



Session
Traitement in situ des sols et des eaux souterraines

RETOUR D'EXPERIENCE sur la **DESORPTION THERMIQUE IN SITU** **« TIEDE »**



SOMMAIRE

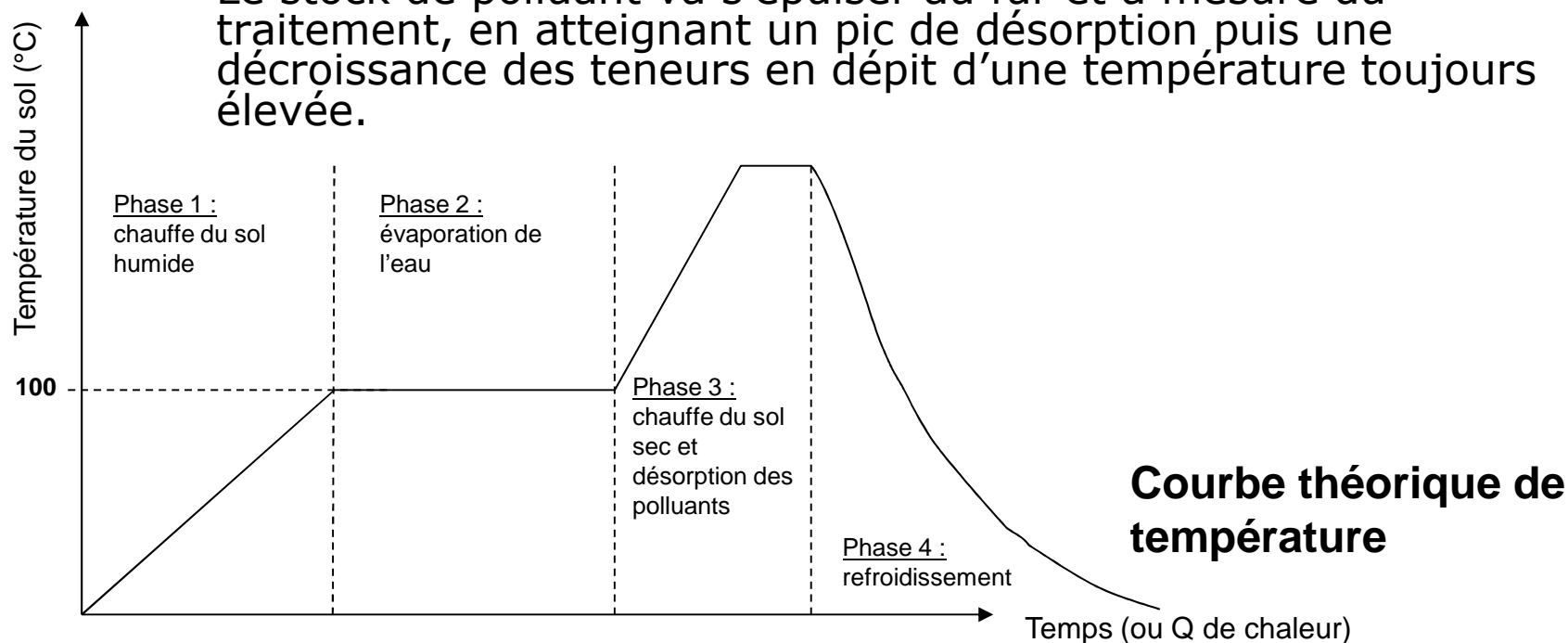
- La théorie du traitement par désorption thermique
- Etude de cas : contexte général
 - Etude de Risque
 - Objectifs de traitement
- La solution retenue
- Phase pilote
 - Test de perméabilité à l'air
 - Essai de chauffe
- Installation
- Aléas de départ
- Résultats
- Bilan - Conclusion



THEORIE DU TRAITEMENT

- Le traitement par désorption thermique permet de créer les conditions thermodynamiques favorables à la désorption du polluant.
- Une fois désorbé, ce polluant est collecté par un réseau de venting classique, adapté à des hautes températures.
- Un tel traitement comporte plusieurs phases :
- Phase I+II → Installation des conditions de désorption
 - L'apport d'énergie au sol par injection d'air chaud permet l'assèchement des sols et donc l'ouverture porale des sols, améliorant les performances du venting. De plus, l'énergie fournie permet une montée en température du sol et donc l'augmentation de la pression de vapeur saturante en polluant dans l'air du sol.

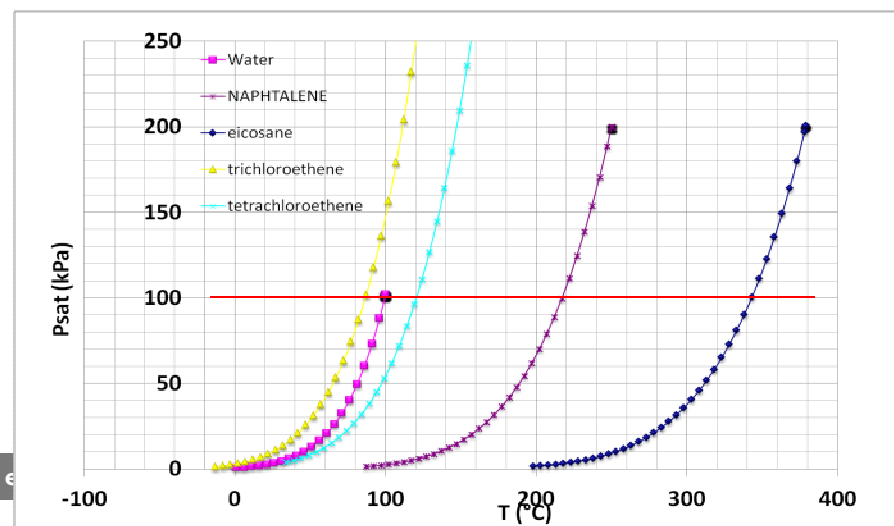
- Phase III → Désorption
 - Si ce phénomène coexiste durant la mise en place des bonnes conditions thermodynamiques, il devient prépondérant une fois que l'air du sol est asséché et que la porosité du sol est bien ouverte. L'augmentation de la température favorise la désorption thermique, en augmentant la pression partielle de naphthalène dans le gaz du sol.
 - Le stock de polluant va s'épuiser au fur et à mesure du traitement, en atteignant un pic de désorption puis une décroissance des teneurs en dépit d'une température toujours élevée.



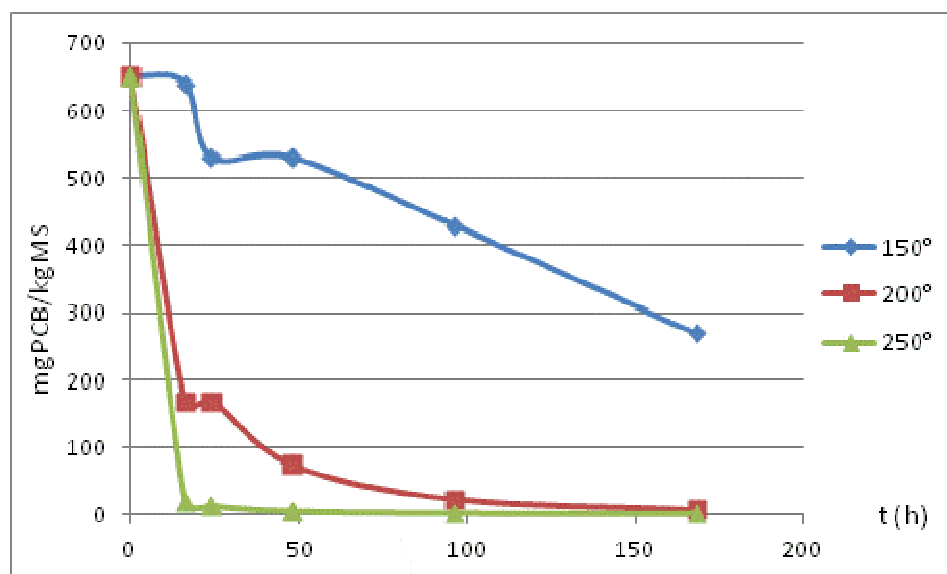
- Dans la littérature, on trouve que la P_{sat} du naphthalène à 20°C est de l'ordre de 7,2 Pa. Selon l'équation d'Antoine, la P_{sat} du naphthalène à 87°C est de 1,37 kPa et de 3 kPa à 100°C.
- (87°C représente la température moyenne qui a été obtenue dans le sol lors du traitement (entre 50°C et 200°C))
- Ainsi le ratio entre la pression partielle à 87°C et celle à 20°C est de 190. C'est-à-dire qu'à l'équilibre, il y a 190 fois plus de naphthalène dans les gaz du sol à 87 °C qu'à 20 °C.

