





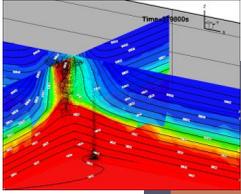
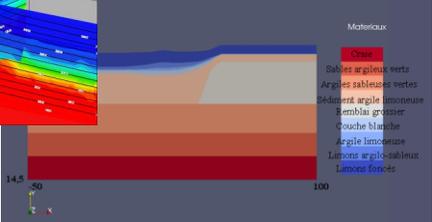
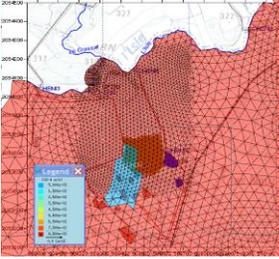








## Modélisation des écoulements et du transport des éléments traces en zone non saturée

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

1

### Modélisation adaptée au contexte / données disponibles

- Passage zone saturée zone non saturée difficultés et limites : Exemple du site 1 (Sandra Béranger, BRGM)
- Simulations transport réactif de métaux lourds en ZNS : Exemple du Site 2 (Catherine Beaucaire et Ingmar Pointeau, CEA)
- Modélisation d'un essai de traçage : Site 4 (Fabien Decung)
- Présentation du guide (Geoffrey Boissard, BRGM)

17/03/2010



2



Modélisation des écoulements et du transport des éléments traces en zone non-saturée

## Passage zone saturée – zone non-saturée : difficultés et limites

### Site 1

BRGM : Sandra Béranger

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012 3

## Objectif de la présentation

**Au travers des étapes de modélisation**

- Conceptualisation du modèle
- Paramètres d'entrée
- Conditions aux limites
- Calage
- Etude de sensibilité

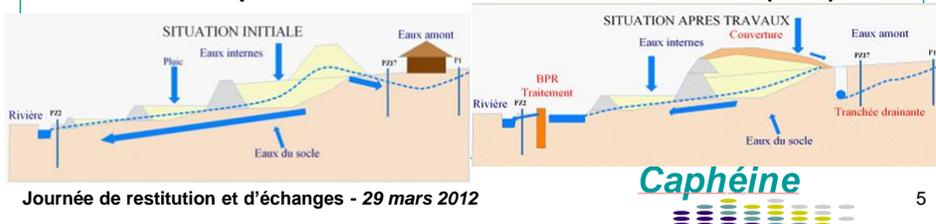
**Illustrer, en partant d'un exemple, les atouts et difficultés rencontrées lors du passage d'un modèle en mode saturé (MS) à un modèle en mode non-saturé (MNS)**

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012 4



## Contexte de l'exemple

- **Contexte minier**
- **Problématique Arsenic – Manganèse**
  - Impact sur les sols,
  - Impact sur les eaux de surface,
  - Impact sur les eaux souterraines
- **Travaux de réhabilitation nécessaires**
  - Mise en place d'un confinement
  - Mise en place d'une tranchée drainante
  - Mise en place d'un bassin d'aération
  - Mise en place de Barrières Perméables Réactives (BPR)



## Objectif de la modélisation

- **Estimer les flux d'eaux**
  - Atteignant la nappe ZNS
  - Au sein de la nappe,
  - Parvenant à la rivière.

Dans l'objectif du dimensionnement des travaux de réhabilitation puis de l'optimisation du système (BPR)
- **Evaluer les temps de transfert depuis la surface jusqu'à la nappe ZNS**
- *Note : Couplage transport / géochimie non abordé dans ce contexte géologique et hydrogéologique complexe*

## Conceptualisation du modèle (1/3)

	Mode saturé	Mode non-saturé
Couches	1 couche = 1 entité hydrogéologique	1 entité hydrogéologique = 1 couche en ZS 1 entité hydrogéologique = plusieurs couches en ZNS
Toit et mur des couches	Correspond généralement à une limite de faciès	Évalué en fonction du changement de saturation d'un horizon au suivant
Domaine d'étude	Correspond généralement à un ensemble cohérent d'un point de vue hydrogéologique et hydraulique	Peut-être réduit pour répondre à des contraintes de temps de calcul, de caractérisation des paramètres, de convergence
Maillage		Possiblement réduit pour répondre à des problèmes de convergence (saut de saturation variable)

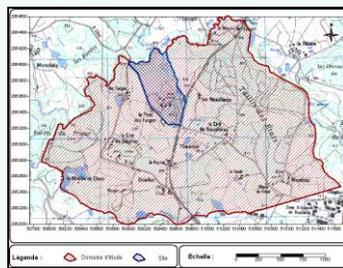
Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

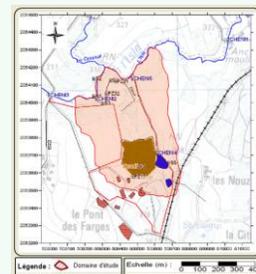
7

## Conceptualisation du modèle (2/3)

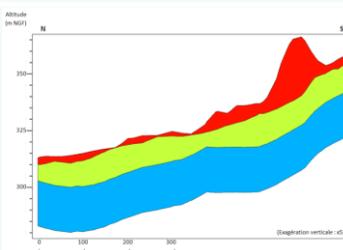
Mode saturé



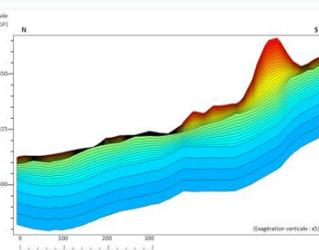
Mode non-saturé



Mode saturé



Mode non-saturé



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

8

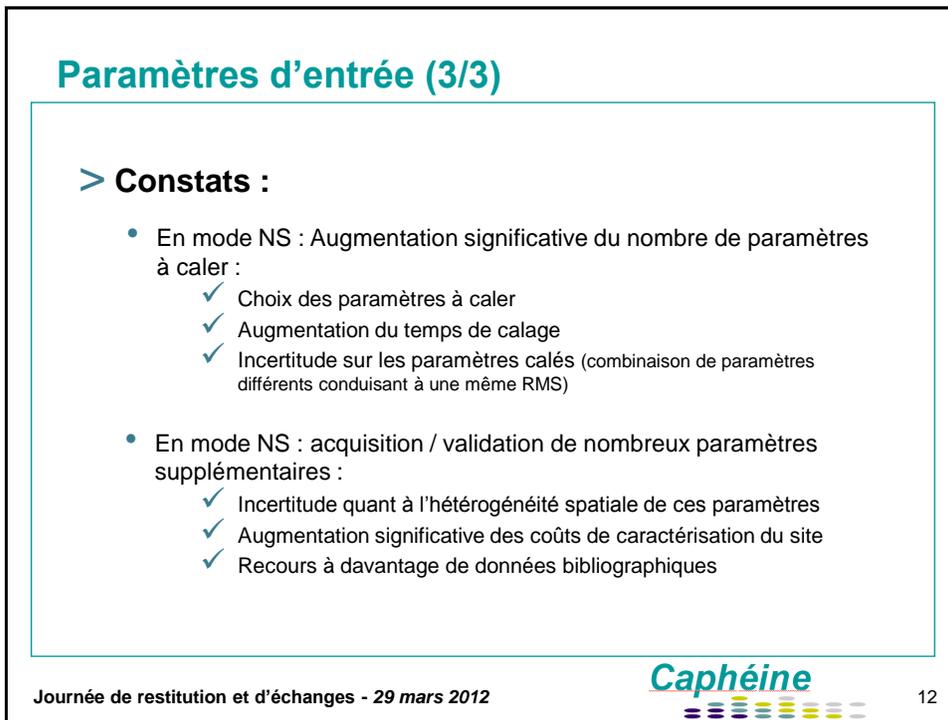
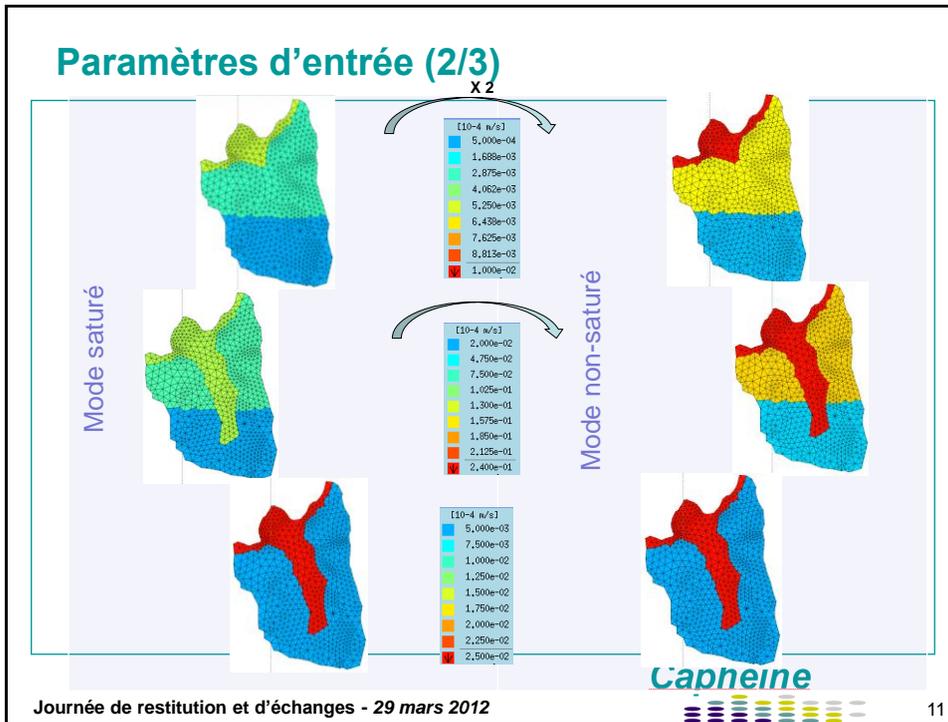
## Conceptualisation du modèle (3/3)

