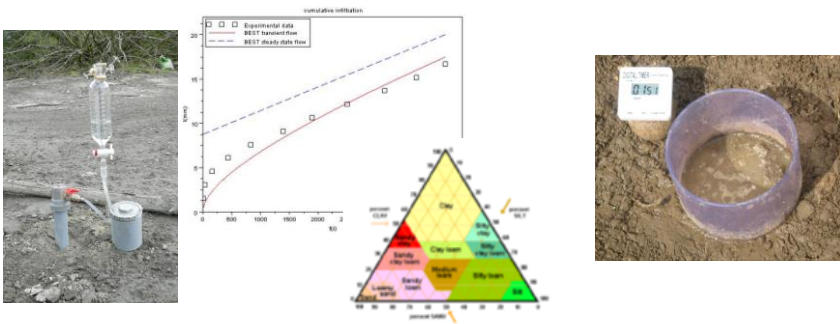


**Caphéine** **INERIS** **EDF** **Mines de Douai** **cea** **brgm** **ADENE**

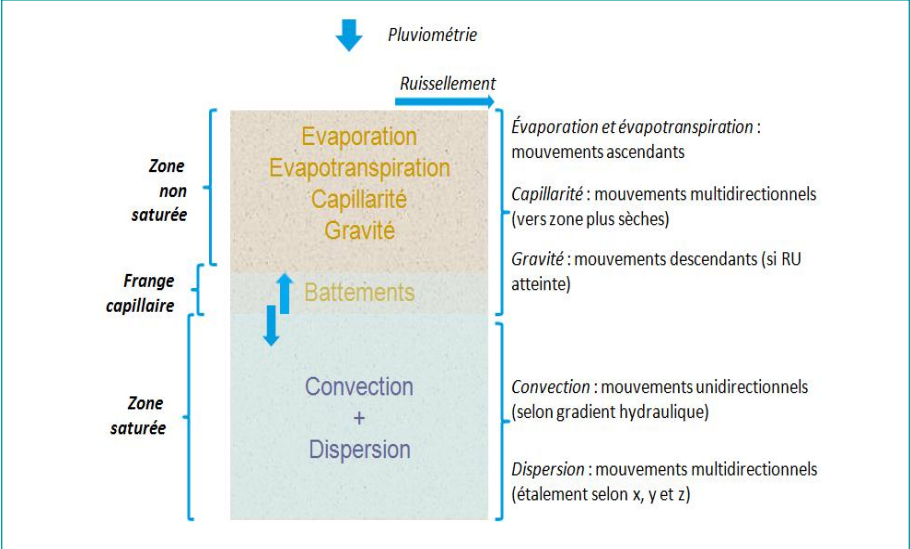
**CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE** **Recherche pour une Terre durable**

## Caractérisation hydrique de la zone non saturée du sol



**Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012** 1

## Pourquoi une caractérisation hydrique



**Pluviométrie**

**Ruissellement**

**Zone non saturée**

Evaporation  
Evapotranspiration  
Capillarité  
Gravité

Évaporation et évapotranspiration : mouvements ascendants

Capillarité : mouvements multidirectionnels (vers zone plus sèches)

Gravité : mouvements descendants (si RU atteinte)

**Frange capillaire**

Battements

**Zone saturée**

Convection + Dispersion

Convection : mouvements unidirectionnels (selon gradient hydraulique)

Dispersion : mouvements multidirectionnels (étalement selon x, y et z)

**Caphéine** 2

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

## Du recul acquis sur site vers le guide

- Apport de différentes méthodes pour la détermination de KS et des paramètres des courbes de rétention : Exemple du site 4 (Fabien Decung, EDF)
- L'évaluation des transferts vers la nappe par l'essai d'infiltration couplé au traçage non réactif : Exemple du site 4 (Sébastien Kaskassian, BURGEAP)
- Présentation guide (Valérie Guérin, BRGM)

