Journées techniques
28 et 29 mai 2013

Gestion des sites et sols pollués

This project has received European Regional Development Funding through INTERREG IV B.

Les substances volatiles : caractérisation, modélisation des transferts, surveillance

Retour d'expérience des projets CITYCHLOR, FLUXOBAT et ATTENA

Caractérisation des gaz du sol : objectifs, mise en œuvre de piez-air, prélèvements, analyses *in situ* et en laboratoire

S. Traverse, C. Hulot, O. Bour, et collaborateurs

Plan de la présentation

- Objectifs des mesures et éléments de compréhension
- Etat de l'art

- Quels types d'ouvrages pour les gaz du sol
- Mise en œuvre des piez-air
- Prélèvement des gaz du sol
- Retours d'expérience sur des concentrations mesurées
- Synthèse sur la caractérisation à partir de piez-air

- Analyses *in situ* et en laboratoire

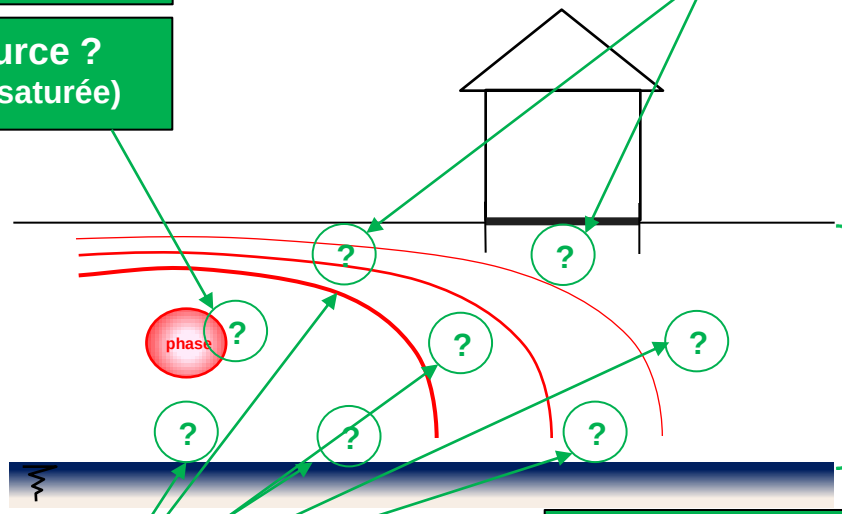
- Questions

Les objectifs de mesures

Les gaz des sol peuvent ils être impactés par des COV ?

Où se situe la zone source ?
(si celle-ci est en zone non saturée)

Comment la pollution des sols ou nappe peut impacter l'air atmosphérique ou intérieur?

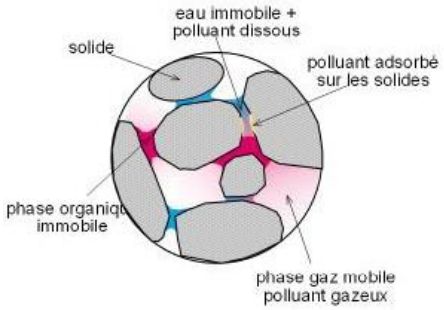


Quelle est l'extension du panache gazeux?

Comment dimensionner la dépollution in situ ou d'autres mesures de gestion sur le bâti ?

Quelle évolution du panache résiduel dans le temps ?

Transfert entre phases

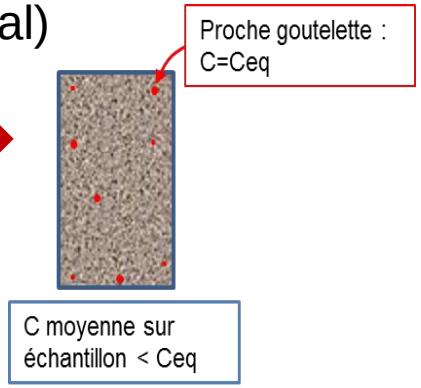


- Au niveau de la source de phase organique

Échange entre phases (organique, adsorbée, eau, air)

(Equilibre ou non équilibre local)

Pression de vapeur saturante
C max (à Pvap à 20°C, patm)
PCE : 128 360 mg/m³
TCE : 418 170 mg/m³



- En l'absence de phase organique et au sein du panache gazeux

Échange entre phases (adsorbée, eau, air)

$$C_g = \frac{\rho_t \; C_{tot}}{\theta_w \frac{S}{K_H} + \theta_g + \theta_n \frac{\rho_n}{K_H} + (1-\theta)\frac{\rho_{ss} K_D S}{K_H}}$$

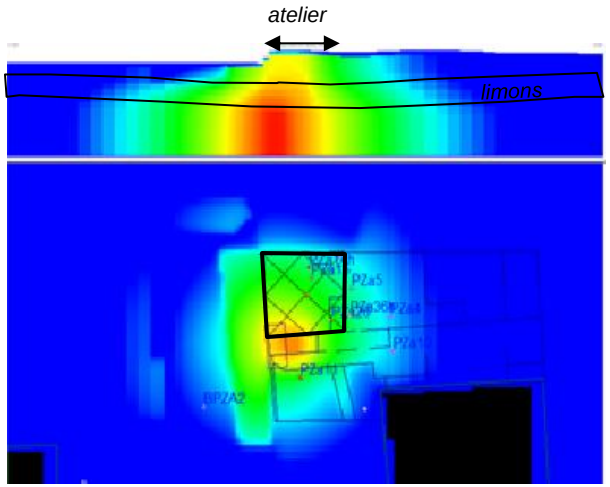
$$K_H = \frac{P_{vap} MW}{RT}$$

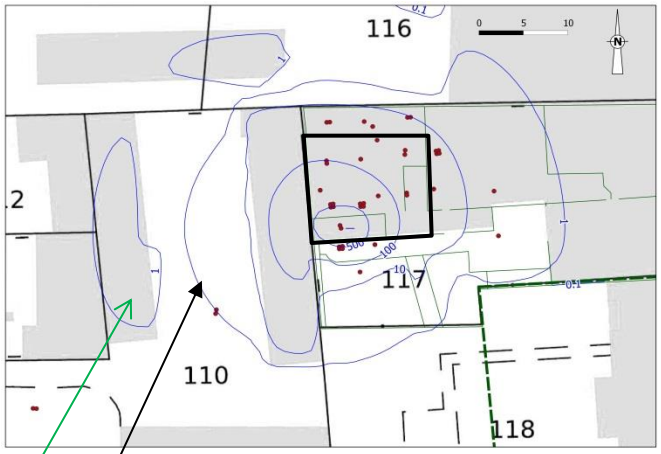
OREOS
www.oreos-software.com

Géométrie du panache gazeux

> Dépendance aux paramètres de transfert

- Diffusion dans le milieu poreux
- Diffusion dans l'eau du sol (négligeable)
- Perméabilité au gaz (proche surface ou bâtiment)





