurs de pression différentielle.



Figure 48- pour illustration, capteur de pression KIMO

Le suivi de la pression créée dans le sol permet d'intervenir en cas de dépassement de la valeur de fonctionnement ( $P > 0$ ). L'ajustement de la pression à un endroit donné de la zone du traitement est effectué par le réglage :

- des vannes vapeur de la zone en question ;
- du débit d'aspiration.

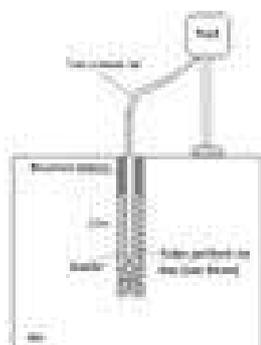


Figure 49- Principe de mesure de la pression dans le sol

## 6.3. Emissions gazeuses

Les paramètres de suivi des émissions gaz se déterminent selon la nature du polluant présent et les normes en vigueur du pays.

Indépendamment de ces règles, TPS met à disposition un analyseur de combustion pour le suivi des émissions du circuit de chauffage.



Le combustible utilisé par le système GTR™ pour dépolluer un sol est soit du propane ( $C_3H_8$ ), soit du gaz naturel (méthane  $CH_4$ ). Lors du traitement, les polluants sont aspirés hors du sol et dans le cas de polluants combustibles, renvoyés dans la flamme du brûleur. Lorsque les gaz générés quittent le tube de chauffe, ils sont rejetés dans l'atmosphère. Pour que ce soit autorisé, les émissions gazeuses ne doivent pas dépasser les normes de rejet en CO,  $NO_x$ ,  $SO_2$ , etc.) Il faut donc mesurer les concentrations de ces composants dans le gaz de sortie ; ces mesures permettent également de régler les brûleurs pour un fonctionnement optimal de l'installation.

Dans le cas de pollution par des hydrocarbures, le CO est un indicateur de combustion incomplète, laquelle a lieu dans le sol durant le chauffage. La mesure de la quantité de CO dans les gaz aspirés du sol (par exemple dans les tubes vapeur) permet donc de suivre l'avancée du traitement. La concentration en CO est importante en début de traitement et diminue au fur et à mesure que le polluant quitte le sol, aspiré par le système GTR™. Lorsque la teneur en CO des gaz aspirés dans le sol tend vers zéro, la dépollution est considérée comme achevée.



Figure 50- Mesure du CO dans le tube vapeur

Deux types d'analyseur sont utilisés : Kane Quintox ou MRU Varioplus.

L'analyseur de gaz MRU Varioplus (voir Figure 51) mesure en permanence 9 gaz en sortie de la cheminée gaz combustion (CO,  $CO_2$ ,  $O_2$ , NO,  $NO_x$ ,  $C_xH_y$ ,  $H_2S$ ,  $H_2$  et  $SO_2$ ). Des mesures ponctuelles seront réalisées dans l'air ambiant et sur les cheminées. Il est possible avec cet analyseur de programmer automatiquement l'analyse du gaz à intervalles choisis.

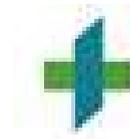


Figure 51- Analyseurs des gaz de combustion : MRU Varioplus à gauche – Kane Quintox à droite

En espaces confinés et pour assurer une sécurité optimale sur et aux alentours d'un chantier, des détecteurs de CO, CH<sub>4</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> et incendie sont également installés.

## 6.4. Autres analyses

Dans certains cas, nous pouvons être amenés à réaliser d'autres types d'analyses complémentaires :

- Qualité de l'air dans la zone de traitement, avant et pendant le traitement
- Condensats, uniquement dans le cas où le circuit de vapeur est séparé du circuit de chauffage

## 6.5. Validation du traitement

La validation du traitement se fait à partir de l'interprétation des mesures de suivi, décrites ci-dessus.

Le traitement est jugé terminé lorsque :

- la température objective est atteinte
- les concentrations des gaz traceurs (tels que le CO dans le cas d'une pollution aux hydrocarbures) dans les tubes vapeur diminue fortement, i.e. tend vers zéro.



## 7. HYGIENE, SECURITE & ENVIRONNEMENT

---

### 7.1. Généralités

Toutes les démarches préalables réglementaires relatives au bon déroulement des prestations seront effectuées, à savoir :

- La rédaction du Plan Qualité Sécurité Environnement (PQSE) ;
- La rédaction des procédures de réalisation des travaux de dépollution ;
- La préparation des rapports retraçant chaque jour le déroulement des opérations de dépollution.

Conformément aux dispositions générales relatives à la sécurité, l'ensemble des documents de sécurité seront établis lors de la phase de préparation. Ainsi, la réalisation des travaux sera régie par un ensemble de règles strictes à respecter.

En résumé, l'ensemble du personnel sur site sera équipé en permanence des EPI (équipements de protection individuels) adaptés (casques, gants, chaussures de sécurité) et spécifiques si nécessaire (masques à cartouches A2P3, combinaisons jetables de type K, etc.). De plus, l'encadrement de chantier sera assuré par un personnel spécialisé. Un agent de prévention (correspondant QHSE) sera intégré à l'équipe projet pour informer le personnel sur les risques et dangers liés aux travaux sur chantier.

### 7.2. Sécurité du personnel

#### EQUIPEMENTS DE PROTECTION INDIVIDUELS

Le personnel prévu sur le chantier sera exposé aux risques d'inhalation, d'ingestion et de contact cutané avec des sols pollués.

Par mesure de sécurité, lors de travaux d'installation, le personnel sera amené à se couvrir complètement de combinaisons de protection c'est-à-dire :

- Un vêtement complet d'une seule pièce résistant aux produits chimiques ;
- Des lunettes ;
- Un casque ;
- Des gants résistants aux produits chimiques ;
- Des bottes, ou des protections de chaussures jetables ;
- Un masque équipé d'un filtre A2P3 approuvé (en cas de besoin).

