

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

**Modélisations analytique et numérique
intégrale du milieu souterrain vers l'air
intérieur à l'échelle de deux sites ateliers**

Guillaume GAY – INERIS



Objectifs des modélisations

Sites ateliers FLUXOBAT et CITYCHLOR

> Données d'entrée (mesurées ou données empiriques)

- Terme source
 - Concentration(s) dans les gaz du sol
- Termes de transfert
 - Lithologie des horizons de sol
 - Caractéristiques de la dalle de béton
- Terme d'exposition
 - Dispersion dans l'air intérieur

> Données de sortie (modélisées)

- Concentration(s) dans l'air intérieur

> Comparaison des concentrations modélisées et mesurées

Modélisations analytique et numérique

Deux approches différentes...

> Modélisation analytique (modèle 2) : transfert vertical à une dimension

- Réduction de la réalité à « une source »
 - Une profondeur
 - Une concentration
- Réduction de la réalité à une concentration de sortie
 - Une localisation horizontale
 - Une hauteur

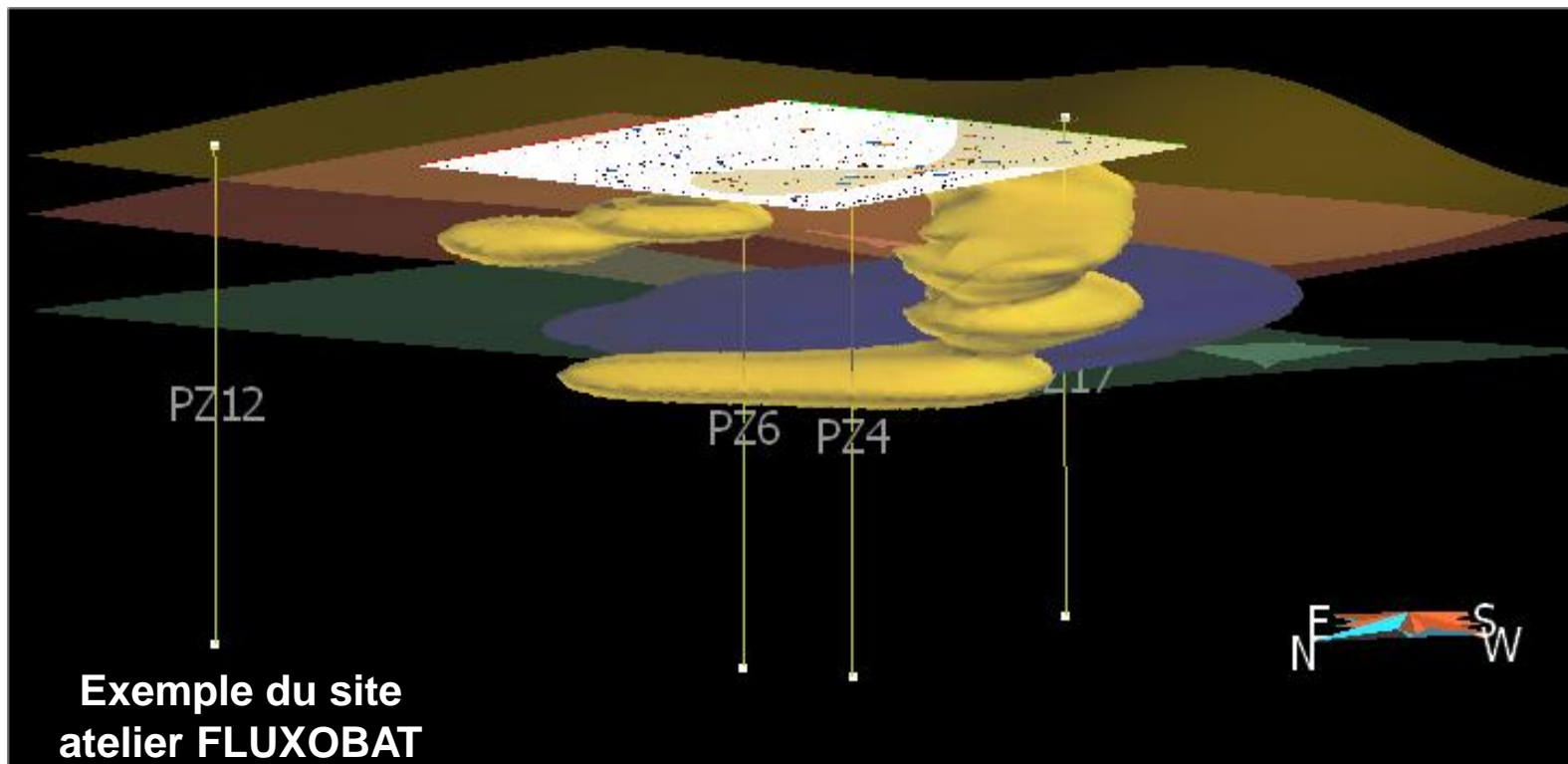
> Modélisation numérique (modèle 7)

- Possibilité d'appréhender l'intégralité d'une source
 - Hétérogénéités spatiales
 - Niveaux de concentrations différents
- Possibilité de proposer plusieurs concentrations
 - Plusieurs localisations horizontales
 - Plusieurs hauteurs

Données d'entrée / Terme source

Quels paramètres définir ?

- > Comment passer de la connaissance du terme source interprété (sur la base de mesures) à la définition de paramètres d'entrée pour les modèles ?