### > Constats :

- En mode NS : Augmentation significative du nombre de couches pour obtenir des résultats satisfaisants,
- En mode NS : Potentielle diminution de la taille des mailles lorsque la saturation d'une maille à une autre varie significativement
- En mode NS : Epaisseur d'une même couche parfois très variable, fonction de la géologie / hydrogéologie du site
  - Modèle ne permettant pas toujours des interruptions de couches
  - Multiplication du nombre de couches pour répondre aux variations de saturations avec la profondeur
- En mode NS : domaine d'étude parfois réduit pour répondre à des problèmes :
  - de paramètres non caractérisés,
  - de convergence,
  - de temps de calcul.

## Paramètres d'entrée (1/3)

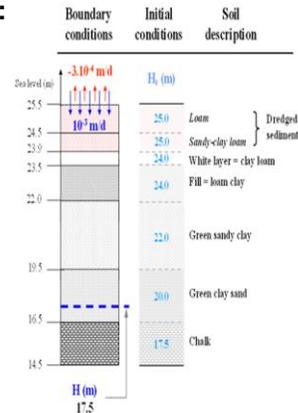
	Mode saturé	Mode non-saturé
Recharge	Évaluée en fonction des pluies et ETP	Évaluée en fonction des pluies et ETP
Conductivité hydraulique	Évaluer à l'aide de : <ul style="list-style-type: none"> <li>• bibliographie</li> <li>• mesures labo / in-situ</li> <li>• calage du modèle</li> </ul>	
Porosité	Non utile si régime permanent	Appartient à la loi de rétention et perméabilité
		Évaluer à l'aide de : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bibliographie</li> <li>• Mesures in-situ</li> <li>• Calage</li> </ul>
Loi de rétention – loi de perméabilité		Choix d'une loi : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Van-Genuchten-Mualem</li> <li>• Haverkamp</li> <li>• Brooks and Corey</li> <li>• Gartner-Philip</li> <li>• Etc.</li> </ul>
		Renseignement des paramètres correspondant à l'aide de : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bibliographie</li> <li>• Expérimentation</li> <li>• Calage</li> </ul>



## Utilisation de données biblio – terrain – labo ? (1/2)

Exemple du cas d'étude décrit dans Béranger et al. (2006) et Picot et al. (2010)

- Conditions initiales et aux limites identiques
- Paramètres hydrogéologiques provenant :
  - Acquisition bibliographique
  - Acquisition en laboratoire
  - Acquisition in-situ



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

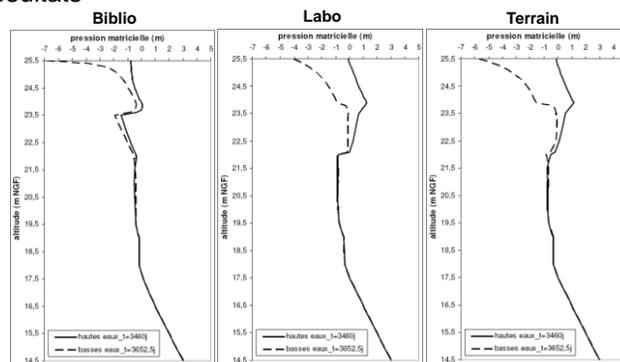
Caphéine

13

## Utilisation de données biblio – terrain – labo ? (2/2)

Exemple du cas d'étude décrit dans Béranger et al. (2006) et Picot et al. (2010)

- Résultats



- Paramètres acquis au labo et sur le terrain permettent de reconstituer les ordres de grandeur observés sur le terrain
- **Combinaison mesure de terrain + caractérisation labo** reconstitue le mieux les processus observés

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

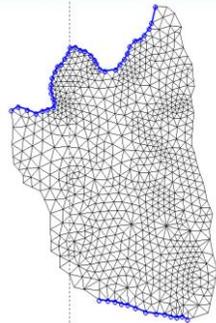
Caphéine

14

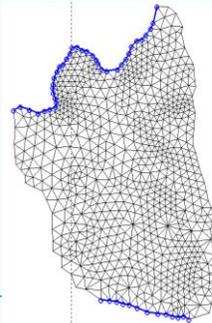
## Conditions aux limites (1/2)

	Mode saturé	Mode non-saturé
Prélèvements d'eau	X	X
Drains	X	X
Rivières	X	X
Lacs	X	X
Saturation		X

Mode saturé



Mode non-saturé



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

15

## Conditions aux limites (2/2)

### > Constats :

- Pas de grandes modifications entre le mode saturé et le mode non-saturé

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

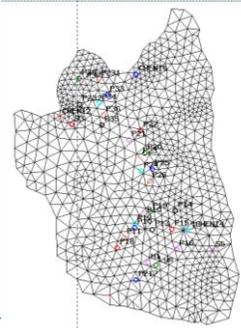
Caphéine

16

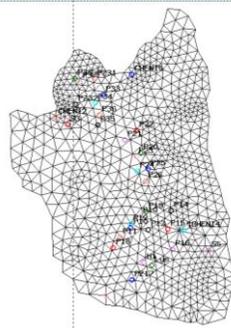
### Calage (1/3)

	Mode saturé	Mode non-saturé
Points d'eau	X	X
Saturation à différentes profondeurs		X
Débitmètres	X	X
Interactions nappe / rivière	X	X