Les tâches de réparation seront réalisées à 2 personnes minimum. En aucune circonstance, le personnel ou les visiteurs ne doivent fumer dans les aires de traitement.



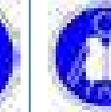
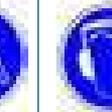
							
<b>XX</b>	<b>XX</b>	<b>A2P3XX</b>	<b>XX</b>	<b>XX</b>	<b>TYVEK X</b> <b>X</b>	<b>XX</b>	<b>X</b>

Figure 52- EPI nécessaires sur site

### INFORMATIONS ET FORMATION DU PERSONNEL

En début de chantier, le personnel présent sur site recevra une formation d'accueil :

- L'organisation et le programme des travaux ;
- Les risques propres au chantier ;
- Les conditions de circulation sur le chantier ;
- La vérification et la mise à disposition de l'ensemble des équipements individuels de sécurité obligatoires sur le chantier ;
- La bonne compréhension de l'ensemble des procédures et modes opératoires qui doivent être mis en application.

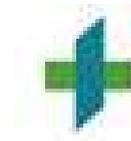
### INSTRUCTIONS AUX CONDUCTEURS D'ENGINS

En complément des formations de sécurité reçues en début de chantier, les conducteurs d'engins recevront une sensibilisation complémentaire portant sur :

- Les caractéristiques de l'engin ;
- Les conditions d'utilisation correspondant à la catégorie d'engin et aux particularités du site ;
- Les interdictions d'utilisation ;
- Les opérations périodiques d'entretien à la charge du conducteur d'engin suivant un document établi par les services d'entretien de l'entreprise en référence à la notice du constructeur ;
- Les principales dispositions générales de sécurité ;
- Les conditions de circulation sur le chantier (itinéraires, croisements, sens uniques, priorités...).

Lors de ces formations spécifiques, une attention particulière sera portée à l'accès aux engins et à la descente du poste de conduite ainsi qu'aux nuisances que représentent le bruit et l'envol de poussières :

- Utilisation de la ceinture de sécurité ;
- Port de protections auditives individuelles lorsque l'exposition sonore quotidienne subie au poste de conduite dépasse 85 dB ;
- Maintien des portes et fenêtres des engins fermées ;
- Port du casque de sécurité et des équipements de protection individuels lorsque le conducteur quitte son poste de conduite.



## CERTIFICATION

L'organisation et la sécurité du chantier sera conforme à la réglementation en vigueur.

## 7.3. Sécurité de l'installation

Toutes nos installations sont conformes aux normes en vigueur et répondent aux exigences de sécurité. L'installation de nos appareils doit être effectuée par du personnel qualifié.

### DELIMITATION DU SITE

Le site sera délimité au moyen de grillage métallique avec la création d'une zone rouge (contenant l'installation et la zone du traitement), une zone orange et une zone verte.

En ce qui concerne les déplacements sur site, seul le personnel de TPS ou le personnel agréé par TPS est autorisé à pénétrer sur le chantier.

Toutefois, les visiteurs extérieurs pourront accéder au chantier s'ils sont accompagnés par un membre du personnel de TPS et après avoir suivi un débriefing sur la sécurité. L'accès à la zone de traitement sera balisé. Le plan de circulation sur site devra être respecté. Ce plan est placé à l'entrée du site. Le port des EPI sera obligatoire.

Une présence journalière est assurée sur le chantier de lundi au vendredi de minimum deux heures et en cas de besoin le week-end.

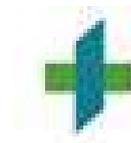
### BRULEURS

Chaque brûleur pouvant fonctionner indépendamment des autres, il est équipé de façon à se mettre en sécurité (coupure automatique de l'alimentation du brûleur en combustible gazeux) lorsque l'un des paramètres essentiels à son fonctionnement est en défaut. Ces paramètres sont :

- L'alimentation en air de combustion ;
- L'alimentation en combustibles gazeux (gaz naturel ou propane) ;
- L'alimentation électrique ;
- La présence de flamme.

Pour ce faire, les dispositifs intégrés à chaque brûleur sont :

- Un pressostat qui contrôle l'arrivée d'air de combustion, placé en contrôle différentiel entre la chambre d'aspiration d'air et la chambre de combustion. En cas de manque d'air de combustion (arrêt du ventilateur par exemple), la vanne d'arrivée des combustibles gazeux est coupée.
- En cas de défaut d'alimentation électrique, le brûleur s'éteint automatiquement avec coupure d'arrivée du combustible (électrovannes normalement fermées).
- La flamme est contrôlée par une électrode d'ionisation placée sur l'accrocheur de flamme du brûleur. En cas de perte de flamme, la vanne d'arrivée des combustibles gazeux est coupée.



- La mise à feu est garantie grâce à l'électrode d'allumage fixée sur l'accrocheur de flamme ; après trois essais d'allumage, le brûleur se met en sécurité (coupure automatique du combustible gazeux).
- La température du gaz à la sortie du tube de chauffe est mesurée en continue sur chaque brûleur. En cas de dépassement de température limite (définie en fonction de l'application), le brûleur se met en sécurité.

La défaillance d'un des équipements de l'installation (réseau gaz, électricité, ventilateur...) a donc pour conséquence la mise en sécurité automatique de chaque brûleur. Les vannes d'alimentation gaz des brûleurs sont alors fermées, assurant une coupure complète de l'alimentation du brûleur, même en cas de coupure de courant.

Une fois mis en sécurité, les brûleurs ne peuvent redémarrer seuls. La présence d'un technicien pour constater l'origine du problème et y remédier avant redémarrage est nécessaire.