Données d'entrée / Terme source

Approches retenues

> **Modélisation analytique (modèle 2) : définitions de plusieurs scénarios à comparer**

- Localisation de la source
 - Source localisée dans les sables et graviers (couche la plus profonde)
 - Source localisée dans les remblais (couche la plus superficielle)
- Niveau de concentration
 - Moyenne de toutes les mesures dans la couche sélectionnée
 - Moyenne des mesures dans la couche sélectionnée, restreintes aux mesures localisées au droit de la « zone source »
 - Valeur maximale mesurée dans la couche sélectionnée

> **Modélisation numérique (modèle 7)**

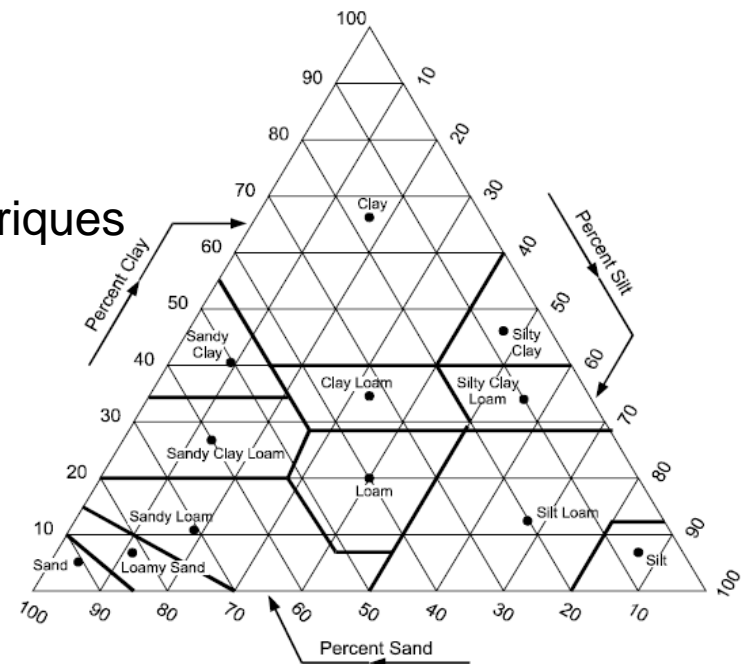
- Définition d'un volume source pour chaque lithologie
- Définition d'une concentration homogène dans chaque volume

Données d'entrée / Termes transfert

Paramètres relatifs au sol

> Respect des observations de terrain

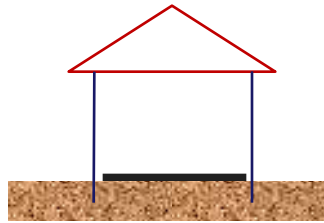
- Découpage en trois couches successives
- Recours privilégié aux mesures
 - Épaisseurs des horizons
 - Masse volumique
 - Porosité totale
 - Perméabilité effective à l'air
 - Granulométrie
- Utilisation ponctuelle de données empiriques
 - Utilisation de la classification SCS
 - Estimation d'une teneur en eau



Le choix du modèle analytique

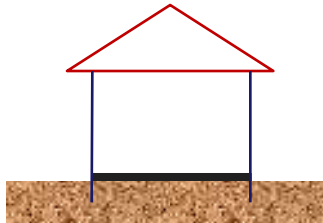
1. Géométrie du soubassement

2. Représentation de la dalle



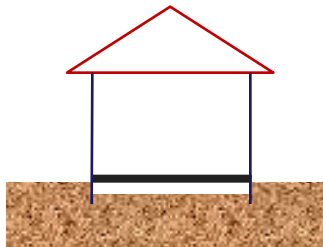
Sans

Fissure de retrait : Jonhson & Ettinger (1991), Yao et al (2011)



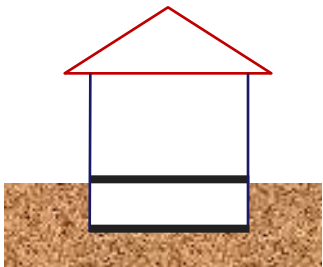
Sans

Fissures réparties : RIVM, 2008
Milieu poreux équivalent : RIVM, 2008



Vide sanitaire

Fissures réparties Volasoil, 1996



Sous-sol

Fissures de retrait : Jonhson & Ettinger (1991)
Fissures réparties : Volasoil, 1996,
Milieu poreux équivalent : RIVM, 2008

Données d'entrée / Termes transfert

Trois concepts pour une dalle de béton

> Dalle considérée comme un milieu poreux « intact »

$$\alpha = \frac{C_{\text{building}}}{C_{\text{source}}} = \frac{A_{\text{floor}}}{Q_{\text{indoor}}} \frac{K_T \frac{\Delta P}{L_T}}{1 - \exp\left(-\frac{K_T \Delta P}{D_T^{\text{eff}}}\right)}$$