Mode saturé



Mode non-saturé

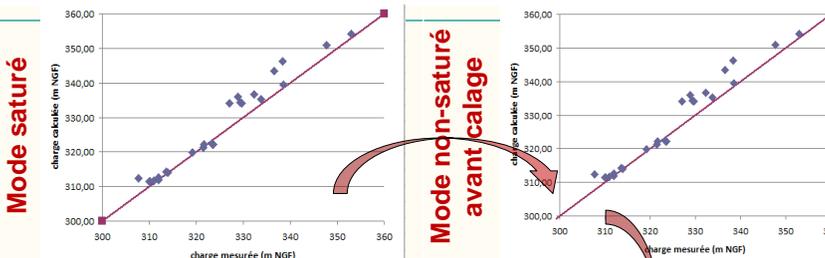


Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012



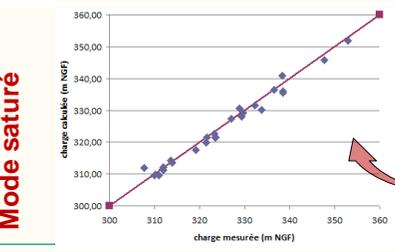
17

### Calage (2/3)



**Mode saturé**  
 RMS = 7.5 %  
 Moyenne  $h_{obs} - h_{calc} = 1.96$  m

**Mode non-saturé avant calage**  
 RMS = 5.8 %  
 Moyenne  $h_{obs} - h_{calc} = 1.66$  m



**Mode saturé**  
 RMS = 3.9  
 Moyenne  $h_{obs} - h_{calc} = -0.66$  m

**Mode non-saturé après calage**  
 RMS = 3.5 %  
 Moyenne  $h_{obs} - h_{calc} = 0.16$  m

18

## Calage (3/3)

### > Constats :

- Calage d'autant plus précis que le nombre de points de calage est important et équitablement réparti sur le domaine,
- En mode non-saturé : précision dans le calage des paramètres associés à la disponibilité de la saturation à différentes profondeurs,
- En mode non-saturé : nombre de couches et de paramètres à caler augmentant significativement donc :
  - ✓ augmentation significative du temps de calage,
  - ✓ partir d'un bon calage en mode saturé pour réduire ce temps
- De façon générale : amélioration de la précision du modèle dans son ensemble grâce au passage en mode non-saturé

## Etude de sensibilité (1/2)

	Mode saturé	Mode non-saturé
Conductivité hydraulique	X	X
Recharge		X
Maillage	X	X
Conditions aux limites	X	X
Paramètres loi de rétention + loi de perméabilité		X

## Etude de sensibilité (2/2)

### > Constats :

- Augmentation du nombre de simulations à faire pour l'étude de sensibilité associée à une augmentation du nombre de paramètres
- Sensibilité des paramètres communs ZS-ZNS relativement stable : recharge légèrement plus sensible
- **Sensibilité des paramètres spécifiques à la ZNS**

## Conclusion : avantages et limites d'un modèle ZNS

- **Augmentation significative du nombre de paramètres à caler**
  - Acquisition de ces paramètres sur le terrain / en labo
    - ✓ Augmentation des coûts de caractérisation du site
  - A défaut, biblio,
  - Incertitudes associées à ces paramètres / à leur distribution spatiale
    - ✓ Augmentation des risques de problèmes de convergence
    - ✓ Augmentation du temps de calage
    - ✓ Augmentation des coûts de modélisation
  - Réduction de la taille du domaine d'étude – Justification hydrogéologique et hydraulique
- **Augmentation du temps de calcul**
  - Meilleure estimation des paramètres initiaux – utilisation des résultats du modèle en mode saturé
  - Réduction de la taille du domaine d'étude

## Conclusion : avantages et limites d'un modèle ZNS

- **En contre-partie :**
  - Amélioration de la connaissance du site
  - Evaluation des temps de transfert surface – nappe
  - Evaluation des flux d'eaux en ZNS
  - Amélioration des résultats de calage

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**  


23

**Caphéine**  


**INERIS**  
  
 EDF  
 CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE

  
 Mines  
 de Douai  
 LA RÉGION



  
 brgm  
 Sciences pour une Terre durable

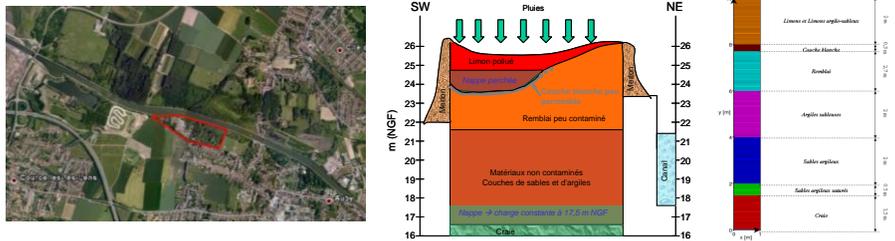
  
 ADEME

## Simulations transport réactif de métaux lourds en ZNS : Site 2 (Auby)

CEA Saclay (L3MR) : Catherine Beaucaire, Nathalie Coreau  
 CEA Cadarache (LMTE) : Xavier Coulet, Christophe Tiffreau, Ingmar Pointeau.

## Auby : Brefs rappels

- ✓ site situé dans le Nord-pas-de Calais, à quelques km de Douai, le long du canal de la Deûle ;
- ✓ terrain argilo-sableux surmontant la craie du Sénonien (avec nappe phréatique importante) ;
- ✓ historique d'exploitation et des mises en dépôt :
  - 1965 - 1969 : matériaux faiblement contaminés (élargissement du canal) ;
  - 1972 - 1973 : matériaux moyennement contaminés (approfondissement du canal) ;
  - 1975 - 1976 : boues fortement contaminées (entretien de la gare d'eau de Courcelles).
- ✓ spécificités du site : ZNS d'environ 10 mètres d'épaisseur avec une forte stratification et une couche blanche très peu perméable produisant un phénomène de nappe perchée.



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

Caphéine

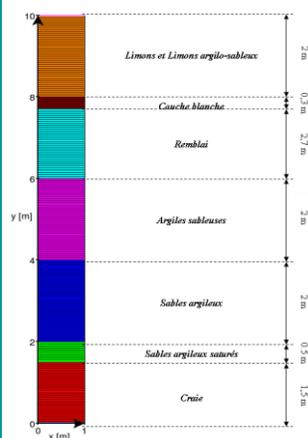
25

## Auby : Contextes et objectifs de l'étude

Le site d'Auby a déjà fait l'objet de nombreuses études : CNRSSP et Thèse de J. Lions (2003) entre autres.

Objectifs de cette étude complémentaire :

- ✓ élargir les connaissances de rétention des métaux (CEA Saclay, L3MR) :
  - mesures de coefficients de distribution ( $K_d$ ), pour diverses conditions physico-chimiques, sur les argiles situées entre les dépôts et la nappe phréatique ;
  - développement d'un modèle de chimie d'interface solide-solution (théorie des échangeurs d'ions) pour prendre en compte l'effet compétiteur des majeurs et pH.
- ✓ réalisation de calculs chimie-transport intégrant ce type de modèle de rétention en ZNS (CEA Cadarache, LMTE).
- ✓ focus sur le Zinc dans cette étude.



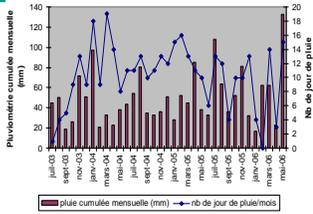
Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

Caphéine

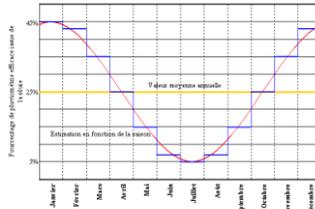
26

# Hydraulique 1/2 : données d'entrée

Utilisation des chroniques pluviométriques existantes auxquelles est ajouté un modèle de correction de pluie efficace



Pluviométrie mesurée sur le site d'Auby entre juillet 2003 et juin 2006



Représentation de l'estimation du pourcentage de pluviométrie efficace chaque mois.

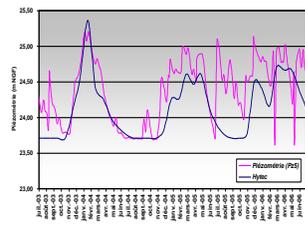
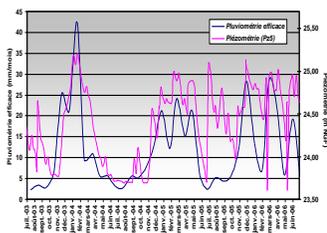
Ces données d'entrée sont ensuite utilisée avec des données hydrauliques mesurées/évaluées sur le site pour caler le modèle hydraulique.

