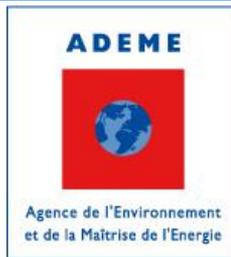


Journées techniques
28 et 29 mai 2013

Gestion des sites et sols
pollués



Les substances volatiles : caractérisation, modélisation des transferts, surveillance

Retour d'expérience des projets CITYCHLOR, FLUXOBAT et ATTENA

Modélisation numérique découplée milieu souterrain/air intérieur à l'échelle du site atelier FLUXOBAT

J. Chastanet (BURGEAP) et E. Powaga (CSTB)

CSTB
le futur en construction



BURGEAP

Modélisation des transferts : quand a-t-on besoin d'un modèle numérique dans l'air intérieur ou dans le milieu souterrain ?

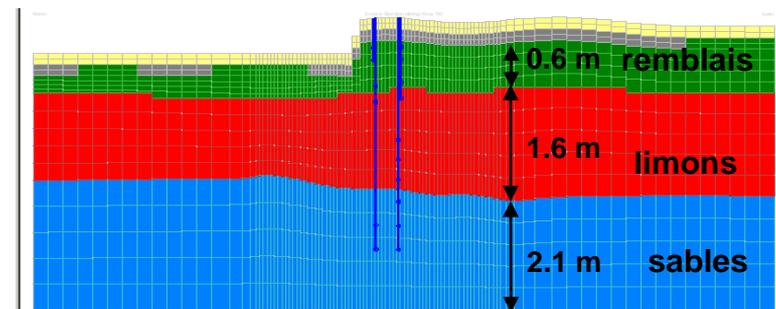
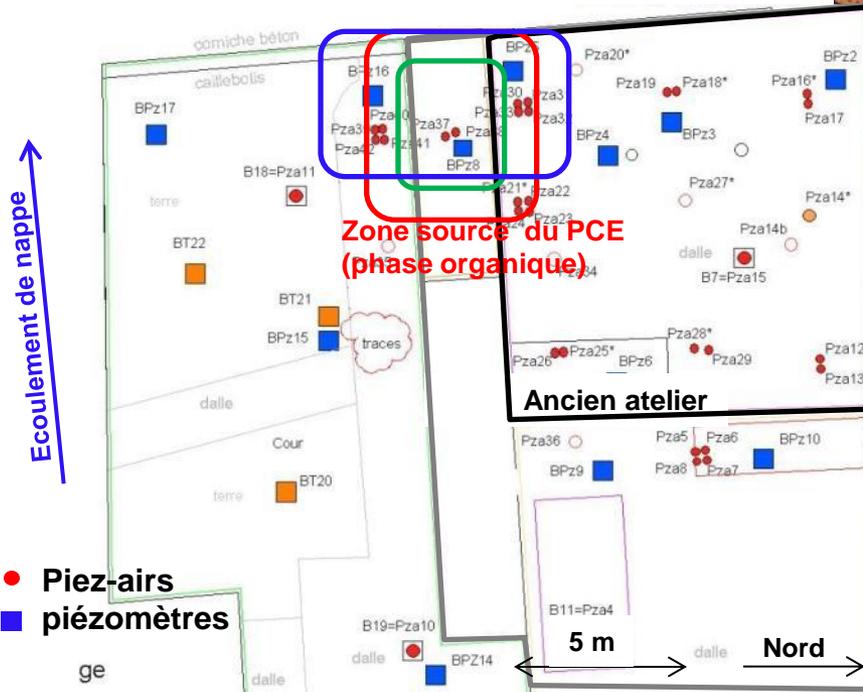
- > Pour répondre à l'un des trois objectifs généraux de modélisation...
 - Aider à la compréhension du fonctionnement du système
 - Evaluer les concentrations d'exposition (risques sanitaires)
 - Dimensionner les travaux

- > ... Et lorsque la modélisation analytique n'est pas suffisante :
 - ⇒ situations complexes / enjeux sanitaires et financiers notables

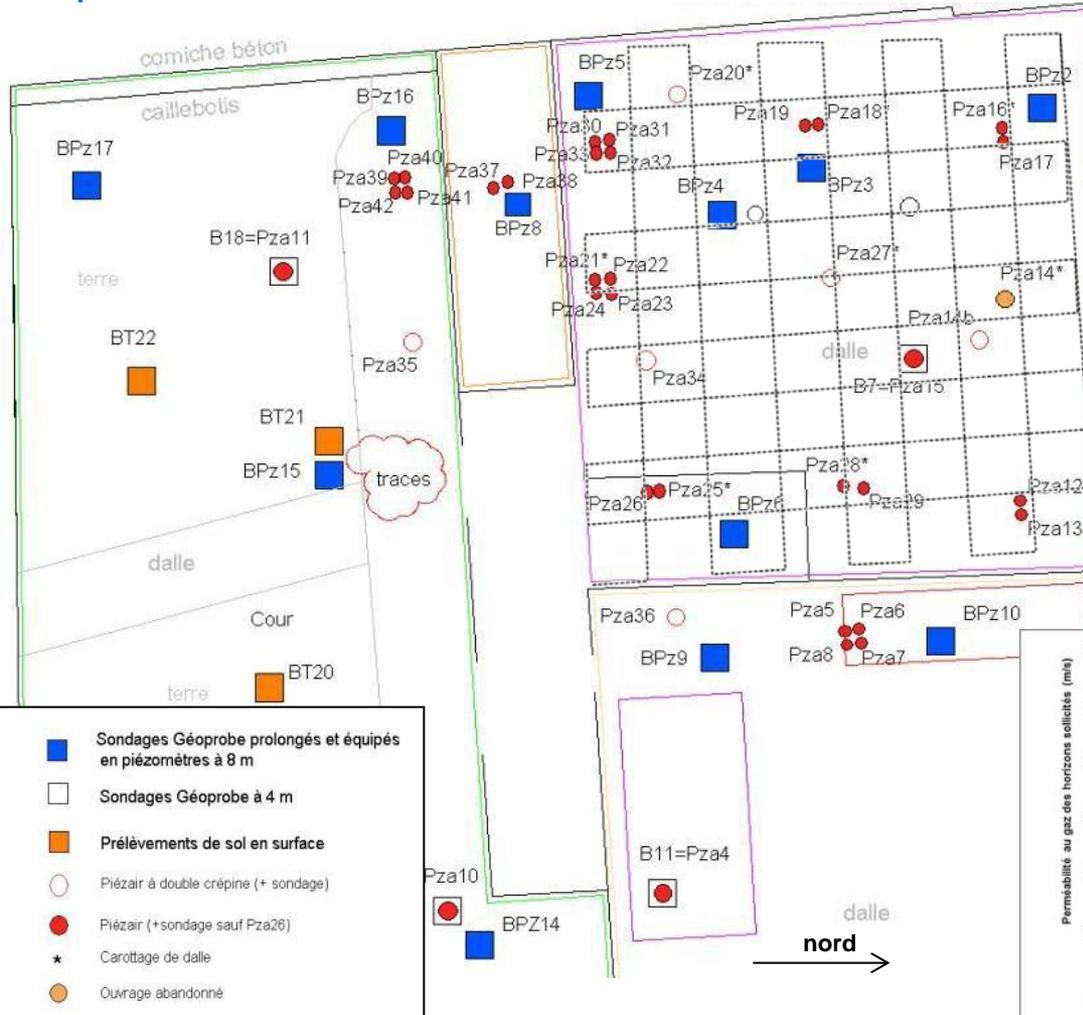
Modélisation des transferts : quand a-t-on besoin d'un modèle numérique ?

