



# THERMOPILE<sup>©</sup>

SUSTAINABLE THERMAL DESORPTION



**Livret 1**

**Dossier Technique**

**V07 – Août 2010**

# 1. TABLE DES MATIERES

1.	Table des matières .....	2
2.	Présentation Générale .....	3
3.	Procédé .....	4
3.1.	Traitement du sol .....	4
3.1.1.	Principes de base .....	4
3.1.2.	Le chauffage du sol .....	5
3.1.3.	La désorption des polluants .....	10
3.1.4.	Récupération des polluants .....	13
3.1.5.	Refroidissement des terres .....	13
3.2.	Le traitement des gaz .....	15
3.2.1.	Traitement primaire .....	15
3.2.2.	Traitement secondaire des gaz .....	16
4.	Mise en oeuvre .....	17
4.1.	Introduction .....	17
4.2.	In Situ .....	17
4.3.	Ex-Situ (On site ou off site) .....	17
5.	Controles .....	19
5.1.	Contrôle de process .....	19
5.2.	Contrôle des gaz de rejet .....	20
6.	Equipements disponibles .....	21
6.1.	T-Lab 1 .....	21
6.2.	T-LAB 2 .....	21
6.3.	T-LAB 3 .....	22
6.4.	T-1.1. ....	22
6.5.	T-1.2. ....	23
6.6.	T-2 .....	23
7.	Liste des Figures .....	26

## 2. PRESENTATION GENERALE

Le traitement par Thermopile© est une mise en œuvre innovante et durable de la désorption thermique inventée par Deep Green (réf : EP04447142.3).

Comme pour les traitements par désorption thermique classique, les terres contaminées sont d'abord chauffées à une température suffisante pour que les polluants s'évaporent (phase de désorption), puis ces polluants, une fois en phase gazeuse, sont acheminés vers une chambre de combustion où ils sont définitivement détruits.

Le procédé Thermopile© représente la nouvelle génération de traitement par désorption thermique, étant basée sur deux principes fondamentaux :

- L'utilisation d'un circuit fermé de gaz pour chauffer les terres de façon statique, réduisant les émissions atmosphériques et éliminant la production de poussières.
- L'utilisation des polluants comme source d'énergie dans la combustion, réduisant la consommation énergétique.

La technologie s'applique aux terres polluées aux hydrocarbures (aliphatiques, mono-aromatiques ou poly-aromatiques) aux polluants organiques halogénés ou à certains polluants inorganiques tels que les cyanures.

Elle s'applique également à tous les types de sol (sable, limon, argile) et à d'autres matériaux comme des résidus de broyage ou des déchets de sidérurgie.

## 3. PROCÉDE

### 3.1. TRAITEMENT DU SOL

#### 3.1.1. PRINCIPES DE BASE

Le procédé Thermopile© est basé sur les mêmes principes que la désorption thermique classique, à savoir un traitement en deux phases :

- Evaporation des polluants organiques contenus dans la matrice minérale (i.e. le sol), principalement par élévation de la température et transfert de ces polluants dans la phase vapeur.
- Oxydation des polluants organiques contenus dans cette phase vapeur par combustion (transformation en CO<sub>2</sub> et en H<sub>2</sub>O).

Ces principes, appliqués dans tous les procédés de désorption thermique, sont mis en œuvre par Thermopile© de manière très spécifique, permettant de garantir, une consommation minimale, ainsi qu'une très forte réduction des autres impacts environnementaux.

Le procédé consiste d'abord à placer, selon un maillage préétabli, un réseau d'éléments chauffants dans la masse de terres polluées à traiter. Ces éléments chauffants sont constitués de 2 tubes coaxiaux en acier, dont le tube extérieur est muni de perforations. Lors du fonctionnement de l'installation, ces éléments chauffants (tubes) sont parcourus par des gaz à haute température (700-800°C) en provenance de la chambre de combustion. Lors de leur circulation dans les tubes, ces gaz vont chauffer la terre et provoquer l'évaporation et la désorption des contaminants volatils à moins de 550°C.

Contrairement aux cas des dispositifs de désorption thermique classiques (réacteur, four,...) où le temps de résidence du sol dans le four est d'environ 20 minutes, le temps de chauffage d'une installation Thermopile© 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.

Les polluants désorbés grâce à la montée progressive en température de la masse de terres polluées migrent vers les tubes d'où ils sont acheminés, par diffusion et convection, vers les tubes de circulation des gaz. Ils y pénètrent par les perforations pratiquées dans les parois latérales de ceux-ci, en raison de la dépression générée par la vitesse de circulation des gaz (effet venturi). Une fois au sein des tubes, les gaz désorbés (vapeur d'eau et polluants) sont véhiculés par les gaz de chauffe vers la chambre de combustion. Ces gaz vont alimenter, en partie, le brûleur de la chambre de combustion. Le dispositif est équipé d'une purge permettant d'évacuer régulièrement une petite partie des gaz et de maintenir les mêmes pressions dans le système. Le brûleur est également équipé d'une alimentation auxiliaire de fuel et d'air.

### 3.1.2. LE CHAUFFAGE DU SOL

#### 3.1.2.1. MECANISMES DE CHAUFFAGE

Le procédé Thermopile© utilise un cycle complet de détente / contraction du gaz avec échange de chaleur vers l'extérieur (Figure 1). Le cycle comprend :

- Une phase de détente et de chauffage de gaz au sein d'une chambre de combustion.
- Une phase de refroidissement accompagnée d'une contraction du gaz au niveau du sol.

A la sortie de la chambre de combustion, la température du gaz avoisine les 850°C avec une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique. Lors de son passage dans le sol (à travers les tubes) le gaz se refroidit et sa pression chute. Cette baisse de pression permet de récupérer les vapeurs de contaminants produites dans le sol. Le retour du gaz dans la chambre de combustion ferme le cycle.

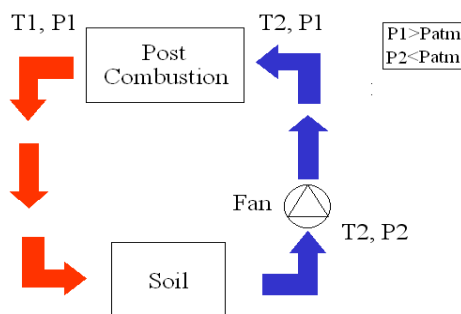


Figure 1: Cycle de détente/contraction du gaz

Le sol lui-même est chauffé par **conduction**. Ce mécanisme est assez inhabituel en traitement des sols, étant donné que la plupart des mécanismes de transfert sont basés sur la convection (déplacement physique d'un fluide porteur au sein de la masse de matériau contaminé).