> Dalle fracturée régulièrement (VolaSoil)

$$\alpha = \frac{C_{\text{building}}}{C_{\text{source}}} = \frac{A_{\text{floor}}}{Q_{\text{indoor}}} \frac{K_T \frac{\Delta P}{L_T}}{1 - \exp\left(-\frac{K_T \Delta P L_{\text{soil}}}{D_{\text{soil}}^{\text{eff}} L_T}\right) \exp\left(-\frac{K_T \Delta P L_{\text{floor}}}{f_{\text{of}} D_{\text{floor}} L_T}\right)}$$

$$K_{\text{floor}} = \frac{f_{\text{of}}^2}{n 8 \pi \mu_a}$$

> Dalle avec fissure périphérique (Johnson &

$$\alpha = \frac{C_{\text{building}}}{C_{\text{source}}} = \frac{\frac{D_{\text{soil}}^{\text{eff}} A_B}{Q_{\text{building}} L_{\text{soil}}} \exp\left(\frac{Q_{\text{soil}} L_{\text{crack}}}{D_{\text{crack}} A_{\text{crack}}}\right)}{\exp\left(\frac{Q_{\text{soil}} L_{\text{crack}}}{D_{\text{crack}} A_{\text{crack}}}\right) + \frac{D_{\text{soil}}^{\text{eff}} A_B}{Q_{\text{building}} L_{\text{soil}}} + \frac{D_{\text{soil}}^{\text{eff}} A_B}{Q_{\text{soil}} L_{\text{soil}}} \left[\exp\left(\frac{Q_{\text{soil}} L_{\text{crack}}}{D_{\text{crack}} A_{\text{crack}}}\right) - 1 \right]}$$

$$Q_{\text{soil}} = \frac{2\pi k_v \Delta P X_{\text{eq}}}{\mu_a \ln(2Z_{\text{eq}}/r_{\text{eq}})}$$

ou

$$Q_{\text{soil}} = \frac{\pi k_v \Delta P X_{\text{eq}}}{\mu_a \ln(4Z_{\text{eq}}/r_{\text{eq}})}$$

Données d'entrée / Termes transfert

Paramètres relatifs à la dalle de béton

> Trois conceptualisations pour une dalle en béton... avec des paramètres caractéristiques distincts

- Dalle intacte considérée comme un milieu poreux
 - (Micro)porosité et une tortuosité → estimation
 - Perméabilité à l'air → mesure sur carottes de béton
- Dalle fracturée régulièrement (approche VolaSoil)
 - Nombre de fractures par unité de surface → valeur par défaut
 - Ratio de fractures dans la dalle → valeur par défaut
- Dalle avec fissure périphérique (approche Johnson & Ettinger)
 - Largeur de la fissure de retrait → valeur par défaut
 - Profondeur de la base des fondations → estimation

> Épaisseur de la dalle → mesure

> Approche pour la modélisation numérique

- Dalle « intacte » ou milieu poreux

Données d'entrée

Autres paramètres

> Paramètres liés au bâtiment

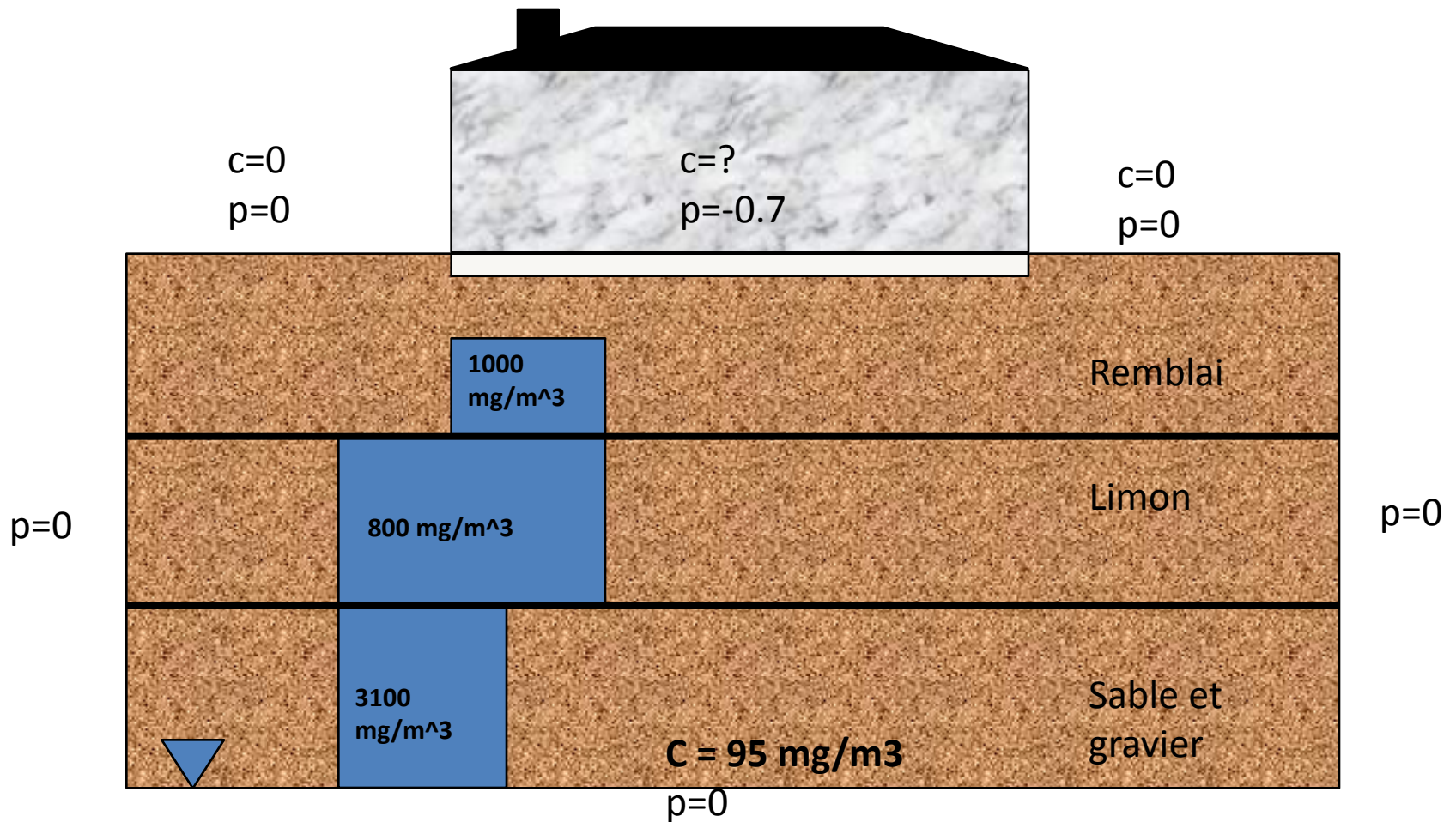
- Dimensions de l'atelier → mesure
- Taux de renouvellement d'air → mesure
- Pression différentielle entre l'intérieur et l'extérieur → mesure