> Exemple du site atelier FLUXOBAT

- Ancien atelier de traitement de surface
- Milieu urbain avec habitations et garages
- Grand volume de bâti (840 m³)
- Hétérogénéités géologique et de pollution



> Les données disponibles :

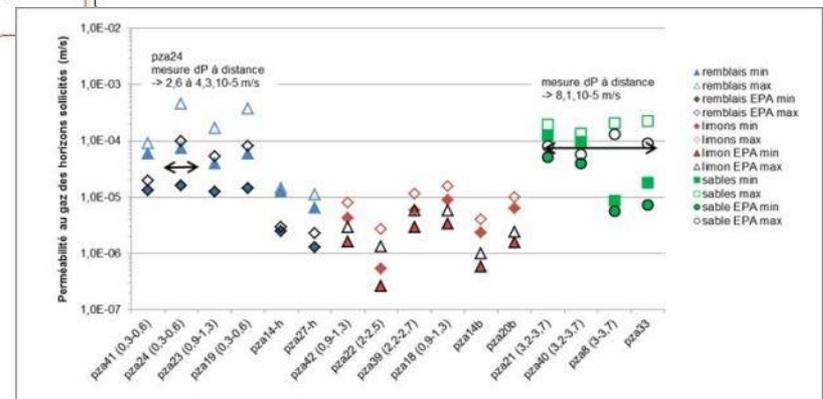


Mesures de dépression, concentration et flux

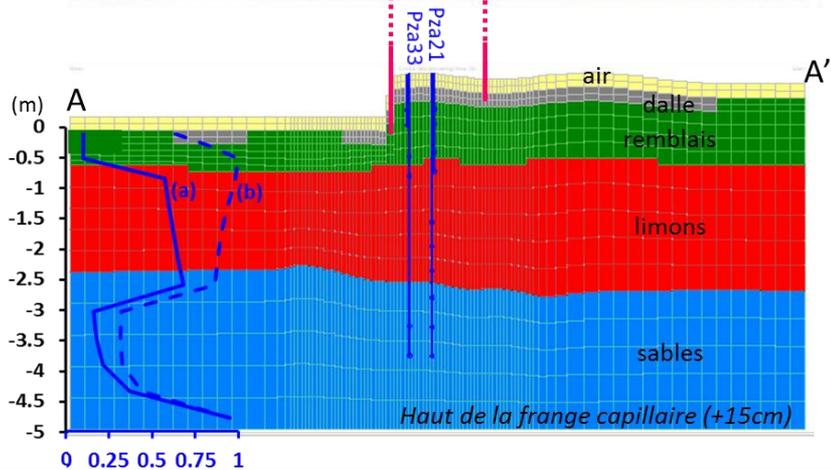
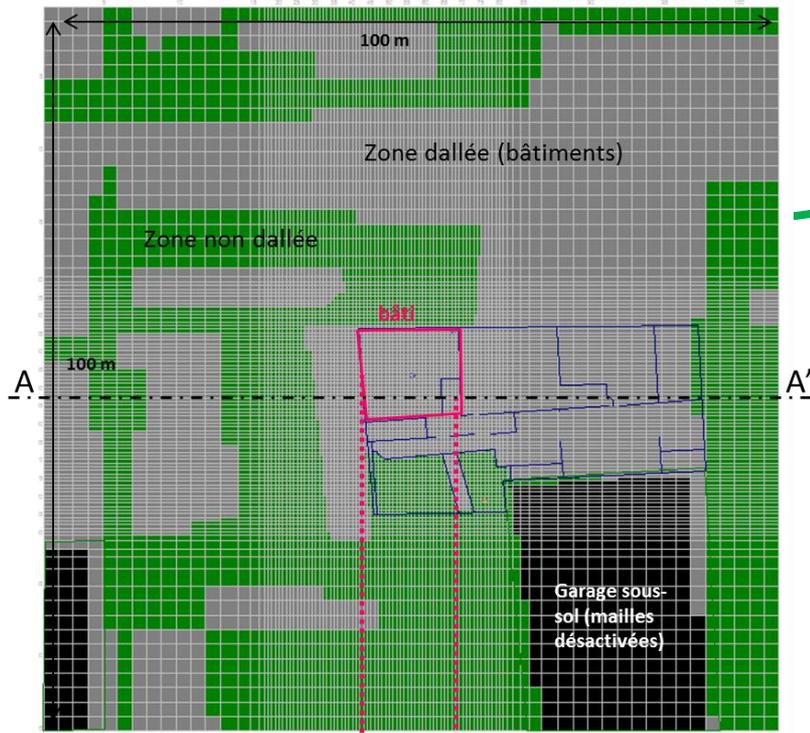
- Suivi de dépression (air intérieur, air extérieur, air des sols) (2 campagnes)
- C sol : ~30 sondages sol
- Cair : ~50 piézairs (3 campagnes)
- Ceau : ~ 20 piézomètres (3 campagnes)
- Flux intérieur : sur 72 mailles (2 campagnes)
- Flux extérieur : 10 localisations (3 campagnes)

Propriétés :

- Mesures sur carottes de sol : porosité, teneur en eau, foc, granulométrie, perméabilité
- Mesures in situ : perméabilité
- Dalle : perméabilité (sur carottes et in situ)