Iso-concentrations simulées en PCE entre 0,3 et 0,6 m de profondeur

-

Sols à saturation résiduelle en eau

Sous bâtis
Augmentation des concentrations

Au droit de zones non couvertes
Diminution des concentrations

Iso-concentrations simulées en PCE entre 0,3 et 0,6 m de profondeur

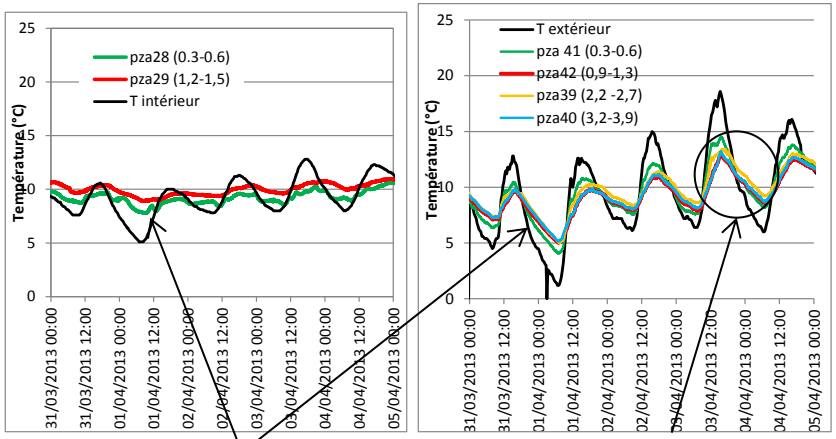
-

3 jours après épisode pluvieux

Influence de la température sur les transferts

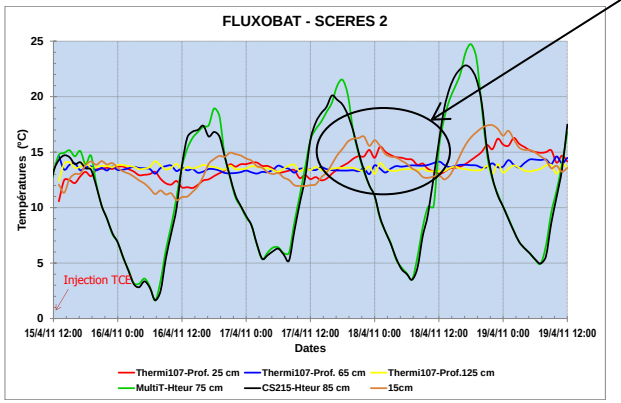
Variations diurnes et saisonnières

Site atelier -mars 2013



Réactions différentes en extérieur et sous bâti

Diminution des amplitudes avec la profondeur

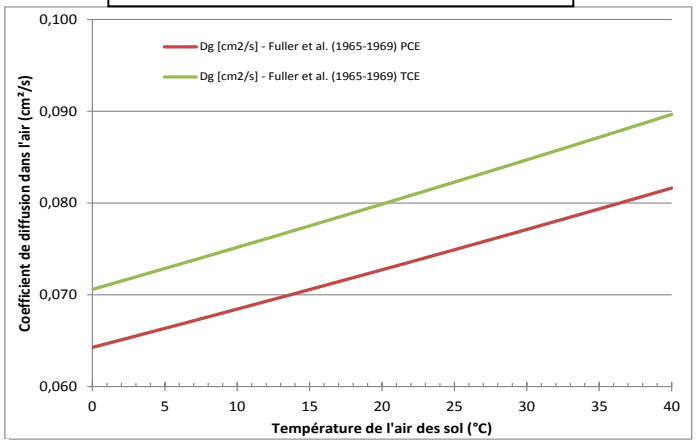


Forte dépendance de la pression de vapeur saturante à la température

Influences

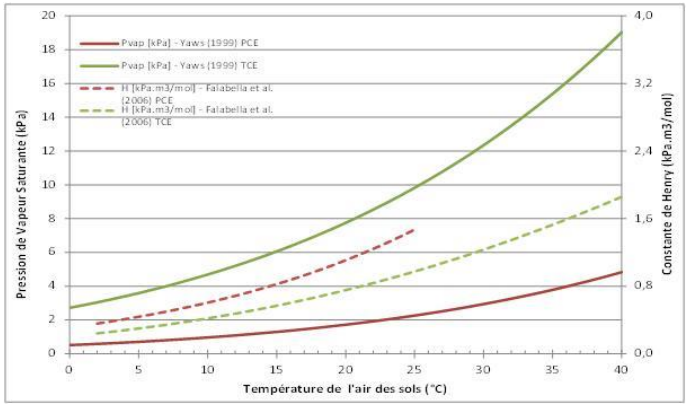
Sur le coefficient de diffusion dans l'air

dT(5-25°) -> D_{air} (PCE) x 1,1



Sur la pression de vapeur saturante

dT(5-25°) -> Pvap (PCE) x 3



Des objectifs aux stratégies de mesure

> Spécificité du site

- Source primaire et/ou secondaire
- Lithologie et hétérogénéités
- Bâtiments existants ou aménagements à venir
- Accessibilité pour des mesures

> Stratégie de mesure et plan d'échantillonnage

- Types d'ouvrage (temporaire ou pérenne)
- Géométrie de l'ouvrage
- Nombre et localisation des ouvrages
- Type de mesure (quantitative ou semi-quantitative)
- Période et fréquence de mesure

Etat de l'art – Normes et guides existants

> Normes (non exhaustif)

- Française : NF ISO10381-7 (2006) Qualité du sol - Échantillonnage - Partie 7 : lignes directrices pour l'échantillonnage des gaz du sol ; travail de révision en cours
- Angleterre : Draft BS 8576 Guidance on investigations for ground gas - Permanent gases and Volatile Organic Compounds (VOCs) (2012)
- Allemagne (VDI 3865-2, Measurement of organic soil pollutants - Techniques of active sampling of soil gas, 1998)
- ASTM (ASTM-D-5314-92, Standard Guide for Soil Gas Monitoring in the Vadose Zone, 2006)

> Guides et documents méthodologiques (non exhaustif)

- US EPA, Final project report for the development of an active soil gas sampling method, 2007
- California Environmental Protection Agency, Advisory Active Soil Gas Investigation, 2012
- Washington State Department of Ecology, Toxics Cleanup Program, Guidance for evaluating soil vapor intrusion in Washington State: Investigation and remedial action, 2009
- New Jersey Department of Environmental Protection, Site Remediation Program, Vapor Intrusion Technical Guidance, 2013

> Présentation des éléments d'échantillonnage des gaz du sol issus des projets FLUXOBAT et CITYCHLOR

Quels types d'ouvrages pour les gaz du sol ?