> Paramètres physico-chimiques

- Approche mono-substance : le PCE (en cohérence avec les mesures)
- Adaptation des paramètres à la température du sol (mesurée)
 - Constante de Henry
 - Coefficient de diffusion dans l'air
 - Coefficient de diffusion dans l'eau

Cas de la modélisation numérique

Définition des conditions aux limites



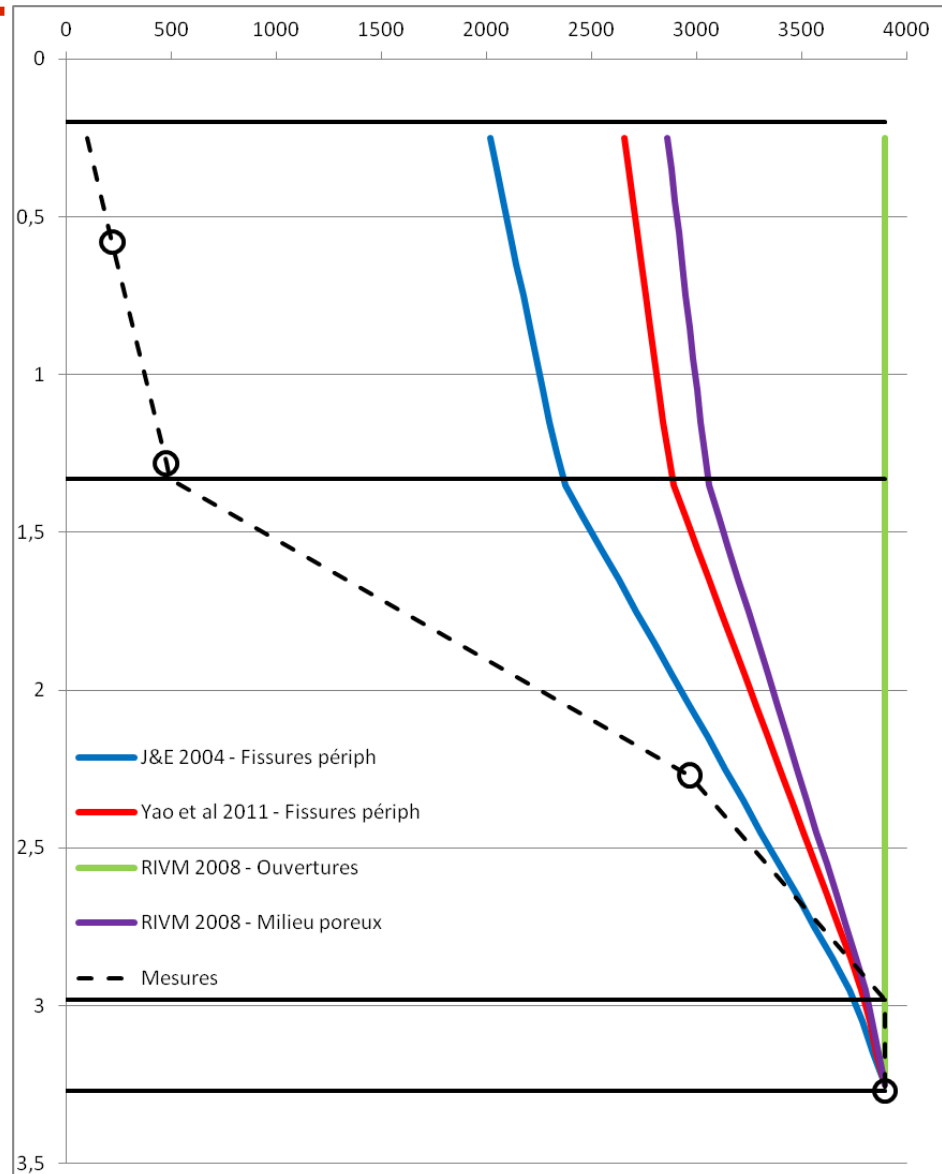
Exemple de résultats analytiques

Site atelier FLUXOBAT

> Profils verticaux des concentrations dans les gaz du sol

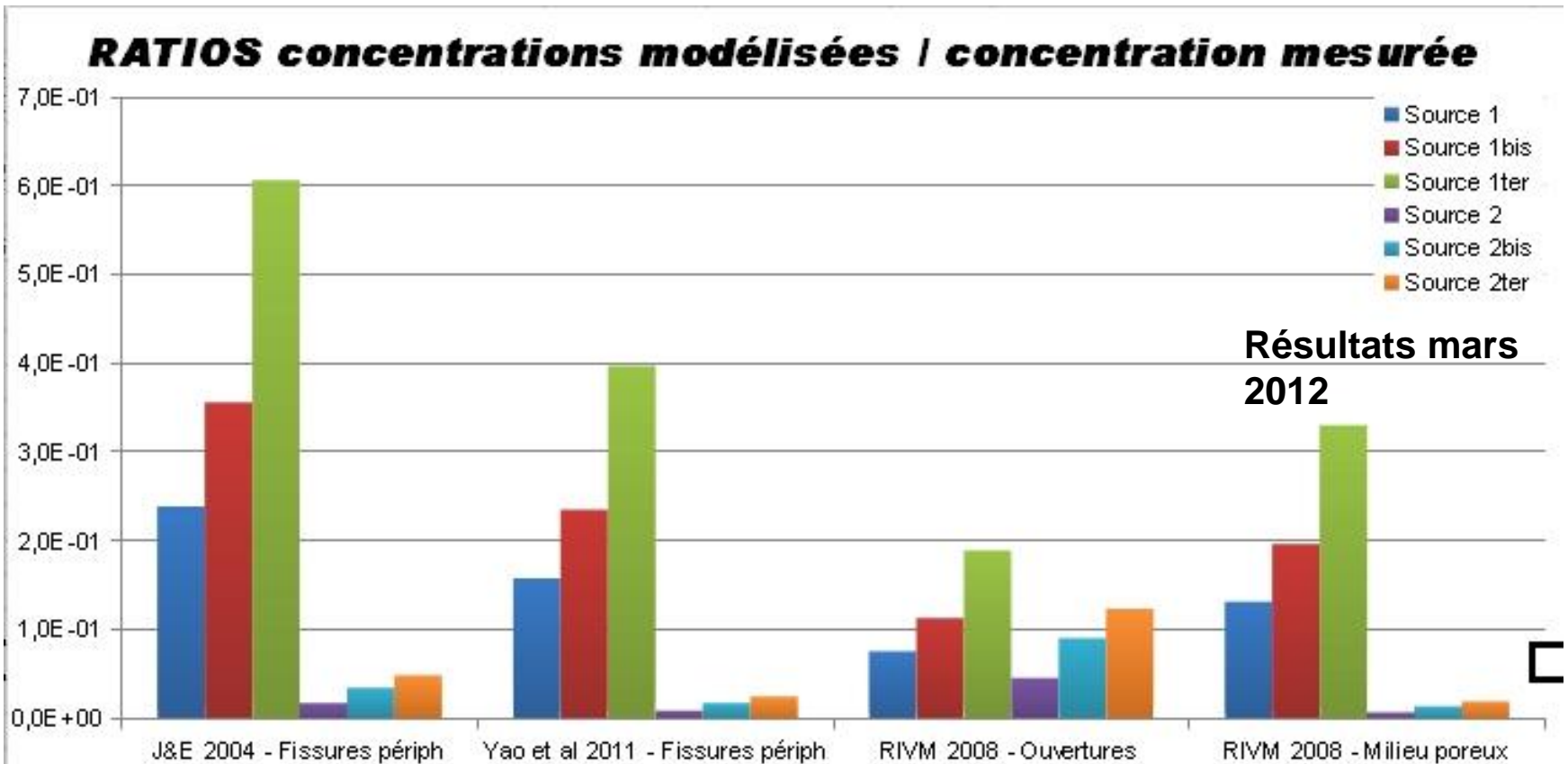
- Valeurs mesurées
- Valeurs modélisées avec les trois approches pour la dalle

Simulations en conditions hivernales (mars 2012) pour une source placée dans l'horizon le plus profond