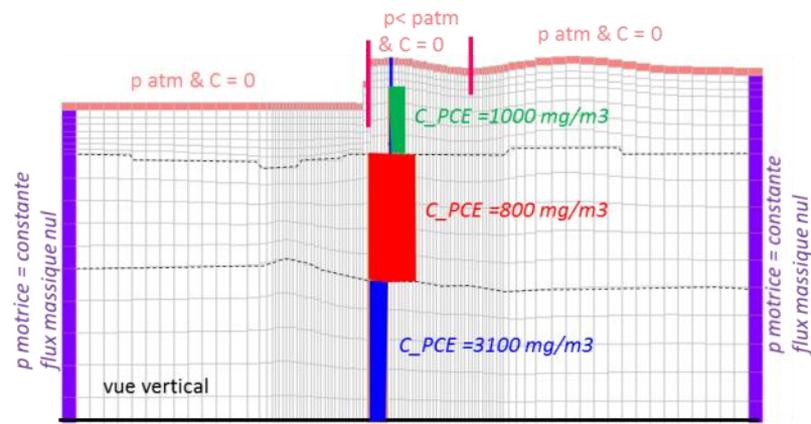
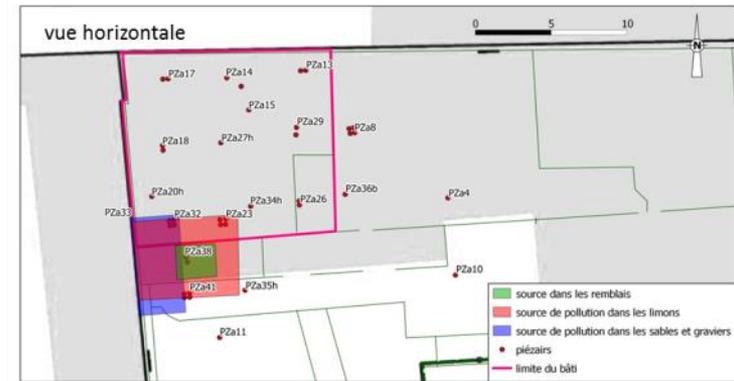
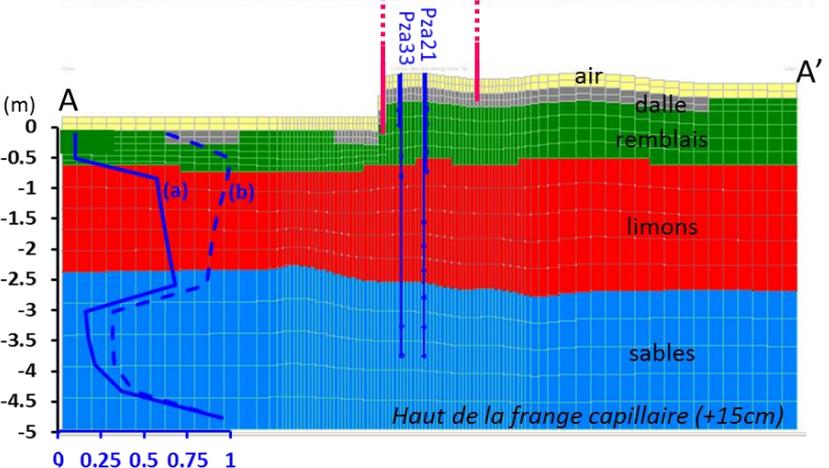
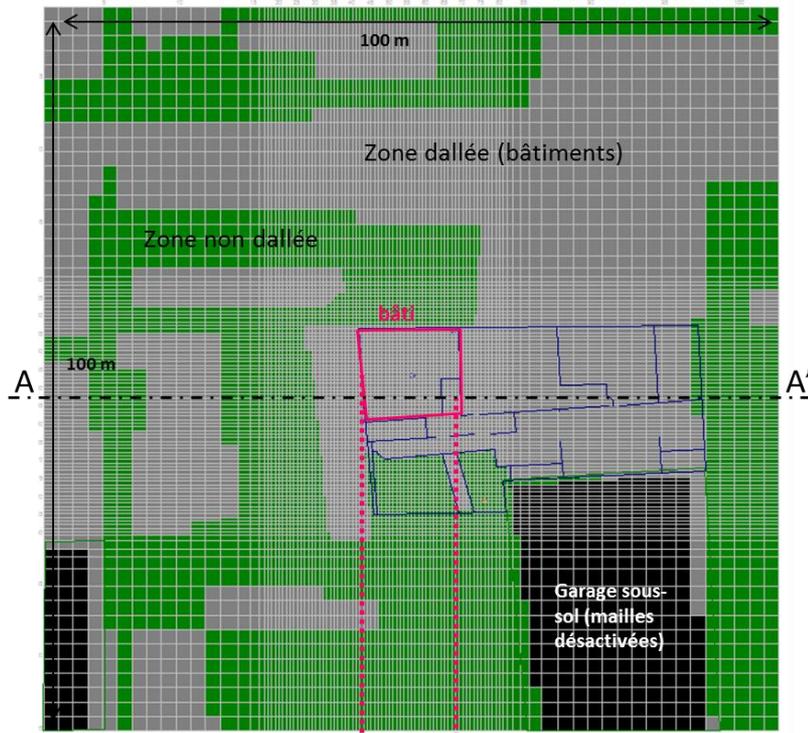


Construction du modèle (ZNS)



Logiciel : Modflow-Surfact

Construction du modèle (ZNS)