### ETANCHEITE DU SYSTEME

L'étanchéité du système est garantie par :

- le placement du béton (7 à 10 cm) sur toute la zone du traitement à la fois dans un but de propreté et de protection des eaux météoriques, mais également afin d'empêcher d'éventuelles émissions fugitives ;
- la mise en dépression de la zone à traiter, et le suivi en continu de la dépression créée dans le sol ;
- avant (et pendant le traitement), une vérification de l'étanchéité de tous les réseaux (gaz, vapeurs...) et des citernes de stockage des effluents ;
- le placement des bacs de rétention, en dessous de toutes les citernes de stockage des liquides, si présentes sur site.

L'installation de désorption thermique GTR™ est constituée de 3 circuits :

- le circuit de gaz propane ou gaz naturel (cuves, réseaux, brûleurs...) ;
- le circuit « gaz de combustion » (extracteur, réseau, cheminée...) ;
- le circuit électrique.

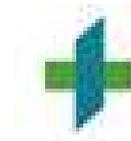
Ces deux premiers circuits véhiculent des fluides qui ne sont jamais en contact avec les terres polluées. La surveillance concerne seulement la sécurité gaz et les émissions gaz de combustion.

Sur ces 2 circuits, des équipements de contrôle de la sécurité sont mis en place, qui en cas de défaut décelé entraînent automatiquement un arrêt des brûleurs (arrêt du chauffage du sol).

Finalement, une inspection des équipements gaz et électricité sera réalisée par une société de contrôle technique agréée et un certificat d'inspection sera fournis au Maître d'Ouvrage.

### RESEAU ELECTRIQUE

Le réseau électrique est sur coffret normalisé, équipé d'un disjoncteur général, d'un disjoncteur différentiel et d'un bouton d'arrêt d'urgence. Ces éléments garantissent la sécurité de l'installation électrique. Les



ventilateurs et les unités de traitement sont également équipés de coffrets et de protections électriques individuelles.

Chaque départ de circuit est alimenté sous protection différentielle et chaque point d'utilisation est connecté à la terre.

De plus, toutes nos unités sont reliées entre elles et reliées à la terre du circuit électrique principal et ce afin d'éviter tout risque de tensions parasites.

## **RESEAU ET STOCKAGE GAZ**

Les brûleurs GTR™ de TPS peuvent être alimentés par du propane ou du gaz naturel. De plus, le circuit d'alimentation des brûleurs est construit par TPS suivant les normes en vigueur. Dans tous les cas, l'alimentation en gaz ne sera mise en route qu'après validation du circuit et des branchements par un organisme agréé.

Si présentes, les citernes de propane seront protégées par des barrières interdisant l'accès à la zone de stockage gaz dans un rayon de 3 m autour des cuves. Toute personne non habilitée, tout véhicule et tout matériel électrique sera donc maintenu hors de cette zone.

L'installation fonctionnant au gaz, un risque majeur réside dans la fuite de gaz, provoquée par un incident technique ou une malveillance. Ce risque est prévenu par la mise en place de dispositifs de sécurité, sur la citerne de propane, sur le circuit d'alimentation, et sur les brûleurs, conformément à la norme des installations de combustion.

## **TEMPERATURE DES GAZ DE COMBUSTION**

Des thermocouples mesurent la température du gaz de combustion en des points critiques de l'installation comme à la sortie du tube de chauffe et à l'entrée des ventilateurs de combustion. Ces données font partie du système de suivi mais fournissent également des informations de sécurité : température maximale dans le réseau de gaz de combustion.

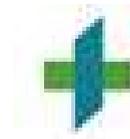
## **TUBES DE CHAUFFE**

Les tubes de chauffe utilisés dans les sols sont des tubes réalisés en acier inoxydable AISI 304L (tube interne) et en acier ordinaire (tube externe). Les différentes portions de ces deux types de tube sont soudées entre elles au moyen de baguettes de soudure appropriées.

## **VENTILATEURS-EXTRACTEURS**

La température en entrée des ventilateurs de combustion est contrôlée régulièrement au moyen de thermocouples. Le seuil acceptable est de 140°C pour le ventilateur d'air de chauffe.

Si le seuil du ventilateur d'air de chauffe est dépassé, les mesures adéquates sont prises pour protéger le matériel et revenir à la normale : réglage de la puissance de chauffe.



## SURVEILLANCE EN PHASE TRAITEMENT

La surveillance du bon fonctionnement technique de l'installation sera assurée par les actions suivantes :

- A plusieurs emplacements de la zone du traitement et à une profondeur donnée, des capteurs de pression contrôlent que le sol soit en permanence en dépression.
- En plus des thermocouples installés dans le sol aux points froids, des thermocouples de monitoring, placés à plusieurs endroits de l'installation assurent un fonctionnement en toute sécurité du procédé :
  - Thermocouples brûleurs : sur chaque sortie tube de chauffage est installé un capteur de température afin de s'assurer de bon fonctionnement du brûleur.
  - Thermocouples ventilateurs gaz de combustion : afin de s'assurer que la température du ventilateur ne s'élève pas trop, un thermocouple est placé à l'entrée gaz de ce dernier.

Un analyseur de gaz mesure en permanence 7 gaz en sortie de la cheminée gaz combustion (CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> et SO<sub>2</sub>). Des mesures ponctuelles sont en outre réalisées à la sortie de chaque tube vapeur et dans l'air ambiant.

## RISQUES ET DEFAILLANCES

Au-delà de la maîtrise des risques liés à la l'utilisation d'un gaz explosif (propane ou gaz naturel) sur site, dont l'analyse est réalisée précédemment, d'autres risques peuvent être envisagés en cas de panne d'éléments sensibles du dispositif. Le risque principal est la diffusion d'odeur et des gaz toxiques dans l'espace du traitement. Ce risque peut avoir lieu :

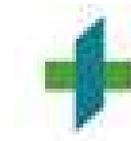
- soit en cas d'un mauvais réglage du brûleur ;
- soit en cas d'une dépression insuffisante dans le sol.