Exemple de résultats analytiques

Site atelier FLUXOBAT



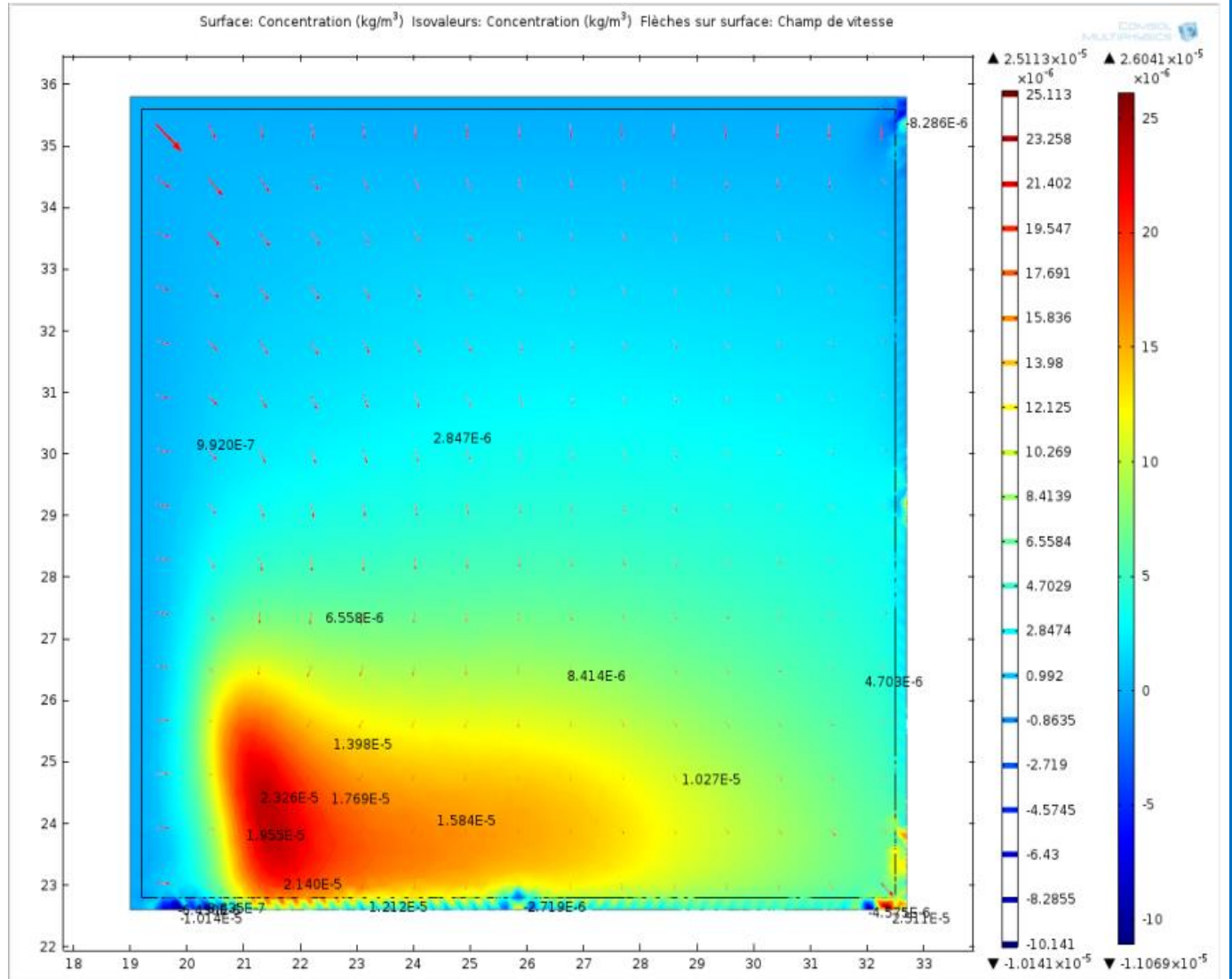
Source 1 = dans l'horizon le plus profond } par défaut, moyennes des concentrations
Source 2 = dans l'horizon superficiel } mesurées dans un horizon
Source 1bis ou 2bis = moyennes des concentrations mesurées au droit de la « zone source »
Source 1ter ou 2ter = valeur maximale mesurée dans l'horizon