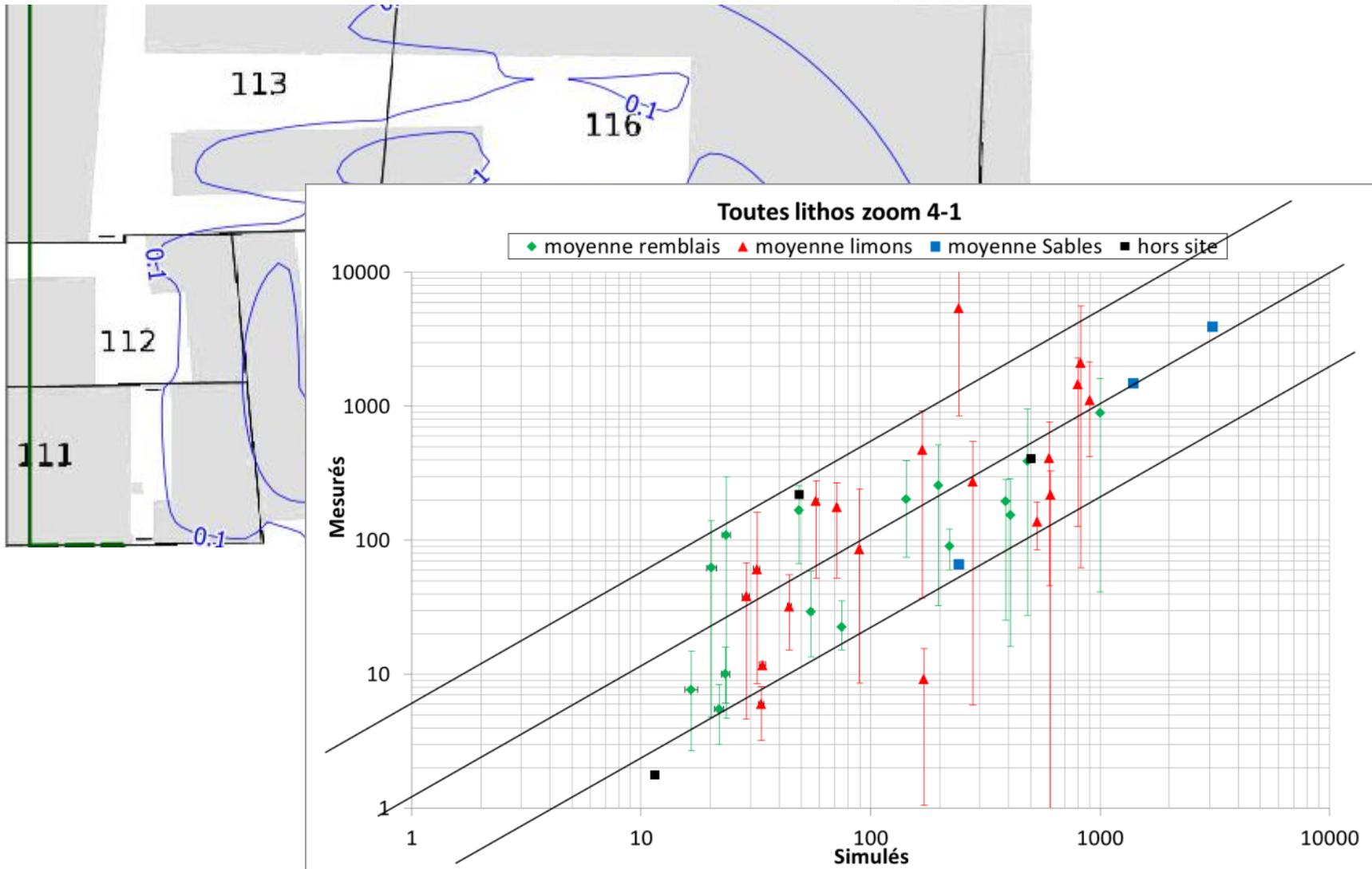
Flux nuls (pas d'entrée d'air et de polluants)

Lithologie	K (m/s)	Porosity (-)	Alpha* (1/m)	Beta* (-)	Swr (-)
REMBLAIS	2.00E-05	0.33	3.52	3.18	0.1
LIMONS	2.00E-06	0.34	1.11	1.47	0.12
SABLE - GRAVIERS	2.30E-05	0.24	3.52	3.18	0.14*
AIR	1.00E-01	1	3.52	3.52	0.01**
DALLES	1.00E-09	0.01***	3.52	3.18	0.1

* issu de la base de données de l'USDA
 ** profil le plus abrupte possible
 *** ajuster en fonction de la tortuosité recherchée (Ddiff / Deff = 500)

Résultats – confrontation aux mesures

> Concentration dans l'air des sols



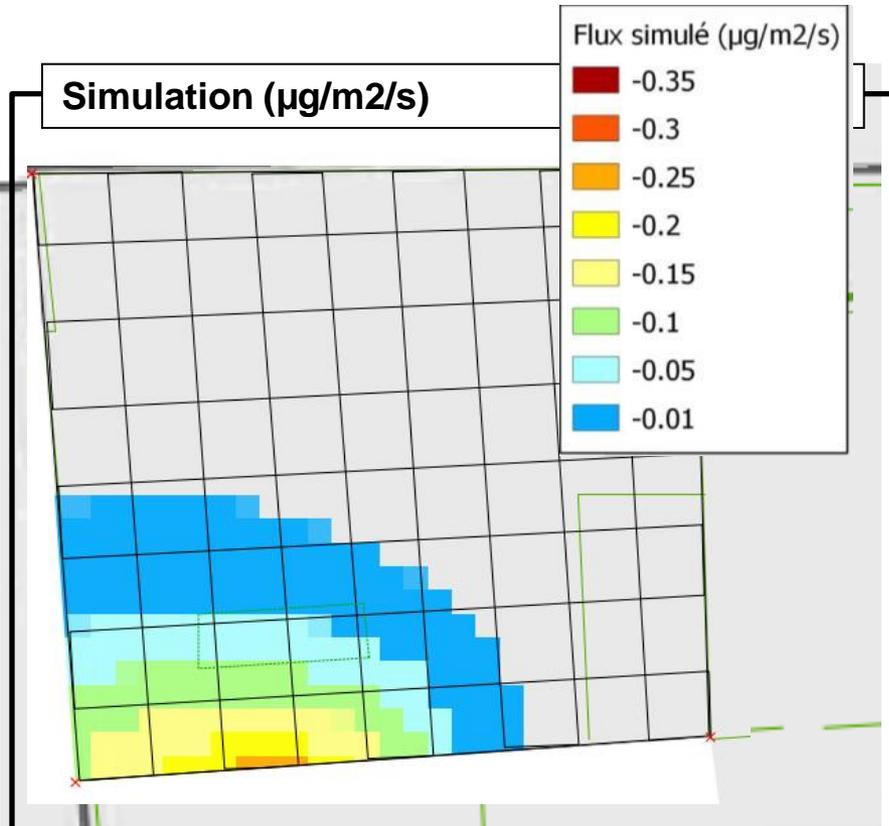
Résultats – confrontation aux mesures

> Flux entrant dans le bâti

Mesures ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$)

	< 0,06	< 0,05	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06
	< 0,06	< 0,06	< 0,05	< 0,06	< 0,05	0,14	< 0,05	< 0,06	< 0,05
	< 0,06	< 0,05	< 0,05	0,10	< 0,05	< 0,06	< 0,05	< 0,06	< 0,06
	< 0,06	< 0,06	< 0,05	< 0,05	< 0,06	< 0,06	< 0,05	< 0,06	< 0,06
	< 0,06	< 0,05	< 0,05	< 0,06	< 0,06	0,08	< 0,06	< 0,06	
extracteur	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,06	0,30	< 0,06	< 0,06	0,08	< 0,06
	< 0,05	0,25	0,36	0,20	< 0,06	< 0,06	< 0,05	< 0,06	< 0,05
	< 0,06	< 0,06	0,23	< 0,06	0,15	< 0,06	< 0,06	0,06	< 0,05
									porte

Simulation ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$)



	Simulé	Mesuré
Flux total (g/j)	0.67	0.39 - 1.03
Conc. Moy. Dans l'air intérieur ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	13	124