Comme première mesure de protection, contre la diffusion d'odeur et des gaz toxiques sur site, intervient le placement d'une couche de béton épaisse sur toute la surface du traitement. En cas d'arrêt du traitement, cette couche empêche les vapeurs de s'échapper du sol.

De plus, en cas d'un des dysfonctionnements mentionnés ci-dessus, les brûleurs s'arrêtent automatiquement et la quantité de vapeur produite dans le sol chute rapidement.

A plusieurs emplacements de la zone du traitement et à une profondeur donnée, des capteurs de pression contrôlent que le sol soit en permanence en dépression.

Un personnel TPS d'astreinte est alors en mesure d'intervenir sur le site dans les deux heures qui suivent, afin de procéder au bon rétablissement de la situation.



## 7.4. Objectifs QHSE spécifiques

Des tableaux de suivi d'indicateurs spécifiques sont mis en place au cours de la réalisation des travaux de réhabilitation dans le but de contrôler et maîtriser l'ensemble des aspects QHSE du chantier :

- Tableau de suivi des indicateurs sécurité : il rassemblera, de façon mensuelle, l'ensemble des données d'accidentologie, le nombre d'audits et de remontées de situations dangereuses ;
- Tableau des indicateurs de chantier : il reprendra une synthèse des données basées sur plusieurs indicateurs :
  - o Sécurité : nombre d'accidents, d'audits, etc. ;
  - o Environnement : respect des seuils de rejet air, eau et suivi des consommations d'eau ;
  - o Qualité : nombre de plainte des riverains ;
  - o Technique : suivi des consommations de gaz, électrique et de charbon actif si présent.

## 7.5. Maitrise des Rejets

Le procédé GTR™ ne génère pas de poussière. Les gaz peuvent donc être traités dans des installations simples et de petites dimensions.

De plus, le combustible utilisé par le système GTR™ pour dépolluer les sols du site est du gaz naturel (principalement du CH<sub>4</sub>) ou du propane (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>). La combustion de ces gaz est propre car leur composition chimique est simple. La quantité de gaz à effet de serre (produits de combustion du méthane et du propane) est inférieure à celle émise par tous les autres combustibles fossiles.

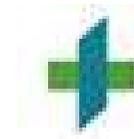
Lorsque le méthane ou le propane sont adéquatement mélangés à l'air pour produire un mélange combustible, celui-ci ne génère pratiquement pas de suie (particules) et très peu de monoxyde de carbone (CO), d'hydrocarbures (H<sub>x</sub>C<sub>y</sub>) et d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>). Comme les pressions de stockage et de transport du propane sont plutôt faibles, le système de transport et de stockage est étanche à l'atmosphère, ce qui évite les émissions par évaporation. En cas de fuite, le propane se vaporise immédiatement; par conséquent, il ne contamine pas les aquifères ou le sol, contrairement à la plupart des autres combustibles liquides.

Lors d'un traitement GTR™, plusieurs moyens sont mis en œuvre par TPS dont l'unique but est le respect des normes environnementales sur site.

Les installations de TPS sont conçues, équipées, exploitées afin d'être le plus respectueuses possibles de l'environnement. A ce jour, il n'existe aucun document ni arrêté officiel applicable à notre procédé et TPS s'appuie sur la Directive 2010/75/UE Du Parlement Européen Et Du Conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution), pour ce qui concerne les incinérateurs de déchets, dont les applications sont les plus proches de notre activité.

Les valeurs suivantes reprennent les normes CE d'émission pour les incinérateurs de déchets.

Toutes les valeurs limites d'émission sont calculées à une température de 273,15 K, à une pression de 101,3 kPa et après correction en fonction de la teneur en vapeur d'eau des gaz résiduaux.



Elles sont normalisées pour une teneur en oxygène des gaz résiduaire de 11 %, sauf en cas d'incinération d'huiles minérales usagées, telles que définies à l'article 3, point 3), de la directive 2008/98/CE où elles sont normalisées pour une teneur en oxygène de 3 %, et dans les cas visés au point 2.7 de la partie 6<sup>17</sup>.

### 1. Valeurs limites d'émission journalière moyenne des substances polluantes suivantes (mg/Nm<sup>3</sup>)

Poussières totales	10
Substances organiques à l'état de gaz ou de vapeur, exprimées en carbone organique total (COT)	10
Chlorure d'hydrogène (HCl)	10
Fluorure d'hydrogène (HF)	1
Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> )	50
Monoxyde d'azote (NO) et dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> ) exprimés en NO <sub>2</sub> pour les installations d'incinération des déchets existantes dont la capacité nominale est supérieure à six tonnes par heure ou pour les nouvelles installations d'incinération des déchets	200
Monoxyde d'azote (NO) et dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> ) exprimés en NO <sub>2</sub> pour les installations d'incinération des déchets existantes dont la capacité nominale est inférieure ou égale à six tonnes par heure	400

### 2. Valeurs limites d'émission moyenne sur une demi-heure des substances polluantes suivantes (mg/Nm<sup>3</sup>)

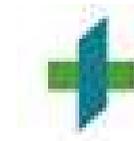
	(100 %) A <sup>(17)</sup>	(97 %) B <sup>(17)</sup>
Poussières totales	30	10
Substances organiques à l'état de gaz ou de vapeur, exprimées en carbone organique total (COT)	20	10
Chlorure d'hydrogène (HCl)	60	10
Fluorure d'hydrogène (HF)	4	2
Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> )	200	50
Monoxyde d'azote (NO) et dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> ) exprimés en NO <sub>2</sub> pour les installations d'incinération des déchets existantes dont la capacité nominale est supérieure à six tonnes par heure ou pour les nouvelles installations d'incinération des déchets	400	200