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**  


3

**Caphéine**  


**INERIS**  
  
 EDF  
 CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE

  
 Mines  
 de Douai  
 LA RÉGION

  
 cea

  
 brgm  
 Sciences pour une Terre durable

  
 ADEME

## Apport de différentes méthodes pour détermination de Ksat et des paramètres des lois de rétention Site 2 et 4

EDF : Fabien Decung, Mohamed Krimissa, Cécile Doukouré  
 BRGM : Valérie Guérin, Boris Chevrier

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

4

## Plan

- Rappel des objectifs
- Présentation Site N°4 (EDF)
- Méthodes pour l'acquisition des paramètres hydrodynamiques
  - ✓ Essais d'infiltrométrie in-situ (BEST, miniForage/microPorchet, Porchet)
  - ✓ Acquisition en laboratoire (Darcy, {TDR ; Succion}...)
  - ✓ BDD / PTFs
- Comparaisons / Interprétations
- Retour d'Expérience

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

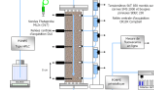


5

## Quelques méthodes pour l'acquisition des paramètres des lois de rétention $h(\theta) / k(\theta)$

### ➤ Laboratoire :

- ✓ Infiltration en « colonne » (imbibition / drainage)



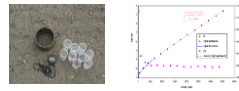
- ✓ PTFs (valorisation de granulométrie)



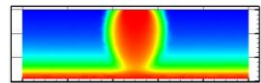
- ✓ Méthode Wind

### ➤ In-situ :

- ✓ Infiltrométrie simple anneau (BEST)



- ✓ Modélisation Inverse



- ✓ Monitoring in-situ (TDR, ...), Perméamètre de Guelph



➤ **Objectifs** : Comparaison de méthodes d'infiltration pour l'acquisition de paramètres hydrodynamiques ( $K_s$ , lois de rétention)

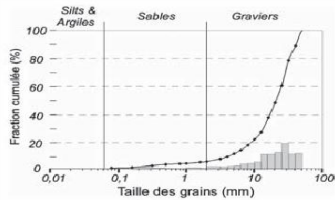
➤ **Contexte** : Site industriel, remblais (alluvions sableux/limoneux) (dé)compactés

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

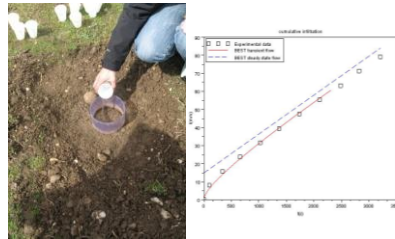


## Procédure BEST : Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters



➤ **Analyse granulométrique :**  
Estimations des paramètres de forme (n, m, η)

➤ **Infiltrométrie simple anneau (faible charge) :** Estimation de la conductivité (Ks) et de la sorptivité (S). Hg (paramètre d'échelle) déduit de {Ks ; S}



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

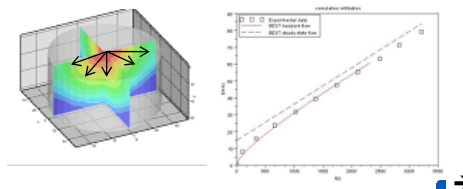


## Procédure BEST : Modèle mathématique



➤ **Transient 3D infiltration model:**

- Analogy with Richard's equation
  - Analytical solution (hypothesis: soil homogeneity and initial humidity uniformity)
  - 3D model ⇔ 1D Philip's equation



$$I_{3D} = S\sqrt{t} + \frac{(2-\beta)K_s}{3}t + \frac{\gamma S^2}{R_d \Delta\theta}t$$

Gravity-driven vertical flow
Vertical capillary flow (early stage)
Lateral capillary flow

➔ Provides estimations of Ks and S

➤ **Procédure BEST**

- Détermination des paramètres des lois de rétention :
  - Ksat
  - Hg : Paramètre d'échelle

$$S^2 = \int_{\theta_0}^{\theta_1} (\theta_1 + \theta - 2\theta_0) D(\theta) d\theta$$

$$h_s = - \frac{S^2}{c_r(\theta_s - \theta_0) \left[ 1 - \left( \frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right]} K_s$$