Tests de sensibilité et conclusion sur ce modèle ZNS

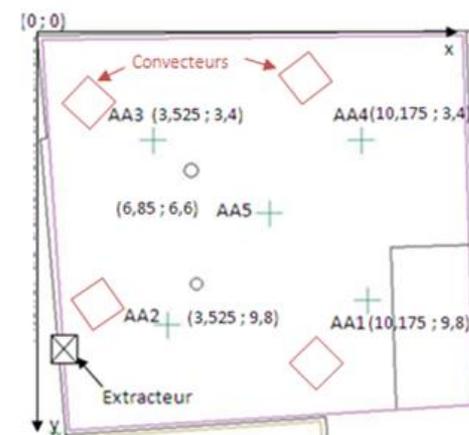
- > Influence de la teneur en eau
 - Profil sec vs. humide -> flux -20%
- > Influence des paramètres de la dalle
 - K_{dalle} de 10^{-16} à $7 \cdot 10^{-12} m^3$ -> flux de +42%
 - Diff / Deff de 500 à 50 -> flux +40%
- > Représentation de la dalle avec une fissure de retrait
 - C moy sous dalle + 30% / Flux entrant dans bâti +10%
- > Conclusion pour la modélisation du milieu souterrain
 - Bilan de masse respecté (flux total entrant dans le bâti conforme aux mesures)
 - Modèle suffisamment contraint -> flux estimé à $\pm 40\%$
 - Restitution des hétérogénéités de C air sol et des flux entrants dans le bâti

Plan de la présentation

- > Modélisation numérique des transferts depuis le milieu souterrain jusqu'à l'interface air/sol (BURGEAP)
- > Modélisation numérique de l'air intérieur d'un site atelier afin d'évaluer les hétérogénéités de température et de concentration de polluants dans le bâtiment en période hivernale et estivale (CSTB)

Contexte / Objectif de l'étude

Bâtiment : Site atelier



Dimensions du bâtiment

Longueur (m)	14
Largeur (m)	12
Hauteur moyenne (m)	5
Surface au sol (m ²)	168
Volume (m ³)	840

Matériels

- 4 convecteurs
- 1 extracteur d'air (1vol/h)
- 5 mats de mesures

➤ Evaluer qualitativement les hétérogénéités de température et de concentration de polluants dans le bâtiment en périodes hivernale et estivale et les comparer aux campagnes de mesures expérimentales

Données d'entrée et Conditions aux Limites

Modélisation numérique sous Fluent® maillage de 1,5 million de cellules

> Données d'entrée / Hypothèses

Air → gaz idéal incompressible

Modèle de turbulence

Prise en compte de la poussée d'Archimède (effet du tirage thermique)

Transfert thermique conjugué fluide/structure (convection / conduction)

Perméabilité de l'enveloppe → surface équivalente des défauts
d'étanchéité

> Conditions limites (CL)

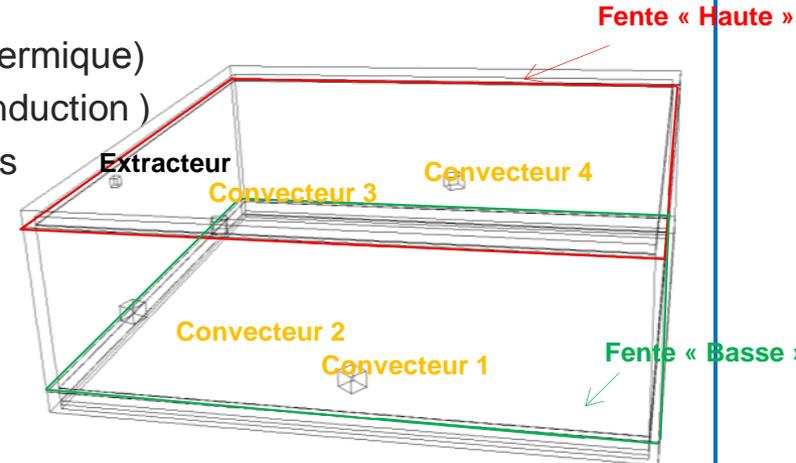
Période Hivernale (Mars) → calcul anisotherme (convecteurs en marche)

→ débit extrait continu par l'extracteur (1 vol/h)

→ débit sortant par la fente haute (1,5 vol/h) [tirage thermique]

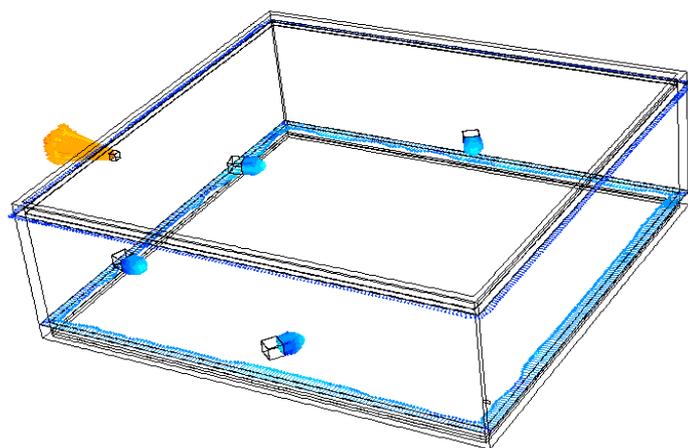
Période Estivale (Juin) → calcul isotherme

→ débit extrait continu par l'extracteur (1 vol/h)

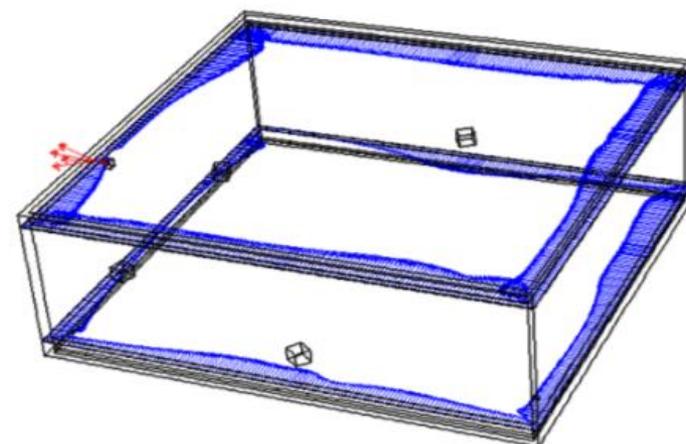
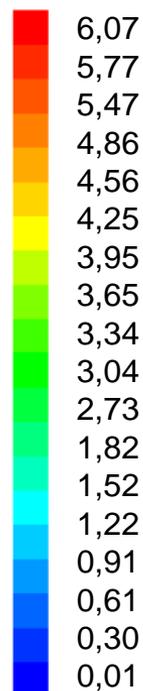