L'avantage principal de la conduction est que cette propriété n'est pas dépendante du type de sol (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 pour obtenir leur évaporation est aisément prévisible, ainsi que la qualité des matériaux après traitement, puisque ces éléments reposent sur des lois physiques claires (température, pression, temps de séjour).

#### 3.1.2.2. ELEMENTS CHAUFFANTS

Le chauffage du sol en soi 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 circule l'air chaud (le fluide caloporteur). 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 système n'est donc aucunement dépendant des chemins préférentiels ni de l'hétérogénéité du sol en place. La chaleur propagée par conduction volatilise les contaminants organiques dans le sol. Une fois volatilisés, ceux-ci se dirigent vers les éléments chauffants grâce à la dépression due à l'effet venturi créé par la circulation de l'air chaud. Là, ils rencontrent la zone surchauffée (>500°C), où la majeure partie de la masse du contaminant est

détruite in-situ. La partie non détruite est emportée par le gaz vecteur jusqu'à la chambre de combustion (800-900°C) où elle sera détruite.

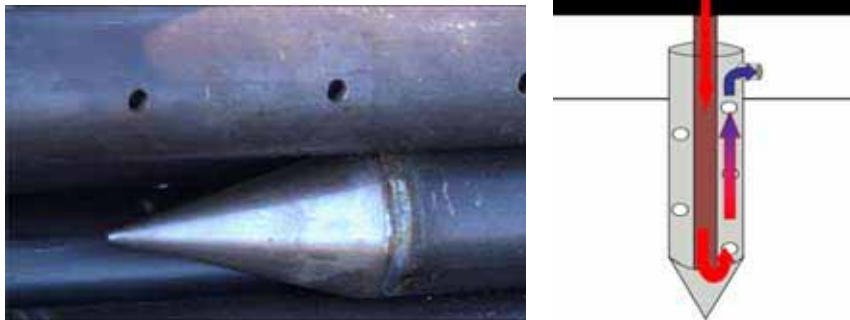


Figure 2 : Eléments chauffants

### 3.1.2.3. TEMPERATURE DU SOL

La température du sol augmente lentement à partir de 10-12°C jusqu'à la température requise pour obtenir l'évaporation complète des polluants organiques. Cette température dépend du type de polluants et du temps de résidence prévu pour le projet spécifique. La Figure 3 représente l'évolution typique de la température, mesurée aux points les plus froids du sol, en fonction du temps.

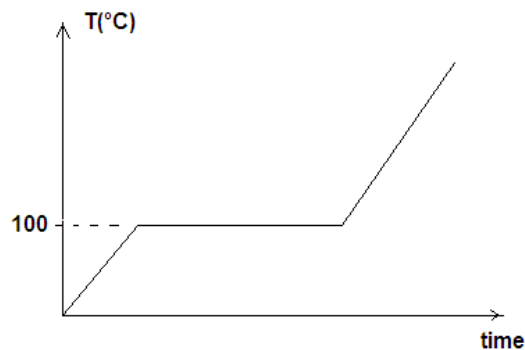


Figure 3: Evolution de la température dans le sol

La Figure 4 représente l'évolution de la température au cours d'un projet in situ réalisé à Liège.

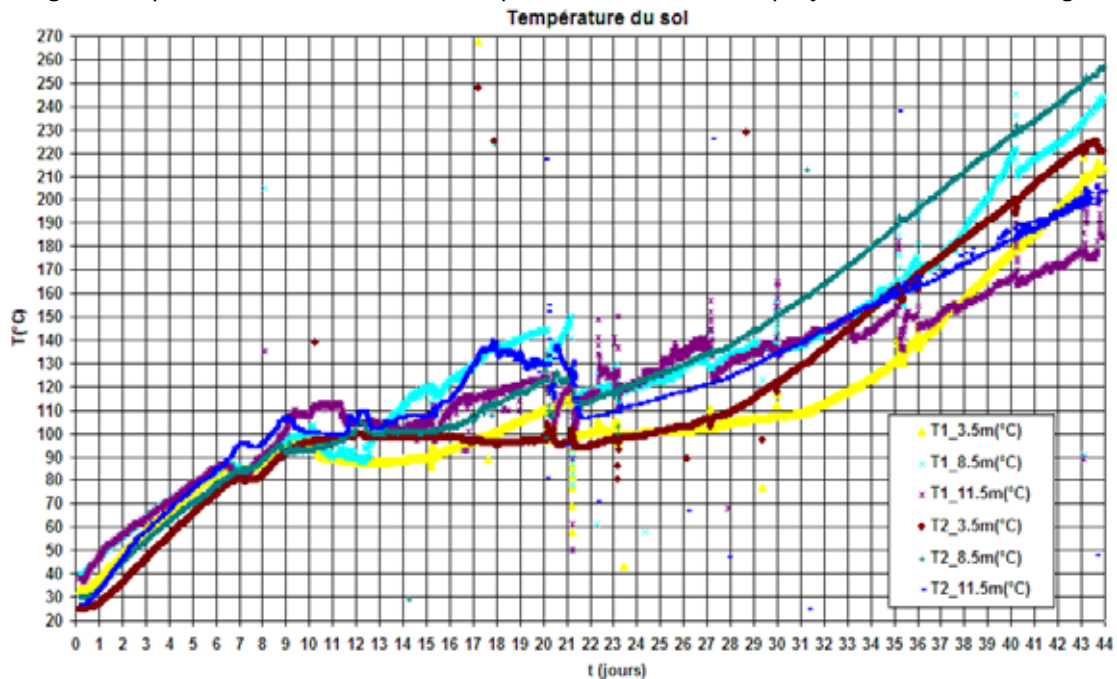


Figure 4 : Evolution de la température pour un projet in situ (Liège)

On peut clairement distinguer trois phases de chauffage ;

- La première phase durant laquelle la température monte jusqu'à la température d'ébullition de l'eau (100°C)
- La deuxième phase au cours de laquelle se produit l'évaporation de l'eau (stable à 100°C)
- La troisième phase au cours de laquelle la température monte pour atteindre 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 + polluants) sont chauffés jusqu'à la température d'ébullition de l'eau. Le temps requis pour cette phase varie en fonction du type de sol et de son taux d'humidité.

