

Journées techniques
28 et 29 mai 2013

Gestion des sites et sols
pollués



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

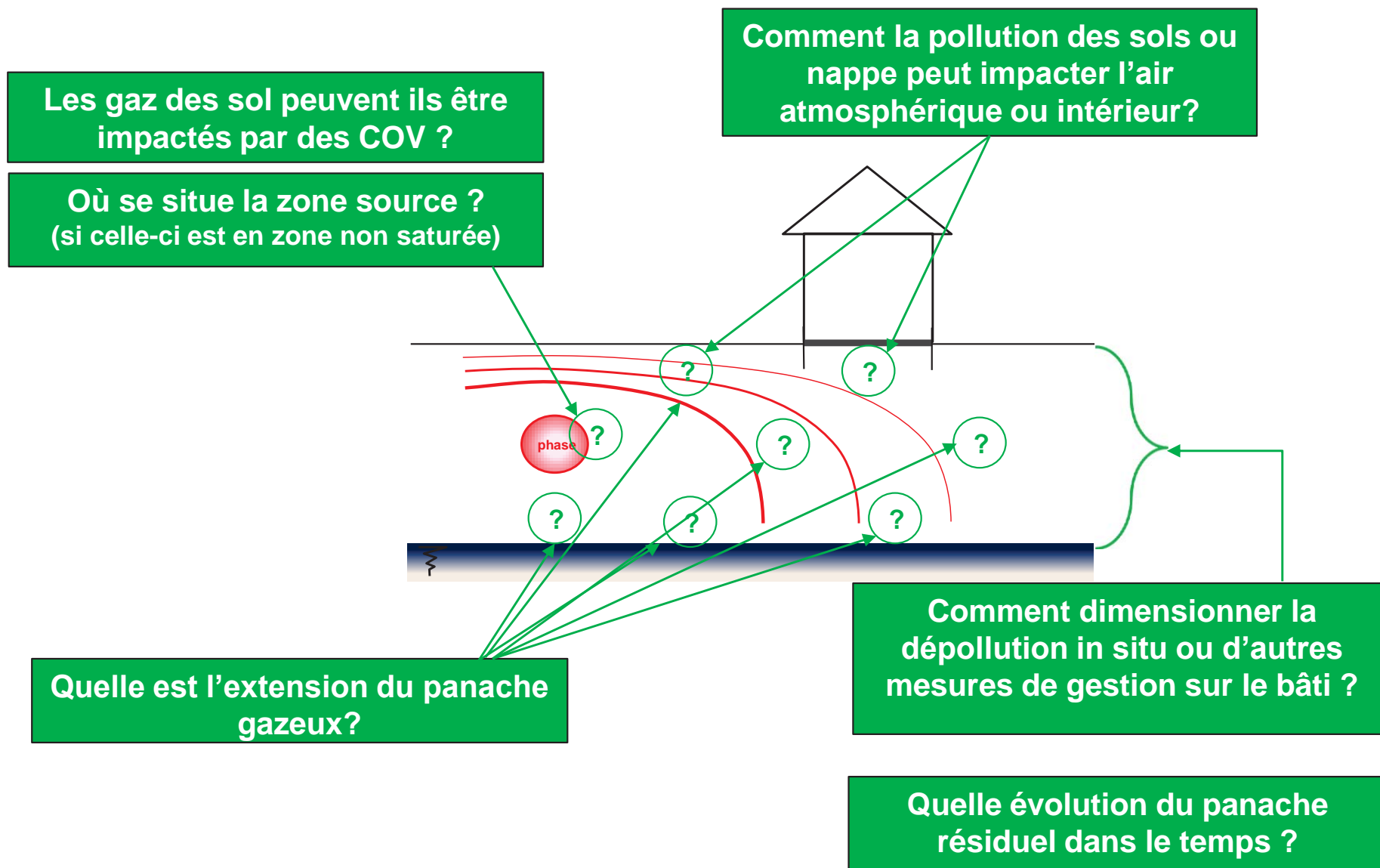
- > Objectifs des mesures et éléments de compréhension
- > Etat de l'art

- > 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

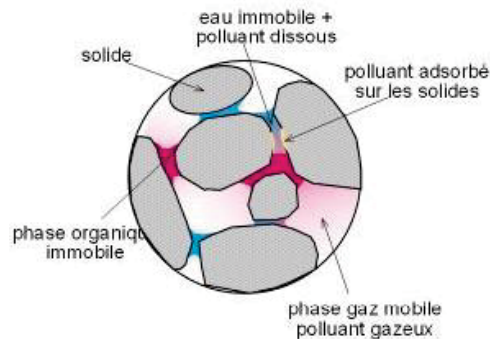
- > Questions

Les objectifs de mesures



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 P_{vap} à 20°C, patm)
PCE : 128 360 mg/m³
TCE : 418 170 mg/m³



Proche gouttelette :
C=C_{eq}

C moyenne sur
échantillon < C_{eq}

- En l'absence de phase organique et au sein du panache gazeux
Échange entre phases (adsorbée, eau, air)