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012



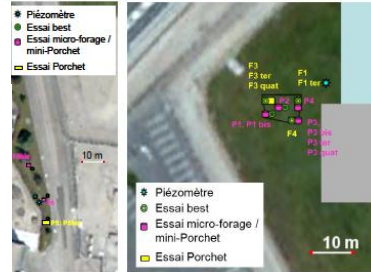
## Présentation du site N°4

### ➤ Contexte

- ✓ Remblais compactés / décompactés
- ✓ Site qui a fait l'objet de travaux de caractérisation hydrique, géochimique en ZNS

### ➤ Parcelles

- ✓ 3 parcelles de différentes natures
- ✓ TN (jaune)
  - Limon, Limon sableux
- ✓ RD
  - Limon, Limon sableux
  - BEST, Porchet, Micro-Porchet/Forage, Grand Infiltromètre/Traçage
  - Plusieurs profondeurs (surface:1m50)
- ✓ NR (partiellement traitée)
  - Limon, Limon sableux
  - BEST,



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

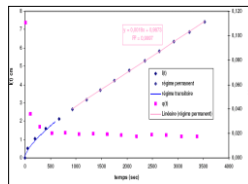
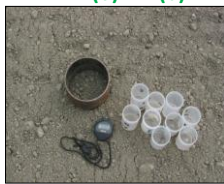
**Caphéine**

## Méthodes mises en œuvre : in-situ

### ➤ Procédure BEST (intégratrice)

- ✓ Infiltrométrie sous charge quasi nulle & valorisation de la granulométrie

❖  $h(\theta)$  &  $k(\theta) + K_s$



### ➤ Infiltrométrie sous charge (variable)

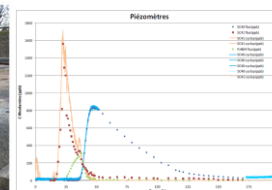
- ✓ Essais de perméabilité

❖  $K_s$



### ➤ Grand Infiltromètre

- ✓ Temps de transfert
- ✓ Atténuation
- ❖  $K_s$  en surface (?)



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

## Méthodes mises en œuvre : Laboratoire

### ➤ Ks (NF X30-442)

- ✓ Mise en œuvre sur échantillons remaniés ou carottés sous gaine

❖ Ks



### ➤ TDR + Canne de succion

- ✓ Acquisition directe. Mesures de couples {TDR ; Succion}
- ✓ Mise en œuvre sur échantillons remaniés ou carottés sous gaine

❖ h(θ) & k(θ)



### ➤ Procédure BEST (laboratoire)

- ✓ Mise en œuvre sur échantillons remaniés.
- ✓ Procédure similaire à celle in-situ (volumes d'échantillons important)

❖ h(θ) & k(θ) + Ks



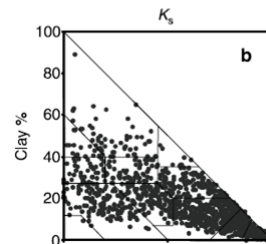
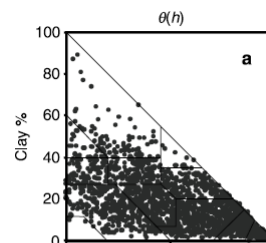
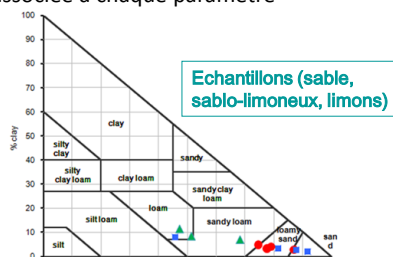
Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