> Simulation de mars

> Simulation de juin



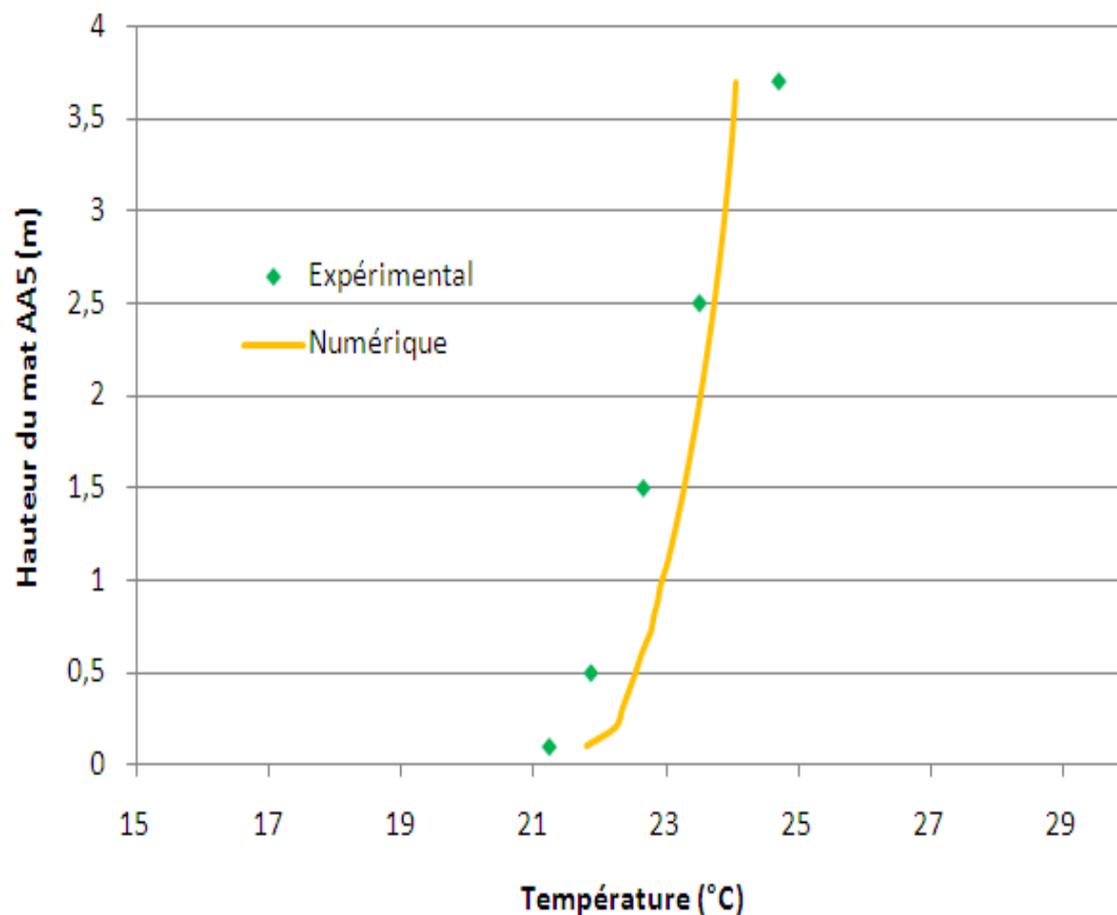
Vitesse
(m/s)



Situation anisotherme
Phénomène de tirage thermique
Renouvellement d'air de 2,5 vol/h

Situation isothermique
Pas de phénomène de tirage thermique
Renouvellement d'air de 1 vol/h

Vérification du résultat thermique du mois de Mars



Bon accord global →
CL thermiques a priori
bien posées

ΔT stratification
expérimentale = 3,45 °C
>
 ΔT stratification simulée
= 2,25 °C

Influence des ouvertures
singulières
→ exacerbe brassage
par rapport à la réalité

Conditions limites de flux de polluants

> Mesures expérimentales de flux de polluant ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$)

> Conditions limites de flux de polluant ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{s}$)

SPEL2 – mars 2012 – fosse comblée / avec convecteurs

N fi	< 0,08	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,04	< 0,10
	< 0,14	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,10	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,06
	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12
	< 0,12	< 0,08	< 0,12	< 0,12	0,23	< 0,12	< 0,08	< 0,12	< 0,12
	< 0,08	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,10		
extracteur	< 0,02	< 0,12	< 0,12	< 0,12	0,73	< 0,12	< 0,14	< 0,12	< 0,12
	< 0,12	2,08	0,44	1,63	< 0,12	< 0,12	< 0,10	< 0,12	< 0,12
	< 0,12	< 0,04	0,39	< 0,12	< 0,12	< 0,06	< 0,14	< 0,12	< 0,06
									porte

Cas Max
← mesure → mesure

Cas Min
← mesure → 0

0,08	0,12	0,12	0,10
0,12	0,12	0,11	0,11
0,12	0,12	0,12	0,12
0,09	0,13	0,23	0,09
0,03	0,26	0,68	0,13
0,12	0,86	0,12	0,10
0,12	0,17	0,12	0,06

0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0,02	0,17	0
0	0,17	0,66	0,01
0	0,83	0	0
0	0,11	0	0

Contraintes de maillage

Lissage des hétérogénéités spatiales des flux de polluant

Somme flux de polluants cas Max
2 X plus grand
somme flux de polluants cas Min

Cartographie du sol du site atelier

Vérification de la conservation de masse de polluant

> Mars

L'air du bâtiment sort par l'extracteur et la fente haute

$$q_p = C_{Fh} Q_{Fh} + C_e Q_e \quad \text{avec} \quad \begin{cases} q_p : \text{débit massique total de polluant imposé au sol [kg/s]} \\ C_{Fh} : \text{concentration de polluant en fente haute [kg/m}^3] \\ Q_{Fh} : \text{débit volumique passant à travers la fente haute [m}^3/\text{s]} \\ C_e : \text{concentration de polluant en sortie de l'extracteur [kg/m}^3] \\ Q_e : \text{débit volumique passant à travers l'extracteur [m}^3/\text{s]} \end{cases} \quad q_p = C_e Q_e$$

> Juin

L'air du bâtiment sort uniquement par l'extracteur

$$\text{avec} \quad \begin{cases} q_p : \text{débit massique total de polluant imposé au sol [kg/s]} \\ C_e : \text{concentration de polluant en sortie de l'extracteur [kg/m}^3] \\ Q_e : \text{débit volumique passant à travers l'extracteur [m}^3/\text{s]} \end{cases}$$