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

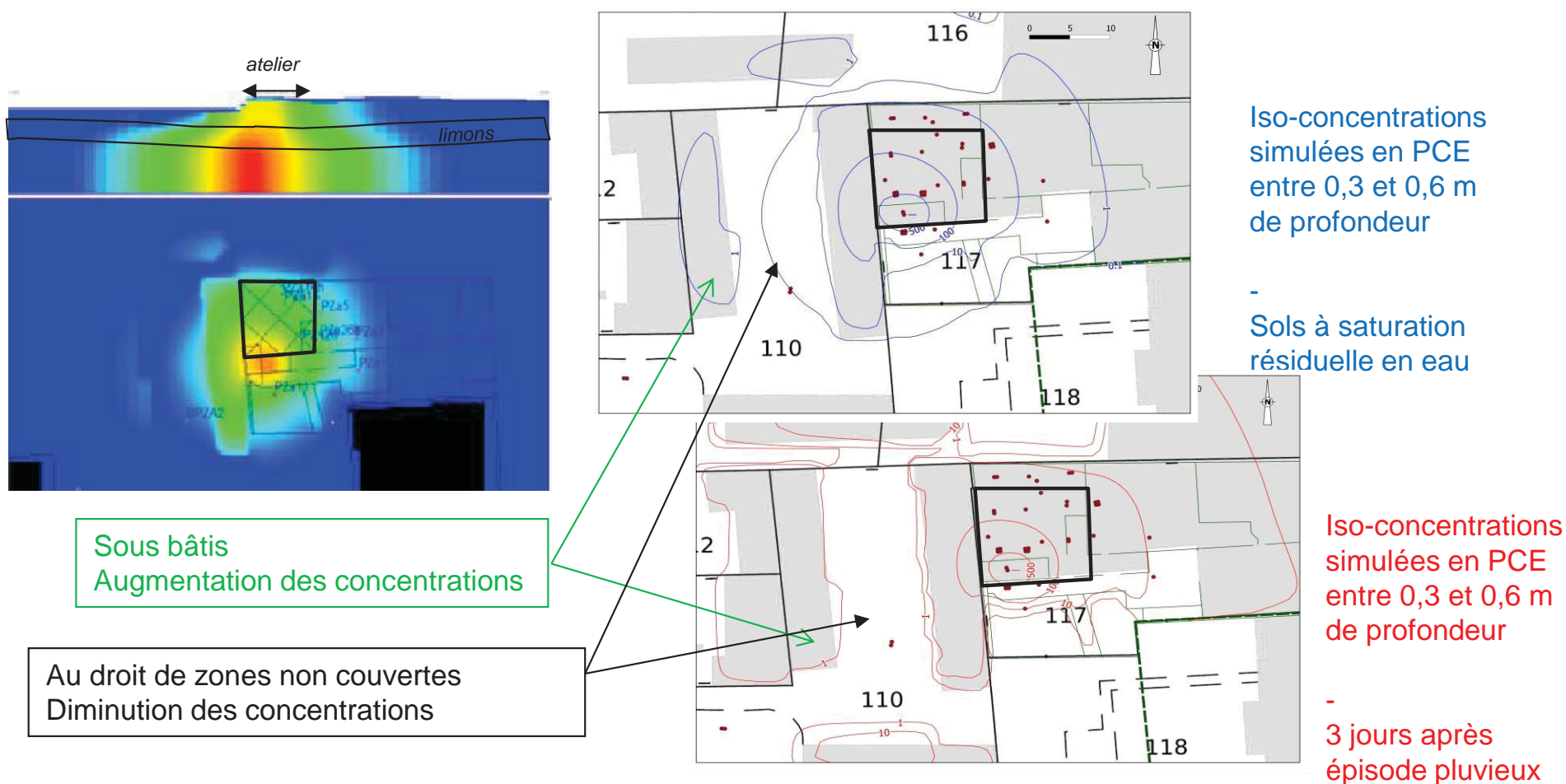
$$K_H = \frac{P_{vap} MW}{RT}$$



Géométrie du panache gazeux

> Dépendance aux paramètres de transfert

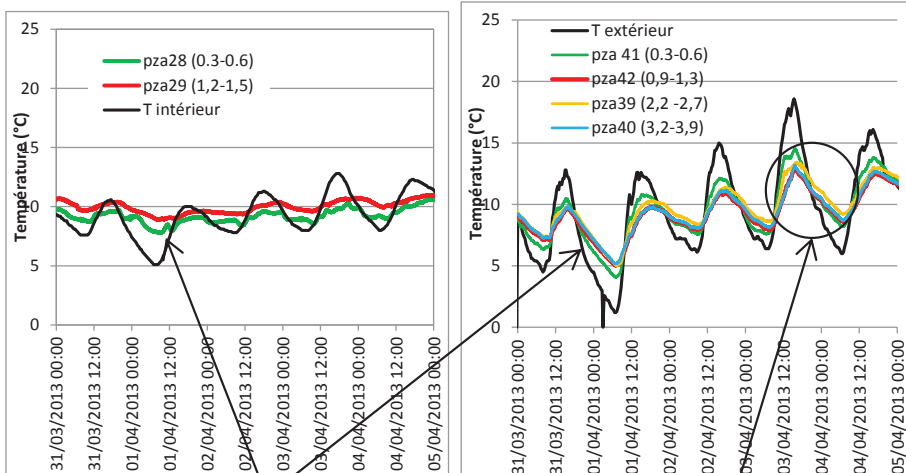
- Diffusion dans le milieu poreux
- Diffusion dans l'eau du sol (négligeable)
- Perméabilité au gaz (proche surface ou bâtiment)