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, de la puissance de chauffe ainsi que de la vitesse de circulation du gaz caloporteur. Lorsque toute l'eau est évaporée, la température du sol monte rapidement au-delà de 100°C. Pendant la montée en température, les composés organiques se volatilisent progressivement et sont dirigés vers les éléments chauffants (dépression engendrée par effet venturi). En fonction de la quantité d'oxygène présente dans le sol, des réactions oxydatives et/ou de pyrolyse ont lieu. Une partie importante des composés organiques présents dans le sol est dès lors détruite in situ. La partie restante est détruite dans le circuit des gaz et dans la chambre de combustion, où la température dépasse 850°C.

La Figure 5 représente l'évolution de la saturation en liquide (eau et polluant) durant le traitement.

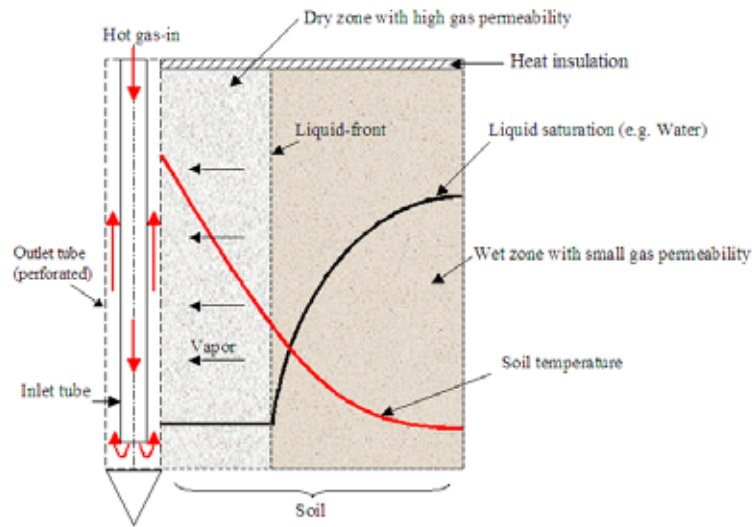


Figure 5: Interface Liquide – Vapeur

Grâce à la zone à haute perméabilité formée autour des tubes (en raison du séchage thermique), les vapeurs sont conduites aisément vers les éléments chauffants (créant leur propre perméabilité à l'air, y.c. dans des argiles compactes).

La Figure 6 représente les températures typiques de gaz et de sol à la fin du traitement (CFD software: Fluent®)

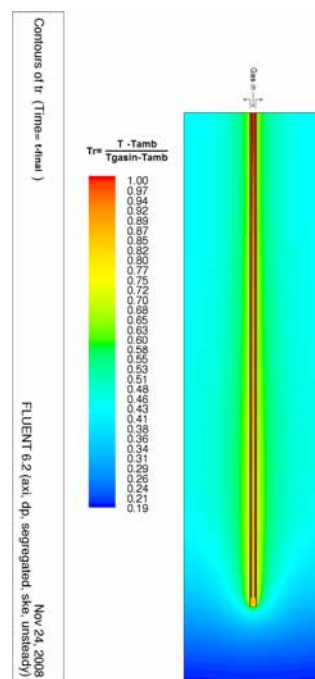


Figure 6: Températures typiques gaz et sols

### 3.1.2.4. MECANISMES PHYSIQUES ET CHIMIQUES PENDANT LE CHAUFFAGE DU SOL

Quand le sol est chauffé, les composés organiques volatils et semi-volatils (VOC et SVOC) sont vaporisés et détruits par plusieurs mécanismes. Ces mécanismes incluent :

- |  |   |                   |
|--|---|-------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Évaporation</li> <li>- Ébullition de l'eau et du contaminant (H<sub>2</sub>O et COV)</li> <li>- Distillation par la vapeur d'eau</li> </ul> | <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; height: 40px; width: 20px; margin: 0 auto;"></div> | <p>≤100°C</p>     |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ébullition du contaminant (COSV)</li> <li>- Oxydation</li> <li>- Pyrolyse/Hydrolyse</li> </ul>  | <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; height: 40px; width: 20px; margin: 0 auto;"></div> | <p>&gt; 100°C</p> |

Les constituants vaporisés sont véhiculés vers les cannes chauffantes. Pendant leur déplacement dans le sol, les vapeurs se décomposent en raison des réactions d'oxydation ou de pyrolyse. Une part importante des contaminants est détruite dans le sol avant d'atteindre les tubes. La fraction significative de la masse de contaminant qui est détruite dans le sol est attribuée à l'exposition des contaminants aux températures élevées pendant un temps de séjour assez long : quelques jours ou semaines sont suffisants pour que des réactions chimiques de destructions (oxydation et pyrolyse) se produisent entre 300 et 500°C.

### 3.1.2.5. PLACEMENT DES ELEMENTS CHAUFFANTS

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.

La Figure 7 présente un équipement standard de forage pour le placement de tubes peu profonds (<6m). L'équipement fonctionne grâce à un marteau en tête de tube et pousse cette tête dans le sol au moyen d'air comprimé.

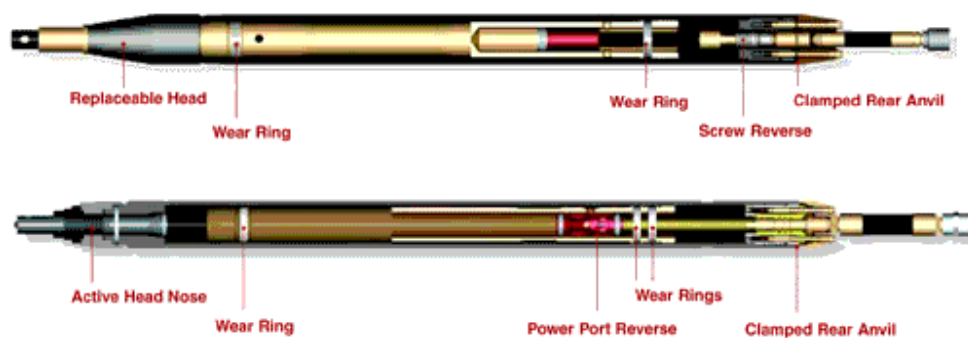


Figure 7 : Unités de forage

### 3.1.2.6. DISPOSITION - RESEAU

Le réseau d'éléments chauffants (Figure 8) est placé en configuration triangulaire équilatérale. Cette configuration permet d'avoir un rayon d'action constant pour chaque élément chauffant et donc un même temps de traitement pour l'ensemble de la zone.