Caphéine

## Méthodes mises en œuvre : PTFs

### ➤ Fonctions Pédotransferts (PTFs) :

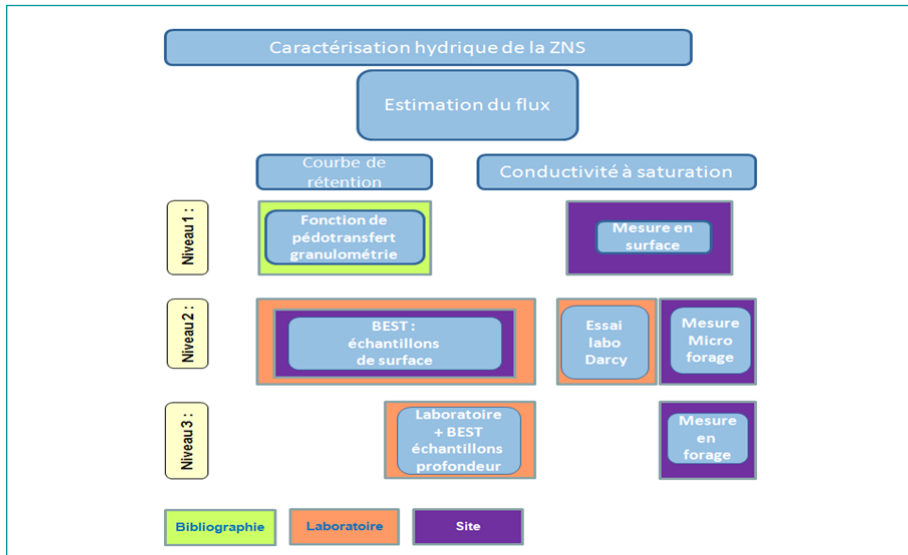
- ✓ Utilisation de ROSETTA basées sur la BDD (UNSODA)
- ✓ A minima, utilisation de la granulométrie
- ✓ Possibilité d'intégrer des informations complémentaires : densité,  $\theta_s$ , couple { $\theta_s$  ; Succion}
- ✓ Renvoi des informations sur l'incertitude associée à chaque paramètre