### 3. Valeurs limites d'émission moyennes (mg/Nm<sup>3</sup>) des métaux lourds ci-après, sur une période d'échantillonnage de trente minutes au minimum et de huit heures au maximum

Cadmium et ses composés, exprimés en cadmium (Cd)	Total : 0,05
Thallium et ses composés, exprimés en thallium (Tl)	
Mercure et ses composés, exprimés en mercure (Hg)	0,05
Antimoine et ses composés, exprimés en antimoine (Sb)	Total : 0,5
Arsenic et ses composés, exprimés en arsenic (As)	
Plomb et ses composés, exprimés en plomb (Pb)	
Chrome et ses composés, exprimés en chrome (Cr)	
Cobalt et ses composés, exprimés en cobalt (Co)	
Cuivre et ses composés, exprimés en cuivre (Cu)	
Manganèse et ses composés, exprimés en manganèse (Mn)	
Nickel et ses composés, exprimés en nickel (Ni)	
Vanadium et ses composés, exprimés en vanadium (V)	

Ces moyennes s'appliquent également aux émissions correspondantes de métaux lourds et de leurs composés à l'état de gaz ou de vapeur

<sup>17</sup> Directive 2010/75/UE Du Parlement Européen Et Du Conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution)



Valeurs limites d'émission moyennes (ng/Nm<sub>3</sub>) de dioxines et de furannes sur une période d'échantillonnage de six heures au minimum et de huit heures au maximum. La valeur limite d'émission se rapporte à la concentration totale de dioxines et de furannes calculée conformément à la partie 2.

Dioxines et furannes	0,1
----------------------	-----

1.5. Valeurs limites d'émission (mg/Nm<sup>3</sup>) de monoxyde de carbone (CO) dans les gaz résiduaire:

moyenne journalière	50
moyenne sur trente minutes	100
moyenne sur dix minutes	150

La concentration totale de poussières dans les émissions atmosphériques d'une installation d'incinération des déchets ne dépasse en aucun cas 150 mg/Nm<sup>3</sup> en moyenne sur une demi-heure. Les valeurs limites d'émission de COT et de CO dans l'air fixées aux points 1.2 et 1.5 b) ne sont pas dépassées.

Pour plus de détails concernant les normes et les formules de calcul des valeurs limites d'émission dans l'air, se référer au document officiel : Directive 2010/75/UE Du Parlement Européen Et Du Conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution).

## 7.6. Maîtrise des nuisances

Il est important de signaler que par rapport aux techniques d'excavation ordinaires, notre installation durant son installation et son fonctionnement ne crée aucune nuisance sonore ni olfactive.

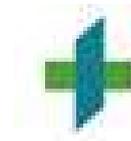
Notre procédé de désorption thermique GTR™ est incontestablement le moyen le plus efficace de dépolluer sans nuire au quotidien des riverains. C'est pourquoi au travers de son offre, TPS s'engage à respecter dans sa totalité les clauses qui se rapportent à la gestion des nuisances conformément aux normes en vigueur.

En phase de chantier, l'installation de notre dispositif de traitement s'effectue en journée et le bruit occasionné par la mobilisation de notre technologie GTR™ est pleinement conforme aux normes en vigueur.

De plus, un des principaux avantages de notre technologie est l'absence totale de vibrations liées à l'exploitation d'engins mécaniques. Contrairement à des travaux d'excavation, le sol portant est conservé en place et il n'est pas remplacé.

Concernant les odeurs, des mesures seront effectuées pendant le projet portant sur :

- Le suivi des concentrations en COV : mise en place d'un PID de façon permanente dans la zone du traitement ;



- Le prélèvement d'échantillons d'air (quantité et fréquence à définir au regard des conditions du projet)

## 7.7. Audits internes et externes

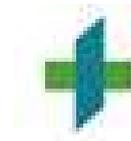
Des audits réguliers seront effectués sur le personnel sur site et ses sous-traitants. L'accent sera mis sur le respect des règles d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail notamment grâce à la maîtrise de la sous-traitance.

## 7.8. Gestion des déchets

Les déchets seront collectés de manière sélective puis stockés sur site en fonction de leurs natures dans un des quatre types de conteneurs disponibles sur site :

- Papier et carton : journaux, magazines, boîtes, etc.
- Déchets PMC : Les emballages en Plastique, Métal ou en Carton, etc.
- Petits déchets dangereux (PDD) ou Petits déchets chimiques : lampes au néon, détergents, cosmétiques, peintures et vernis, huiles usagées, pesticides, etc.
- Les déchets de construction et de démolition.

Pour chaque lot de déchet, le chef de chantier guidera le chauffeur jusqu'à la position de chargement prévu et lui remettra en fin de chargement un bordereau de « Suivi de Déchets » établi. Tous les chargements feront l'objet d'un contrôle rigoureux conformément à la réglementation en vigueur et aux exigences d'acceptation des filières d'élimination retenues.