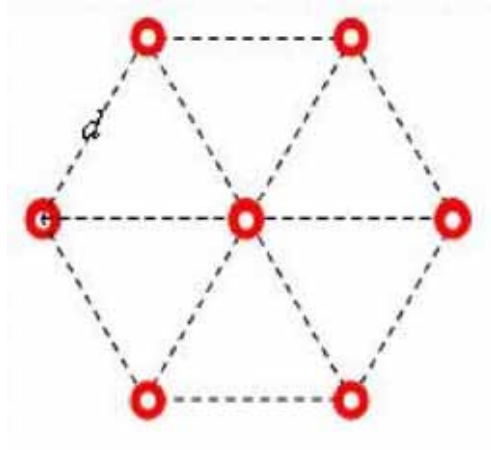


Figure 8: Disposition des cannes à équidistance l'une de l'autre

### 3.1.3. LA DESORPTION DES POLLUANTS

#### 3.1.3.1. DUREE DE CHAUFFAGE DU SOL

La durée de chauffage du sol dépend de:

1. La puissance de chauffe (température et vitesse de circulation)
2. La distance entre les tubes
3. La température finale au point le plus froid (centre du triangle)
4. Les caractéristiques du sol
5. La teneur en eau et en contaminants

La Figure 9 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. La puissance de chauffe est de 2000 W/m de tubes.

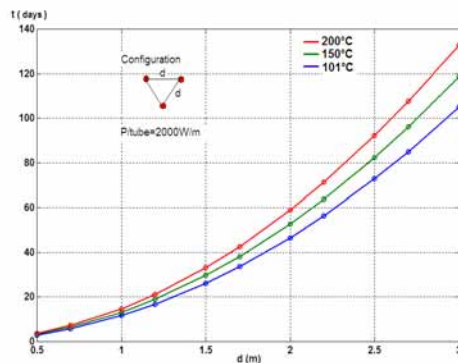


Figure 9 : Durée de chauffe en fonction de la distance entre les tubes

### 3.1.3.2.

### APPLICATIONS

#### **3.1.3.2.1.**

#### ***Hydrocarbures***

Les hydrocarbures sont des molécules composées principalement d'hydrogène et de carbone. Les températures d'évaporation des hydrocarbures varient principalement 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 sera élevée. Les hydrocarbures présents dans les sols pollués vont 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 rencontrant quant à eux le plus souvent dans le cadre de pollutions liées à des produits issus du charbon.

Dans tous les cas, les hydrocarbures se volatilisent au cours du processus de désorption thermique (y.c. le procédé Thermopile©) et sont acheminés vers la chambre de combustion. 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 certains cas, certains éléments peuvent également être présents dans le sol, en association avec ces hydrocarbures (Soufre, Chlore, etc). Ces derniers se comportent alors différemment au cours de la désorption et il convient d'y apporter une attention particulière afin de ne pas rejeter à l'atmosphère des éléments polluants.

On trouvera dans la Table 1 les températures d'ébullition (à pression atmosphérique) de la plupart des polluants pour lesquels la désorption thermique (Thermopile©) peut s'appliquer.

Température d'ébullition de certains contaminants	
<b>HAP</b>	
Naphtalene	218 °C
Acenaphtylene	280 °C
Acenaphtalene	279 °C
Fluorene	296 °C
Phenantrene	340 °C
Antracene	342 °C
Fluoranthene	375 °C
Pyrene	393 °C
Benzo(a)Fluranthene	482 °C
Chryseen	488 °C
Benzo(b)Fluoranthene	480 °C
Benzo(k)Fluoranthene	480 °C
Benzo(a)pyrene	371 °C
Benzo(ghi) perylene	550 °C
Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	530 °C
<b>Hydrocarbures</b>	
Essence	221 °C
Diesel	343 °C
Fioul lourd	443 °C
<b>Autres</b>	
PCB	<350 °C
Phenols	310 °C
TNT	300 °C
Cyanide	430 °C
Mercure	320 °C
Sulphure	414 °C
Solvants chlorés	60 °C

Table 1 : Températures d'ébullition des principaux polluants

*Remarque : Les températures présentées dans le tableau ci-dessus sont des températures d'ébullition à pression atmosphériques. L'évaporation, elle, peut se produire à différentes températures inférieures ou égales à cette température d'ébullition.*

### 3.1.3.2.2.

#### Autres polluants

D'autres polluants peuvent être traités par Thermopile© de la même manière qu'ils sont traités par désorption thermique classique. A savoir tout polluant dont la température d'ébullition est inférieure à 550°C environ. Quant à leur comportement au cours du procédé Thermopile©, il pourra différer selon la nature du polluant.

Les polluants organiques proprement dits, à savoir les hydrocarbures (voir plus haut), qu'ils soient aliphatiques, mono-aromatiques, poly-aromatiques ou autres, seront non seulement évaporés durant la phase de chauffe du sol, mais ensuite récupérés et entièrement oxydés (transformés en CO<sub>2</sub> et en H<sub>2</sub>O) dans la chambre de combustion. Il n'y a pas d'autre rejet à l'atmosphère que du CO<sub>2</sub> et de l'H<sub>2</sub>O.

En ce qui concerne les polluants organiques halogénés (solvants chlorés, PCB, dioxines, furanes, pesticides, etc.), le principe de désorption est le même (Thermopile© permet d'extraire la

totalité des polluants du sol en les désorbant), mais leur oxydation dans la chambre de combustion produira des composés halogénés (Chlore notamment) qu'il faudra traiter par un traitement secondaire (voir plus bas) avant rejet à l'atmosphère.

Quant aux polluants inorganiques traitables, tels que les cyanures ou le mercure, leurs cas sont différents. Les cyanures désorbent très bien (selon les complexes, les températures d'ébullition varient de 300°C à 420°C). Dans la chambre de combustion, les complexes cyanurés s'oxydent en dioxyde de Carbone et en oxydes d'azote. Ce dernier devra être suivi minutieusement afin de s'assurer que sa concentration dans les gaz de rejet ne dépasse pas les valeurs limites, sans quoi il conviendra là aussi de mettre en place un traitement secondaire (voir plus bas).