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

Caphéine

## Méthodes mises en œuvre sur le site N°4 en regard de la méthodologie Caphéine)

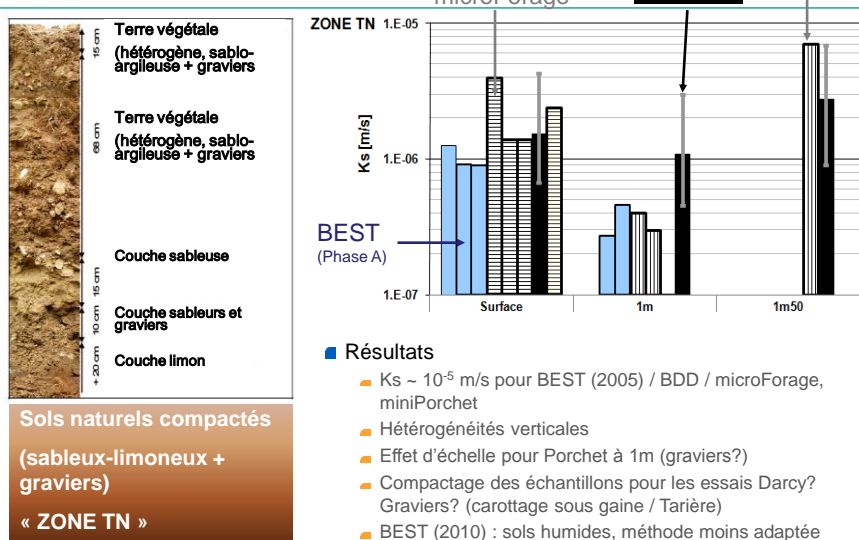


Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012



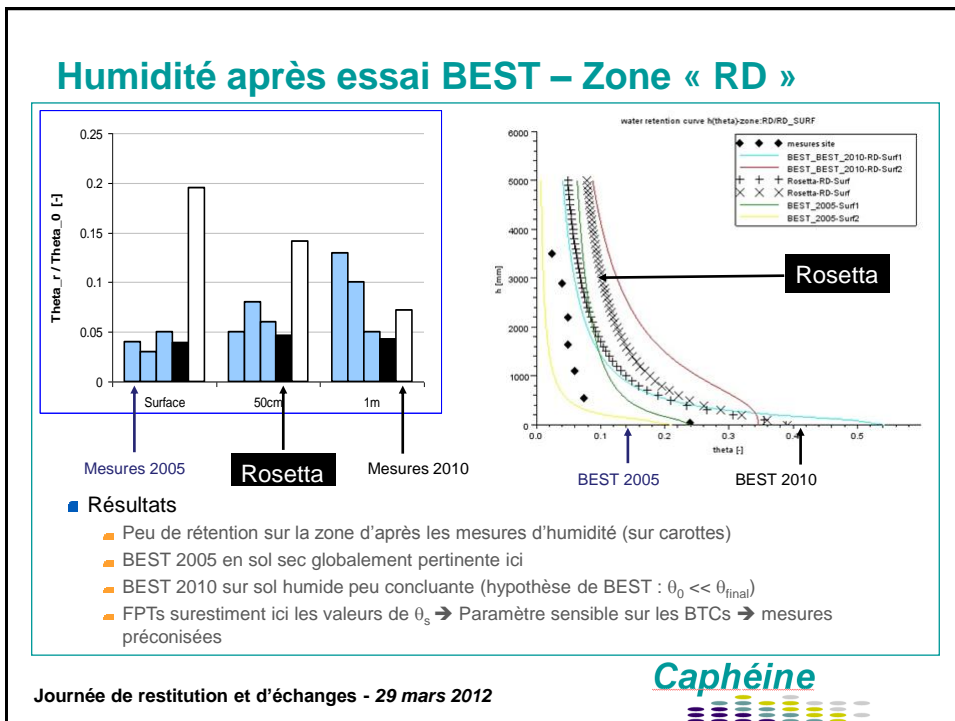
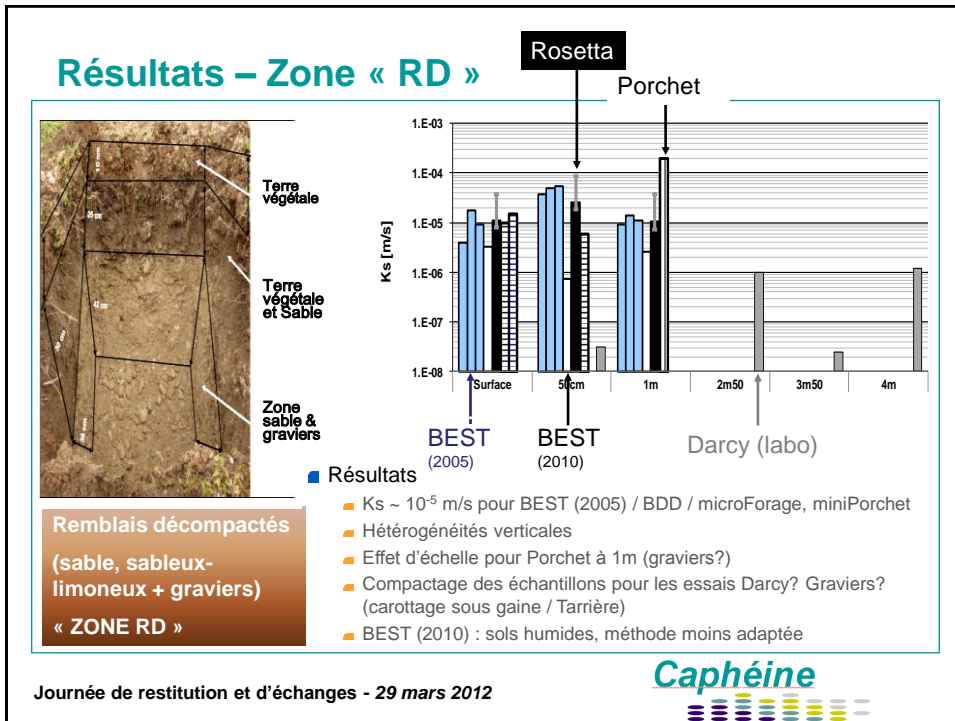
13