Courbes de pression saturante : chaque composé présente un niveau de volatilisation variant en fonction de la température

À 100 kPa : T° d'ébullition sous 1 atm



- Au laboratoire de VALGO :
Les terres contaminées sont introduites dans une unité de désorption, munie d'une ventilation, à différentes températures. Des échantillons du sol en cours de désorption sont prélevés périodiquement et la teneur résiduelle en polluants est mesurée.



Validation des interactions chimiques



Désorption thermique - MODELISATION

- Pour estimer les phénomènes physiques, nous avons créé un code de calcul avec le Groupe d'Etude des Milieux Poreux de l'IMFT
- Le modèle prend en compte les gaz de l'air, l'eau et la vapeur, ainsi qu'un polluant.
- La matrice sol est définie par différentes grandeurs, notamment perméabilité
- Le calcul démarre en appliquant une température et une différence de pression entre 2 points
- Le logiciel calcule les vecteurs vitesses et pression, ainsi que leurs évolutions de proche en proche

```

format      ascii;
class       dictionary;
location    "constant";
object      transportProperties;
}
// *****

transportModel Newtonian;
nu           nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-05; // necessaire pour la boucle pimple
createFields.H)

// [kg m s K kgMol A cd ]
k           k [ 0 2 0 0 0 0 0 ] 1e-10;
mu          mu [ 1 -1 -1 0 0 0 0 ] 1.8e-05;
eps_l       eps_l [ 0 0 0 0 0 0 0 ] 0.1;
eps_g       eps_g [ 0 0 0 0 0 0 0 ] 0.3;

rho_l       rho_l [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1000;
rho_P       rho_P [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1162;
rho_s       rho_s [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1800;

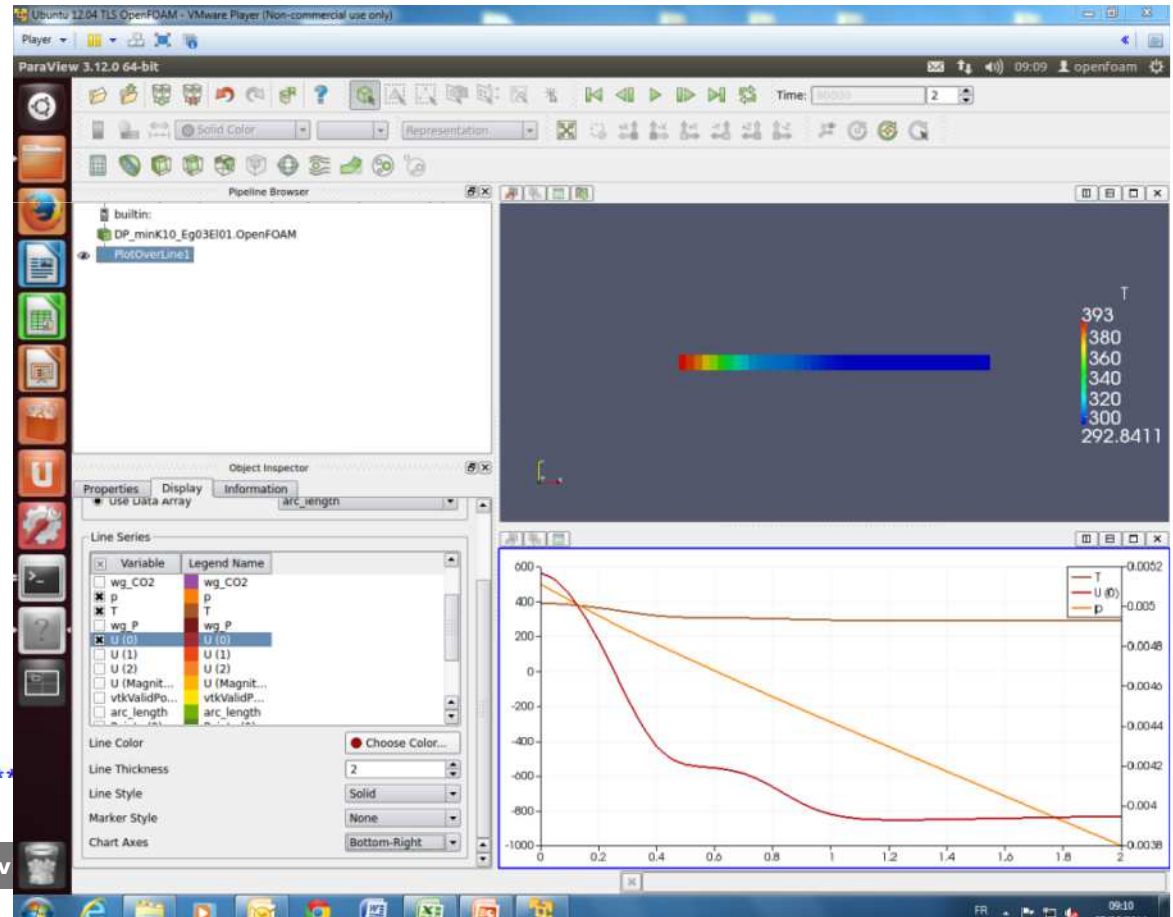
lambda      lambda [ 1 1 -3 -1 0 0 0 ] 0.8;
D           D [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-6;
Cpg         Cpg [ 0 2 -2 -1 0 0 0 ] 1000;
Cps         Cps [ 0 2 -2 -1 0 0 0 ] 2000;
Cpl         Cpl [ 0 2 -2 -1 0 0 0 ] 2000;

M_h2o       M_h2o [ 1 0 0 0 -1 0 0 ] 18;
M_N2        M_N2 [ 1 0 0 0 -1 0 0 ] 28;
M_CO2       M_CO2 [ 1 0 0 0 -1 0 0 ] 44;
M_O2        M_O2 [ 1 0 0 0 -1 0 0 ] 32;
M_P         M_P [ 1 0 0 0 -1 0 0 ] 128;

R           R [ 1 2 -2 -1 -1 0 0 ] 8314.4621;
p0          p0 [ 1 -1 -2 0 0 0 0 ] 101325;

sigma       sigma [ 0 0 -1 0 0 0 0 ] 0.5;
// *****

```





SOMMAIRE

- La théorie du traitement par désorption thermique
- Etude de cas : contexte général
 - Etude de Risque
 - Objectifs de traitement
- La solution retenue
- Phase pilote
 - Test de perméabilité à l'air
 - Essai de chauffe
- Installation
- Aléas de départ
- Résultats
- Bilan - Conclusion

- Le chantier se situe sur l'Ile Beaulieu, à Nantes, zone en plein renouveau ; il s'agit d'une ancienne concession automobile, qui doit être cédée avant démolition, dans un projet de reconversion immobilière.



- Les polluants, BTEX et naphtalène, sont dans un panache principalement situé sous le bâtiment, provenant de l'activité d'une ancienne fonderie, avant aménagement.
- Concentration initiale* en naphtalène :
9130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les gaz du sol et 12 000 mg/kg MS sur les sols