Exemple de résultats numériques

Site atelier FLUXOBAT

Cartographie des concentrations en PCE dans l'air ambiant de l'atelier

Hauteur : 0,5 m

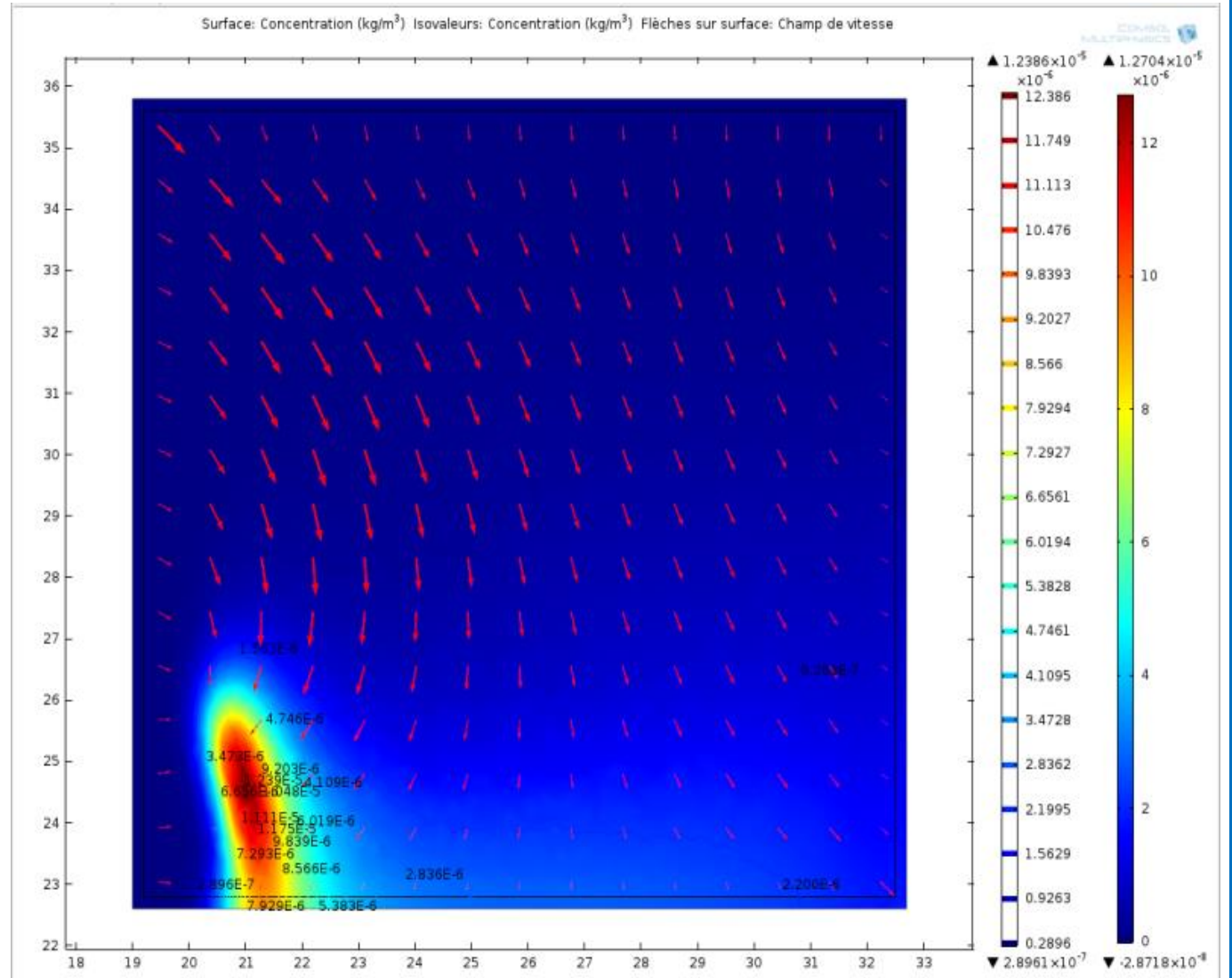


Exemple de résultats numériques

Site atelier FLUXOBAT

Cartographie des concentrations en PCE dans l'air ambiant de l'atelier

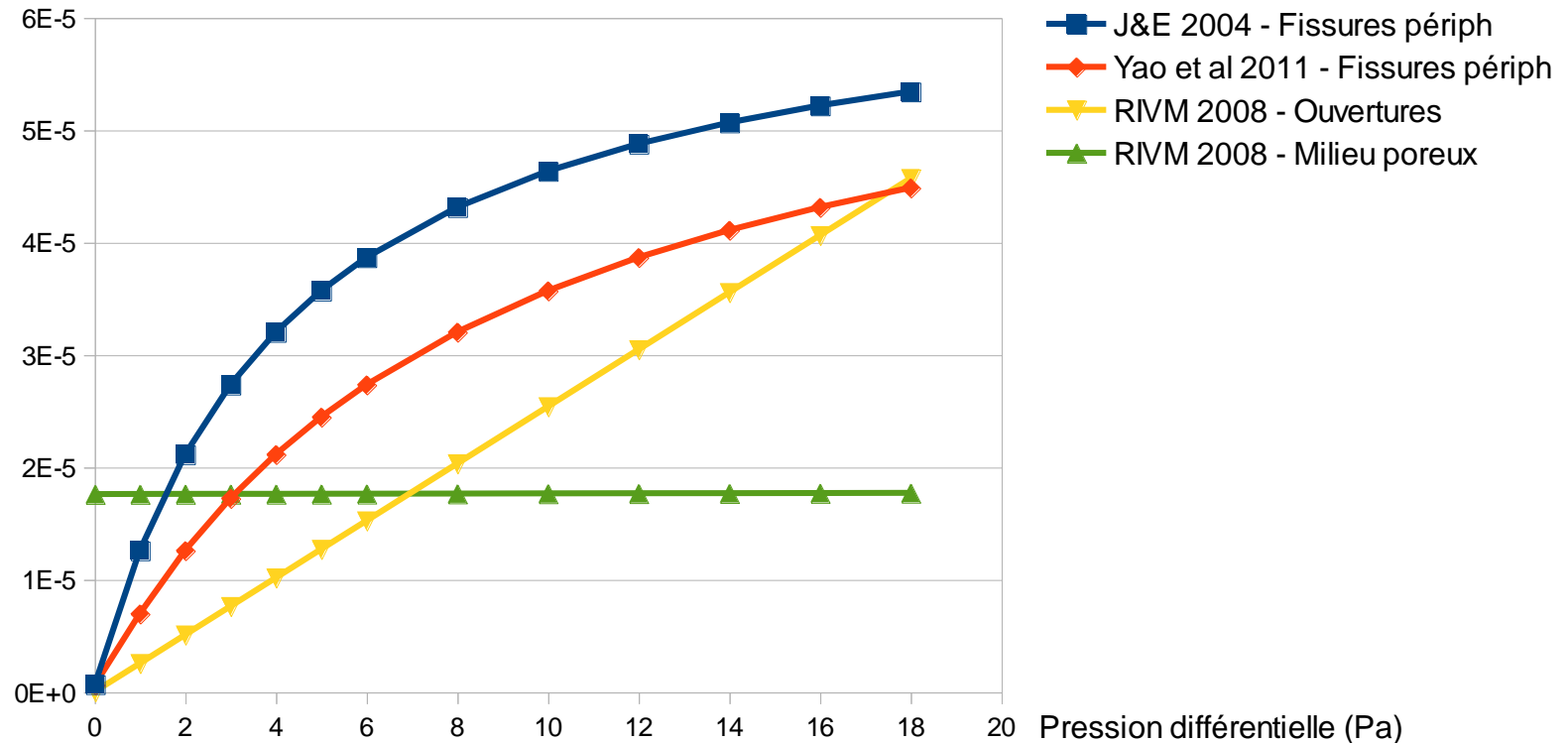
Hauteur : 1,5 m



Exemple d'étude de sensibilité – Site CityChlor

Influence de la pression différentielle

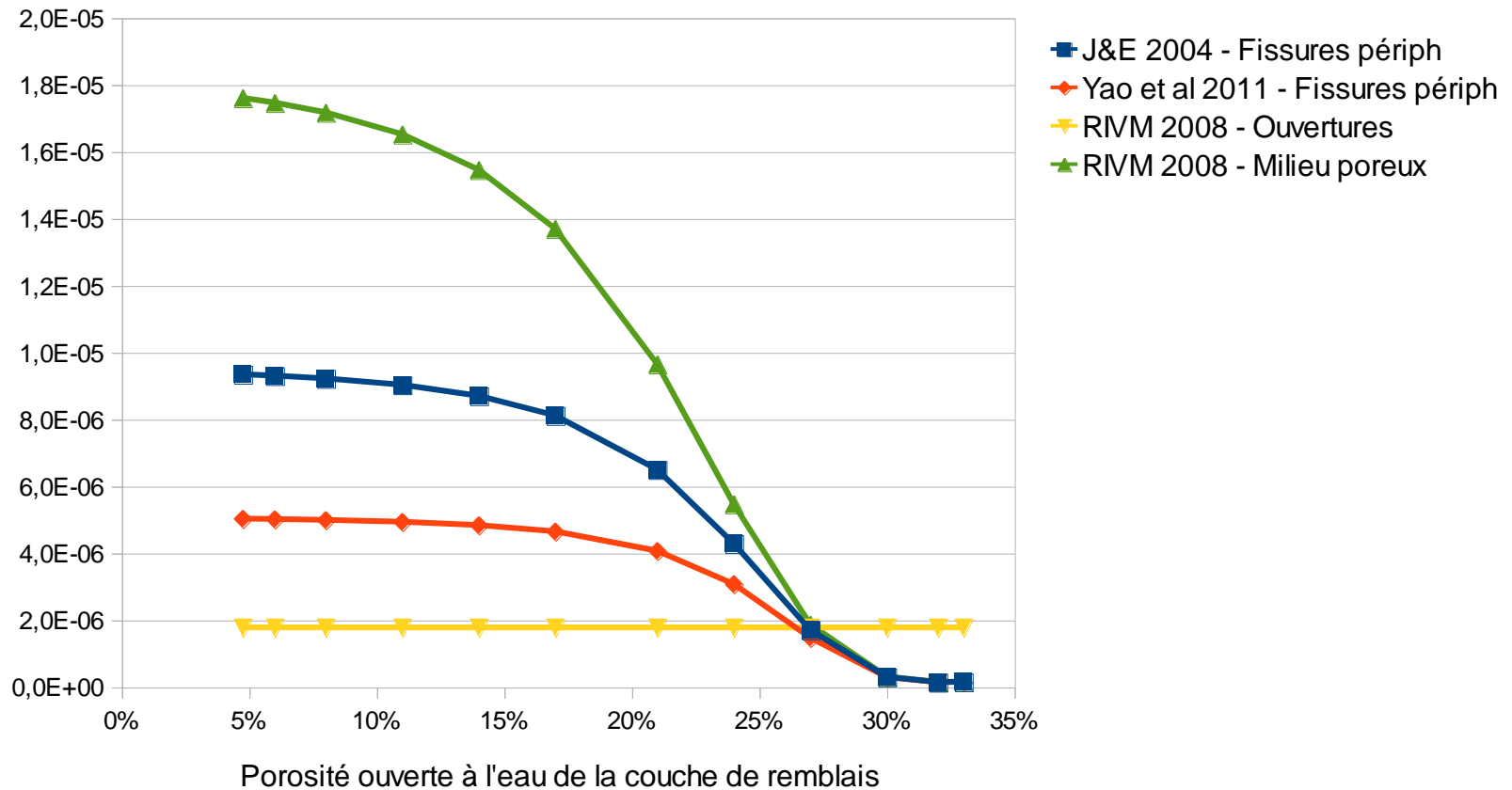
Ratio Cambiant / Csource



Exemple d'étude de sensibilité – Site CityChlor

Influence de la teneur en eau des remblais

Ratio Cambiant / Csource



Retours d'expérience sur deux sites ateliers

Conclusions

> Modélisation numérique

- Capacité à intégrer les hétérogénéités spatiales