Paramètres	Limons et limons argilo-sableux	Couche blanche	Remblai	Argiles sableuses	Sables argileux	Craie
Perméabilité Ks (m/s)	1,0E-06	4,0E-09	2,5E-06	2,5E-07	3,0E-08	1,0E-04
Porosité e	0,15	0,45	0,45	0,45	0,45	0,30
Sr (saturation résiduelle)	0,16	0,20	0,20	0,17	0,17	0,30
Si (degré de saturation)	1	1	1	1	1	1
a (m <sup>2</sup> )	2,0	1,0	1,0	3,6	3,6	3,0
n	1,41	1,23	1,23	1,56	1,56	1,50

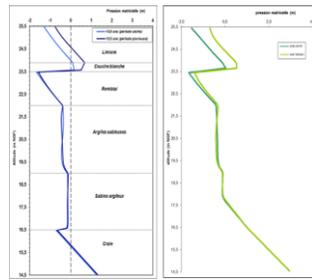


# Hydraulique 2/2 : données d'entrée

Temps Travail estimé 20 jrs

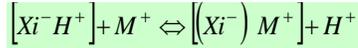


- La nappe est très sensible aux événements (temps de réponse courts) ce qui est dû à la faible profondeur de la nappe perchée (inférieure à 2 mètres).
- Discordance en été 2005 due au modèle de correction de pluie efficace sévère pour cet été « frais ».
- Cet ajustement a un impact mineur → très grande similitude avec les modèles construits antérieurement.



## Interaction argile-calcite – Zn 1/3

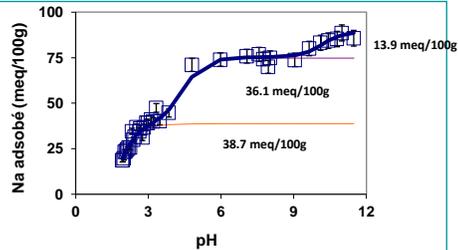
### Modèle des échangeurs d'ions:



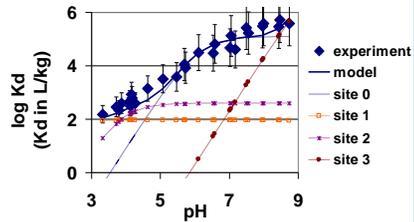
- Multi-sites : plusieurs sites d'échange
- Prise en compte explicite du pH
- Prise en compte de la spéciation
- Prise en compte des ions compétiteurs

### Zn adsorption on montmorillonite

(exp. data from Baeyens and Bradbury, 1987, ; modélisation: al., 2009)



Courbe de saturation de Na sur la montmorillonite du Wyoming (Nollin, 1997)



Caphéine

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

29

## Interaction argile-calcite – Zn 2/3

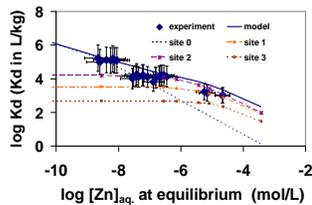
### Construction du modèle pour Aubry :

#### Paramètres intrinsèques sur phases minérales pures (Ph. 1):

- coefficients de sélectivité ; nb de sites ; concentration de sites (données de la littérature).

#### Paramètres spécifiques du site (Ph. 2) :

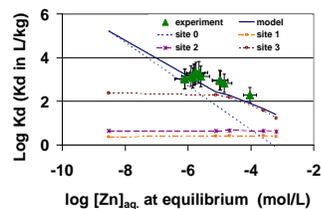
- Minéralogie ; teneur en eau ;
- CEC ; cations échangeables ;
- Chimie des solutions : cations majeurs compétiteurs.



Isothermes de rétention de Zn sur le sédiment d'Auby (Tertre et al., 2009):  
 pH: 7.8 milieu NaCl: 0.01 M  
 Zn : 10<sup>-6</sup> mol/L Kd : 10000 - 1000 selon le cation compétiteur (Na ou Ca)

### Isothermes expérimentales de rétention d'un métal sur un sédiment naturel (Ph. 3):

- Force ionique et pH maintenus constants ;
- Différents ions compétiteurs ;
- Différentes concentrations métal.



Caphéine

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

30

## Interaction argile-calcite – Zn 3/3

Temps  
Travail  
estimé  
90 jrs

Phase 1 : Acquisition des paramètres intrinsèques (constantes de sélectivité; concentration de sites sur phases minérales pures)  
- Données de la littérature et mise en cohérence du formalisme (1 mois);  
- Acquisition des données (plusieurs mois).

Phase 2 : Acquisition des paramètres spécifiques du site (2 à 3 semaines)  
- Teneur en eau ;  
- Minéralogie (DRX; analyse totale élémentaire) ;  
- CEC, Cations échangeables.

Phase 3 : Isothermes expérimentales (adsorption/désorption : 3 semaines)

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

Caphéine

31

## Transport généralisé (Kd simple)

Temps  
travail  
estimé  
10 jrs

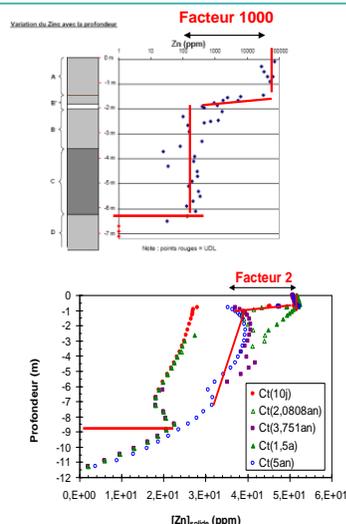
Code utilisé : PORFLOW

Prise en compte de la ZNS et d'un Kd unique pour l'ensemble des zones.  
**Essais rapides (10 jours)**

Résultats : ~ 250 ans pour atteindre la nappe avec Kd de la littérature

Résultats intéressants mais difficulté à :  
- contrôler la solubilité dans la zone A ;  
- représenter le profil de rupture en dessous de la zone de la nappe perchée ;

→ utilisation de transport réactif pour affiner les évolutions de profils.



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

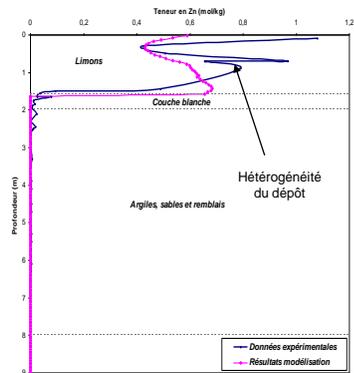
Caphéine

32

## Transport réactif (calage)

Code utilisé : HYTEC

- ✓ Prise en compte de la ZNS ;
- ✓ Utilisation de la Théorie des Echangeurs d'Ions → prise en compte des majeurs (Ca et Na)
- ✓ phase majeure : smithsonite ( $ZnCO_3$ )
- ✓ 1<sup>ère</sup> étape → calage du modèle sur les 40<sup>èmes</sup> années d'exploitation du site



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

Caphéine

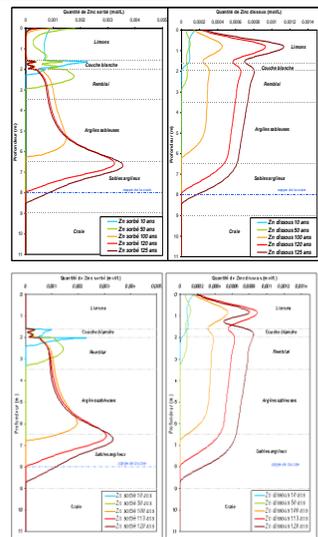
33

## Transport réactif prédictif

Temps  
travail  
estimé  
50 jrs

Calculs réalisés avec (1) {montmorillonite + calcite} et (2) {montmorillonite}

- ✓ calcul (1) → nappe atteinte à 120 ans ;
- ✓ calcul (2) → nappe atteinte à 113 ans → calcite peu d'importance dans la migration du Zinc ;
- ✓ Résultats Lions (2004) : temps de transfert à la nappe (1m plus profond) :
  - ✓ 150 ans avec échange ionique seul ;
  - ✓ 300 ans avec échange ionique + précipitation.
- ✓ les différences s'expliquent par les modèles de rétention et bases de données thermodynamiques différents.