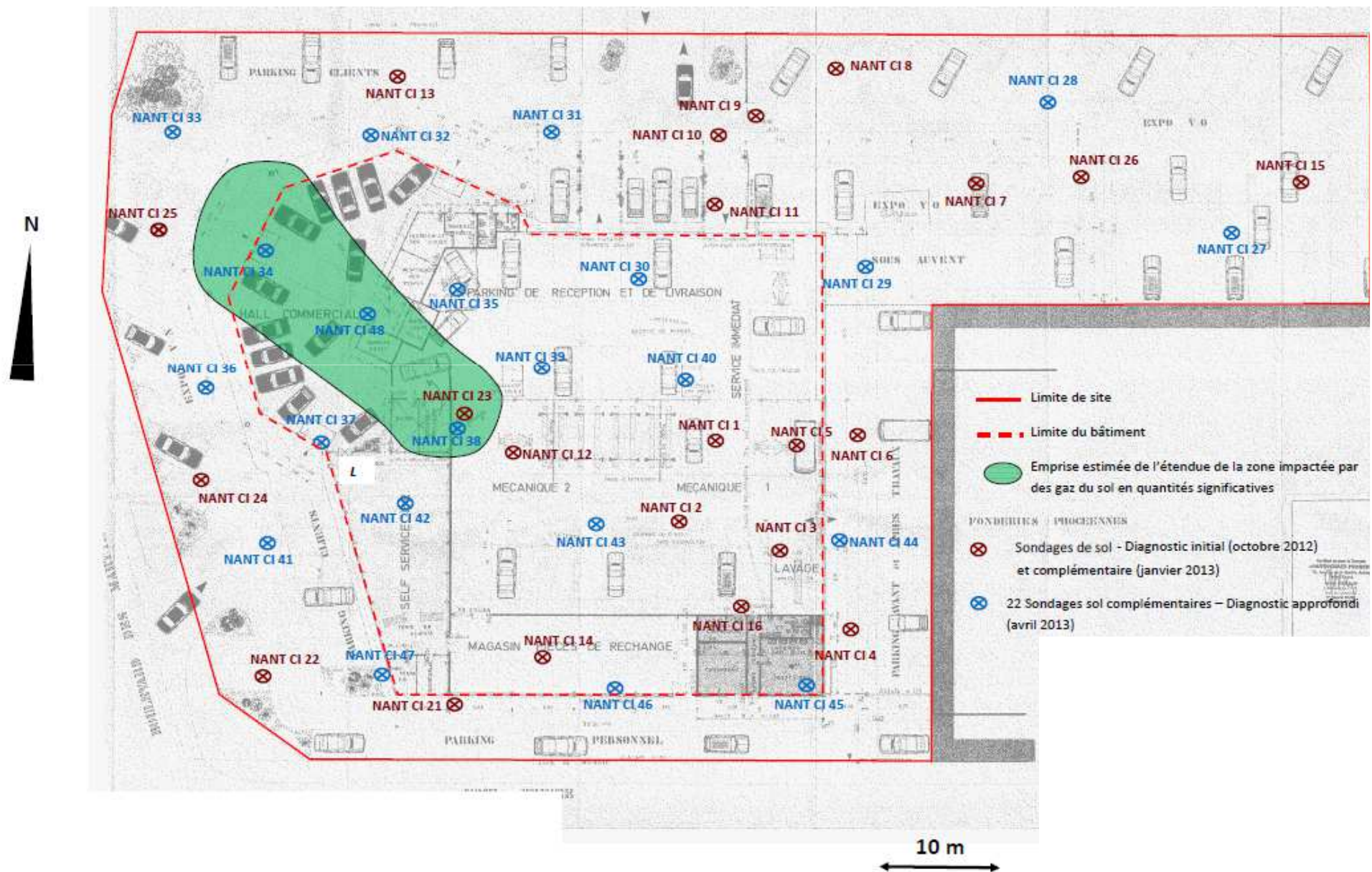
DIAGNOSTIC – ETUDE DE RISQUE

- Si les différentes études ont mis en évidence une contamination du site par des hydrocarbures, des HAP et des métaux, l'étude de risque conclut que le facteur de risque majeur, **nécessitant une intervention et qui détermine la conduite des travaux**, est la teneur des gaz du sol en naphthalène.
- Le naphthalène est présent au droit de 3 zones sur le site :
 - Zone NANT C23-38 : 12 000 mg/kgMS.
Sur le piézair à 3 m : 9 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
 - Zone NANT C48 : 0,087 mg/kgMS.
Sur le piézair à 1 m : 583 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
 - Zone NANT C34 : 40 mg/kgMS.
Sur le piézair à 1 m (PA4) : 8 625 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



CONTEXTE GENERAL

- Les **contraintes** urbaines et du bâti ont orienté vers des techniques in situ, mais la présence de sources-sol en naphtalène pur (jusqu' 12 g/kg) rendaient les modélisations de venting simple beaucoup trop longues dans le temps.
 - ($T_{éb} = 218^{\circ}\text{C}$; $P_{\text{sat}_{20^{\circ}}} = 7 \text{ Pa}$)
- D'où l'idée de favoriser la désorption du naphtalène par un apport modéré de chaleur dans le sol.
- La **lithologie** de la zone polluée est composée d'un horizon de remblai sablo graveleux entre 0 et 4 m en moyenne puis un horizon limoneux au delà.





OBJECTIFS DE REHABILITATION

- Le principe général de l'opération est de traiter les sources de pollution in situ, pour **atteindre des teneurs résiduelles en naphthalène inférieures à 300 µg/m³**, dans les gaz du sol.



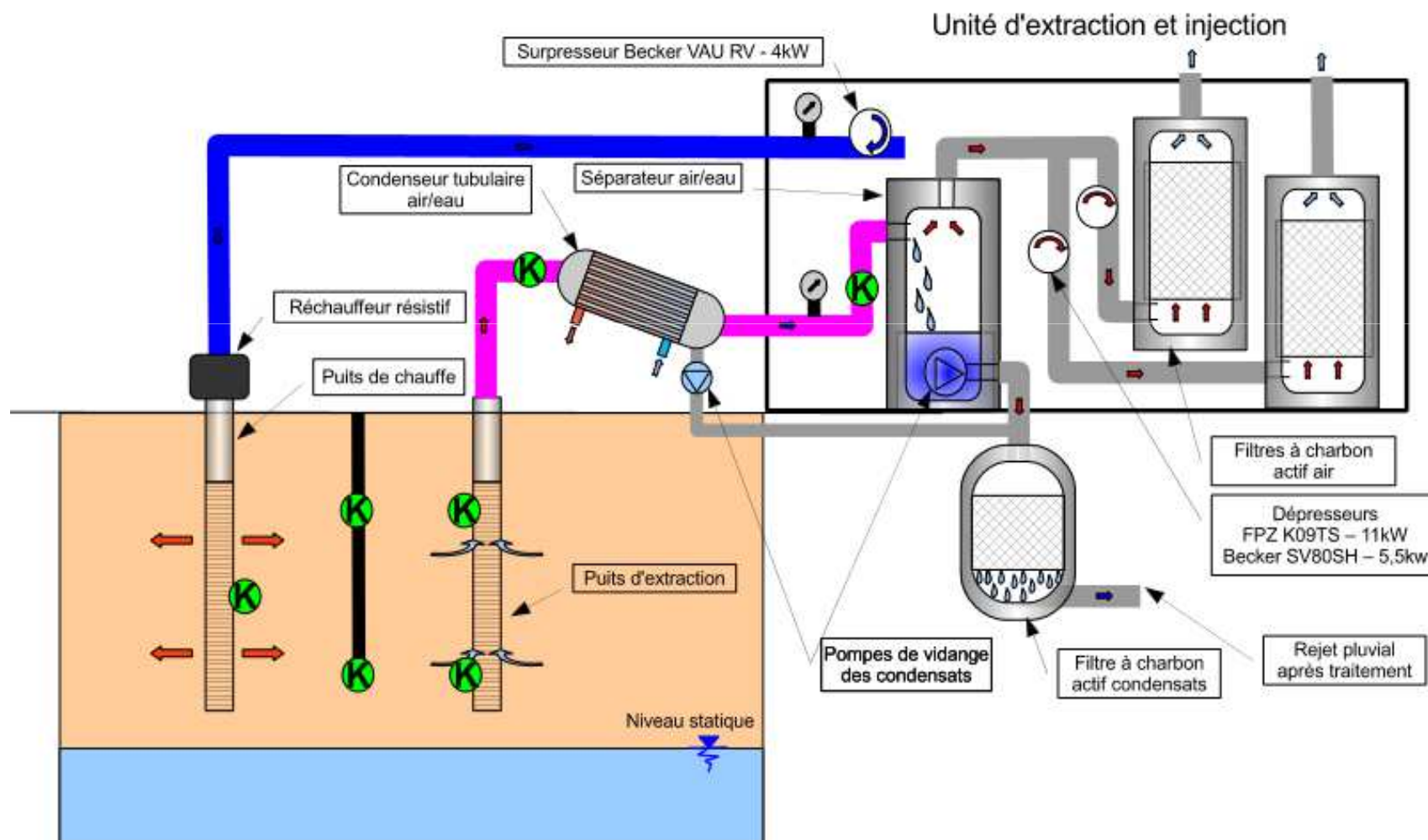
SOMMAIRE

- La théorie du traitement par désorption thermique
- Etude de cas : contexte général
 - Etude de Risque
 - Objectifs de traitement
- La solution retenue
- Phase pilote
 - Test de perméabilité à l'air
 - Essai de chauffe
- Installation
- Aléas de départ
- Résultats
- Bilan - Conclusion



LA SOLUTION RETENUE

- Face aux contraintes imposées par le site :
 - Délais courts de traitement
 - Le naphthalène est principalement adsorbé dans les sols
 - l'excavation semblait trop contraignante et trop compliquée
- La désorption thermique in-situ a été retenue
 - *Principe* : application de chaleur au sol afin d'y extraire les polluants par volatilisation et de les récupérer, une fois volatilisés, dans un réseau de venting.
 - *Avantage* : La technique de traitement par désorption in-situ permet le traitement des naphthalènes qui sont difficilement extractibles par une autre méthode in-situ puisqu'adsorbés dans les sols.
- → Phase pilote de 1 mois suivi d'un traitement de 4 mois





LA SOLUTION RETENUE

- En ambiance urbaine, la solution électrique a été retenue, rendue possible par le calibre de l'ancienne installation
- Dans le commerce des équipements industriels, on trouve des réchauffeurs électriques, à placer en ligne, avec différentes options de régulation et commandes.