> Des mesures pour quels objectifs ?
  - screening, caractérisation de la source, du transfert, surveillance, etc.

> Tenant compte du niveau de connaissance du site et de ses spécificités

> Ouvrages temporaires
  - Canne (classique, à pointe perdue, etc.)
    - intérêt pour un screening rapide sur site
  - Cas du prélèvement sous dalle « sub-slab »

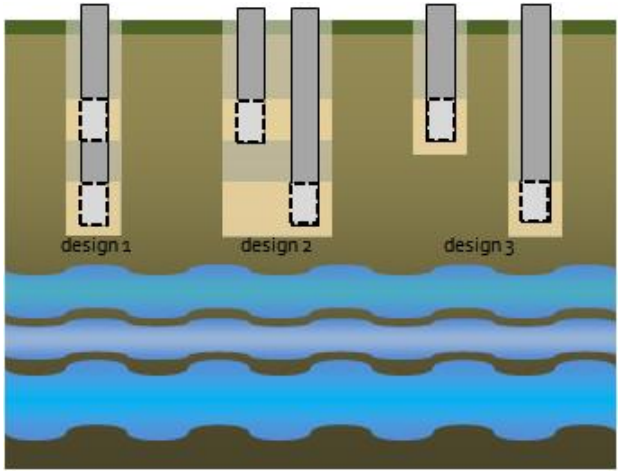
> Ouvrages permanents
  - Piez-air
    - intérêt pour un suivi temporel

Mise en œuvre des piez-air (1/3)

> Choix du design

- En fonction des objectifs (terme sources, de transfert, …), des contraintes (nappe, zone à nu ou bâtie, etc.)

- Ouvrage unique, doublet, triplet
  - tenir compte du rayon d'influence



- Zone crépinée

  - unique,
  - double crépine (maîtrise du Packer)
  - sur toute la hauteur de l'ouvrage
- Où positionner le tubage crépiné et non crépiné, au regard de quels critères ?
  - éléments de pré-diagnostic
  - spécificités du sol
  - spécificités de la nappe (./. profondeur du toit)
  - spécificités du site (sol à nu, revêtement, bâtiment, etc.)

Mise en œuvre des piez-air (2/3)

> Comment réaliser les sondages pour les piez-air ?

- Réalisation à sec du sondage
  - au carottier sous gaine à l'aide d'un outil de type GEOPROBE
  - carottier à fenêtre ouverte, etc.

- Ne pas graisser les tubes du carottier
- Lavage des outils

> Quelques recommandations sur les prélèvements d'échantillons de sol en présence de COHV

- Minimiser les pertes par volatilisation

Mise en œuvre des piez-air (3/ 3)

> Equipement de l'ouvrage

- Choix du matériau du tubage
  - inerte, en fonction des substances attendues
  - assemblage (filetage, absence de colle)

Matériaux de remplissage de la zone annulaire (sable, gravier, bentonite, ciment inerte)

  - étanchéité annulaire (couche de bentonite ou autre argile gonflante , son épaisseur minimale de 30 cm) ;
  - mise en place (coulis bentonite-ciment, bentonite déjà humide avec une consistance « liquide »

- Tube fermé en surface par une « tête » étanche à l'air (vanne, ou système permettant de connecter le circuit de prélèvement, etc.)
- Tube fermé à la base (bouchon)

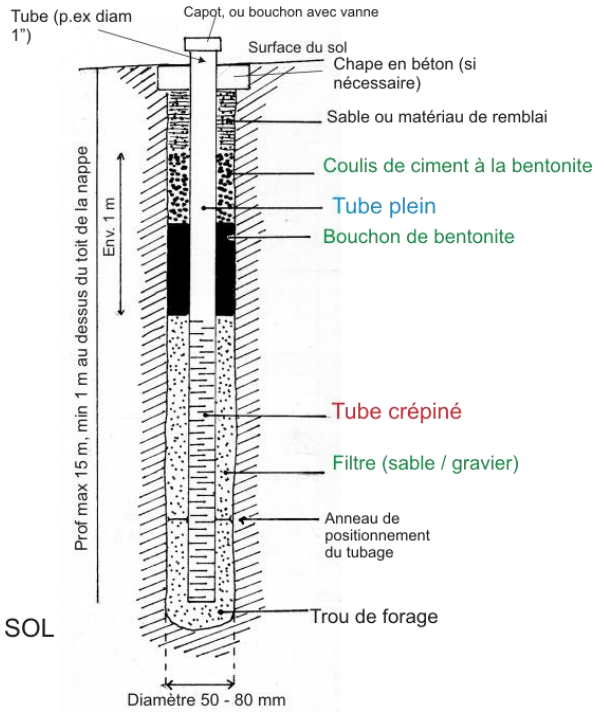


Schéma de principe : équipement en puits à gaz d'un forage (d'après VDI 3865-2)

Prélèvement des gaz du sol

> Choix tenant compte des objectifs de l'étude

- Caractérisation qualitative
  - screening, extension d'un panache,…
  - PID, FID, tube réactif, support passif
- Caractérisation quantitative
  - caractérisation d'une source, d'un panache, …
  - dépollution, surveillance,….

> Quels principes et types de prélèvements

- Prélèvement actif
  - par pompage mécanique sur support adsorbant
  - par aspiration naturel dans une enceinte en acier traitée (Canister ®)
- Prélèvement passif
  - non abordé dans Citychlor et Fluxobat, autre projet, présentation suivante