Le cas du mercure est tout à fait particulier. En effet, si le mercure désorbe sans problème (selon les formes, ses températures d'ébullition ne dépassent jamais 550°C), il en va bien entendu autrement quant à son traitement dans l'effluent gazeux. Le traitement du mercure par Thermopile© requiert une installation dédiée et spécifique pour l'ensemble du circuit des gaz.

### **3.1.4. RECUPERATION DES POLLUANTS**

Lorsque les polluants ont atteint leurs conditions d'évaporation, ils migrent vers les éléments chauffants. Cela se produit au travers de chemins préférentiels, et ce grâce à la dépression générée dans les éléments chauffants. Cette dépression est due à la vitesse de circulation des gaz à l'intérieur des tubes, entraînant un effet Venturi.

Les polluants volatilisés peuvent suivre, au sein de la matrice de sol, n'importe quel chemin préférentiel, étant donné que tous conduisent vers les éléments chauffants situés au cœur de la dépression. Même dans des sols fortement argileux, des chemins préférentiels se créent en raison de l'assèchement des argiles, entraînant 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 conditions de surpression, elles-mêmes aussi à la base du mouvement des gaz désorbés vers les points de basse pression (les éléments chauffants).

### **3.1.5. REFROIDISSEMENT DES TERRES**

Après chauffage à une température de max 400°C (mesurée au point le plus froid), le sol est refroidi tout d'abord par circulation d'air froid (plus tard, avec de l'eau). De l'air à 30°C (température maximum de l'air ambiant) est circulé dans le circuit de tubes grâce au ventilateur principal.

Une modélisation a été réalisée afin de déterminer le flux d'air nécessaire pour permettre un refroidissement rapide du sol (quelques jours).

La modélisation est faite grâce à Fluent® (Software CFD)

#### **Modèle:**

Système: Air, tube et sol autour (D=1.5m).

Modèle: 86000 meshes, 2d/axisymétrique, instable, débit turbulent /k- $\omega$  (voir Figure 10)

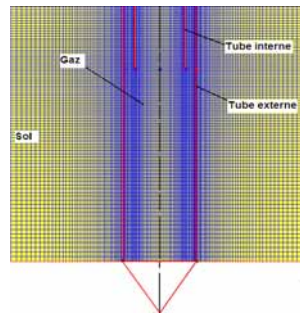


Figure 10 : 2D – asymmetric

Conditions Opérationnelles:

T <sub>air</sub> (°C) Tube In	U <sub>air</sub> Tube In (m/s)	Q <sub>air</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)
30	25	34482
30	35	44000

**U<sub>air</sub>=25m/s à 30°C**

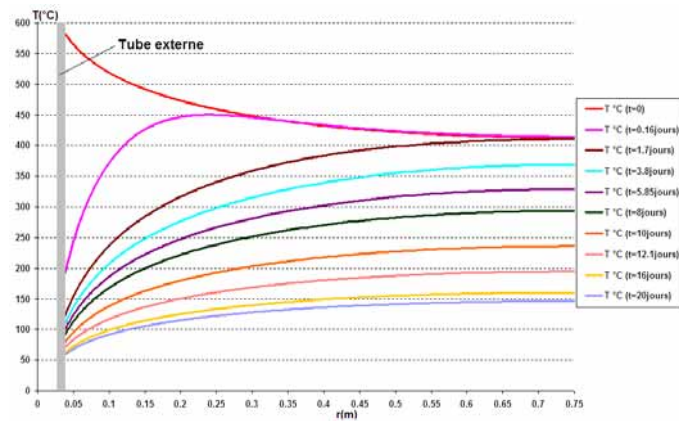


Figure 11 : Profil de température en fonction du temps

Comme indiqué à la Figure 11, la température du sol baisse sous les 145°C après 20 jours (U<sub>air</sub> = 25m/s à 30°C),

La Figure 12 reprend les températures de sortie de l'air en fonction du temps.

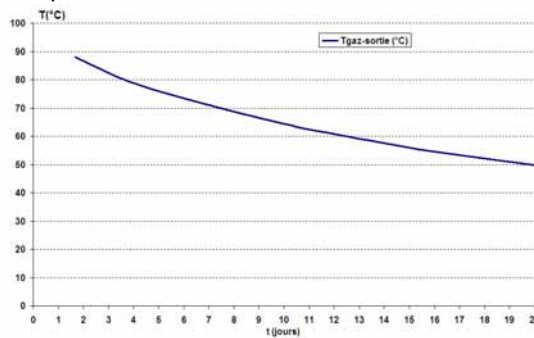


Figure 12 : Température à la sortie des tubes pendant le refroidissement

Lorsque la vitesse de circulation augmente (et par conséquent le débit d'air de refroidissement) - 35 m/s – la baisse de température est plus rapide, comme indiqué à la Figure 13. Après 18 jours, ( $U_{air} = 35\text{m/s}$  at  $30^\circ\text{C}$ ), la température du sol est descendue sous les  $105^\circ\text{C}$

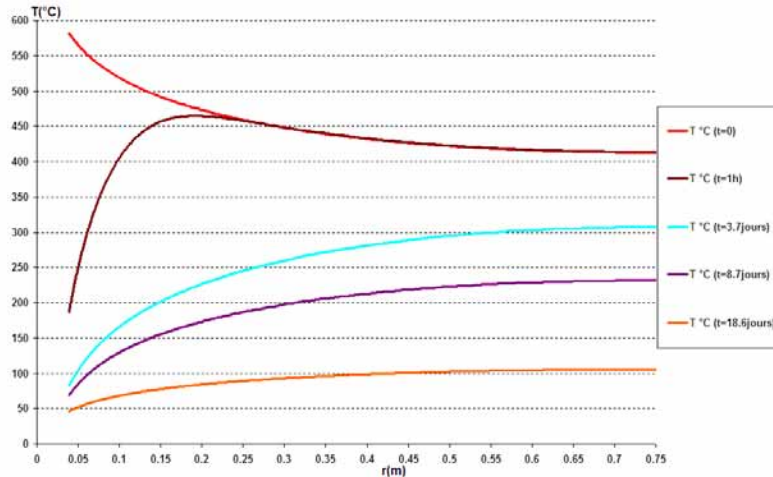


Figure 13: Evolution de la température en fonction du temps à 35 m/s

## 3.2. LE TRAITEMENT DES GAZ

### 3.2.1. TRAITEMENT PRIMAIRE

#### 3.2.1.1. REACTIONS

Le traitement primaire consiste en une oxydation de tous les polluants organiques désorbés qui n'ont pas été oxydés in situ ni dans le réseau de tubes.