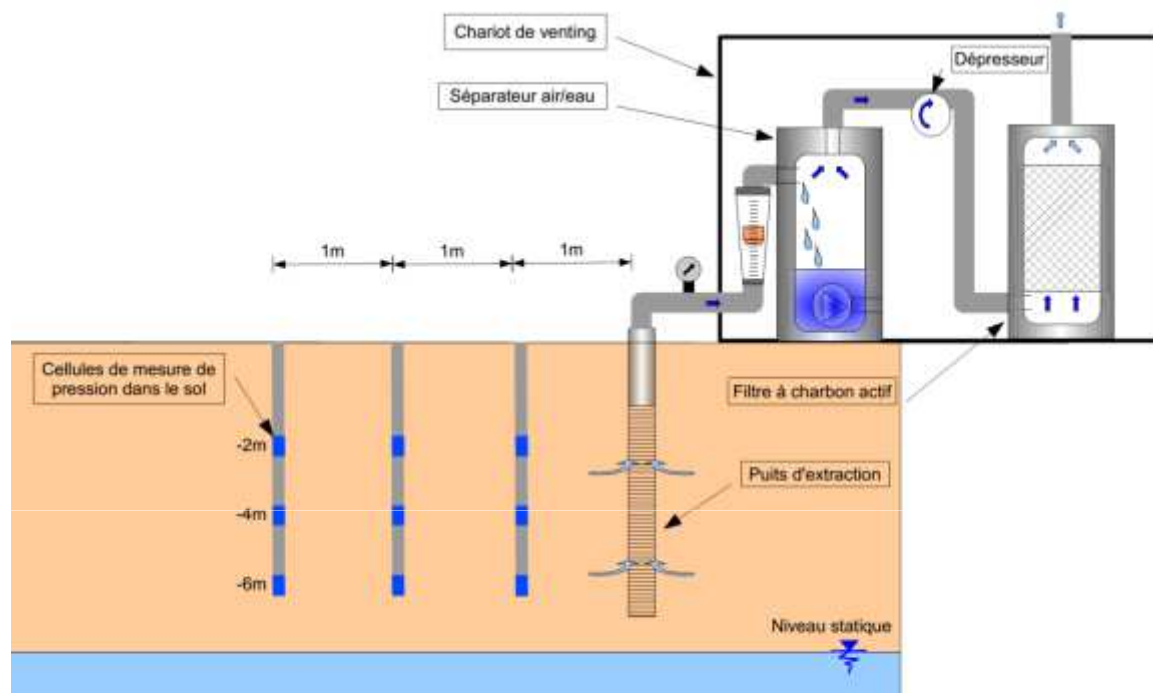




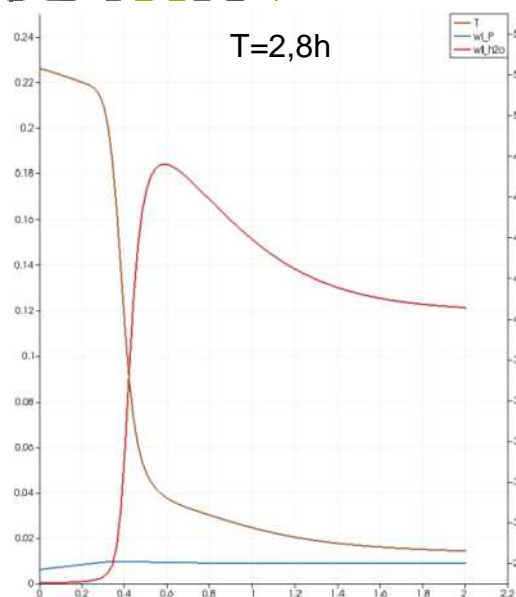
SOMMAIRE

- La théorie du traitement par désorption thermique
- Etude de cas : contexte général
 - Etude de Risque
 - Objectifs de traitement
- La solution retenue
- Phase pilote
 - Test de perméabilité à l'air
 - Essai de chauffe
- Installation
- Aléas de départ
- Résultats
- Bilan - Conclusion

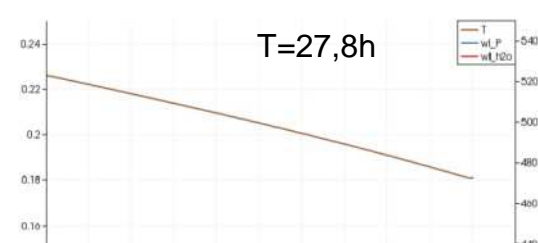
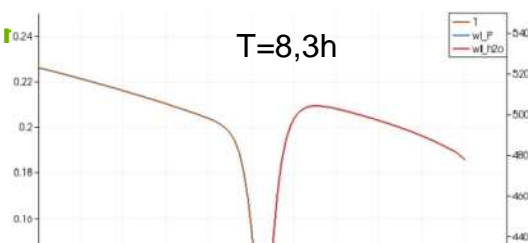
PHASE PILOTE



La perméabilité à l'air des sols a permis de déterminer un rayon d'influence des aiguilles de venting d'environ 2,40 m pour un débit expérimental de 25 m³/h

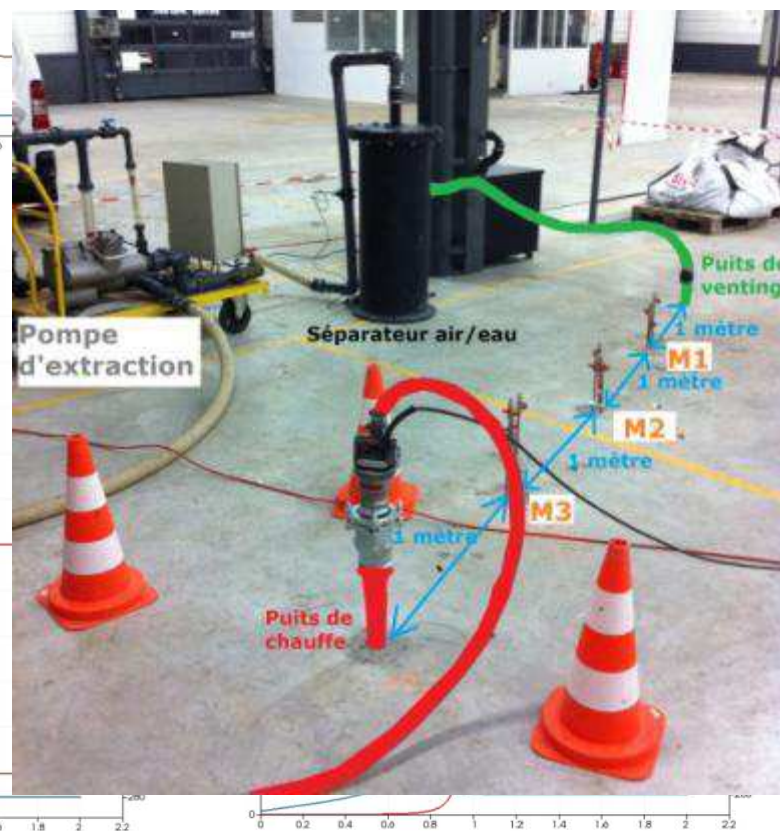
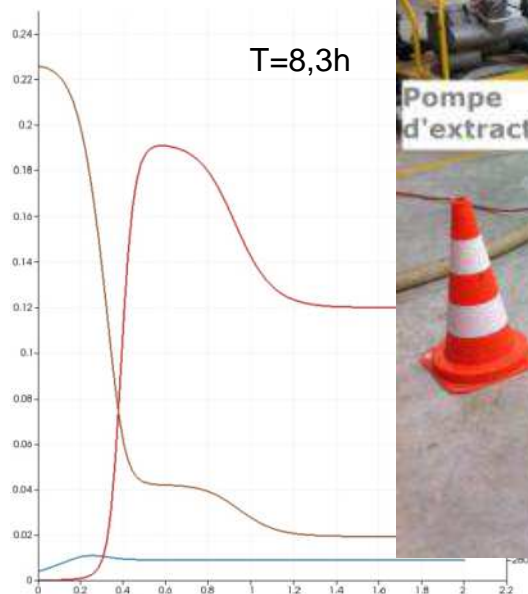
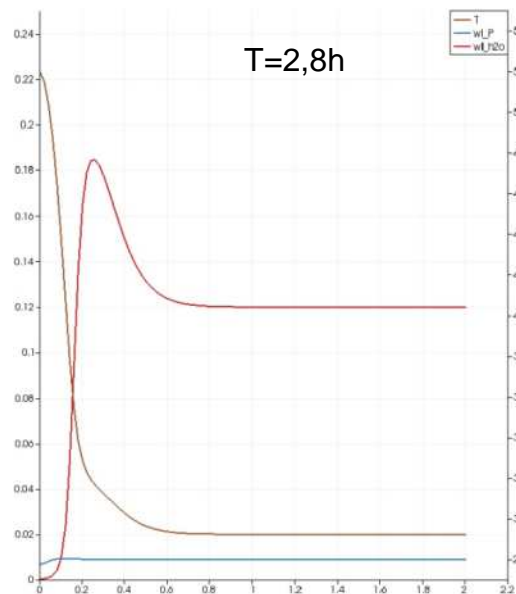