Caractérisation quantitative des gaz du sol

> Prélèvement par aspiration mécanique, naturelle

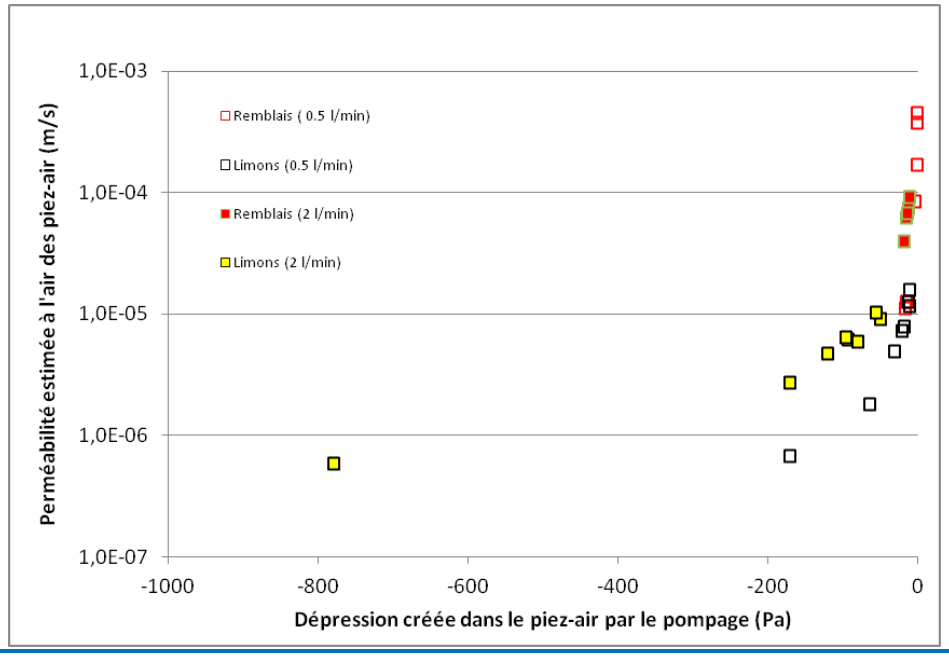
par aspiration mécanique, support avec un ou plusieurs adsorbants	- coût (actuellement) - seule possibilité pour certaines substances (par ex. tube hopkalite pour le mercure élémentaire)	- saturation potentielle en l'absence de connaissance des gammes de concentrations - spécifiques à certaines substances - humidité (dans les gaz du sol souvent > 90%) - faible autonomie en l'absence d'électricité sur site
par aspiration naturelle, enceinte en acier traitée (Canister®)	- caractérisation de nombreuses substances - concentrations extrêmes (basses, hautes) - « automonie »	- coût (actuellement) -temps de préparation : nettoyage, mise sous vide - utilisation peu de temps après leur préparation (mise sous vide notamment) -analysé rapidement après prélèvement - humidité

Protocole de prélèvement - Phases amont (1/3)

> Préparation du matériel

- choix du débit des pompes (prélèvements actifs mécaniques), des « Veriflow » (par aspiration naturel)
  - tenant compte du choix du support (spécificités des fabricants), des limites de détection/quantification , du rayon d'influence,…
  - Rappel de la norme : débits de 2 l/min au max, ou plus bas si sol présentant une faible perméabilité au gaz
  - Influence du volume prélevé et perturbation du milieu, un exemple

site atelier Fluxobat



Protocole de prélèvement - Phases amont (2/3)

> Préparation du matériel

- Chaîne de prélèvement (flexible, raccord, etc.)
  - choix de matériaux inertes
  - usage unique pour ceux en contact avec les gaz du sol
  - usage de colle, graisse proscrit
  - si usage de filtre à humidité, choix en cohérence avec substance étudiée, par ex. gel de silice proscrit si COHV
- Mise en place de la chaîne
  - privilégier des lignes indépendantes : par ex. une pompe pour chaque ligne, surtout en cas de supports de nature différente
  - montage en parallèle, nécessité de dispositifs de répartitions/régulation des flux et dispositifs de contrôle des débits spécifiques

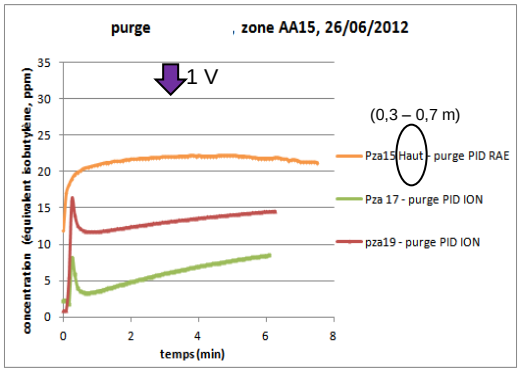
  - montage en série uniquement avec des supports identiques, l'un étant utilisé comme « contrôle », ou au regard d'un potentielle saturation du support
- Support de contrôle, blanc de terrain, de transport

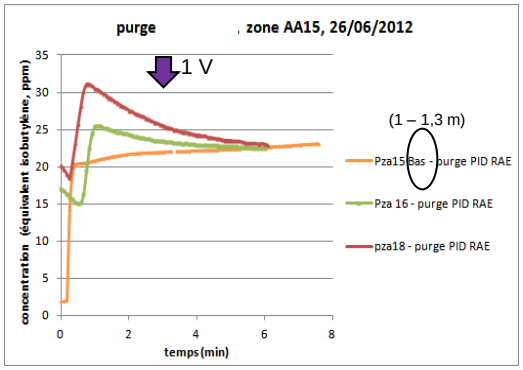
Protocole de prélèvement - Phases amont (3/3)

> Purge

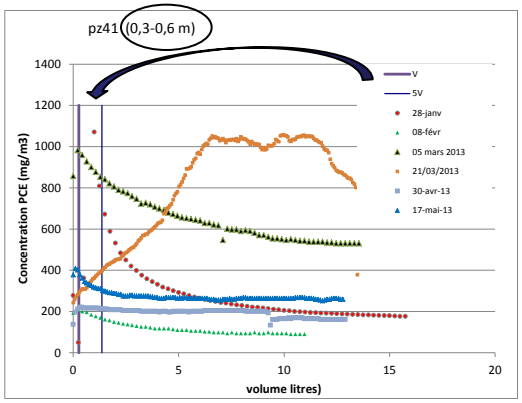
- La norme : 5 fois le volume mort
- Purge avec PID avec suivi d'autres paramètres (CO_2, O_2,…), REX, cas > ou < à 5 fois le volume