Ces gaz sont collectés et amenés vers une chambre de combustion où ils sont oxydés, c'est-à-dire complètement transformés en  $\text{CO}_2$  et en  $\text{H}_2\text{O}$  (pour la fraction hydrocarbonée).

Au cours du procédé, et parfois avant que les gaz n'arrivent dans la chambre de combustion, les réactions suivantes peuvent se produire:

- Pyrolyse :
  - $\text{C}_x\text{H}_y \Leftrightarrow x\text{C}(\text{coke}) + y/2\text{H}_2$
- Hydrolyse:
  - $\text{C}_x\text{H}_y + 2x\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow x\text{CO}_2 + (2x+y/2)\text{H}_2$
  - $\text{C}(\text{coke}) + 2\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$
- Oxydation:
  - $\text{C}(\text{s}) + \text{O}_2 \Leftrightarrow \text{CO}_2$
  - $\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \Leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$
  - $\text{C}_x\text{H}_y + (x+y/4)\text{O}_2 \Leftrightarrow x\text{CO}_2 + y/2\text{H}_2\text{O}$

L'oxydation complète des gaz (phénomène ultime et principal) a lieu dans la chambre de combustion. Afin d'atteindre une efficacité proche de 100%, il convient de tenir compte de trois éléments principaux :

- La température
- Le temps de séjour
- Turbulence

La température et le temps de résidence sont liés par la loi de cinétique d'Arrhénius

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

Où

C/Co :	Concentration résiduelle
t :	Temps de résidence
T :	Température
R :	Constante des gaz parfaits
E :	Energie d'activation
A :	Constante dépendant du type de polluant

Le temps de séjour et la température sont donc fonction du type de polluant et le dimensionnement se fait en fonction du polluant à traiter le plus lourd.

La turbulence est générée par la conception spécifique de la chambre de combustion.

### 3.2.1.2. PARAMÈTRES CLÉ ET CONTRÔLES

Les paramètres-clé pour un traitement primaire sont le temps de résidence, la température et le taux d'oxygène. La combustion complète est suivie grâce à la mesure en continu du taux de CO, qui indique clairement que l'oxydation a été complète (la présence de CO est le signe d'une combustion incomplète).

### 3.2.2. TRAITEMENT SECONDAIRE DES GAZ

En fonction du type de polluant traité, il est possible qu'un traitement secondaire des gaz soit nécessaire. Tel est le cas lorsque des éléments tels que le S, Cl, Br, Hg ou des NOx se retrouvent dans les gaz circulant et/ou à traiter.

Lorsque ces éléments sont en concentrations supérieures aux valeurs admissibles pour les émissions atmosphériques, les gaz de purge doivent faire l'objet d'un traitement secondaire. Il est important de noter que **le traitement secondaire ne s'applique qu'aux gaz de purge**, et non à la totalité des gaz circulant dans le réseau. L'ordre de grandeur du débit de gaz secondaire varie en fonction des installations de 300 à 1,500 Nm<sup>3</sup>/h.

Les unités de traitement secondaire 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 moyenne température. Des équipements d'oxydation catalytique, de traitement au charbon actif ou de lavage acide sont les plus communément mis en œuvre.

## 4. MISE EN OEUVRE

### 4.1. INTRODUCTION

La mise en œuvre de technologies de traitement de sols peut se faire de différentes manières. La terminologie utilisée considère les traitements in situ, off site, on site, ... Afin d'éviter les malentendus, nous avons adopté les définitions suivantes :

**In situ**: Tout type de traitement ne nécessitant pas d'excavation du sol

**On site**: Tout type de traitement nécessitant l'excavation du sol mais ne nécessitant pas de transport du sol en dehors du terrain à traiter.

**Off site**: Tout type de traitement ayant lieu sur un autre site que le terrain à traiter.

### 4.2. IN SITU

La technologie Thermopile© in-situ utilise des éléments chauffants placés verticalement dans le sol (Figure 14). Ces éléments sont connectés à une installation de combustion en surface.



Figure 14 : Thermopile © en mode "in-situ"

### 4.3. EX-SITU (ON SITE OU OFF SITE)

Thermopile© peut également traiter des terres et matériaux préalablement excavés. Dans ce cas, ces derniers sont placés dans un bassin préalablement construit (Figure 15). La taille du bassin dépend de la quantité totale de matériaux à traiter et du type d'installation Thermopile© utilisée (T1 ou T2). Lorsque les matériaux sont mis en place, les éléments chauffants sont placés, après forage, dans la masse à traiter. Ces éléments sont ensuite reliés entre eux par des connections (partie flexible – partie solide) sous forme de réseau, puis reliés au travers des collecteurs principaux à l'unité de traitement.

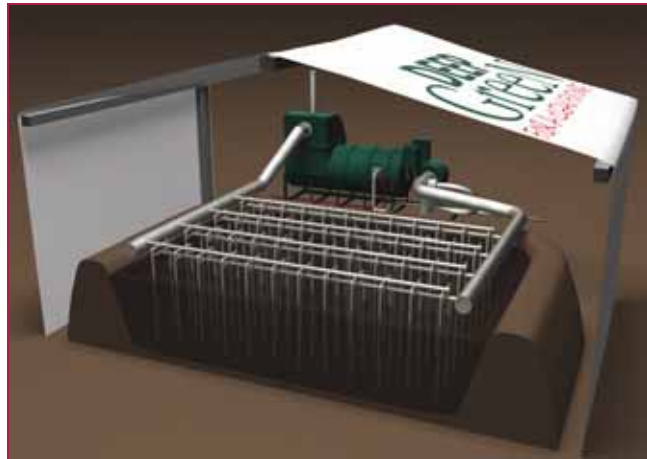


Figure 15: Thermopile© en mode ex-situ



Figure 16 : Disposition T2 ex-situ avec 8 bassins et 4 unités

## 5. CONTROLES

### 5.1. CONTROLE DE PROCESS

La Figure 17 reprend les différents paramètres suivis en continu dans le circuit de gaz (températures, pressions, concentrations en produits de combustibles, ...).