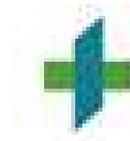
## 8. LISTE DES FIGURES

---

Figure 1- GTR™: Schéma de principe .....	7
Figure 2- Brûleur .....	7
Figure 3- Mise en œuvre ex-situ on site du procédé GTR™ : unité de chauffage et unité de traitement de la vapeur récupérée .....	8
Figure 4- Configuration en triangle équilatéral (tubes chauffants / tubes vapeurs) .....	9
Figure 5- Disposition des éléments chauffants à équidistance l'un de l'autre sur des profondeurs variables .....	10
Figure 6- Brûleur GTR™ .....	10
Figure 7- Circulation des gaz chauds dans le tube de chauffage .....	11
Figure 8- Corrélation entre le type de sol et la perméabilité.....	12
Figure 9- Evolution théorique de la température dans le sol (zone vadose avec quantité d'eau limitée/alimentation continue en eau).....	13
Figure 10- Evolution réelle de la température pour un projet in situ (Bruxelles) .....	13
Figure 11- Températures (°C) typiques gaz et sol au début et vers la fin de la phase 3 .....	14
Figure 12- Champ de température après 30 jours de chauffage (distance entre tubes d=3m) .....	14
Figure 13- Durée de chauffe en fonction de la distance entre les éléments chauffants.....	17
Figure 14- Perte en poids durant le chauffage d'une argile.....	18
Figure 15- Fissures de l'argile après séchage (TANG, et al., 2010) .....	19
Figure 16- Aspect d'un sol pollué en hydrocarbures avant et après traitement thermique GTR.....	20
Figure 17 a et b- Evolution de la pression partielle de certains composés chimiques en fonction de la température (PCE : Perchloroéthylène).....	25
Figure 18- Transfert de masse entre phase liquide et phase gazeuse du PCE et de l'eau .....	28
Figure 19- Différentes configurations possibles de rétention du polluant dans la matrice du sol .....	30
Figure 20- Traitement GTR™ dans une zone saturée .....	31
Figure 21- Variation en fonction du temps du CO en sortie de tube vapeur et de la température du sol au point froid : résultats d'un traitement GTR™ sur site .....	32
Figure 22- exemple de traitement secondaire GTR™ (cas de PCB).....	34
Figure 23- GTR™ en mode "in-situ" vertical sous habitation .....	36
Figure 24- Montage du système GTR™ en mode "in situ" vertical sous habitation (Bruxelles) .....	36



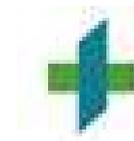
Figure 25- GTR™ en mode "in situ" horizontal avec traitement secondaire .....	36
Figure 26- tube externe -tube interne .....	37
Figure 27- Tube vapeur perforé.....	37
Figure 28- Forage du sol.....	38
Figure 29- Placement du tube externe.....	38
Figure 30- Placement du tube interne dans le tube externe .....	38
Figure 31- couche de béton sur la surface du sol au-dessus de la zone à traiter .....	39
Figure 32- Fixation du brûleur .....	39
Figure 33- Installation ISTD en cours de traitement.....	39
Figure 34- Construction d'une pile thermique GTR™ .....	41
Figure 35- Installation GTR™ - ESTD en pile thermique.....	42
Figure 36- Montage de la première couche d'une pile de 800 m <sup>3</sup> .....	43
Figure 37- Montage du premier quart de la pile .....	43
Figure 38- Montage de la première couche du premier quart.....	44
Figure 39- Montage de la deuxième couche du premier quart.....	45
Figure 40- Montage de la dernière couche du premier quart .....	45
Figure 41- Illustration de la pile terminée.....	46
Figure 42- Champ de température dans une pile thermique (coupe transversale).....	46
Figure 43- Montage des tubes pression-sol.....	47
Figure 44- Préparation d'un thermocouple type K.....	49
Figure 45- Connexion d'un thermocouple .....	50
Figure 46- Point froid.....	50
Figure 47- Position des thermocouples sur un chantier in situ .....	50
Figure 48- pour illustration, capteur de pression KIMO .....	51
Figure 49- Principe de mesure de la pression dans le sol .....	51
Figure 50- Mesure du CO dans le tube vapeur .....	52
Figure 51- Analyseurs des gaz de combustion : MRU Varioplus à gauche – Kane Quintox à droite.....	53
Figure 52- EPI nécessaires sur site.....	55



## 9. LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1- Propriétés physiques de quelques sols.....	12
Tableau 2- Températures cibles par type de polluant.....	15
Tableau 3- Estimation de la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer un sol d'une température initiale à la température du traitement, TT.....	16
Tableau 4- Températures de pyrolyse.....	19
Tableau 5- Exemple d'un projet réalisé : dépôt de carbone dans le sol après traitement thermique à 250°C pendant 3 jours.....	21
Tableau 6- Températures d'ébullition des principaux polluants à pression atmosphérique.....	23
Tableau 7- Concentrations avant et après traitement pour un chantier in situ à Bruxelles.....	24
Tableau 8- Effet de la température sur la viscosité cinématique des huiles moteur [].....	26
Tableau 9- Fraction massique en phase vapeur et température d'ébullition du mélange Eau/PCE.....	29
Tableau 10- Mesure des émissions gazeuses lors d'un traitement thermique GTR™ d'un chantier in situ à Bruxelles....	34
Tableau 11- Normes EN pour appareils à gaz.....	70



## 10. BIBLIOGRAPHIE

---

**ABUEL-NAGA, H.M., et al. 2005aa.** Thermal consolidation of Bangkok clay. *International Journal of Lowland Technology*. 2005aa, Vol. 17, 1.

**ADEME. 2001.** *Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des sols et des eaux souterraines pollués en France*. 2001.

**BECKER, Bryan R., MISRA, Anil et FRICKE, Brian A. 1992.** Development of correlations for soil thermal conductivity. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. 1992, Vol. 19, pp. 59-68.

**COSTIC. 2009.** *Les Pompes à chaleur géothermiques Très basse énergie*. Paris : SEBTP, 2009.

**Environmental Protection Agency. 2001.** *A Citizen's Guide to Air Stripping*. USA : s.n., 2001.

— **2001.** *A citizen's guide to vitrification*. USA : s.n., 2001.

— **2006.** *Off-Gas Treatment Technologies for Soil Vapor Extraction Systems: State of the Practice*. USA : s.n., 2006.

— **2004.** *Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report (11th Edition)*. USA : s.n., 2004.

**Giasson, Philippe et Jaouich, Alfred. 2008.** *Les Propriétés Physiques du Sol*. 2008.

*Is risk based land management really sustainable?* **HAEMERS, Jan. 2005.** Bordeaux : s.n., 2005. ConSoil.