Influence de la température sur les transferts

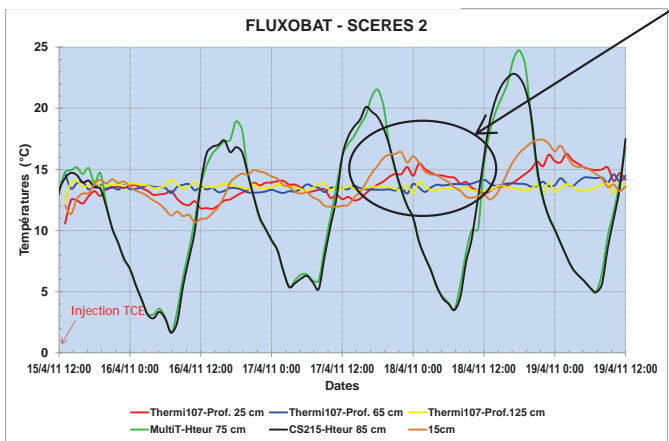
Variations diurnes et saisonnières

Site atelier -mars 2013



Réactions différentes en extérieur et sous bâti

Diminution des amplitudes avec la profondeur



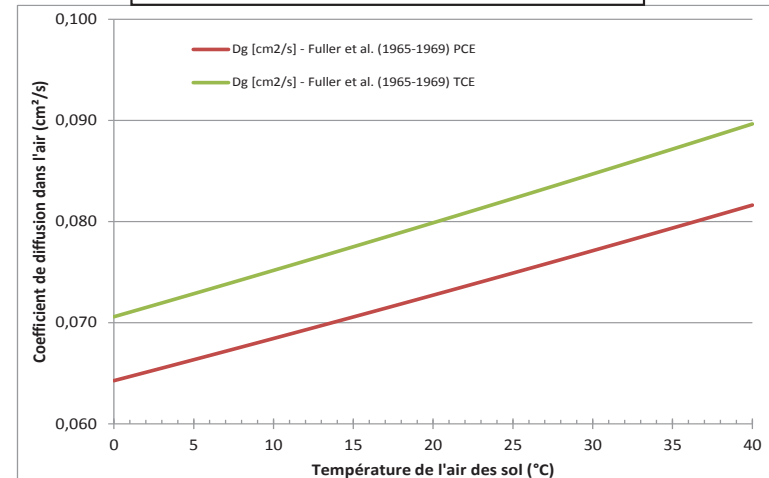
Forte dépendance de la pression de vapeur saturante à la température



Influences

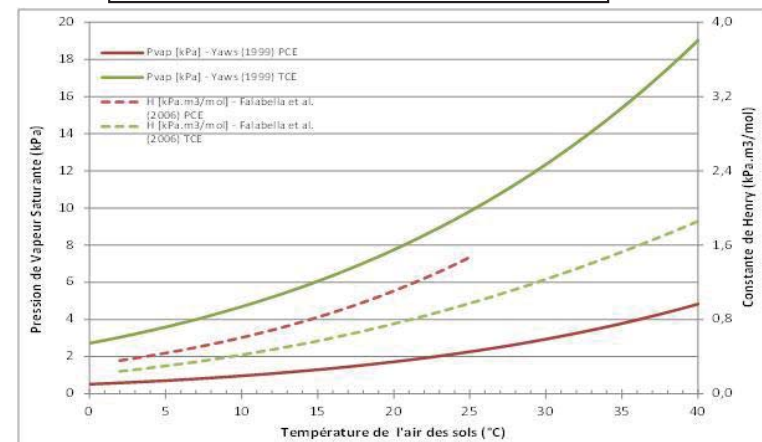
Sur le coefficient de diffusion dans l'air

$$dT(5-25^\circ) \rightarrow D_{\text{air}} (\text{PCE}) \times 1,1$$



Sur la pression de vapeur saturante

$$dT(5-25^\circ) \rightarrow P_{\text{vap}} (\text{PCE}) \times 3$$



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

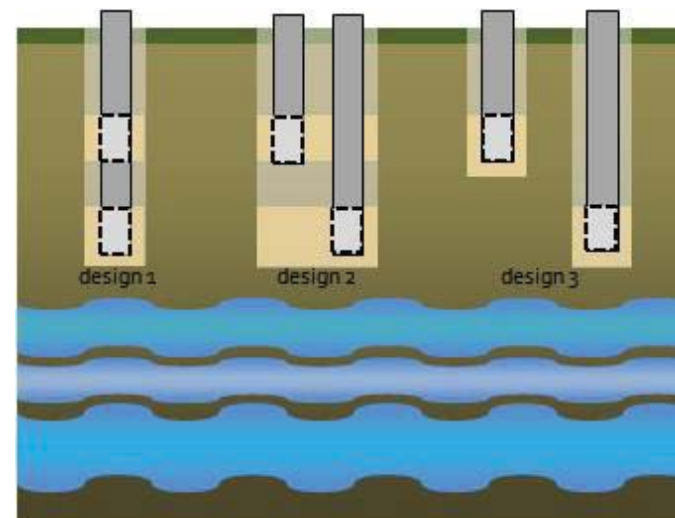
- Piez-air
 - intérêt pour un suivi temporel



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)

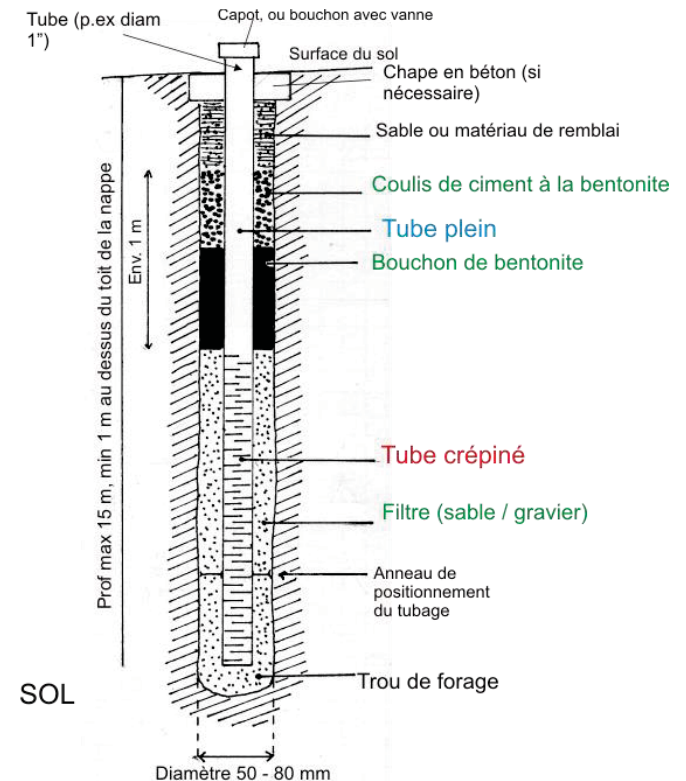


Schéma de principe : équipement en puits à gaz d'un forage (d'après VDI 3865-2)