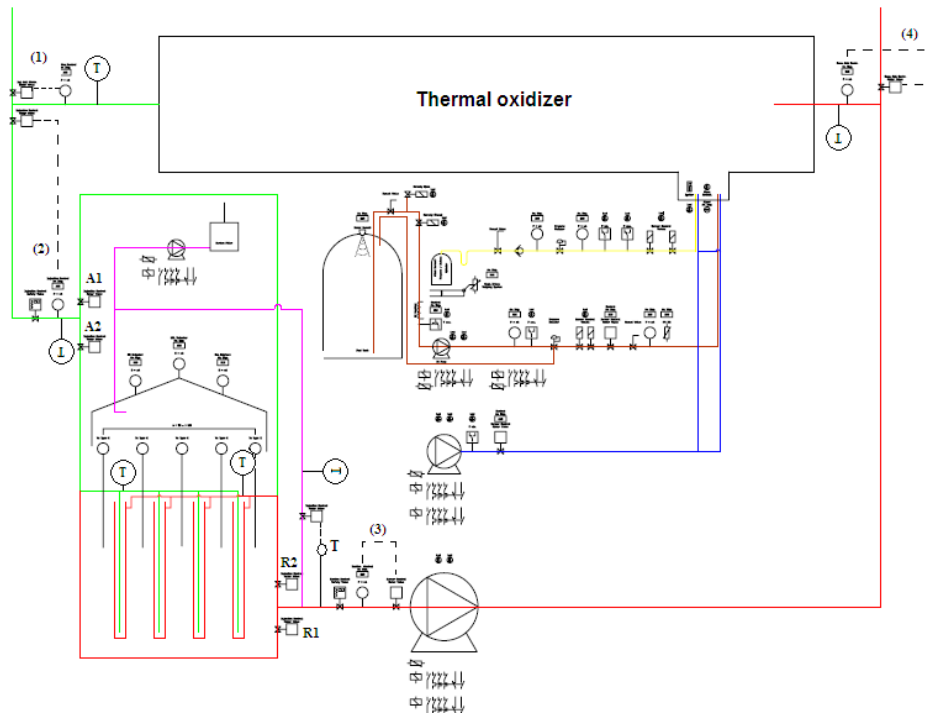


Figure 17 : Contrôles de process

Au sein de la masse de sol/matériau, le paramètre unique suivi en continu est la température. Cette dernière est mesurée au moyen de thermocouples placés à différentes profondeurs, aux endroits les plus froids (à équidistance de 3 éléments chauffants).

Le procédé peut être suivi à distance à partir d'un portable ou d'un PC. Un SMS est envoyé lors de chaque interruption ou alarme de dépassement d'une valeur clé. Aucune présence humaine sur place n'est en principe requise pendant la période de chauffe.

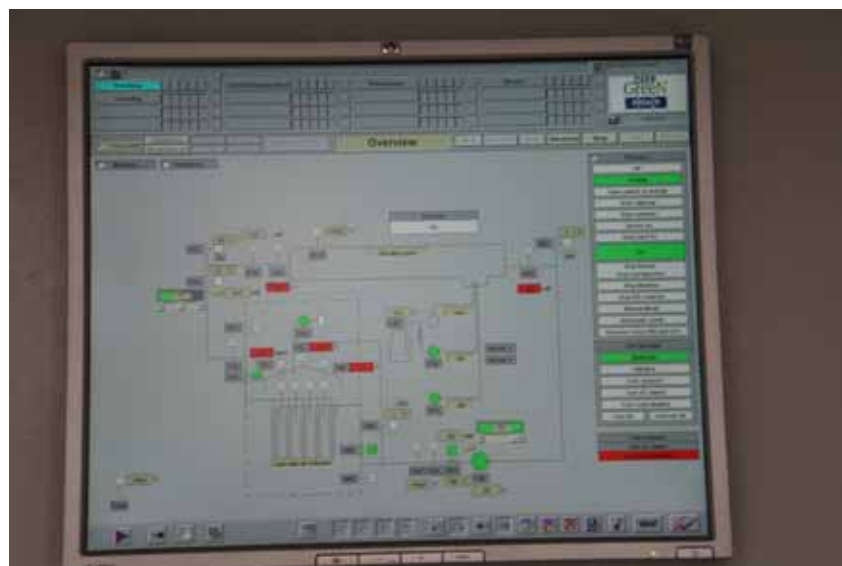
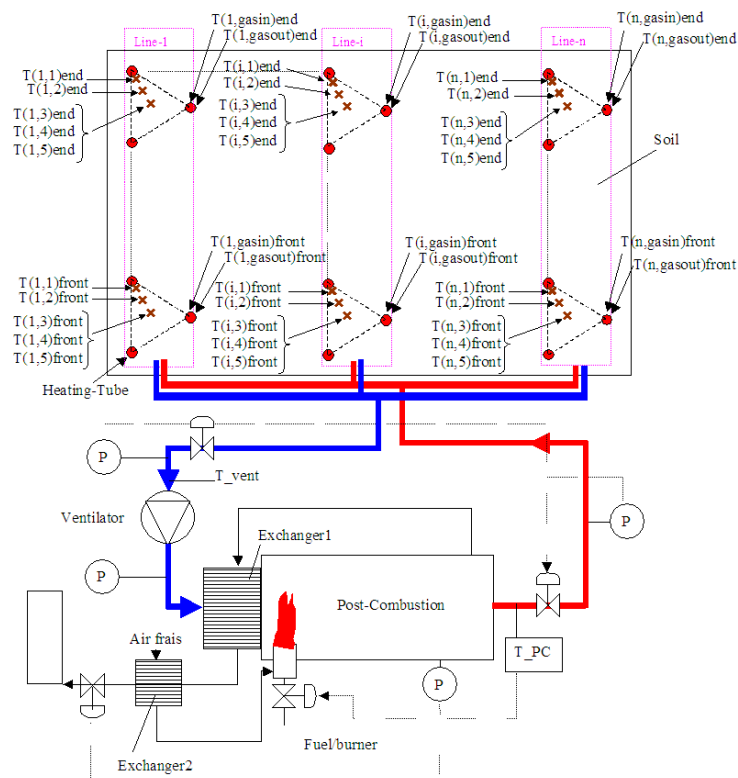


Figure 18 : Localisation des thermocouples de suivi et contrôle

## 5.2. CONTROLE DES GAZ DE REJET

Les gaz de rejet (uniquement les gaz de purge) sont analysés en continu. Les paramètres mesurés par l'installation de monitoring sont les suivants : O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>.