0mbar



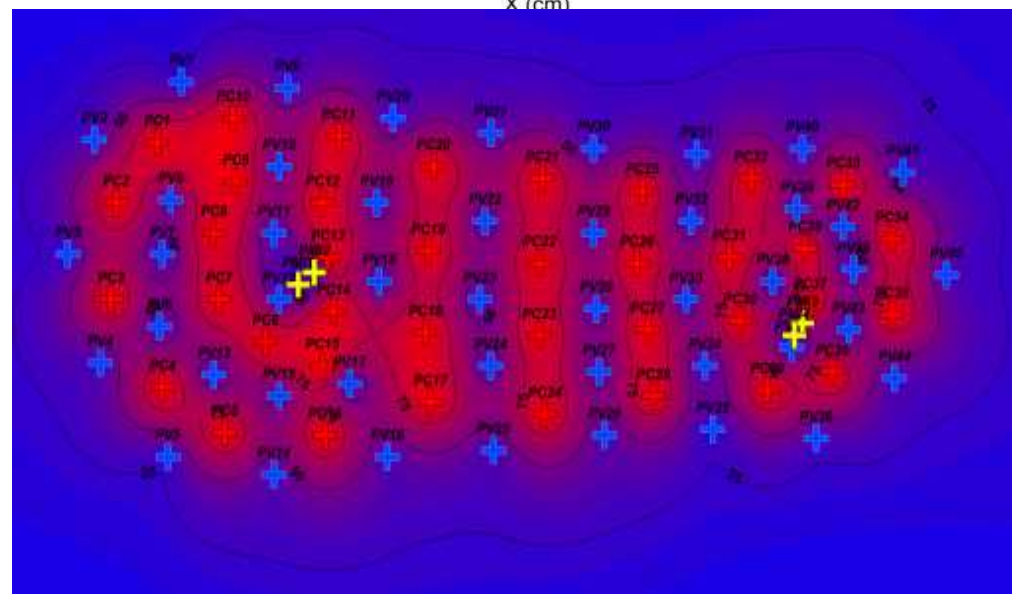
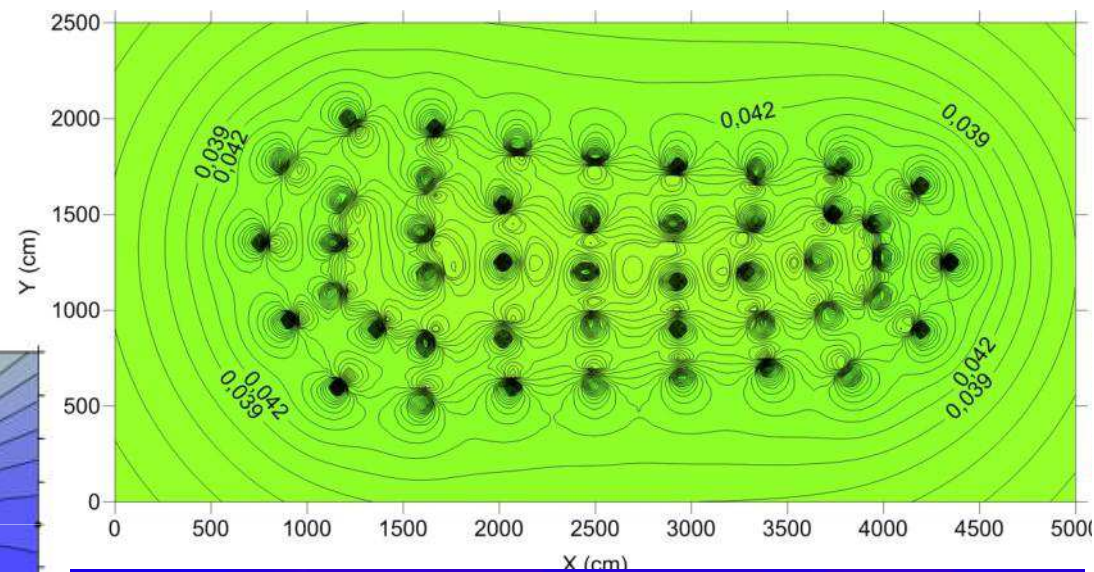
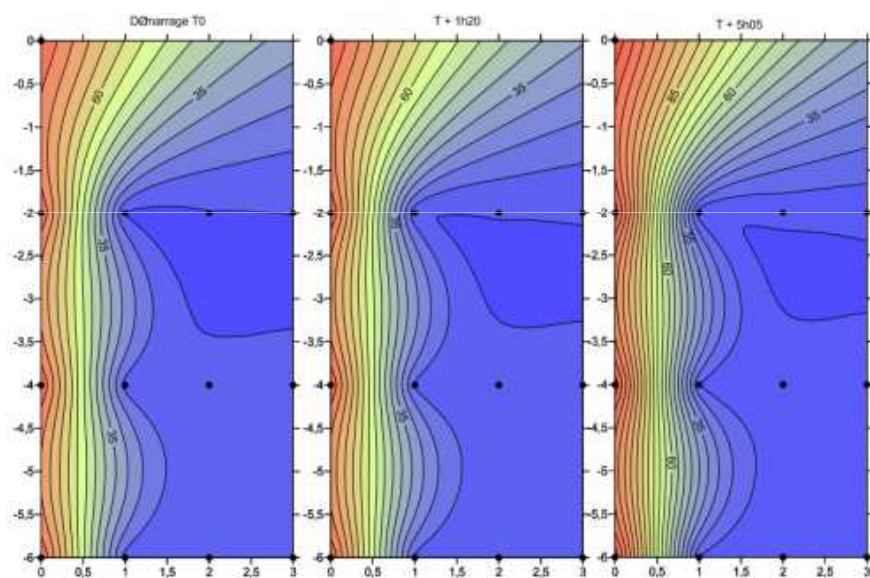
Un test de diffusion thermique a également été réalisé permettant de vérifier la bonne diffusivité thermique des sols et de dimensionner l'installation d'insufflation d'air chaud.