 - Approche intéressante dans le cas d'un diagnostic très complet
 - Mais approche nécessitant de nombreux paramètres
 - Réflexion en amont sur les conditions aux limites
- Résultats sous forme de cartographie de concentrations
 - Information très complète sur la variabilité spatiale
 - Quelle(s) valeur(s) sélectionner dans un calcul de risque sanitaire ?

> Modélisation analytique

- Nécessité de simplifier la réalité à un transfert vertical à une dimension
- Réflexion en amont sur la représentation du terme source
 - Coller à la réalité des mesures
 - Éviter les a priori en termes de calculs des risques sanitaires
- Obtention d'un résultat unique : quelle est la représentativité de la concentration ainsi modélisée ?

Retours d'expérience sur deux sites ateliers

Perspectives

> Vers un « calage » des modèles de transferts ?

- Principe du calage
 - Extraction de concentrations dans les gaz du sol modélisées à des profondeurs intermédiaires
 - Comparaison avec les valeurs mesurées : intérêt de disposer de piézairs crépinés dans des horizons différents
 - Ajustement des paramètres les plus incertains
- Analogie avec la modélisation des transferts dans la nappe

> Quels efforts en termes de R&D ?

- Améliorer la caractérisation à l'échelle d'un site de la dalle béton
 - Passer des mesures sur carottes à la représentation d'une dalle ?
 - Identifier les voies de transfert préférentielles à travers une dalle
- Utiliser la modélisation numérique pour faire de la modélisation analytique en améliorant la représentativité des paramètres sélectionnés