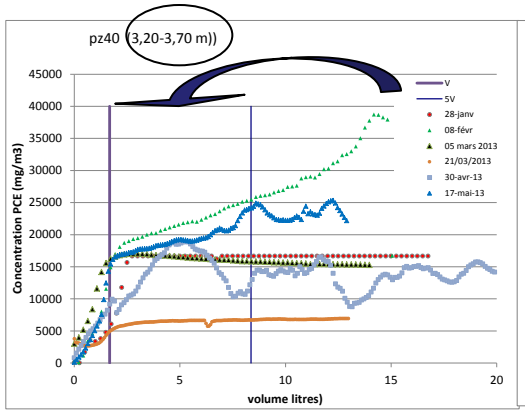
site atelier CityChlor

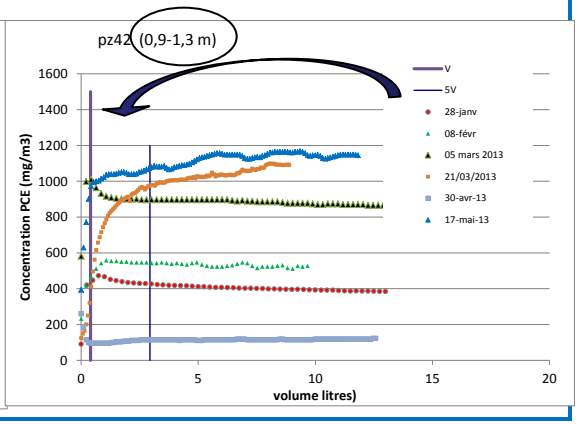




site atelier Fluxobat







Protocole de prélèvement

> Pendant le prélèvement

- Durée de prélèvement en fonction de LD/LQ, de l'objectif
- Contrôles débits/flux dans le cas d'une « ligne multiple »

Après le prélèvement

- Vérification de l'évolution des paramètres suivis pendant la purge
- Dans le cas de prélèvements par pompage mécanique, contrôle des débits des pompes, calcul des volumes prélevés
- Conditionnement, conservation et transport des échantillons pour l'analyse en laboratoire (à l'abri de la lumière, respect de la température (< 4°C), des durées, etc.)

> Rendus de la campagne de terrain et rapport de résultats des analyses

- Informations *a minima*
  - enregistrement de la mesure de suivi des paramètres lors de la purge, et en fin de prélèvement
  - feuilles de prélèvements, description de la procédure d'échantillonnage, conditions de mesure, observations ayant pu influencer les prélèvements, etc.
  - bordereaux avec les incertitudes analytiques, etc.

Prélèvement des gaz du sol

> Facteurs environnementaux impactant le transfert dans les sols et vers l'air intérieur et extérieur

> Autres paramètres à mesurer

- Eléments en termes d'interprétation des résultats et de *compréhension des transferts vers l'air intérieur d'un bâtiment et leur modélisation*
- Conditions climatiques
  - Pression atmosphérique
  - Pluviométrie (impact du front d'infiltration)
  - Température et humidité des gaz du sol
  - *Direction, vitesse du vent*
  - *Cas des piez-air au droit d'un bâtiment*
    - *température de l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment*
    - *différence de pression entres les gaz du sol et l'air*

    (cf. présentation « Modélisation » du lendemain)
- Profondeur de la nappe

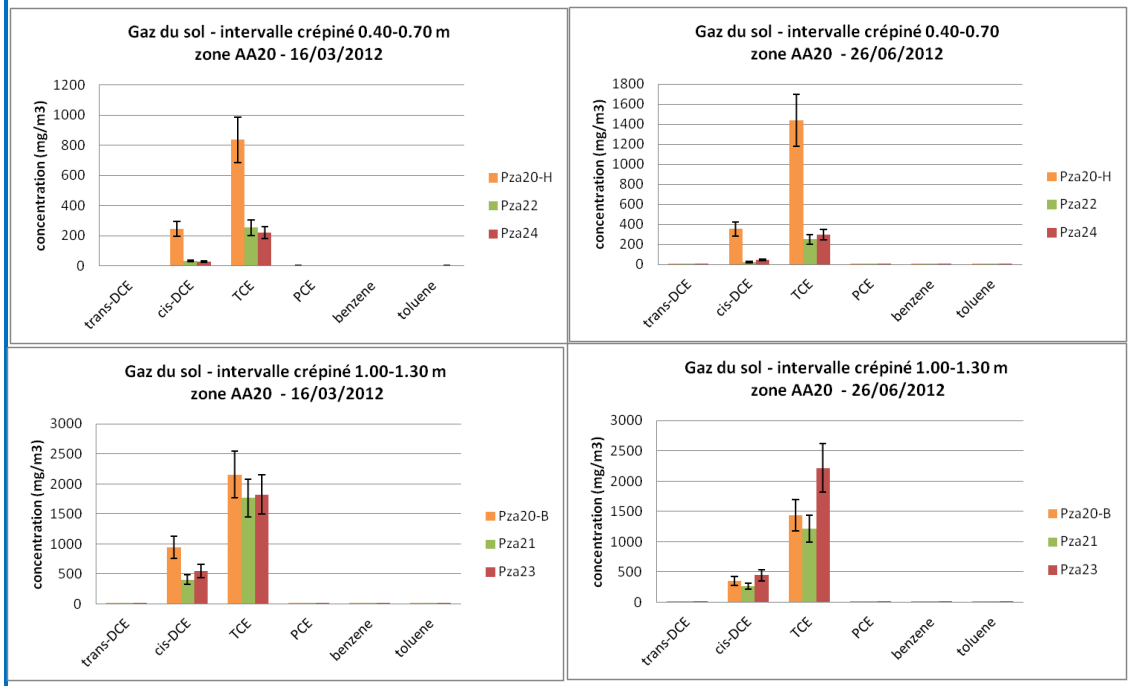
Impact des paramètres en fonction de la profondeur de la zone crépinée, …

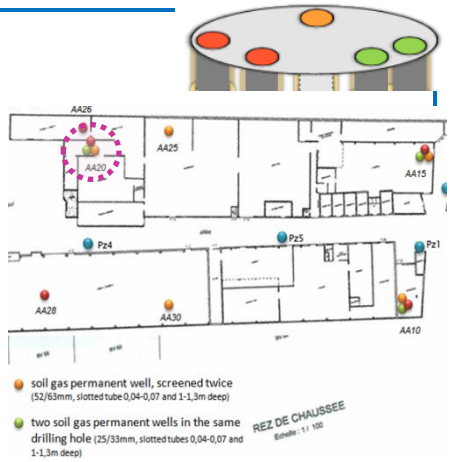
> Nécessité de réaliser plusieurs campagnes de mesures

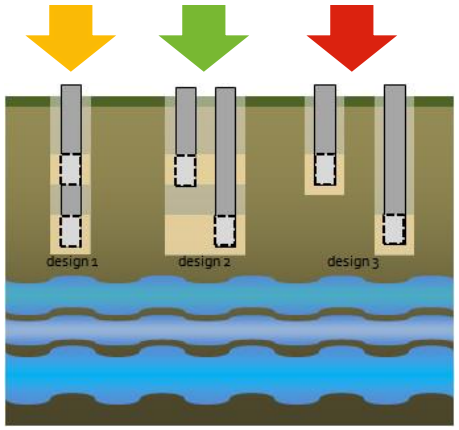
- Périodes à éviter, tenant compte de la profondeur de la zone crépinée : gel, après de fortes précipitations, …