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

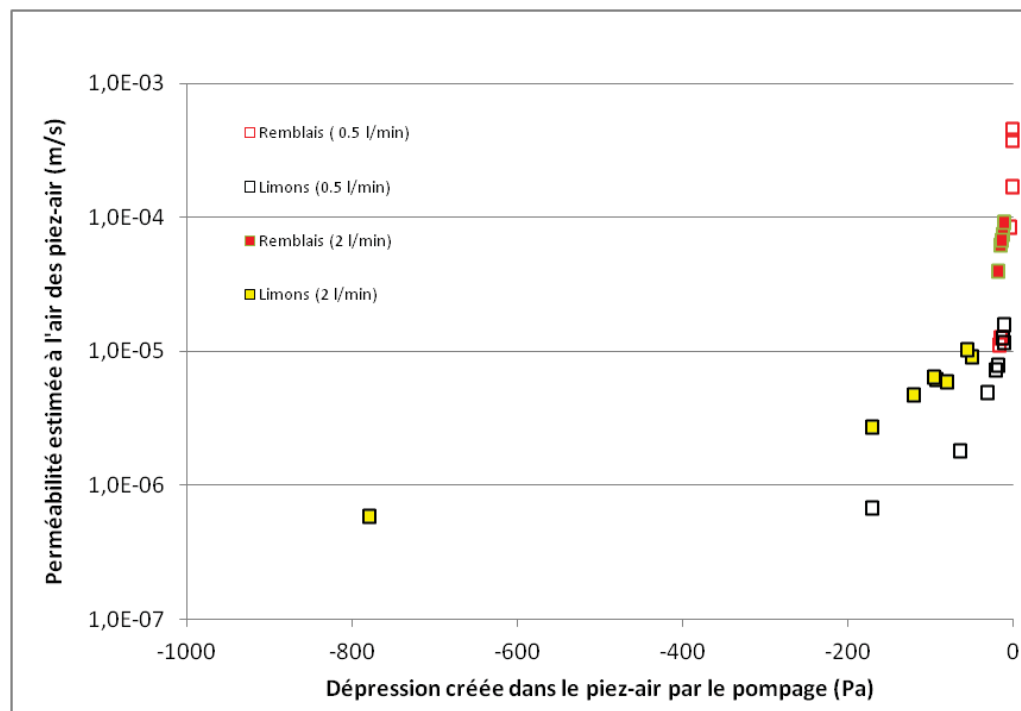
> Prélèvement par aspiration mécanique, naturelle

		
par aspiration mécanique, support avec un ou plusieurs adsorbants	<ul style="list-style-type: none">- coût (actuellement)- seule possibilité pour certaines substances (par ex. tube hopkalite pour le mercure élémentaire)	<ul style="list-style-type: none">- 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®)	<ul style="list-style-type: none">- caractérisation de nombreuses substances- concentrations extrêmes (basses, hautes)- « autonomie »	<ul style="list-style-type: none">- 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'une potentielle saturation du support
- Support de contrôle, blanc de terrain, de transport



Protocole de prélèvement - Phases amont (3/3)

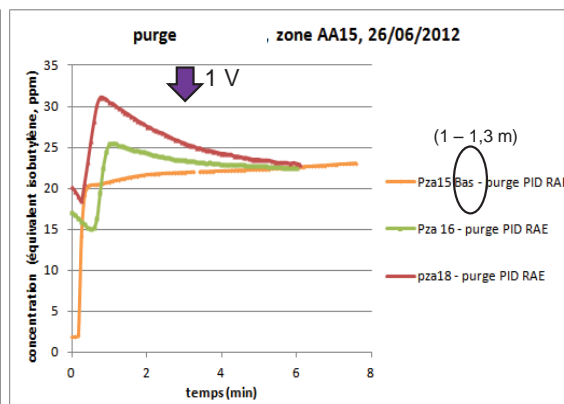
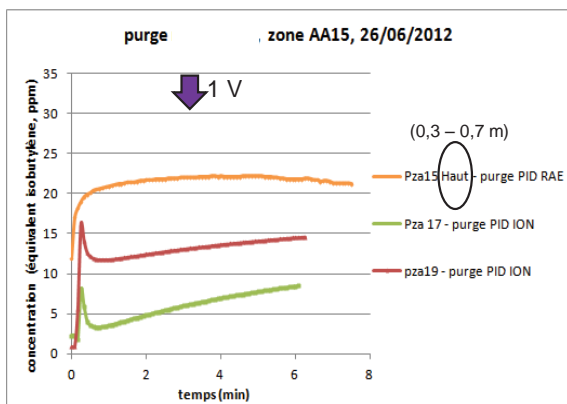
> Purge