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

Caphéine

34

## Conclusions

### Apports du chimie-transport sur le transport généralisé :

- ✓ possibilité de mieux gérer les termes sources (possibilité de gérer cinétiquement la dissolution de phases ;
- ✓ gère l'influence des conditions chimiques sur la migration des polluants : pluies acides, effets des ions compétiteurs, changements d'états *redox*, effets complexants en solution (carbonates, organiques), influence de la solubilité ;
- ✓ mais nécessite des moyens d'investigations plus importants :
  - construction d'un modèle de rétention : ~ **10 fois plus de temps** / à acquisition de  $K_d$  généraux ;
  - modélisation chimie-transport : ~ **5 fois plus de temps**.

## Modélisation d'un essai de traçage : Site 4

EDF : Fabien Decung, Mohamed Krimissa, Cécile Doukouré  
BURGEAP : Sébastien Kaskassian

## Contexte / Problématique

### ➤ Contexte :

- ✓ Site industriel, ZNS totalement excavée puis remblayée
- ✓ Pollution aux ETM (déversement incidentel / accidentel)

### ➤ Problématique

- ✓ Impact sur les sols & eaux souterraines

### ➤ Gestion de risques

- ✓ Mise en évidence de zone à forte vulnérabilité (proximité des lieux de stockage, zones décompactées)
- ✓ Evaluation de risques selon scénarios
- ✓ Evaluation des propriétés de la ZNS « retard », « atténuation », « émission »

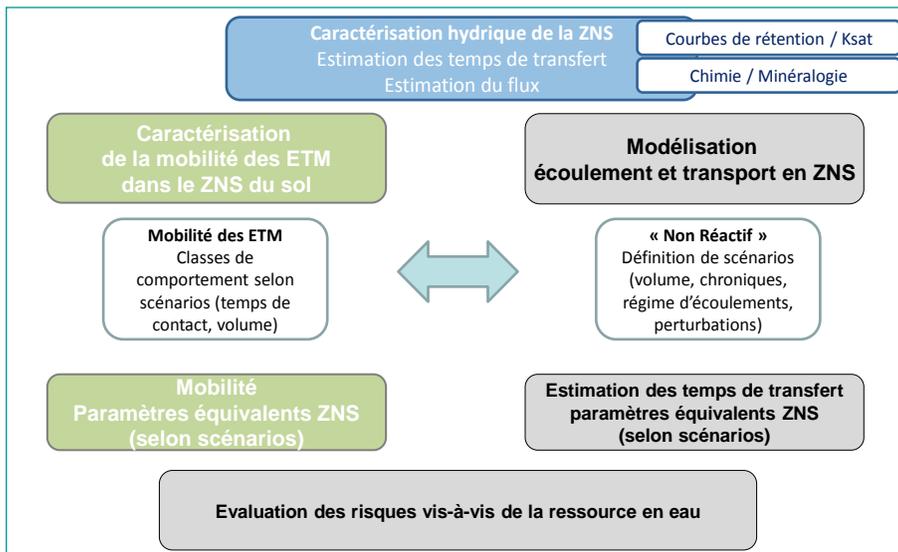


Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

37

## Démarche



**Caphéine**

## Objectifs / Intérêts du modèle numérique

### ➤ Rappels des acquis de l'essai « Grand Infiltromètre »

- ✓ « **Temps de transfert** » : Estimation du temps de transfert dans la ZNS
- ✓ « **Atténuation** » : Estimation de l'atténuation du signal dans la ZNS
- ❖ « **Extrapolation** » : informations acquises représentatives d'un scénario de déversement à débit rapide
- ✓ « **Caractérisation** » : Génération de données pertinentes pour la mise en œuvre d'un modèle

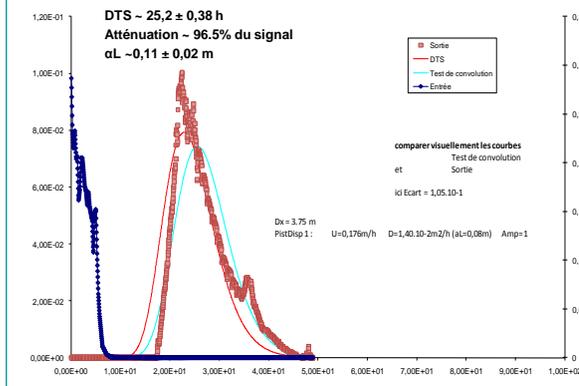
### ➤ Intérêts du modèle numérique

- ✓ « **Validation** » : Intégration des données acquises lors des étapes de caractérisation
- ✓ « **Vérification** » : Tests d'hypothèses relatives à la mise en œuvre, à la caractérisation ou au comportement
- ✓ « **Extrapolation** » : Adaptation à différents scénarios
- ❖ « **Complexité** » : Complexité du calage (relatif à un scénario donné)

## Distribution des temps de séjour (~ Niveau 1, modèle analytique / opérationnel)

### ➤ Interprétation en DTS, hypothèses

- ✓ Solution semi-analytique 1D, Homogénéité des paramètres (vitesse, saturation), Signal normé (effet d'atténuation), Schématisation des chemins de transfert
- ✓ Ne prend pas en compte : bulbe 3D, transitoire, saturation variable, pompage



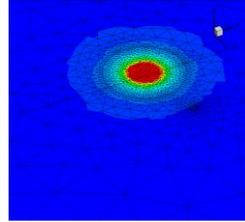
### ➤ Questions?

- ✓ « **Chemin de transfert** » : ZNS, ZNS+Nappe?
- ✓ Biais ? Création de dôme, Défaut de maintien de charge
- ✓ Informations suffisantes?
- ✓ Paramètres sensibles

## Conceptualisation du modèle (1/3)

### ➤ Emprise

- ✓ Fenêtre temporelle d'intérêt :
  - Transfert :  $T \sim 40h$
  - Hydro :  $T \sim 200h$
- ✓ Phénomènes d'intérêts autour de l'infiltromètre (rayon de 1 à 3m)
- ✓ Impact faible des infiltrations sur le NS de la nappe (+ 20cm dans un rayon de 2m)



### ➤ Construction / Validation

- ✓ Modèle hydrodynamique
- ✓ Modèle de transfert non réactif
- ✓ Bilans hydriques

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

41

## Construction du modèle (2/3)

COUPE GEOLOGIQUE			ECHANTILLON	
Prof. m	coupe	NS	OBSERVATIONS	N°
0			Terris Végétales	Carotte n°1
1			Sable très fin beige à galets centimétriques	Carotte n°2
2			Sable grossier roseâtre à galets centimétriques	Carotte n°3
3			Sable très fin marron à galets centimétriques	Carotte n°4
4			Sable très fin limoneux	Carotte n°5
5			Sable très fin limoneux	Carotte n°6
6			Sable très fin limoneux	Carotte n°7
7			Molasse	
8				

### ➤ Remblais +/- uniforme sur la ZNS → Modèle homogène en ZNS

- ✓ Essais préliminaires (BEST, Tranchée, essais de pompage en nappe)

### ➤ Modèle homogène

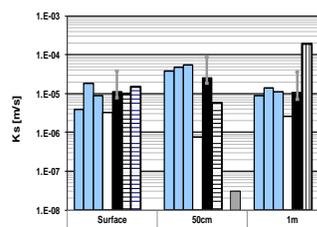
- ✓ double-couche si nécessaire

### ➤ Géochimie non abordée ici

- ✓ traceur non réactif

### ➤ Utilisation des paramètres acquis lors de l'étape de caractérisation (BEST)

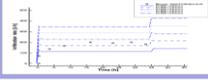
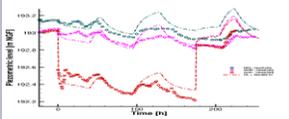
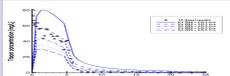
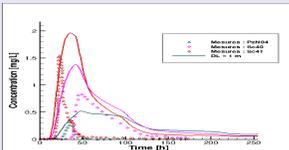
- ✓ Confrontation des données (Ks essentiellement car régime gravitaire)