Injection 0mbars à 250°C, extraction -50mbars





PHASE PILOTE

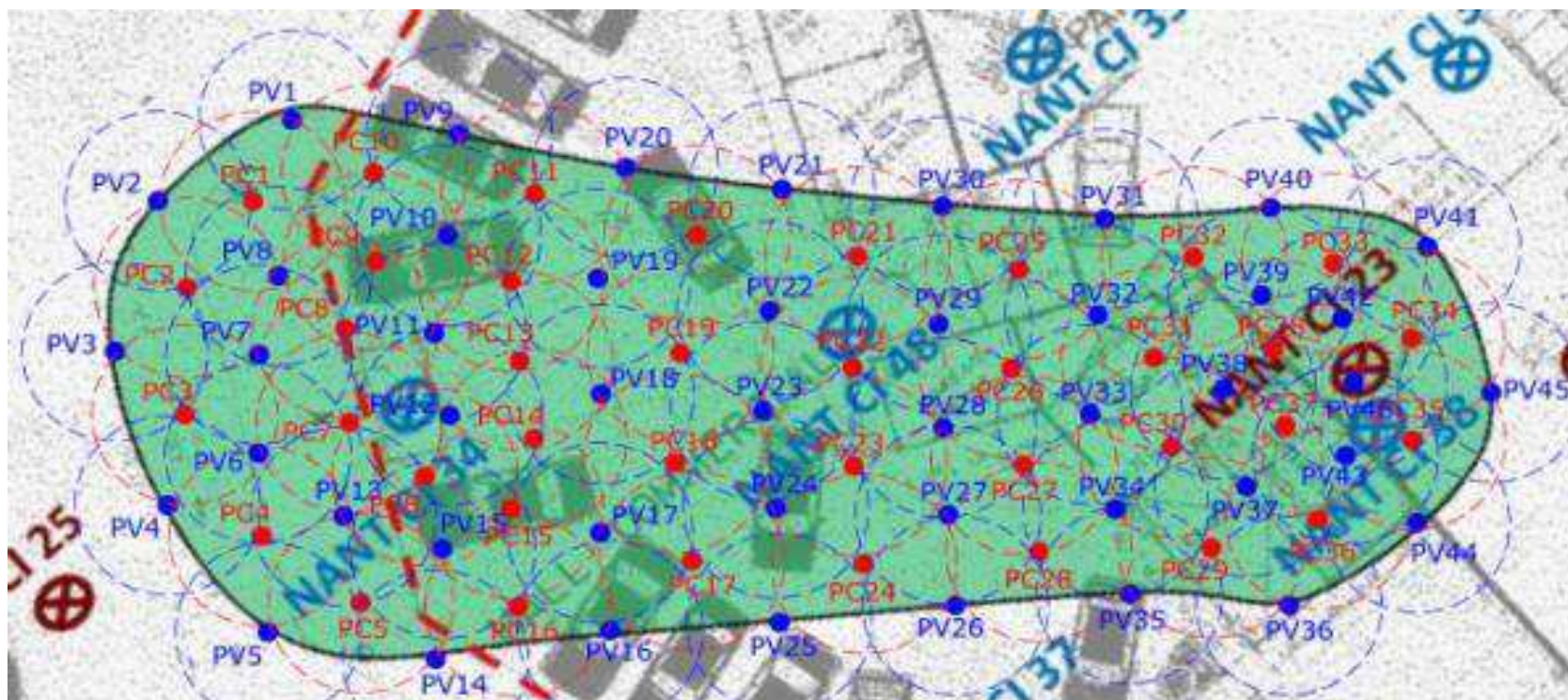




SOMMAIRE

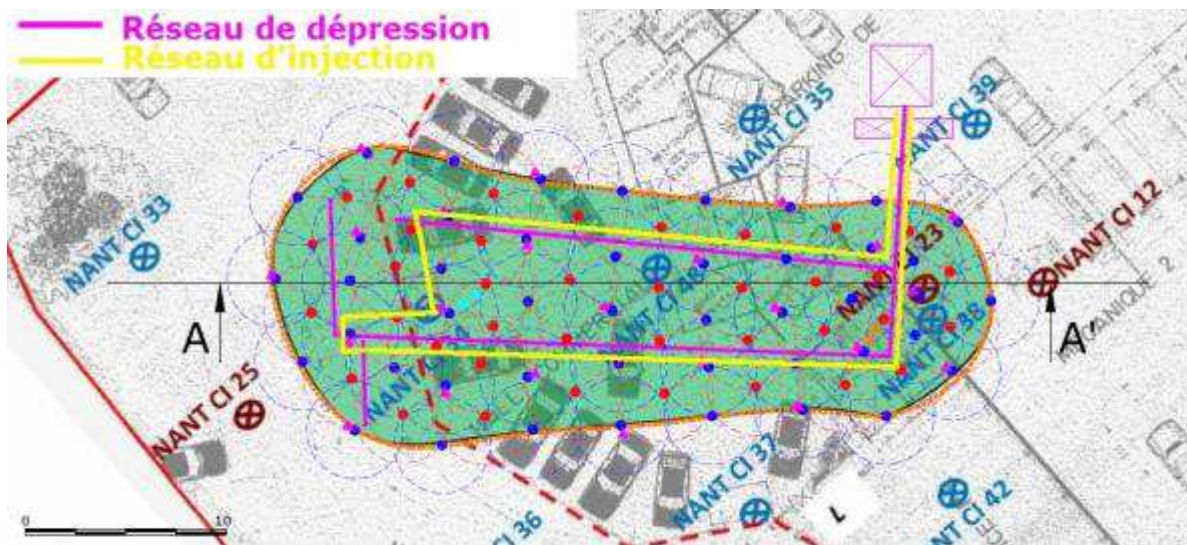
- La théorie du traitement par désorption thermique
- Etude de cas : contexte général
 - Etude de Risque
 - Objectifs de traitement
- La solution retenue
- Phase pilote
 - Test de perméabilité à l'air
 - Essai de chauffe
- **Installation**
- Aléas de départ
- Résultats
- Bilan - Conclusion

- 38 aiguilles d'injection d'air chaud (réchauffeurs de 4 kW)
- 46 aiguilles d'extraction d'air (points froids)





INSTALLATION – MISE EN OEUVRE



filière de traitement des gaz, incluant un échangeur thermique, des séparateurs et des filtres à charbons actifs.



INSTALLATION – MISE EN OEUVRE



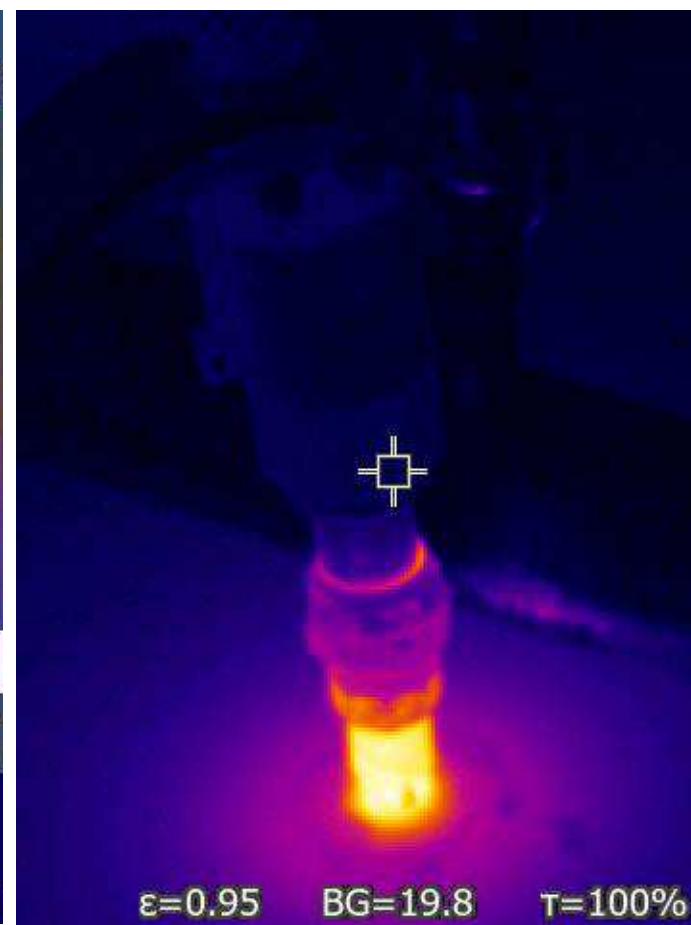


PANORAMIQUES





IMAGERIE THERMIQUE

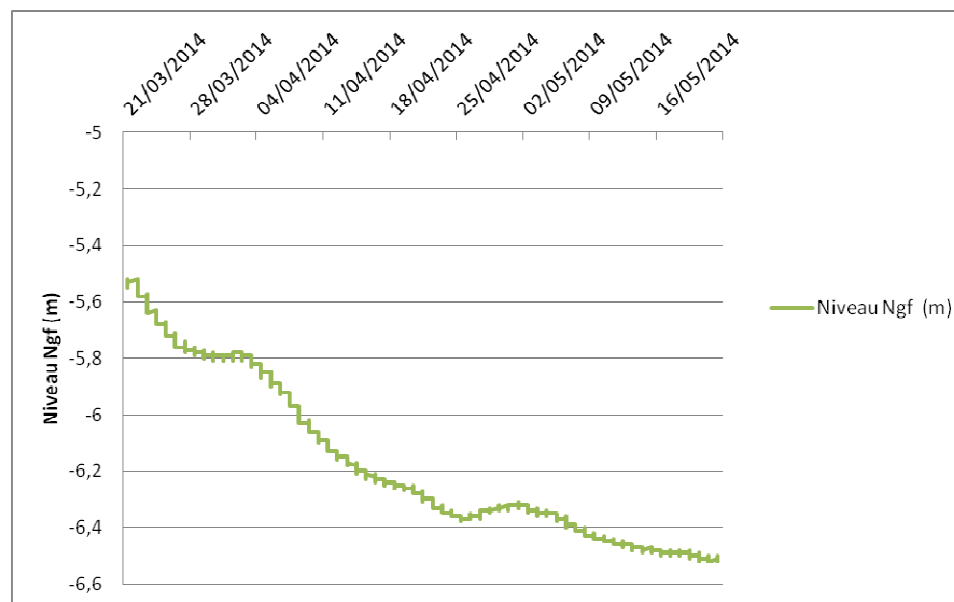
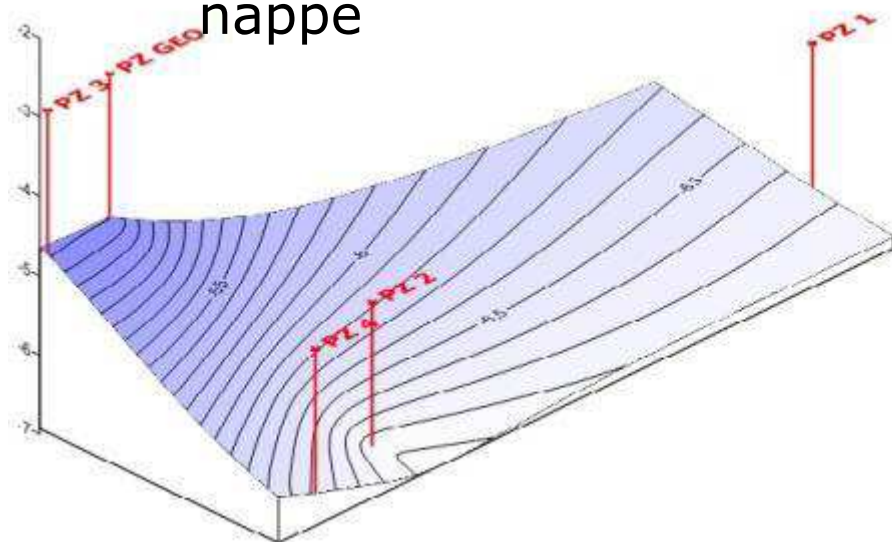