## 6. EQUIPEMENTS DISPONIBLES

### 6.1. T-LAB 1



Figure 19: Installation T-Lab 1

### 6.2. T-LAB 2



Figure 20: Installation T-Lab 2

### 6.3. T-LAB 3



Figure 21: Installation T-Lab 3

### 6.4. T-1.1.



Figure 22 : Unité T-1.1

## 6.5. T-1.2.



Figure 23 : Unité T-1.2

## 6.6. T-2





Figure 24: Installation T-2

Caractéristiques techniques d'une unité Thermopile© T2

- Capacité thermique de la chambre de combustion : 3 MW
- Température de combustion :  $>850^{\circ}\text{C}$
- Temps de résidence dans la chambre de combustion :  $> 2\text{sec.}$
- Concentration en oxygène des gaz de purge : min 6% - max 11%
- Débit gaz de purge :  $1500\text{Nm}^3/\text{h}$  (à  $20^{\circ}\text{C}$ )
- Nombre total d'éléments chauffants par batch (env.  $2500\text{m}^3$ ) : 288
- Longueur totale des tubes : 1152 m
- Consommation moyenne (fuel) : 80 à 175 l/h
- Température finale (HCT ou équivalent) : 200 à  $250^{\circ}\text{C}$  (au point le plus froid)
- Température finale (HAP ou équivalent) : 350 à  $400^{\circ}\text{C}$  (au point le plus froid)

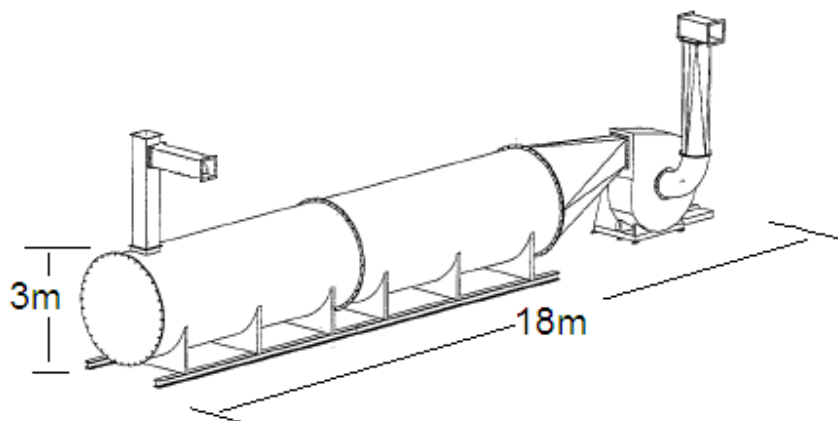


Figure 25 : Dimensions d'une unité T2

Chambre de combustion T2

Longueur : 12m  
 Hauteur : 3m  
 Brûleurs : 2 brûleurs au fuel (2 x 150 l/h à pleine puissance)  
 Température de fonctionnement maximale : 1100°C

Ventilateur principal

Courbe de fonctionnement: voir Figure 26  
 Température maximale de fonctionnement : 550°C

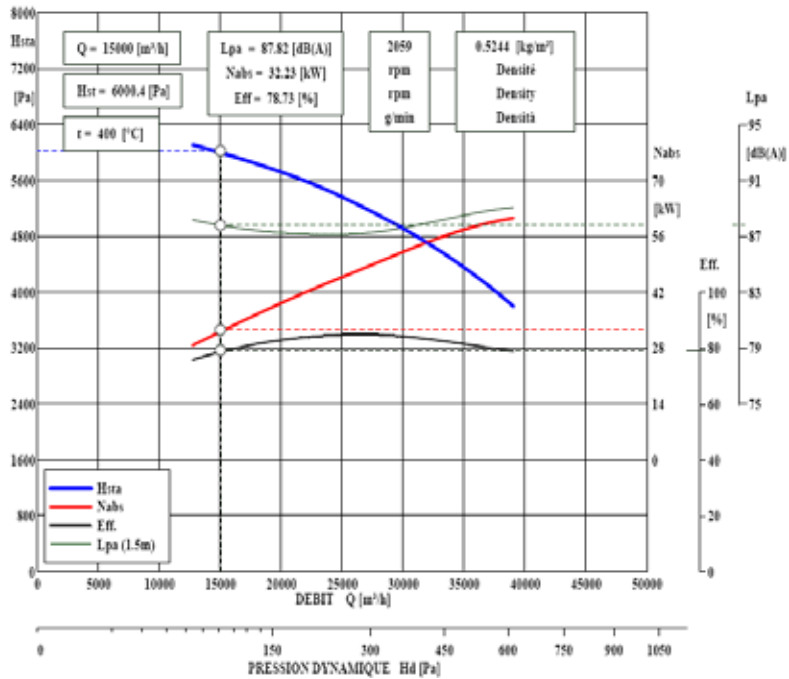


Figure 26 : Courbe de fonctionnement du ventilateur principal T2

## 7. LISTE DES FIGURES

Figure 1: Cycle de détente/contraction du gaz.....	5
Figure 2 : Eléments chauffants .....	6
Figure 3: Evolution de la température dans le sol.....	6
Figure 4 : Evolution de la température pour un projet in situ (Liège).....	7
Figure 5: Interface Liquide – Vapeur.....	8
Figure 6: Températures typiques gaz et sols .....	8
Figure 7 : Unités de forage.....	9
Figure 8: Disposition des cannes à équidistance l’une de l’autre.....	10
Figure 9 : Durée de chauffe en fonction de la distance entre les tubes.....	10
Figure 10 : 2D – asymmetric .....	14
Figure 11 : Profil de température en fonction du temps.....	14
Figure 12 : Température à la sortie des tubes pendant le refroidissement.....	14
Figure 13: soil temperature evolution over time at 35m/s .....	15
Figure 14 : Thermopile © en mode “in-situ” .....	17
Figure 15: Thermopile© en mode ex-situ .....	18
Figure 16 : Disposition T2 ex-situ avec 8 bassins et 4 unités.....	18
Figure 17 : Contrôles de process.....	19
Figure 18 : Localisation des thermocouples de suivi et contrôle .....	20
Figure 19: Installation T-Lab 1.....	21
Figure 20: Installation T-Lab 2.....	21
Figure 21: Installation T-Lab 3.....	22
Figure 22 : Unité T-1.1.....	22
Figure 23 : Unité T-1.2.....	23
Figure 24: Installation T-2 .....	24
Figure 25 : Dimensions d’une unité T2 .....	24
Figure 26 : Courbe de fonctionnement du ventilateur principal T2.....	25