**JACKSON, R.D. et TAYLOR, S.A. 1986.** Thermal conductivity and diffusivity. *Methods of soil analysis agronomy*. 1986, Vol. 9, pp. 945-956.

**National Instruments. 2011.** Mesure de températures par thermocouples : Guide pratique. *NI Developer Zone*. [En ligne] Février 2011. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/7245>.

**Naval Facilities Engineering Service Center. 1998.** *Application guide for thermal desorption systems*. Port Hueneme (USA) : s.n., 1998.

**Percebois, Jean-Marc. 2009.** *Le guide du chauffage géothermique*. Paris : Eyrolles, 2009.

**SENEVIRATNE, H.N., et al. 1993.** A review of models for predicting the thermomechanical behaviour of soft clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1993, Vol. 17, pp. 715-733.

*Sustainable remediation and restoration of contaminated soils: a partnership project between Quebec, Wallonia and Brussels Regions.* **BEAULIEU, Michel, et al. 2005.** Bordeaux : s.n., 2005. ConSoil.

**TANG, Chao-Sheng, et al. 2010.** Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils. *Engineering Geology*. 2010, Vol. 114, pp. 261-266.

*The homecourt (F) cokeswork site: a successful redeveloped brownfield case.* **CHARBONNIER, Patrick, et al. 2005.** Bordeaux : s.n., 2005. ConSoil.



**Thermique et Energie. 2009.** La Géothermie. [En ligne] Décembre 2009. <http://thermiqueetenergie.wordpress.com/2009/12/16/la-geothermie/>.

*Thermopiles - A new thermal desorption technology for recycling highly organic contaminated soils down to natural levels.* **HAEMERS , Jan, et al. 2005.** Bordeaux : s.n., 2005. ConSoil.

**USOWICZ, B., et al. 2006.** Thermal conductivity modelling of terrestrial soil media- A comparative study. *Planetary and Space Science.* 2006, Vol. 54, pp. 1086-1095.

**VIDIC, Radisav D., LIU, Wei et BROWN, Thomas D. 1997.** *Development of Novel Activated Carbon- Based Adsorbents for Control of Mercury Emissions From Coal-Fred Power Plants.* Pittsburgh : s.n., 1997.

**Windmill Software Ltd. 1998.** How to Use Your PC to Measure Temperature. [En ligne] Décembre 1998. <http://www.windmill.co.uk/thermocouple.html>.



# 11. ANNEXES

---

## 11.1. Surveillance et mesures de sécurité

### 1. En mode normal

Une fois terminée l'installation est mise en route pour un traitement continu (24h/24) et cela pour toute la durée du traitement. En cas d'alerte, il doit être possible de couper l'appareil à distance. Une procédure a été établie par TPS en vue de réaliser cette opération.

Le dispositif de monitoring doit être relié en permanence via une carte GSM intégrée dans l'armoire électrique. Ce système permet de suivre en permanence le traitement et d'alerter l'exploitant (et vice-versa) en cas de problème.

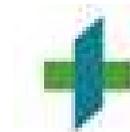
### 2. En mode dégradé

L'installation est entièrement autonome et se met en mode sécurisé en cas de défaillance d'un des équipements. Cette installation répond aux normes : EN 416-1, EN 416-1/A1, EN 416-1/A2 et EN 416-1/A3, concernant les installations et les appareils à gaz. Les principaux points de cette norme sont rappelés dans le Tableau 11 ci-dessous.

En cas de défaut de l'installation, celle-ci se met donc automatiquement en mode sécurisé. Les vannes d'alimentation en gaz sont fermées assurant dès lors une coupure complète de l'alimentation des brûleurs même en cas de coupure de courant. Le reste de l'installation se met également en mode sécurisé.

Le redémarrage après une panne due à un défaut nécessite la présence d'un technicien TPS pour constater l'origine du problème, y remédier et procéder au redémarrage une fois la panne résolue.

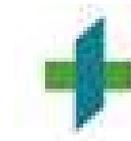
Les informations techniques du brûleur sont détaillées à l'annexe 11.2.



## Normes techniques pour appareils à gaz

Norme	Titre	Norme remplacée	Référence Journal Officiel
EN 26 A2	Appareils de production instantanée d'eau chaude pour usages sanitaires équipés de brûleurs atmosphériques utilisant les combustibles gazeux – Amendement A2	2009/C 278/04	EN 26 A2
EN 203-1 + A1	Appareils de cuisson professionnelle utilisant les combustibles gazeux – Partie 1: Règles générales de sécurité	2009/C 278/04	EN 203-1 + A1
EN 203-3	Appareils de cuisson professionnelle utilisant les combustibles gazeux – Partie 3: Matériaux et parties en contact avec les denrées alimentaires et autres aspects sanitaires	2009/C 278/04	EN 203-3
EN 416-1	Tubes radiants suspendus à monoc brûleur à usage non-domestique utilisant les combustibles gazeux – Partie 1: Sécurité	2009/C 278/04	EN 416-1
EN 419-1	Appareils surélevés de chauffage à rayonnement lumineux au gaz, à usage non domestique – Partie 1: Sécurité	2009/C 278/04	EN 419-1
EN 437 + A1	Gaz d'essais – Pressions d'essais – Catégories d'appareils	2009/C 278/04	EN 437 + A1
EN 525	Générateurs d'air chaud à chauffage direct et à convection forcée utilisant les combustibles gazeux pour le chauffage de locaux à usage non domestique, de débit calorifique net HI inférieur ou égal à 200 kW	2009/C 278/04	EN 525
EN 656 A1	Chaudières de chauffage central utilisant les combustibles gazeux – chaudières de type B dont le débit calorifique nominal est supérieur à 70 kW mais inférieur ou égal à 200 kW – Amendement A1	2009/C 278/04	EN 656 A1
EN 777-1	Tubes radiants suspendus à multibrûleurs utilisant les combustibles gazeux à usage non domestique – Partie 1: système D, sécurité	2009/C 278/04	EN 777-1
EN 777-2	Tubes radiants suspendus à multibrûleurs utilisant les combustibles gazeux à usage non domestique – Partie 2: système E, sécurité	2009/C 278/04	EN 777-2
EN 777-3	Tubes radiants suspendus à multibrûleurs à usage non domestique utilisant les combustibles gazeux – Partie 3: système F, sécurité	2009/C 278/04	EN 777-3
EN 777-4	Tubes radiants suspendus à multibrûleurs utilisant des combustibles gazeux pour usages non domestiques – Système H – Partie 4: sécurité	2009/C 278/04	EN 777-4
EN 12864 A3	Détendeurs à réglage fixe, à pression de détente maximale inférieure ou égale à 200 mbar, de débit inférieur ou égal à 4 kg/h, et leurs dispositifs de sécurité associés pour butane, propane ou leurs mélanges – Amendement A3	2009/C 278/04	EN 12864 A3