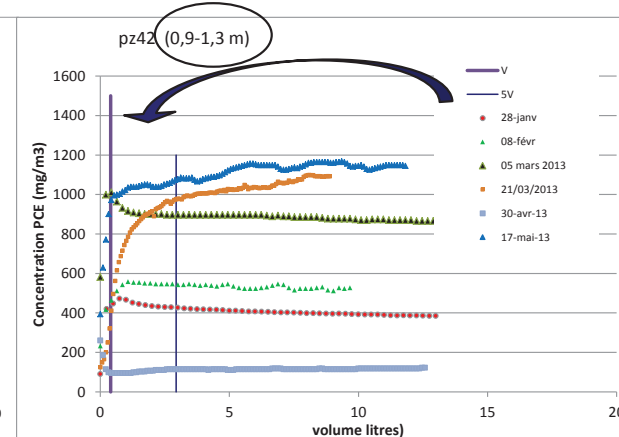
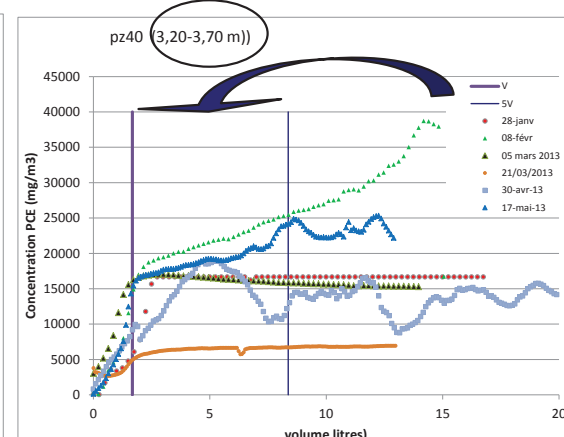
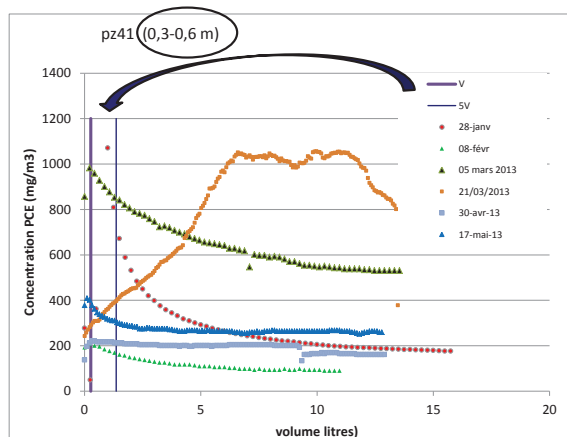
- La norme : 5 fois le volume mort
- Purge avec PID avec suivi d'autres paramètres (CO₂, O₂,...), REX, cas > ou < à 5 fois le volume



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 entre 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, ...

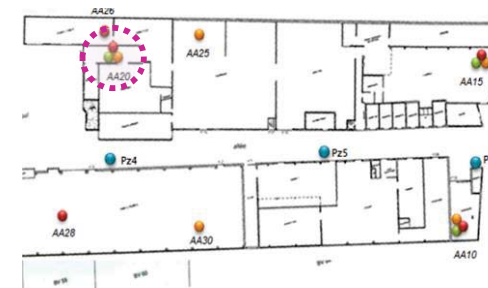
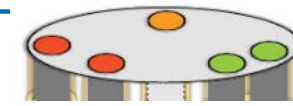
> **Nécessité de réaliser plusieurs campagnes de mesures**

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



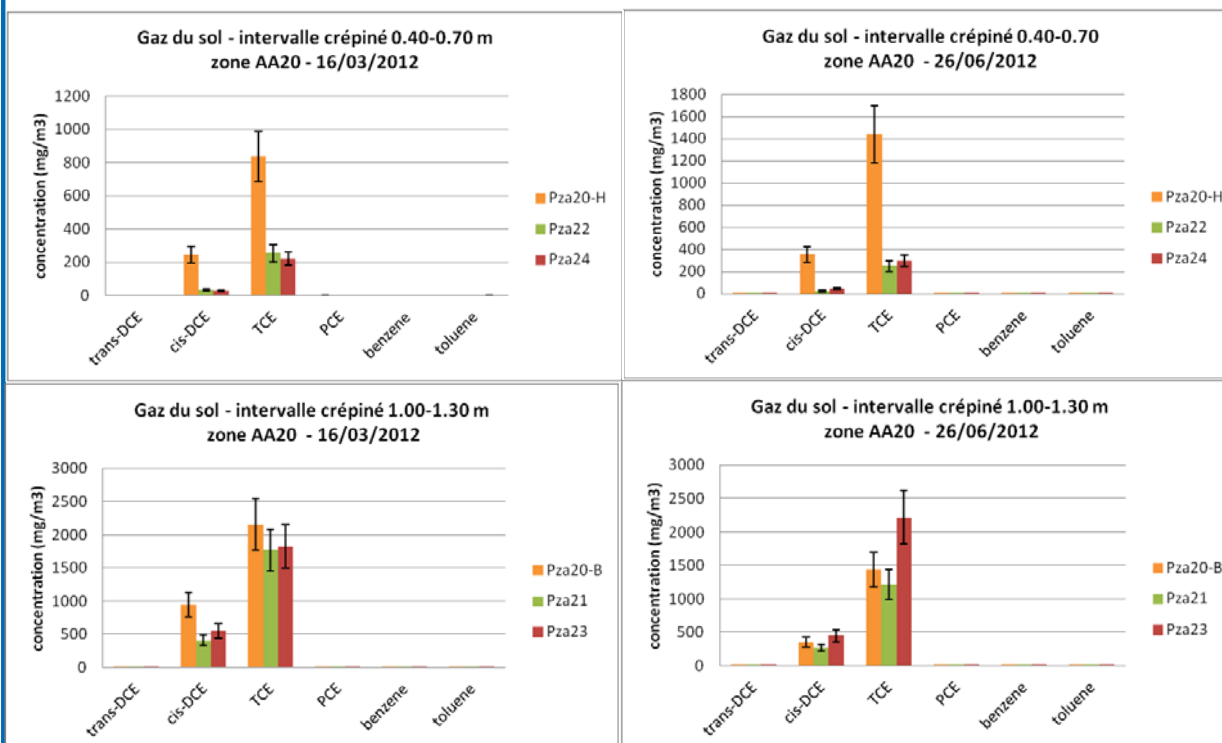
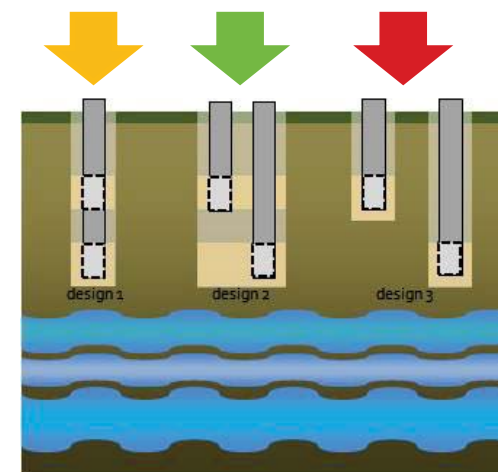
REX sur des concentrations mesurées