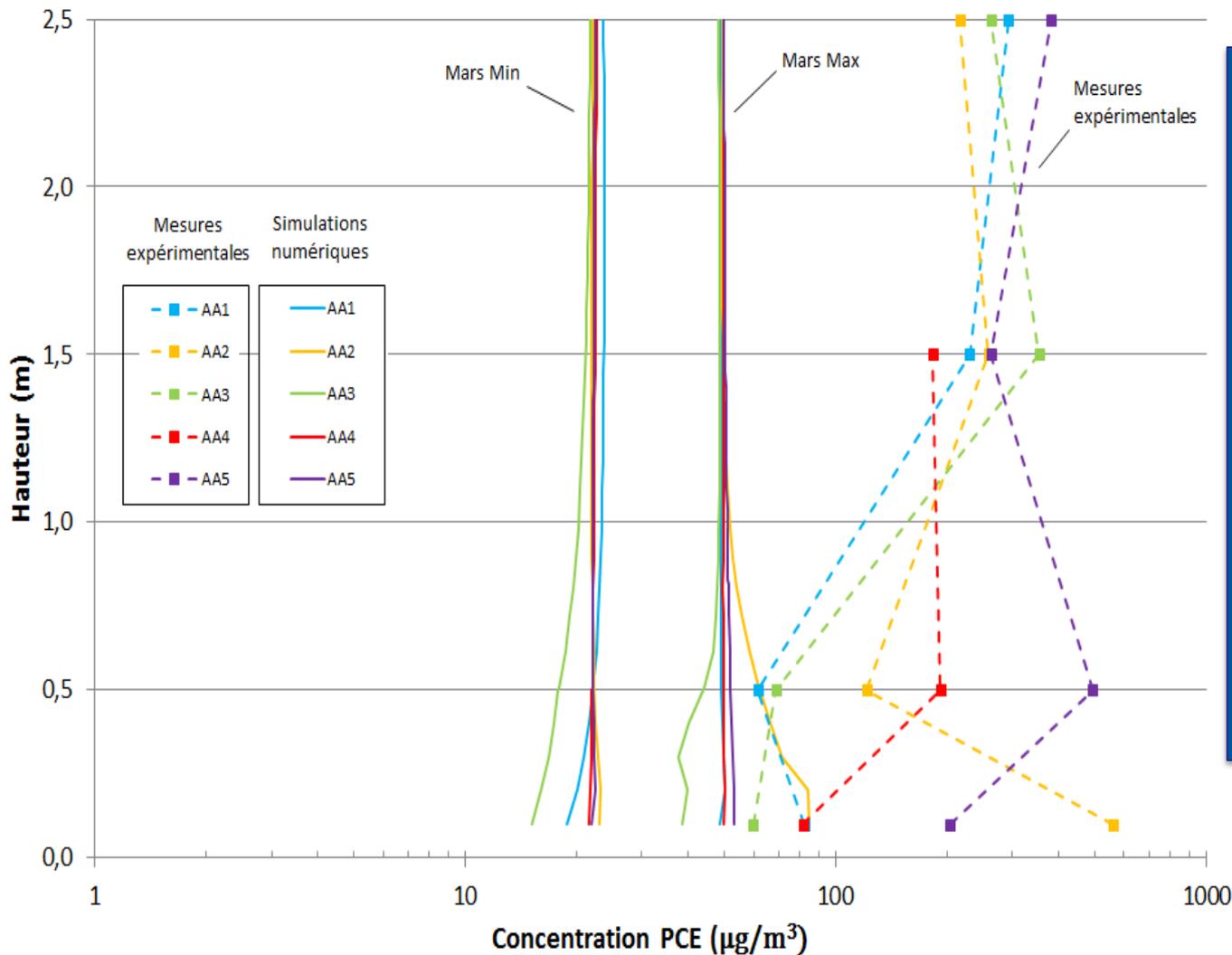
Simulation	q_p (kg/s)	$C_{Fh} Q_{Fh} + C_e Q_e$ (kg/s)
Mars Max	$29,4 \cdot 10^{-9}$	$29,6 \cdot 10^{-9}$
Mars Min	$13,1 \cdot 10^{-9}$	$13,0 \cdot 10^{-9}$

Simulation	q_p (kg/s)	$C_e Q_e$ (kg/s)
Juin Max	$13,5 \cdot 10^{-9}$	$13,3 \cdot 10^{-9}$
Juin Min	$5,7 \cdot 10^{-9}$	$5,5 \cdot 10^{-9}$