SOMMAIRE

- La théorie du traitement par désorption thermique
- Etude de cas : contexte général
 - Etude de Risque
 - Objectifs de traitement
- La solution retenue
- Phase pilote
 - Test de perméabilité à l'air
 - Essai de chauffe
- Installation
- Aléas de départ
- Résultats
- Bilan - Conclusion

- Les intempéries du début de l'année 2014 sur la région ont obligé à décaler l'opération et à installer un rabattement de nappe



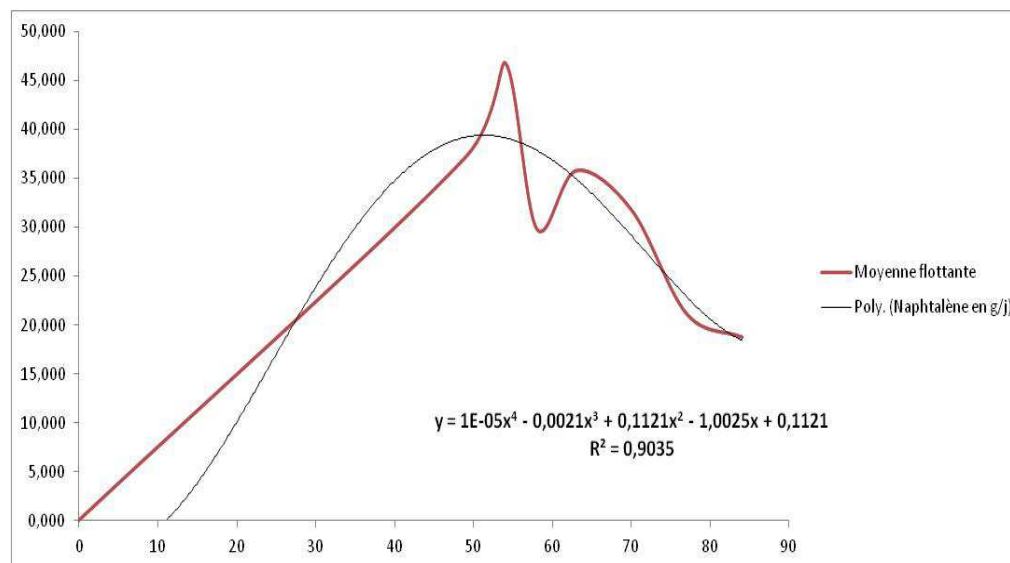




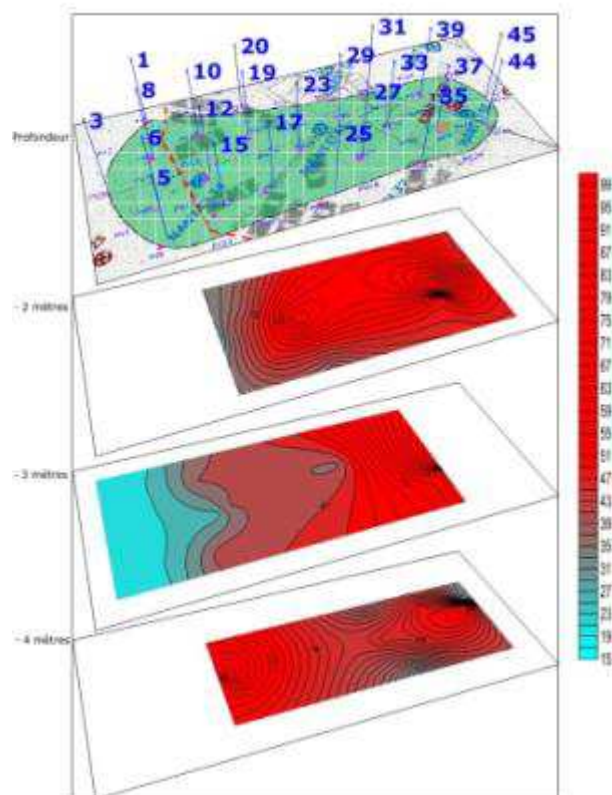
SOMMAIRE

- La théorie du traitement par désorption thermique
- Etude de cas : contexte général
 - Etude de Risque
 - Objectifs de traitement
- La solution retenue
- Phase pilote
 - Test de perméabilité à l'air
 - Essai de chauffe
- Installation
- Aléas de départ
- Résultats
- Bilan - Conclusion

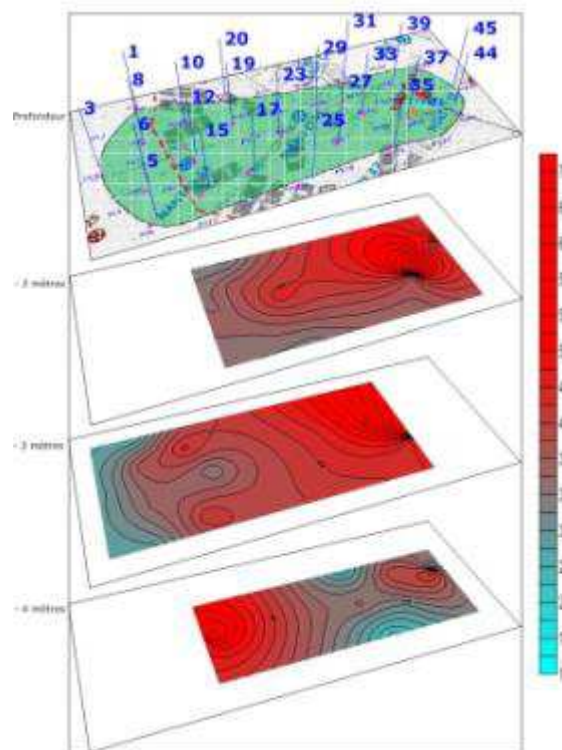
- Le traitement a été lancé fin mars 2014. Après 2 mois de chauffe, il a permis d'atteindre des températures moyennes d'environ 50°C, à proximité des points de venting, qui sont placés aux endroits les plus froids (le débit d'extraction étant plus important que le débit d'injection, cette température résulte du mélange de l'air injecté chaud et de l'air extrait extérieur).
- 19 campagnes de mesures des COV extraits sur la totalité des puits de venting



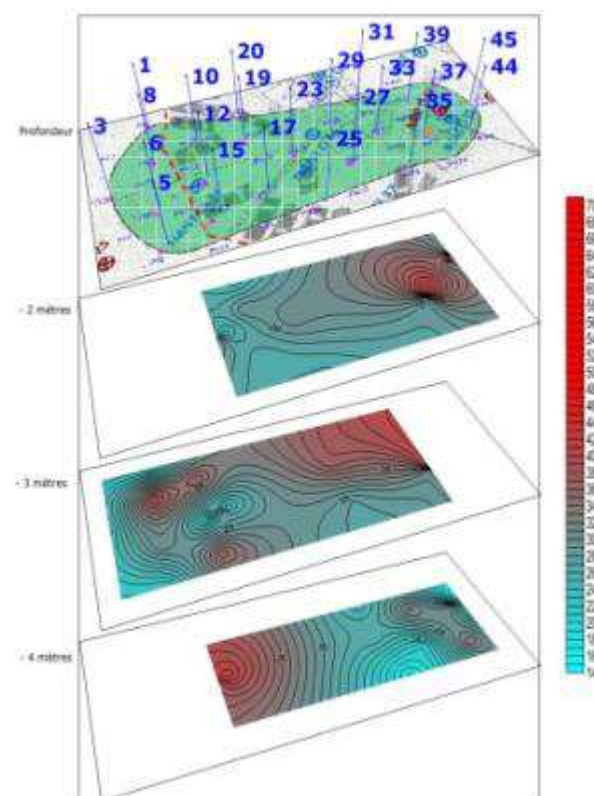
- contrôle de la température de chauffe via un réseau de thermocouples posés sur le site
- visualisation quotidienne des températures via un système de télésurveillance.