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

## Procédure de calage du modèle (manuel)

Données Exp. (type de données)	Paramètre ajusté (si nécessaire)	Validation
Débit infiltration de l'eau dans l'infiltromètre (CL)	Ks (en surface)	
Relevés piézométriques de 3 ouvrages (Restitutions)	Ks (ZNS ou Nappe) ; Lois de rétention ; Conditions aux limites (Drainage / Recharge) ; Sinon : double-couche, modèle conceptuel, étude de sensibilité des paramètres	
Débit infiltration du traceur dans l'infiltromètre (CL)	Flux massique	
Chronique de concentration dans 3 ouvrages (Restitutions)	Dispersivités ; Ks (ZNS ou Nappe) ; Sinon : double-couche, modèle conceptuel, étude de sensibilité des paramètres	

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

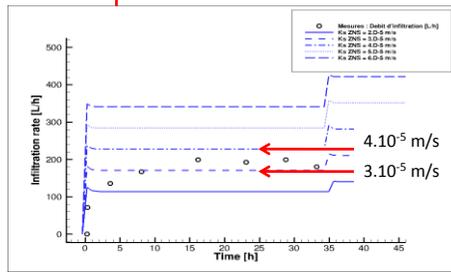
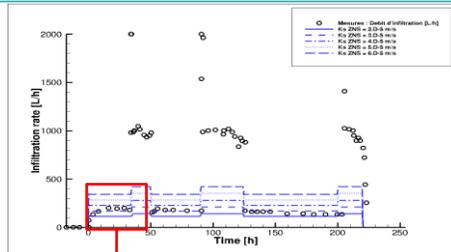
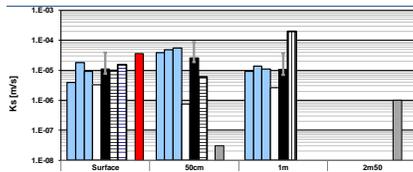
## Débit infiltration (calage : 1/4)

### ➤ Données exp.

- ✓ 165 L/h (ou 195 L/h) ( $H_{infiltr\ o} = 20\text{cm}$ )
- ✓ ~ 1000 L/h lors des phases sans maintien de charge ( $H_{infiltr\ o} = 35\text{cm} + \text{Débordement}$ )

### ➤ Modèle

- ✓ Estime une infiltration plus rapide dans les 1ères heures
- ✓  $K_{S\text{Surface}} \sim 3 \text{ à } 4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  (en pseudo-permanent)



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

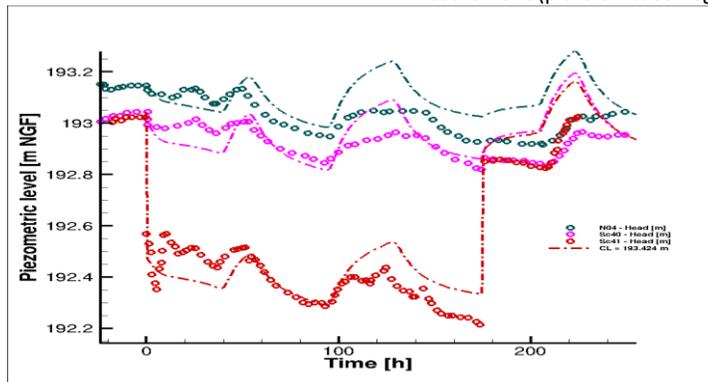
## Restitutions des niveaux piézométriques (calage : 2/4)

### ➤ Ks Nappe.

- ✓  $K_{s\text{Nappe}} \sim 3.5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$
- Valeur similaire aux essais préliminaires et Ks ZNS

### ➤ Conditions Limites

- ✓ CL légèrement drainante sur les bords du domaine (sensibilité)
- ✓ Apports hydriques par l'infiltromètre seulement (pluie efficace négligée)



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

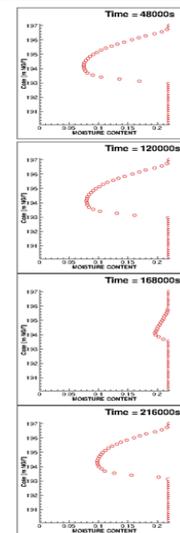
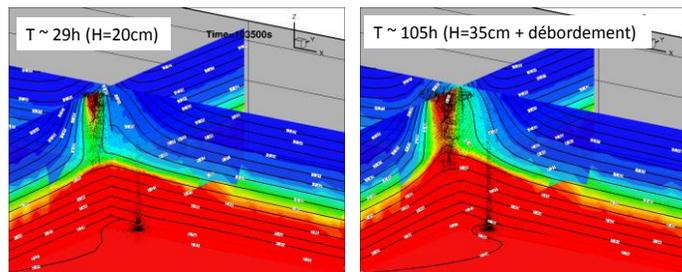
Caphéine

45

## Vérifications d'hypothèses

### ➤ Biais ?

- Pas de formation de dôme sous l'infiltromètre en fonctionnement « normal » (débit 165 L/h)
- Mise en place d'un continuum hydraulique et formation d'un dôme lors des phases sans maintien de charge (débit 1000 L/h)
- Ecoulement quasi permanent atteint vers  $T \sim 15\text{h}$



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

Caphéine

46

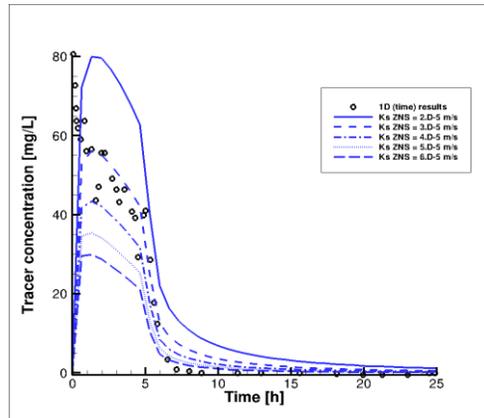
## Courbe d'élution du traceur dans l'infiltromètre (calage : 3/4)

### ➤ Données exp.

- ✓ Infiltration pendant 5h
- ✓ Flux massique : 6,8 g /h

### ➤ Modèle

- ✓ Courbe d'élution conforme aux données expérimentales
- ✓  $[Rhodamine]_{Infiltro} = 40 \text{ mg/L}$  (en moyenne)
- ✓  $K_{S_{Surface}} \sim 3.5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

Caphéine

47

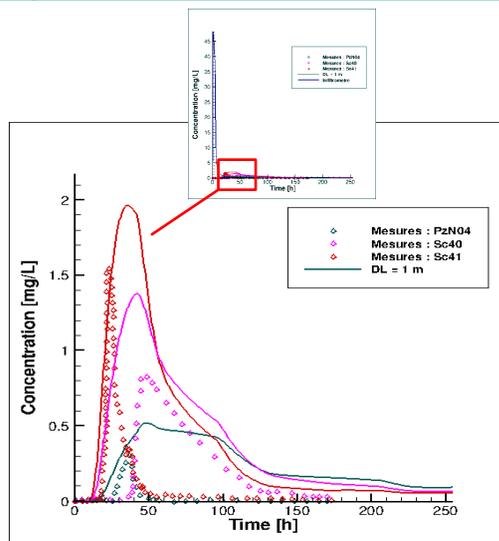
## Courbes de percée (BTCs) du traceur dans les piézomètres (calage : 4/4)

### ➤ Courbes estimées par le modèle homogène

- ✓ Temps d'arrivée Infiltration pendant 5h
- ✓ Flux massique : 6,8 g /h

### ➤ Modèle

- ✓ Atténuation :
- ✓  $K_{S_{Surface}} \sim 3.5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