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



● soil gas permanent well, screened twice (52/63mm, slotted tube 0,04-0,07 and 1-1,3m deep)
● two soil gas permanent wells in the same drilling hole (25/33mm, slotted tubes 0,04-0,07 and 1-1,3m deep)

REZ DE CHAUSSEE
Echelle: 1/100



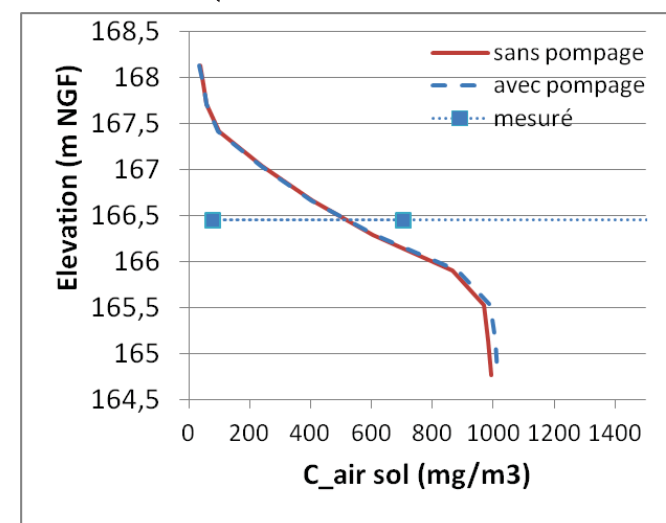
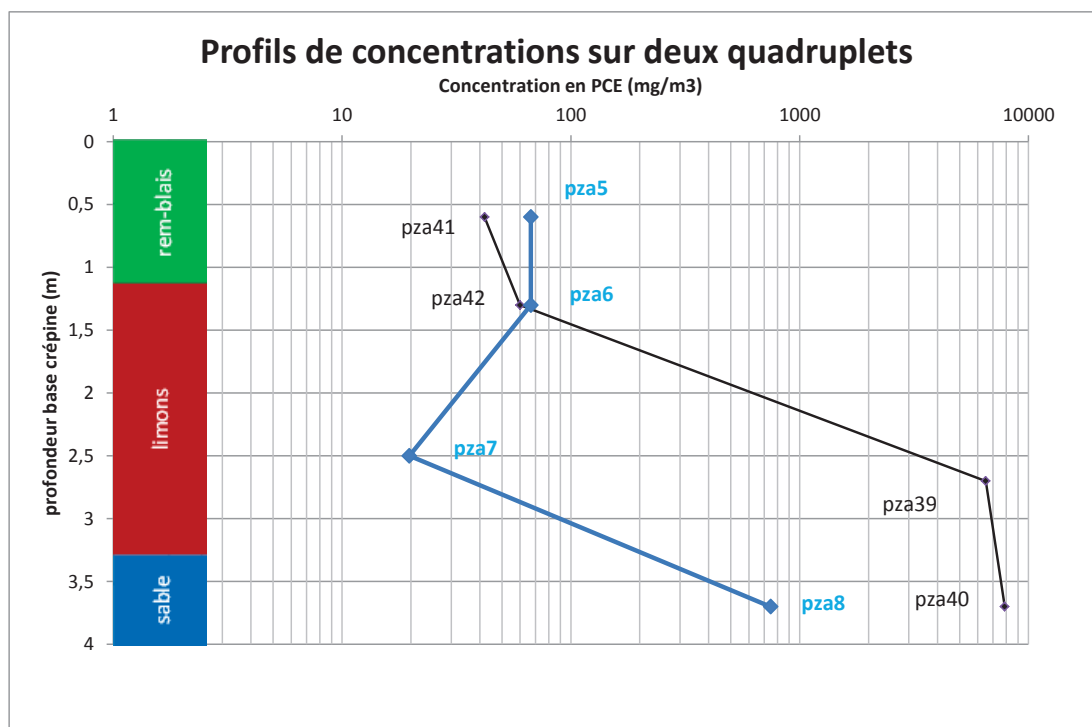
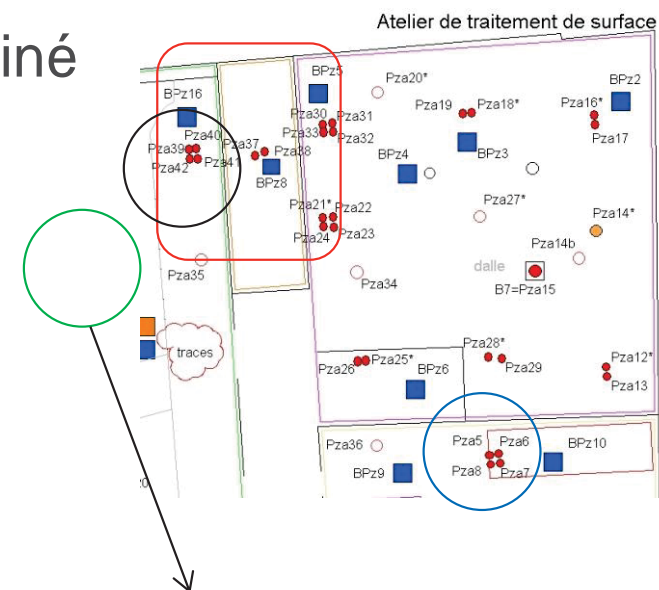
- Pour la majorité des zones étudiées et des campagnes
 - Cas des design 2 et 3 : concentrations globalement équivalentes
 - Cas du design 1 : concentrations généralement supérieures aux concentrations mesurées dans les autres piez-air (design 2 et 3) pour la zone crépinée à moindre profondeur, équivalentes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