REX sur des concentrations mesurées

> Comparaison de différents design de piez-air sur le site de CityChlor (zone AA 20)





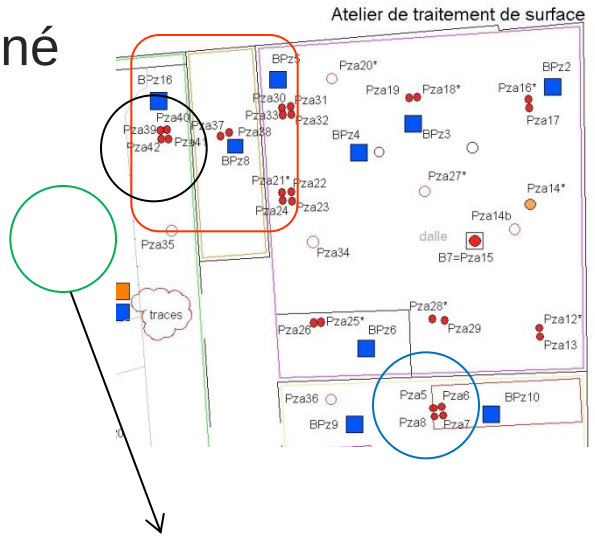


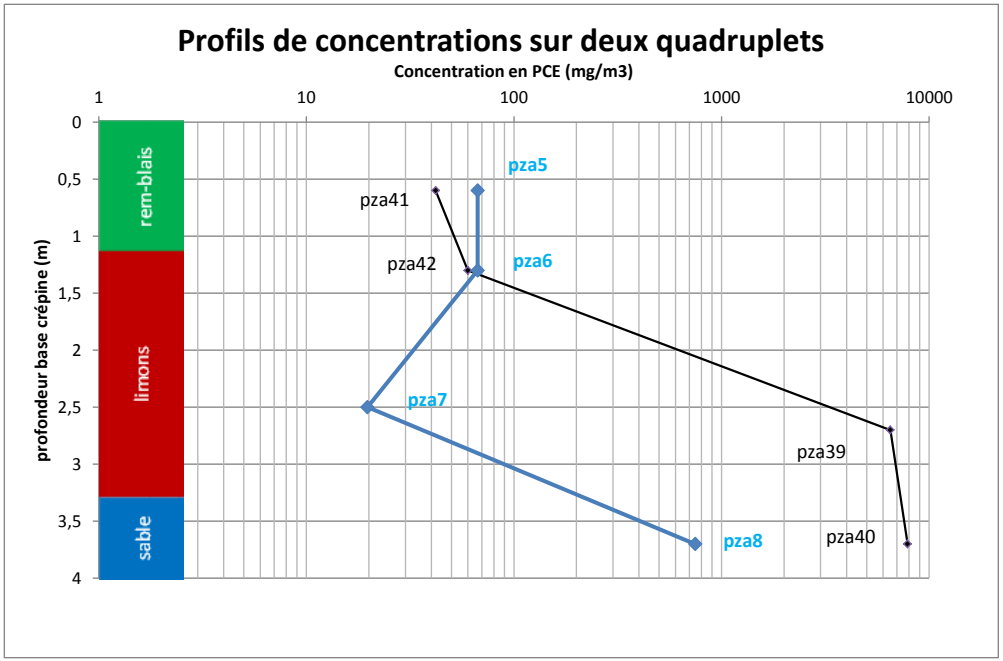
- Pour la majorité des zones étudiées et des campagnes
  - Cas des design 2 et 3 : concentrations globalement équivalentes
  - Cas du design 1 : concentrations généralement supérieures aux concentrations mesurées dans les autres piez-air (design 2 et 3) pour la zone crépinée à moindre profondeur, équivalentes pour la zone crépinée plus profond
  - Design 1 : Packer et étanchéité annulaire

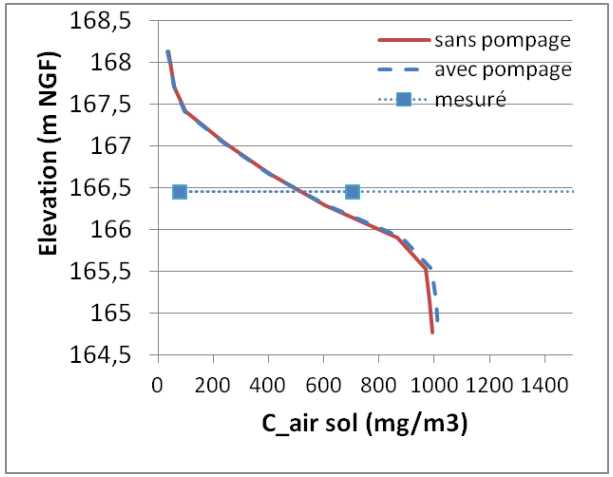
REX sur des concentrations mesurées

> Variabilité spatiale sur le site de Fluxobat

- Cas de quadruplet et d'un ouvrage crépiné toute hauteur
  - Des variations de comportement