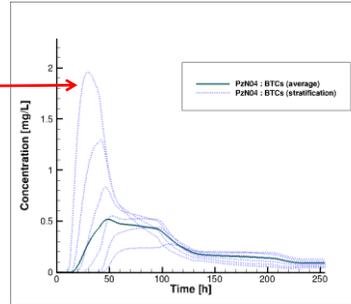
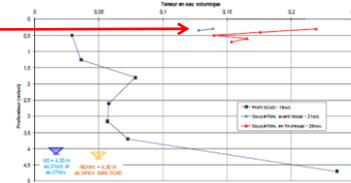
Caphéine

48

## Incertitudes

### ➤ Mise en œuvre

- ✓ Profil d'humidité avant essai (informations a minima en surface)
- Monitoring {TDR ; Succion} avant / pendant essai
- ✓ Massif en béton...
- ✓ CL : flux de débordement
- ✓ Pénétration du traceur dans la nappe
- « Packers » en surface (?) pour la restitution du traceur



## Paramètres sensibles

Paramètre	Commentaires	Influence
$\theta_s$ (~porosité efficace)	Accélération du traceur	Hydro : ● / Transfert : ●●
Hg	Ecoulements horizontaux	Hydro : ●● / Transfert : ●●
Saturation initiale	Flux massique	Hydro : ● / Transfert : ●●
Dispersivités	Temps d'arrivée / Atténuation	Hydro : x / Transfert : ●●●
Régime d'écoulement	Paramètres majeurs	Influence
Gravitaire	Ks	Hydro : ●●● / Transfert : ●●●
Gravitaire	Lois de sols	Hydro : ● / Transfert : ●
Mise en œuvre	Commentaires	Influence
Pompage	Diminution de la traînée et des BTCs (dilution)	Hydro : ● / Transfert : ●●
$H_{INFILTROMETRE}$	H = 05cm → $V_{INF} = 0.14$ m/h H = 20cm → $V_{INF} = 0.22$ m/h	Hydro : ● / Transfert : ●

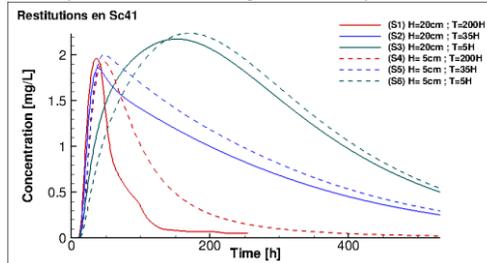
## Modification des conditions de mise en œuvre de l'essai

### ➤ Mise en œuvre

- ✓ H Infiltromètre = 5cm (pendant 5h, 35h, 200h)
- ✓ Absence de pompage

### ➤ Résultats

- ✓ H=5cm →  $V_{inf} = 0.18$  m/h (contre 0.22 m/h pour H = 20cm)
- ✓ Pas de modification significative des courbes de percée
- ✓ Effet seulement si l'imposition de la charge est < temps de transfert



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

Caphéine

51

## Conclusion

### ➤ Apports du modèle numérique ici

- ✓ « **Vérification** » : Le modèle ne montre pas l'apparition de dôme → exploitation des résultats (DTS, atténuation)
- ✓ « **Optimisation** » : Le modèle permet de valider de possibles modifications de mise en œuvre de l'essai
- ✓ « **Caractérisation** » : Le modèle a permis de vérifier les Ks estimés lors de la caractérisation. Scénario de régimes gravitaires, difficile d'être concluants sur les lois de sols... (incertitudes)

### ➤ Autres apports potentiels

- « **Extrapolation** » : Elargir à d'autres scénarios de rejet plutôt de type « suintement »
- « **Couplage géochimie - Transport** » : Construction d'un modèle couplé avec incorporation des modèles issus des travaux « Mobilité des ETM » (précipitation / dissolution, cinétique). Estimation de Vitesse & Retard équivalents
- « **Dimensionnalité / Emprise du modèle** » : Passage d'un modèle local à un modèle SITE.

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

Caphéine

52



## Présentation du « Guide technique »

BRGM : Geoffrey Boissard, Sandra Béranger, Nolwenn Croizet, Marc Parmentier, Arnault Lassin  
CEA: Christophe Tiffreau  
EDF : Fabien Decung  
INERIS: Julien Michel

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012 53

### Objectifs du guide

- Rendre plus systématique la prise en compte de la zone non-saturée (ZNS) dans les études de risques vis-à-vis de la ressource en eau des sites pollués.
- Pour cela,
  - ✓ juger de l'intérêt de prendre en compte la ZNS,
  - ✓ mettre à disposition des décideurs une méthodologie permettant de préciser, selon le degré de complexité du contexte, les modélisations à mettre en œuvre pour ne pas être exagérément pessimiste ou optimiste dans l'évaluation des risques vis-à-vis de la ressource en eau.

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012 54



## Plan du guide

### I. Méthodologie proposée

- 1) Méthodologie générale de modélisation
- 2) Proposition d'une approche graduée selon l'objectif
- 3) Critères de choix des modèles

### II. Modélisation des écoulements en ZNS

- 1) Paramètres d'entrée nécessaires
- 2) Intérêts
- 3) Contraintes et limites

### III. Modélisation du transport dans la ZNS

- 1) Paramètres d'entrée nécessaires
- 2) Intérêts
- 3) Contraintes et limites

## Plan de la présentation

### I. Pourquoi prendre en compte la modélisation de la ZNS?

- 1) Modélisation des écoulements
  - Intérêts
  - Contraintes et limites
- 2) Modélisation du transport
  - Intérêts
  - Contraintes et limites

### II. Comment prendre en compte la modélisation de la ZNS?

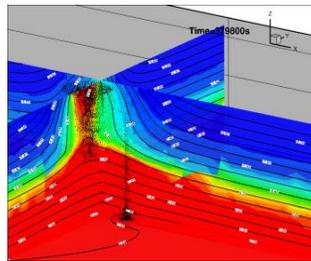
- 1) Méthodologie générale de modélisation
- 2) Proposition d'une approche graduée selon l'objectif
- 3) Critères de choix des modèles

## I. Pourquoi modéliser la ZNS?

### 1) Modélisation des écoulements

#### ➤ Intérêts :

- ✓ étape préliminaire et indispensable à la modélisation du transfert des polluants dans la ZNS.
- ✓ prise en compte des caractéristiques de la ZNS (épaisseur, perméabilité, ...) qui permettent d'expliquer les variations dans le temps du niveau de la nappe et des flux d'eau atteignant la nappe.
- ✓ quantification du temps de transfert d'un traceur, depuis la surface du sol jusqu'à la nappe.
- ✓ prise en compte des modifications des conditions d'écoulement



Site 4  
(EDF)

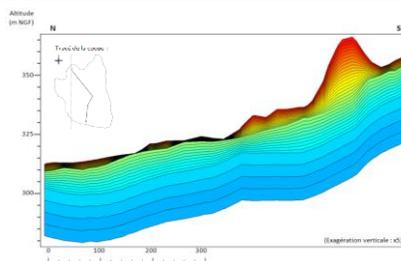
Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

57

#### ➤ Contraintes et limites

- ✓ Contraintes numériques  
=> moyens de calcul importants
- ✓ Difficultés liées à l'acquisition des données d'entrées  
=> importance de la phase de conceptualisation et de l'étude de sensibilité
- ✓ Prise en compte des transferts dans la zone racinaire
- ✓ Difficulté de la prise en compte des phénomènes d'hystérèse



Site 1 (BRGM)

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

58

## 2) Modélisation du transport

### ➤ Intérêts

- ✓ Prise en compte des paramètres qui influent sur :
  - o la variation des concentrations entre la surface du sol et la nappe;
  - o la variation de la taille du panache de pollution;
  - o la vitesse de transfert et donc le temps d'arrivée de la pollution jusqu'à la nappe.
- ✓ Intérêt de l'approche empirique : simplicité, faible nombre de paramètres
- ✓ Intérêt de l'approche mécanistique : tient compte des conditions physico-chimiques de la ZNS