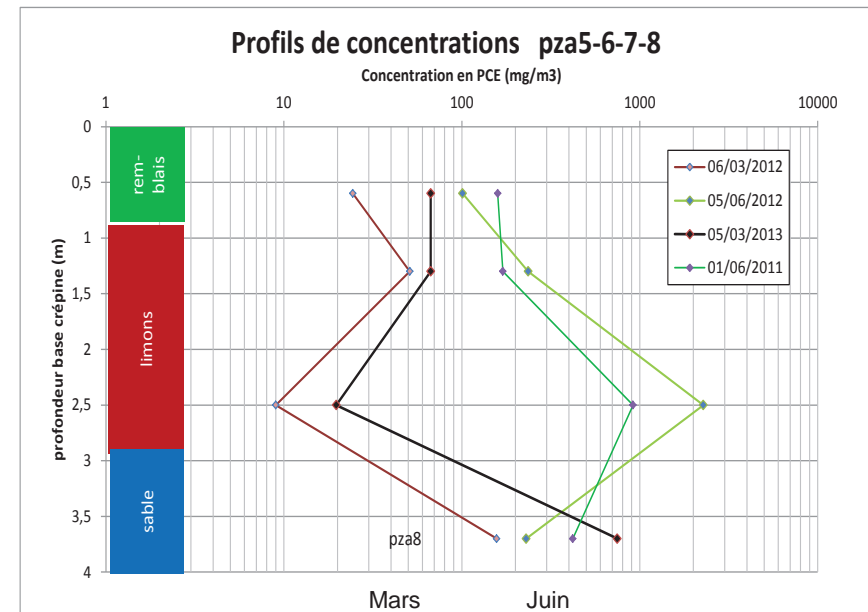
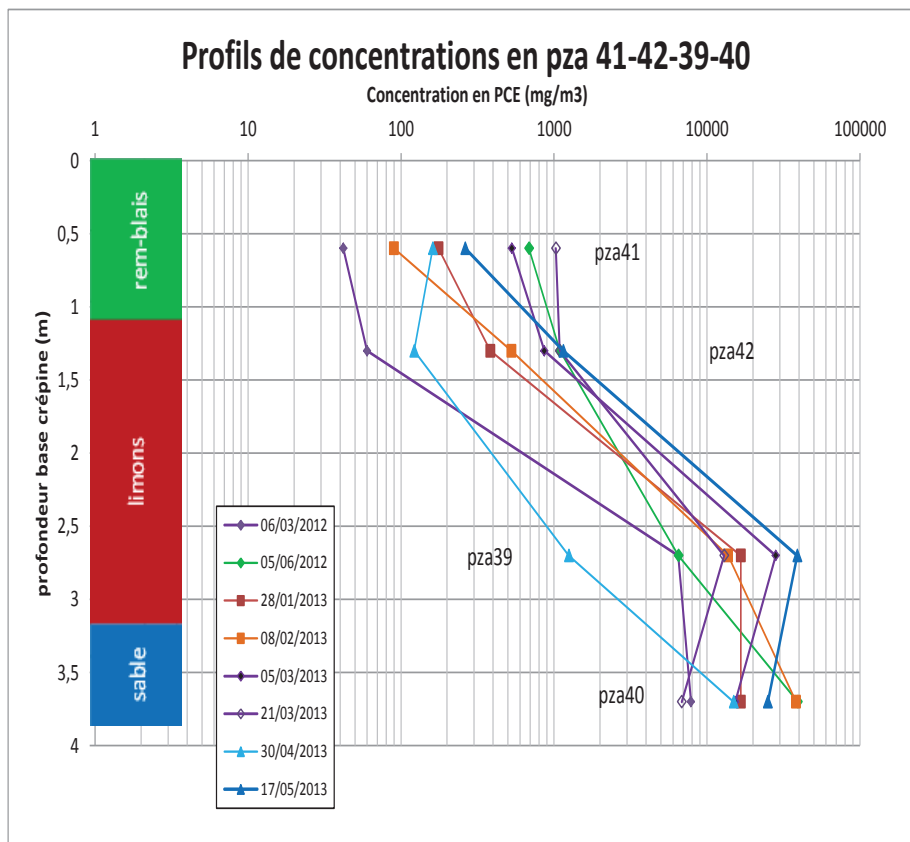
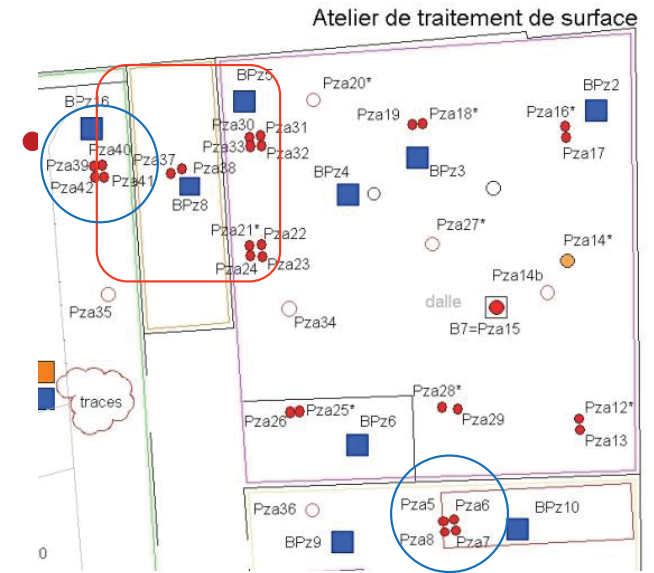