Tableau 11- Normes EN pour appareils à gaz



## 11.2. Caractéristiques du brûleur NSR

### BRULEUR

Le boîtier brûleur est monté sur le tube de chauffage au moyen d'une bride démontable en acier.  
Le boîtier brûleur est composé d'un habillage rigide en acier laqué gris anthracite d'une épaisseur de 1,2 mm avec ouverture rapide par charnière de la chambre des composants.  
Le bec du brûleur sera en laiton ou aluminium.

### EQUIPEMENT DES BRULEURS AU GAZ DE TYPE ATMOSPHERIQUE

- transformateur d'isolement sur le circuit de détection de flamme par ionisation
- temporisateur permettant un pré ventilation de 10s avant la phase d'allumage
- contrôleur électronique de combustion.

### EQUIPEMENT DU CONTROLEUR ELECTRONIQUE DE COMBUSTION

- dispositif d'allumage automatique électrique au moyen d'une électrode d'allumage
- surveillance de flamme automatique au moyen d'une électrode d'ionisation

### CONTROLE DE LA PRESSION D'AIR

Un pressostat différentiel contrôlera la différence de pression entre l'arrivée d'air de combustion vers la chambre de combustion et la chambre de combustion elle-même.  
Les prises de pression d'air ne pourront pas se faire entre la chambre de combustion et l'entrée du ventilateur.

### COMPOSITION DU BLOC DE SECURITE GAZ

- régulateur de pression
- deux vannes électromagnétiques de classe B
- dispositif d'ouverture progressive réglable
- entrée par raccord mâle ½ "
- prise de pression gaz en amont et une prise de pression en aval du bloc.

### RACCORDEMENT ELECTRIQUE

Le raccordement électrique sera fait via une prise avec fiche débrochable à cinq pôles (1 pôle pour la phase, 1 pour la terre, 1 pour le neutre, 1 pour le déverrouillage à distance et 1 pour le témoin de signalisation acoustique ou visuelle de dérangement du brûleur)



### 11.3. Certificat de conformité EN du brûleur

<b>EC TYPE EXAMINATION CERTIFICATE</b>	
<b>Annex II Paragraph 1 directive 90/269/EEC</b>	
	
Certificate number :	ET015/3098
ID number :	0401/020/17
Date of issue :	20/08/2007
Manufacturer :	TECHNIGAS S.P.R.L.
Manufacture :	chaussée de Bruxelles, 4
Fabricant :	B - 1470 Gosselies
Marque commerciale :	TECHNIGAS
Trade mark :	
Handelsmerk :	
Type :	ECO 16 SILENT - ECO 25 SILENT - ECO 42 SILENT -
Modél :	ECO 25 SILENT - LINEAR - ECO 42 SILENT LINEAR
Type :	
Genre d'appareil :	OVERHEAD RADIANT TUBE (BLATER)
Kind of product :	
Sorte d'appareil :	
Type d'appareil :	A2/ B12/ B12HS/ B22/ C12/ C22
Appliance type :	
Type d'appareil :	
Countries of destination, appliance categories :	
AT/ CZ/ GR/ ES/ CH Cat: I2H/ DP G20/20mbar/ G31/50mbar	
BE Cat: I2H/R3H/ DP G20/G25 20/25mbar/ G31/37mbar/ G31/50mbar	
DE Cat: I2H/L/ DP G20/20mbar/ G25/20mbar/ G31/50mbar	
DK/ LU Cat: I2H/ DP G20/20mbar/ G31/50mbar	
DK/ EE/ FI/ LT/ LV/ NO/ PL/ RO/ SK/ SI/ SE/ TR Cat: I2H G20/20mbar	
FR Cat: I2H/ DP G20/G25 20/25mbar/ G31/37mbar/ G31/50mbar	
IE/ PT/ GB/ IR Cat: I2H/ DP G20/20mbar/ G31/37mbar	
Normative references :EN 416-1 edition 06/1999	
EN 416-1/A1 edition 10/2000	
EN 416-1/A2 edition 07/2001	
EN 416-1/A3 edition 04/2002	
	
DIRECTOR	
K. DE WIT	
TEP-001/04 1403-04-11	TECHNIGAS - Rodestraat, 125 - B - 1470 Louvain-la-Neuve Phone +32 2 380 82 00 - Fax +32 2 380 87 04 e-mail : <a href="mailto:technigas@technigas.be">technigas@technigas.be</a> - website : <a href="http://www.technigas.be">www.technigas.be</a>



## Thermal Processing Solutions & Technologies SA

Avenue de la Jonction, 53

B-1190 Bruxelles

+32 2 219 13 42

[contact@tps.tech](mailto:contact@tps.tech)