### ➤ Intérêts

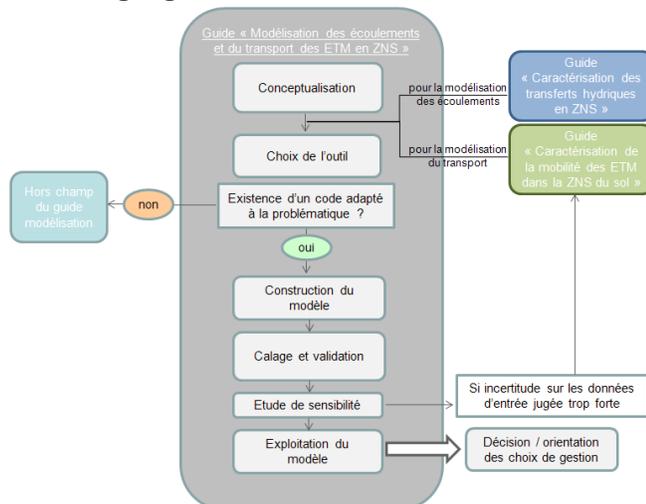
- ✓ Prise en compte de l'influence de la microflore du sol
- ✓ Prise en compte de la volatilisation
- ✓ Prise en compte des modifications des paramètres d'écoulement en relation avec les réactions chimiques
- ✓ Transport particulaire

## ➤ Contraintes et limites

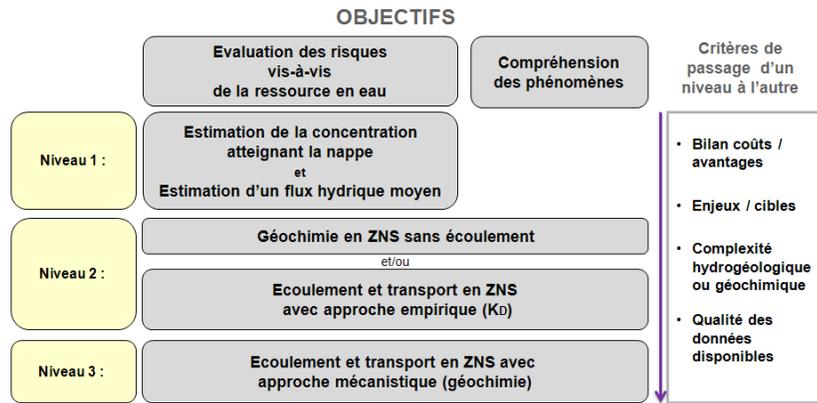
- ✓ Contraintes numériques
- ✓ Difficultés liées à l'acquisition des données d'entrée
- ✓ Effet d'échelle
- ✓ Limites de l'approche empirique
- ✓ Limites de l'approche mécanistique

## II. Comment modéliser la ZNS?

### 1) Méthodologie générale de modélisation



## 2) Proposition d'une approche graduée selon l'objectif



### ➤ Niveau 1

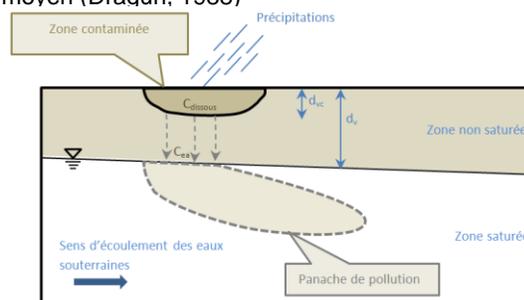
- ✓ Estimation de la concentration atteignant la nappe (Connor et al., 1997)

$$C_{ea} = C_{dissous} \cdot d_{vc}/d_v$$

- ✓ Estimation d'un flux hydrique moyen (Draquin, 1988)

$$v = \frac{I}{\theta_v \cdot R_f}$$

- ✓ Temps approximatif < 1 j



### ➤ Niveau 2

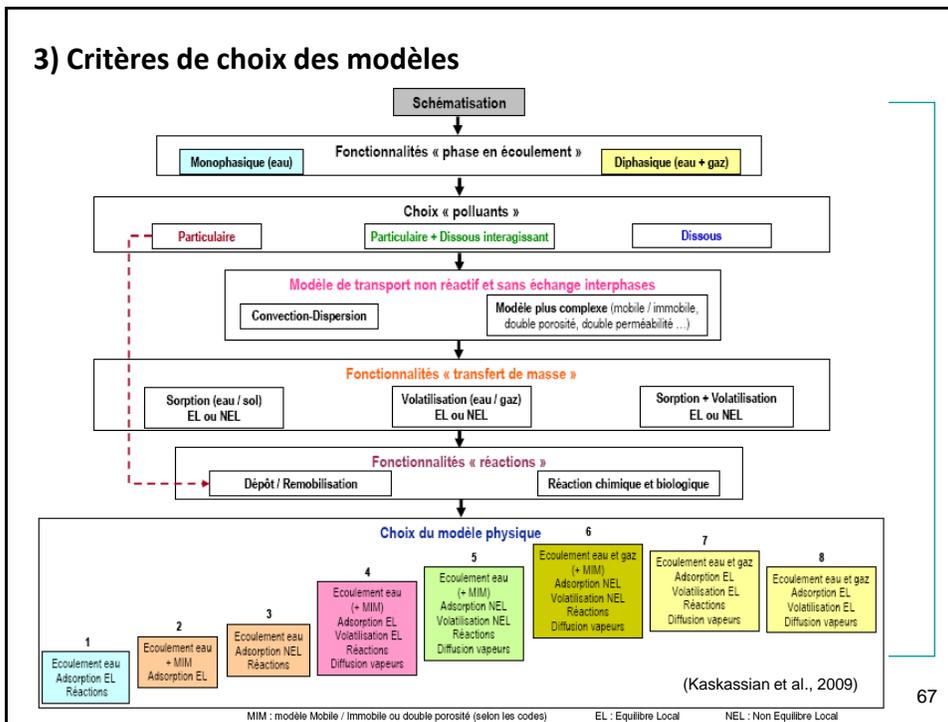
- ✓ Ecoulement et transport en ZNS avec approche empirique (KD)
  - Modélisation des écoulements et du transport de manière couplée
  - Modélisation simplifiée de la chimie du polluant
  - Temps approximatif ≈ 15-30 j

Et/ou

- ✓ Géochimie sans écoulement (ou « géochimie en batch »)
  - Permet de tracer différents graphiques dont :
    - les diagrammes fractionnaires,
    - les diagrammes de prédominance,
    - les diagrammes de solubilité,
    - évolution dans le temps de différents paramètres
  - Temps approximatif ≈ 10-20 j

### ➤ Niveau 3

- ✓ Ecoulement et transport avec approche mécanistique
  - Permet de prendre en compte, de manière spatiale et éventuellement temporelle, les différents mécanismes en jeu (précipitation/dissolution, complexation de surface, échange cationique, précipitation de surface, co-précipitation...).
  - Utilisation beaucoup plus lourde en termes d'investissement humain
  - A réserver plutôt pour des sites à fort enjeux
  - Nécessite une très bonne connaissance de la matrice (chimie, minéralogie et propriétés physiques)
  - Temps approximatif ≈ 30-60 j



67

## Conclusion

- La modélisation, un outil d'aide à la décision et d'aide à la compréhension des phénomènes liés à la présence des ETM dans la ZNS
- Limites et contraintes de l'exercice:
  - ✓ importance des données d'entrée (en nombre et en qualité),
  - ✓ importance de la phase de conceptualisation.
- Augmentation des moyens à mettre en œuvre du Niveau 1 au Niveau 3 :
  - ✓ temps estimé à consacrer à la modélisation,
  - ✓ nombre de paramètres d'entrée,
  - ✓ coût et le temps nécessaires à l'acquisition des paramètres d'entrée.

## Conclusion

- Les calculs peuvent, selon les contextes, s'avérer coûteux et difficiles
- Le Niveau 3 peut représenter un indispensable outil d'aide à la compréhension du comportement du système.
- Dans le cas de systèmes complexes, les capacités prédictives du modèle peuvent s'avérer limitées.
- Néanmoins, des progrès rapides sont en cours