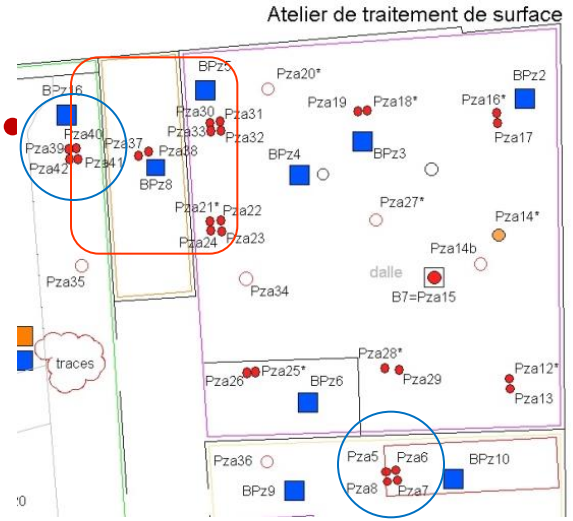


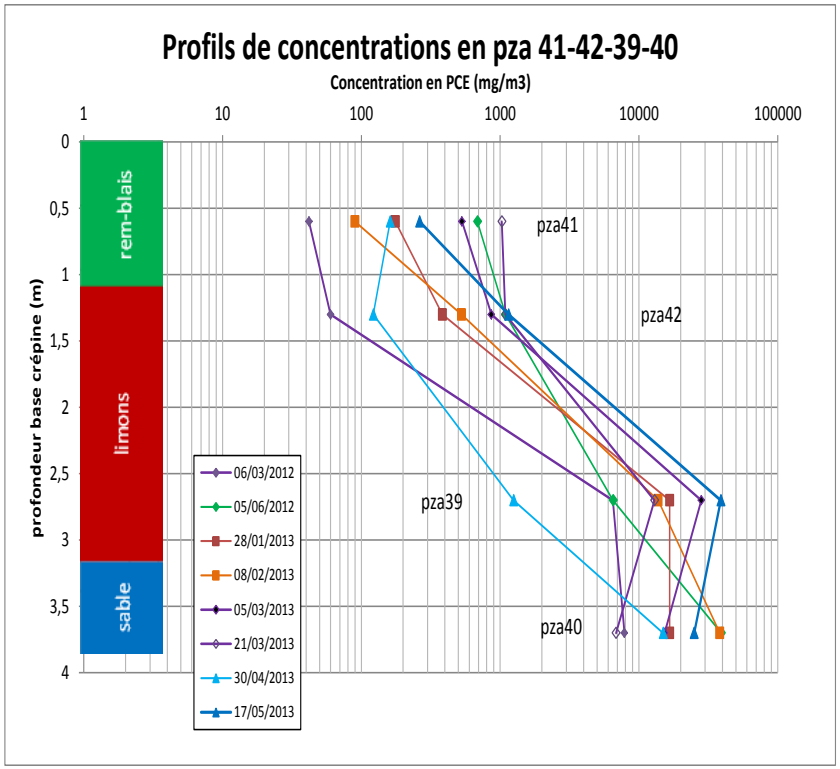
PZ 11 : concentrations à différentes périodes et avec concentrations modélisées

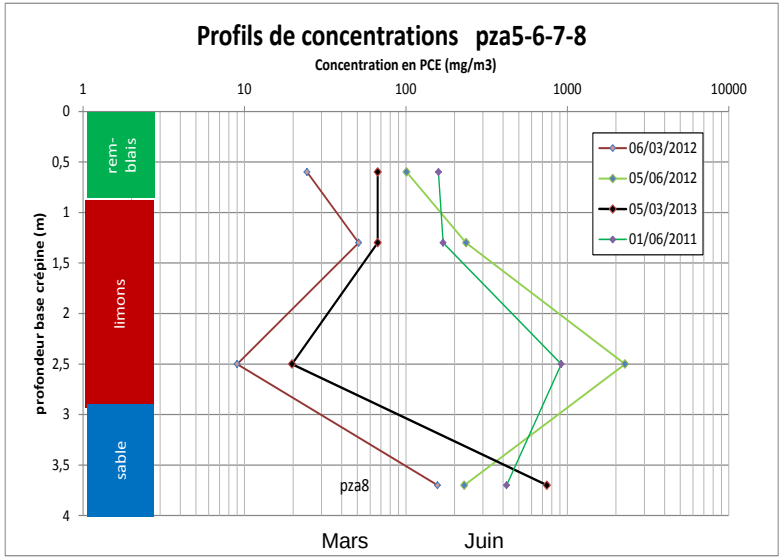
REX sur des concentrations mesurées

> Variations temporelles des concentrations sur le site de Fluxobat

- Cas de quadruplet
  - Des variations de comportement



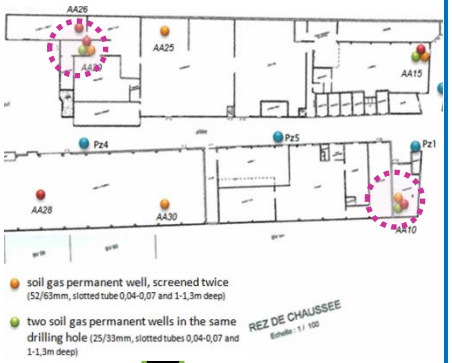


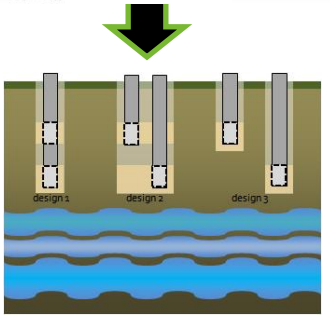


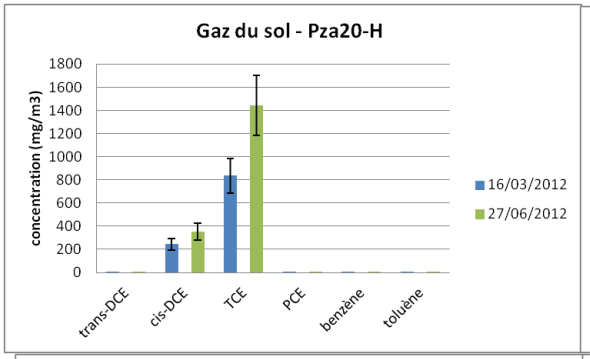
REX sur des concentrations mesurées

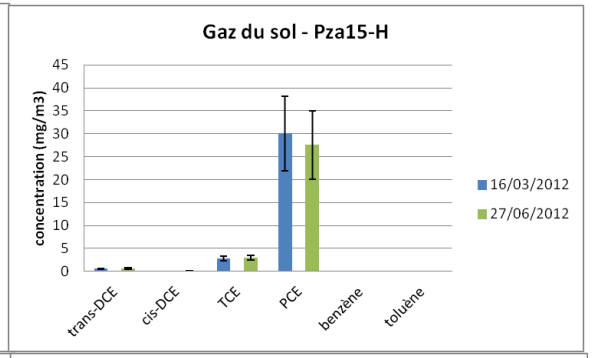
> Variations temporelles de concentrations sur le site de CityChlor

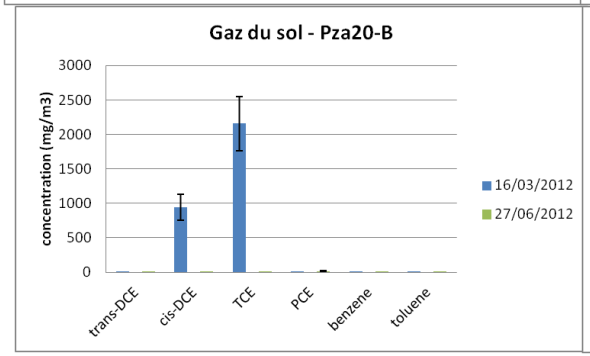
- Influences des conditions environnementales variables en fonction des zones d'études et horizons concernées (profondeur des zones crépinées)