Bilan de masse respecté pour le polluant

→ Mise en œuvre du calcul du transport de polluant cohérent

Résultats et Analyse – Comparaison avec les données expérimentales en Mars

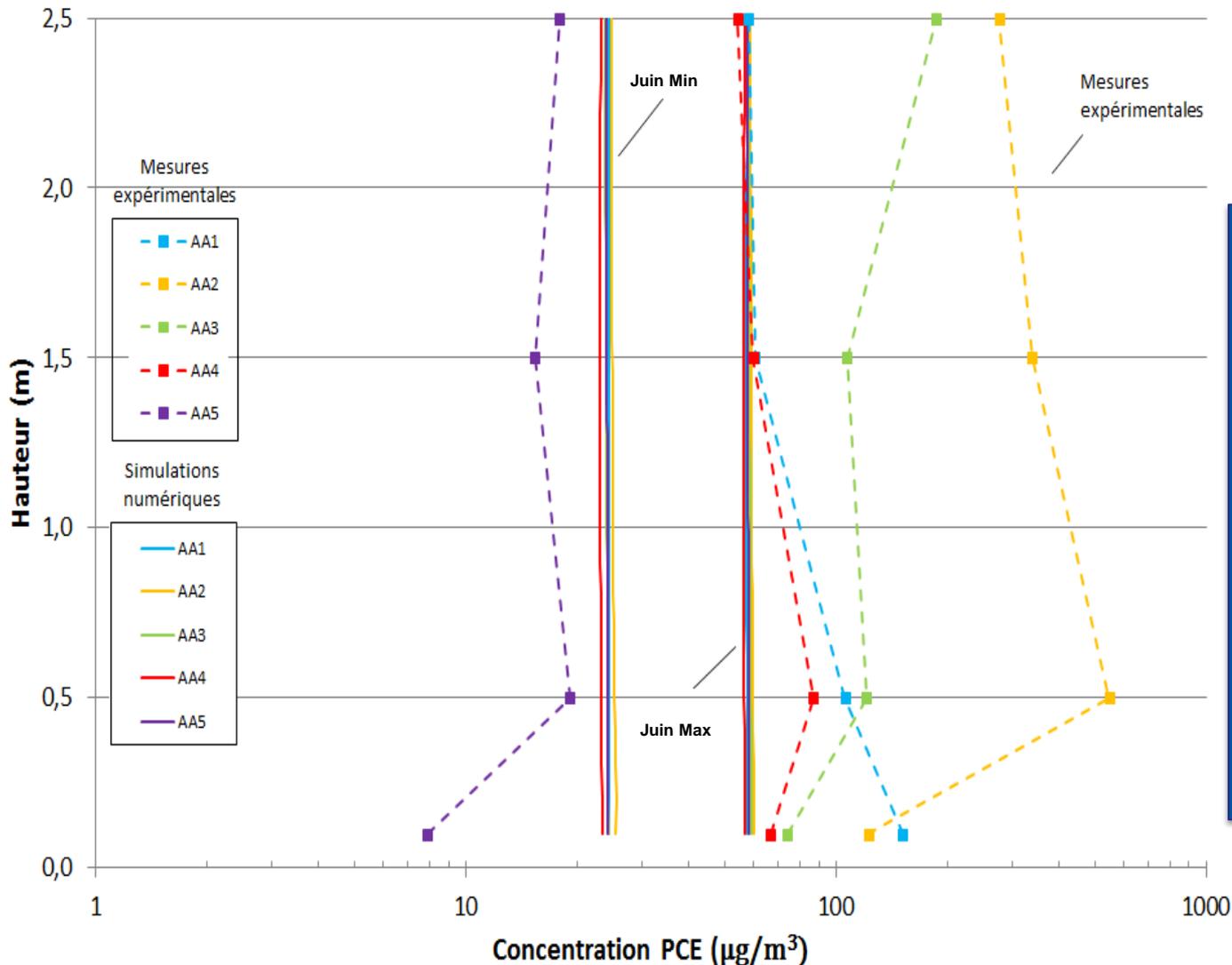


Rapport 10 entre valeurs simulées et expérimentales
→ données d'entrée des flux de polluants ?

Stratification + marquée pour les mesures que pour les simulations
→ Hypothèse de répartition de la perméabilité ?
→ Lissage des hétérogénéités spatiales des flux de polluant ?

Homogénéisation en partie haute

Résultats et Analyse – Comparaison avec les données expérimentales en Juin



Mêmes observations que pour Mars

Hétérogénéité spatiale quasi-inexistante pour les simulations

- Dépression faible du bâtiment
- Transport diffusif prédominant en Juin

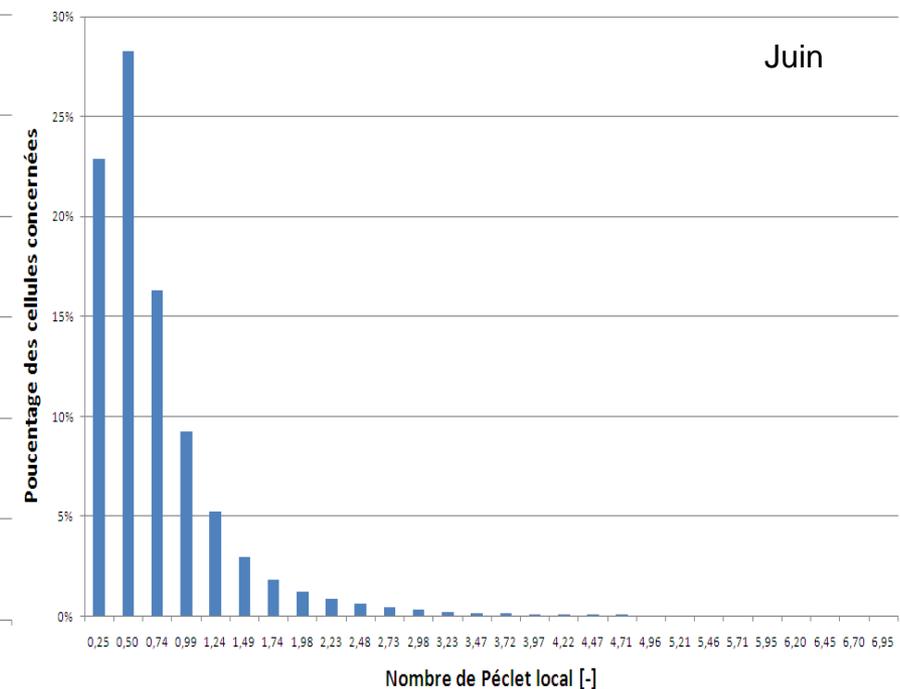
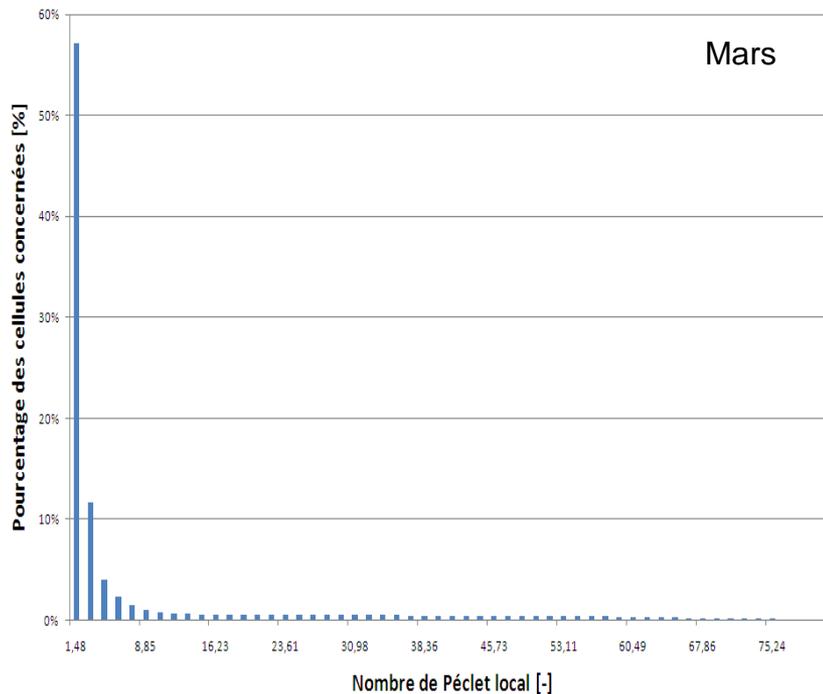
Analyse dimensionnelle – Nombre de Péclet

compare le transfert convectif au transfert diffusif
Si $Pe \ll 1$ transfert par diffusion domine
Si $Pe \gg 1$ transfert par convection domine

$$Pe_L = Re_L \times S_c$$

avec

- Pe_L : nombre de Péclet local [-]
- Re_L : nombre de Reynolds local [-]
- S_c : nombre de Schmidt [-]



Phénomène de convection prédominant en Mars
Phénomène de diffusion prédominant en Juin

Conclusions sur les modélisations numériques

> Intérêts des modèles numériques

- physique plus riche, variations spatio-temporelles des paramètres et variables
- Un modèle permet de répondre à plusieurs objectifs
 - aider à la compréhension
 - évaluer les concentrations d'exposition (risques sanitaires)
 - simulation prédictive (bâtiment à construire)
 - dimensionner les travaux
- Pour évaluer les impacts hors site

> Pré-requis & contraintes

- Temps de réalisation (qq semaines)
- Bonne connaissance du site
- Bon niveau d'expertise (modélisation et interprétation des résultats)