Phase 1 : chauffe

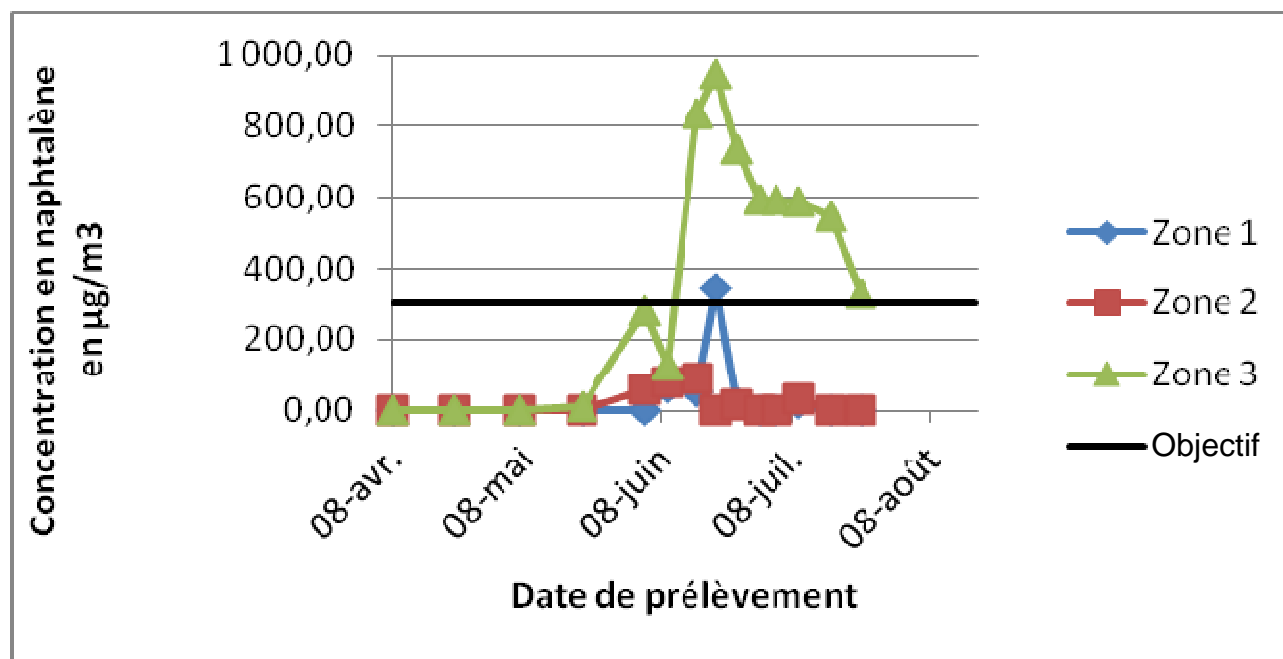


Phase 2 : ciblage



Phase 3 : refroidissement

- Analyse hebdomadaire de la concentration en naphtalène du sol dans 3 puits de la zone de traitement



- A l'issue de 19 semaines de traitement on observe un abattement de 99% des pollutions sur la majeure partie des zones et l'atteinte des objectifs de 300 µg/m³ sur la quasi-totalité des zones traitées.
- Le bilan matière montre que le traitement a permis de récupérer 4780,4 g de Naphtalène.



SOMMAIRE

- La théorie du traitement par désorption thermique
- Etude de cas : contexte général
 - Etude de Risque
 - Objectifs de traitement
- La solution retenue
- Phase pilote
 - Test de perméabilité à l'air
 - Essai de chauffe
- Installation
- Aléas de départ
- Résultats
- Bilan - Conclusion



BILAN

- Environ 1600 m³ traités soit 2900 T
- Près de 5 kg de naphthalène pur récupéré
- Coût du traitement 100 €/T
- + 13 K€ d'électricité (4,50 €/T)
- + 50 K€ de rabattement de nappe

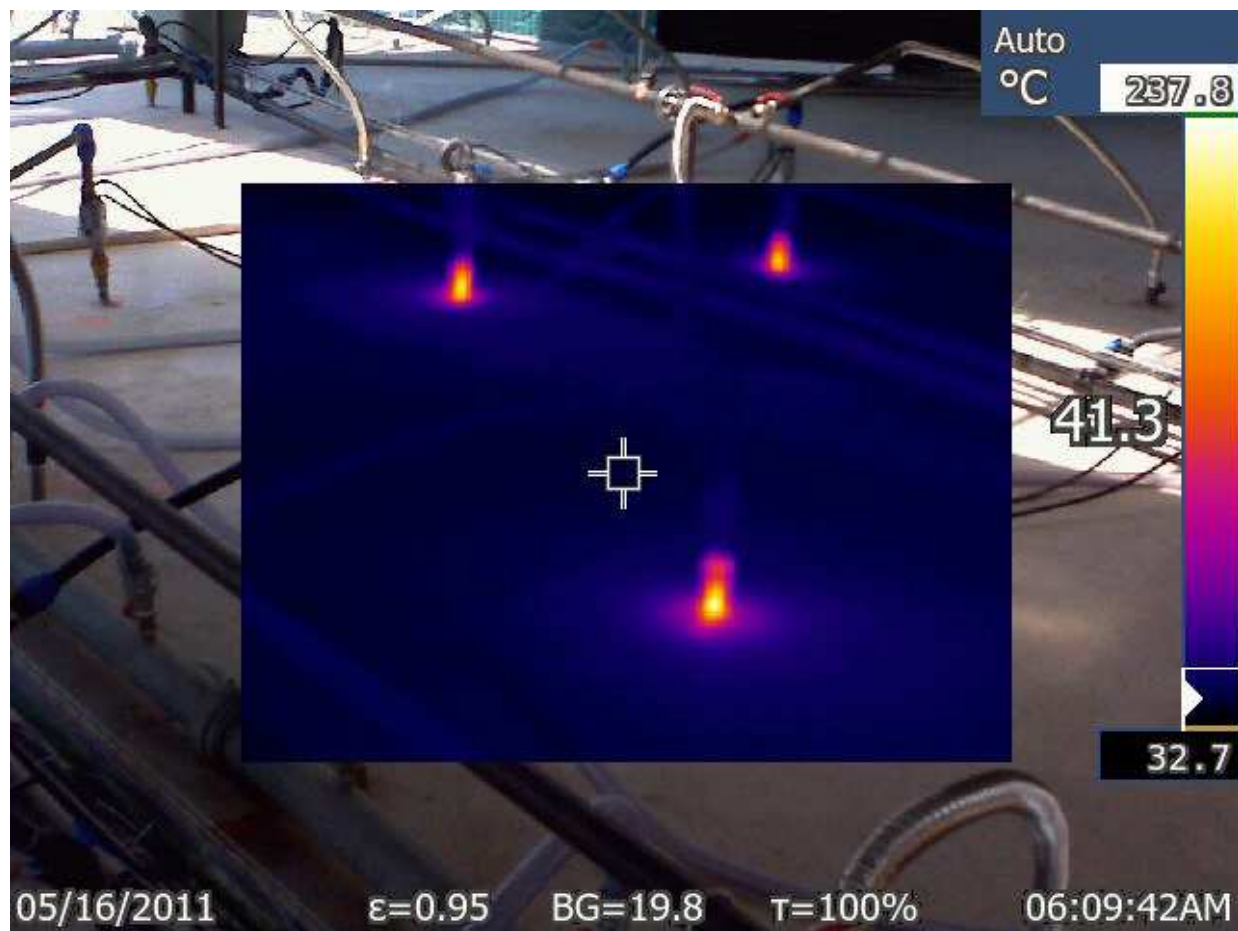


CONCLUSION

- En fonction des polluants et des configurations de chantier, VALGO développe plusieurs technologies de désorption thermique in situ, dont un procédé d'insufflation d'**air chaud**, à l'aide de réchauffeurs du commerce, ici, électriques.
- Un **double réseau** été créé : injection et aspiration
- **4 mois de chauffe** ont permis de porter l'ensemble de la zone à des températures moyennes de 55°C, mesurées aux "points froids" (puits d'aspiration), avec une pointe à 77°C.
- La **modularité** de l'installation et l'extrême souplesse apportée par les réchauffeurs électriques a permis d'opérer des délestages par puits, pour optimiser la puissance délivrée en fonction de la puissance disponible, puis de neutraliser les zones dépolluées, pour concentrer l'énergie sur les zones résiduelles, avec une **précision** chirurgicale.
- Le suivi des gaz extraits a montré la disparition rapide des BTEX et autres COHV. Au fur et à mesure de la diffusion de la chaleur dans le sol, la **teneur en naphthalène** a augmenté pendant 3 mois, jusqu'à atteindre de 180 mg/m³, puis a réduit, suite à **l'appauvrissement des zones sources**.
- Le site est maintenant **réceptionné** par le maître d'œuvre et le démantèlement des installations est réalisé .



MERCI DE VOTRE ATTENTION



VALGO – OUEST
3, rue Thomas Edison
Z.A. Tournebride
44118 LA CHEVROLIERE
Contact :
guillaume.droniou@valgo.com

VALGO – Laboratoire
72, bd A. Briand
76650 PETIT COURONNE
Contact :

laurent.thannberger@valgo.com