PZ 11 : concentrations à différentes périodes et avec concentrations modélisées

REX sur des concentrations mesurées

> Variations temporelles des concentrations sur le site de Fluxobat

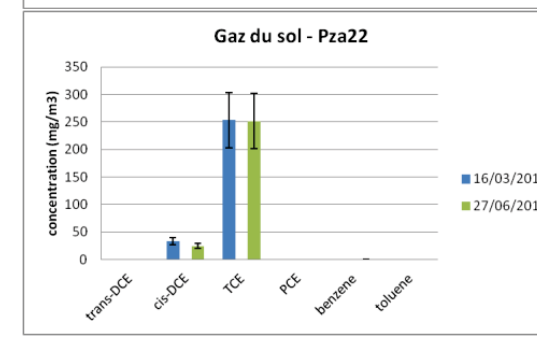
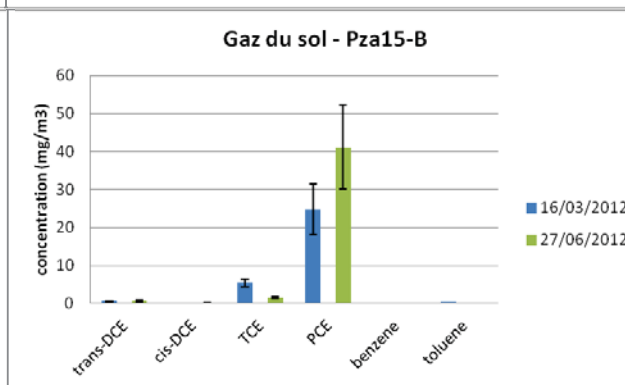
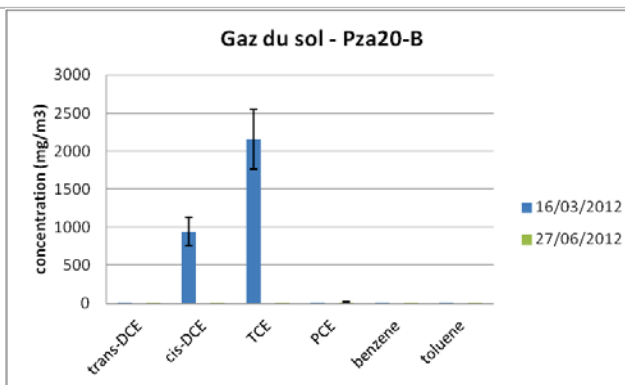
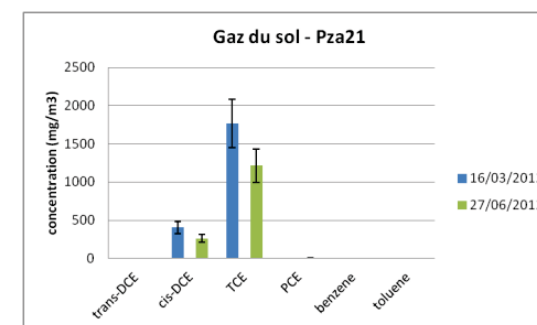
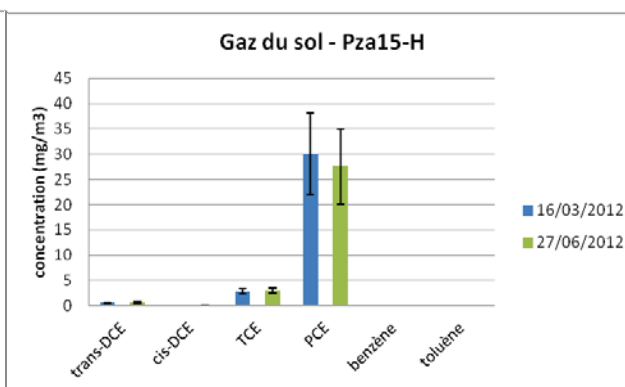
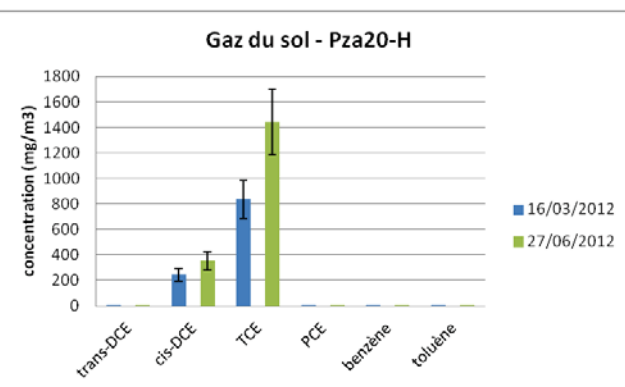
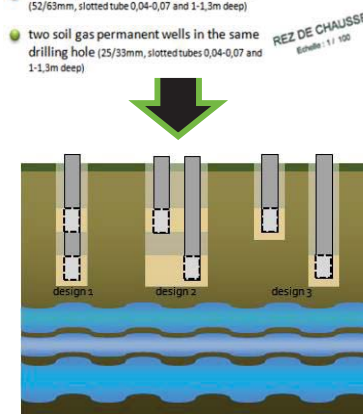
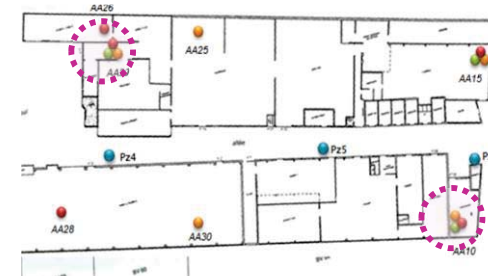
- Cas de quadruplet
 - Des variations de comportement



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 s  « 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	Type de prélèvement des gaz du sol	Type d'analyse
- détection des sources sols/gaz/eaux	- prélèvement passif - ouvrage temporaire	- non discriminante : PID/FID -- semi discri. : IR / tubes - discri. : prélèvements sur support
Délimitation de panaches	-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	- 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

Éléments 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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 - 2 (pour 100 vials) selon qualité et bouchon
sacs Tedlar®, volume intermédiaire (1 – 3 l)	selon volume du sac, pour 1 l : 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10 – 15 selon valve de fermeture
tube de charbon actif, adsorbant monozone	selon volume prélevé, (pour 10 – 20 l) : 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; risque de perçage	20 - 30
tube adsorbant spécifique type multizone	selon volume prélevé, (pour 10 – 20 l) : 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; risque de perçage	30 – 70
canister 3l (location)	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; pas de risque de perçage	70 - 110

> Éléments 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 ?