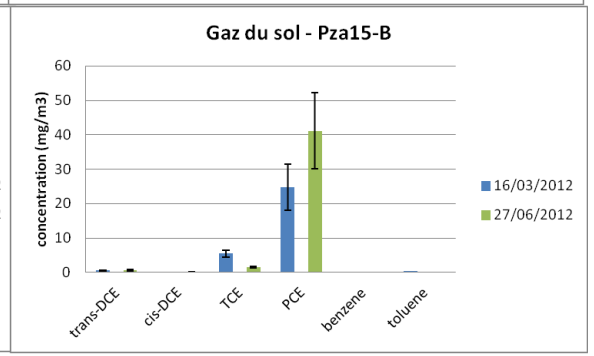


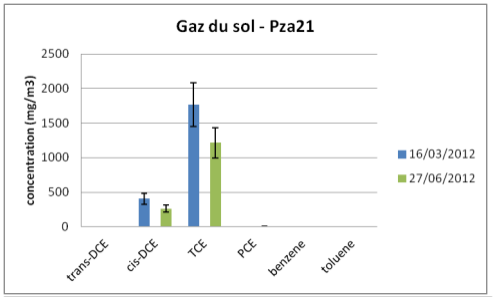


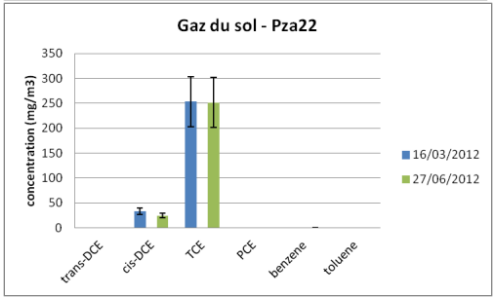












Synthèse sur la caractérisation à partir de piez-air (1/2)

> Définition de l'objectif de la mesure

> Analyser les enjeux et spécificité du site

> Définition de la localisation et du nombre d'ouvrage

> Choix des design

- Au regard de l'objectif, des spécificités des sols et du site
- Cas avec une zone crépinée unique sur « toute la hauteur »
- Cas avec 2 zones crépinées, « maîtrise » de la mise en place de l'ouvrage
- Cas du doublet avec 2 niveaux différents de crépines, dans un forage unique ou différent

> Mise en place du piez-air

- Matériaux inertes
- Bentonite ciment « liquide »

Synthèse sur la caractérisation à partir de piez-air (2/2)

> Parmi les étapes du prélèvement

- Premières mesures avec PID
- Purge au PID avec suivi de paramètres recommandée
- Choix du type de prélèvement et des supports au regard des objectifs
- Cas avec aspiration mécanique, une attention particulière au choix du débit des pompes, leur contrôle
- Chaîne de prélèvement
- Durée de prélèvement

> Mesure de paramètres environnementaux impactant le transfert dans les sols et vers l'air intérieur et extérieur

> Réalisation de *a minima* 2 campagnes avec des conditions environnementales différentes, en l'absence de cohérence des résultats, poursuite des campagnes

Analyses *in situ* et en laboratoire

> Prélèvements et analyses selon les stades et stratégies d'investigation (REX Modes Opératoires Attena)

Screening de source - détection des sources sols/gaz/eaux	**Type de prélèvement des gaz du sol** - prélèvement passif - ouvrage temporaire	**Type d'analyse** - non discriminante : PID/FID -- semi discri. : IR / tubes - discri. : prélèvements sur support
Délimitation de panaches -source primaire / secondaire -Indice A. N.	-prélèvement actif -prélèvement passif - sondage temporaire dédié: canne/tubage - ouvrage permanent (piézair)	- non/semi discri. : idem screening + calage -- discri. : idem screening + IR photo-acoustique / chromatographe de terrain
Bilan et suivi des gaz du sol - A.N., - migration de panaches	- prélèvement actif - prélèvement passif - ouvrage permanent (piézair)	

- **Mesure de flux surfacique**

Caractérisation des gaz du sol sur site

- Données récapitulatives sur les méthodes sur site pour les hydrocarbures légers, les BTEX, et COHV (REX Modes Opératoires Attena)

- Trois niveaux de caractérisation
  - screening de source
  - identification des sources
  - identification des composés des sources

- Données de mise en œuvre sur les principales méthodes
  - non discriminantes : PID / IR / FID
  - semi discriminantes : tubes réactifs
  - discriminantes : photo-acoustique /chromatographe de terrain

Interprétation de l'analyse des gaz du sol

- Différents niveaux d'interprétation
  - Evolution globale / screening
  - Evolution de contaminant spécifique semi quantitative (CPG sur site/laboratoire)
  - Interprétation en termes de suivi de la contamination
- Avec / sans prise en compte de
  - Agrégation des résultats (variabilité temporelle / spatiale)
  - Interprétation en tant que gaz à l'équilibre

Eléments de référence

Type de consommable	LQ indicative et limite d'utilisation	Coût unitaire en euros
vial verre petit volume + bouchon téflon, type 40 ml EPA	500 µg/m³	1 - 2 (pour 100 vials) selon qualité et bouchon
sacs Tedlar®, volume intermédiaire (1 – 3 l)	selon volume du sac, pour 1 l : 10 µg/m³	10 – 15 selon valve de fermeture
tube de charbon actif, adsorbant monozone	selon volume prélevé, (pour 10 – 20 l) : 1 µg/m³ ; risque de perçage	20 - 30
tube adsorbant spécifique type multizone	selon volume prélevé, (pour 10 – 20 l) : 1 µg/m³ ; risque de perçage	30 – 70
canister 3l (location)	1 µg/m³ ; pas de risque de perçage	70 - 110

- Eléments de coût
  - Sondages/équipements
  - Analyseurs
  - Consommables
  - Temps de prélèvement/analyse
- Bibliographie/annexes
  - Normes et méthodologies
  - Bibliographies thématiques
  - Annexes

Limites et bénéfices des analyses sur site

> Limites des approches

- Selon les analyseurs (PID/FID/IR)
- Sensibilité (catharomètre/IR)
- Co-élution (CPG)
- Influence sur site de nombreux paramètres
  - température, humidité
  - chemins préférentiels dans les sols (présence de sondage, de limites de dalles,..) ;
  - variations barométriques, variation de l'amplitude des marées

> Bénéfices attendus

- Investigations légères
- Information principale et/ou auxiliaire à la démonstration de la migration du panache de contaminant et de l'atténuation naturelle

Merci de votre attention

Questions ?