## Résultats – Zone « TN »



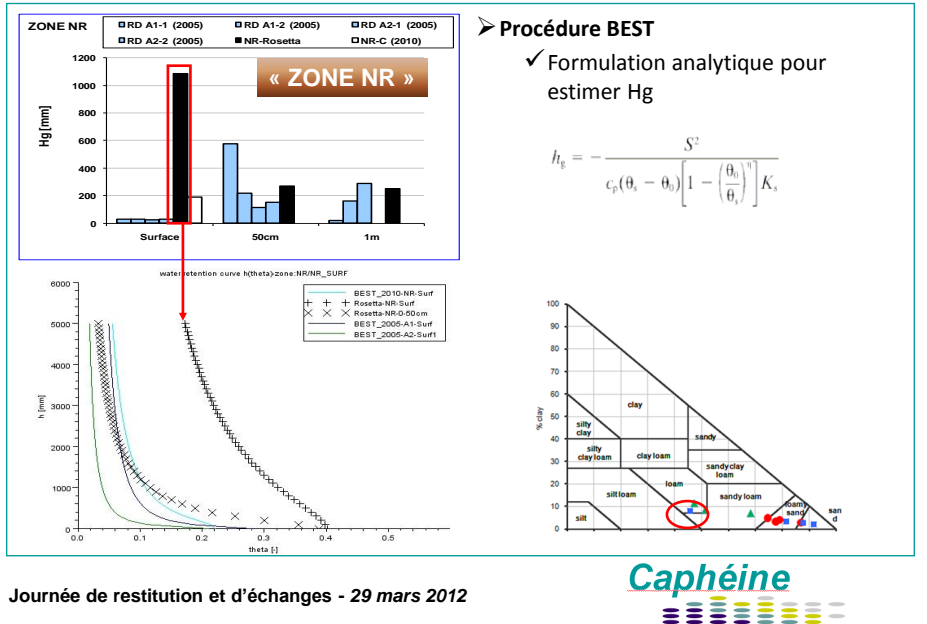
Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012





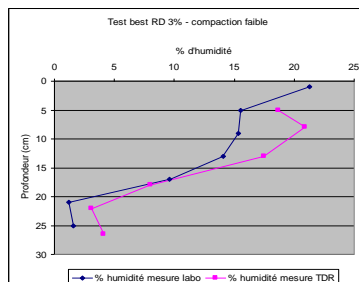


## Paramètre Hg – Lois de rétention $h(\theta)$ / $k(\theta)$



## Essais en laboratoire

- **Essais de perméabilité (carottage sous gaine)**
- ✓  $K_s$  estimée sur la zone "RD" (Sc40) :  $10^{-8}$  à  $10^{-6}$  m/s 1 à 3 ordres inférieurs aux essais terrains
- **Lois de rétention en laboratoire**
- ✓ BEST & TDR : seules méthodes pour caractériser des échantillons en profondeur (> 1m50) : Ex : Milieu initial à 3% d'humidité, profil en fin d'essai « BEST »
- ✓ TDR : acquisition des courbes en imbibition et drainage
- ❖ Gamme de succion limitée



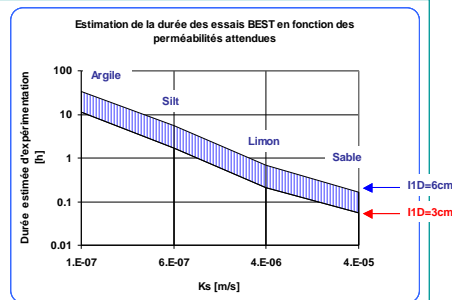
## REX / Conclusion

### ➤ Conclusion :

- ✓ **Intercomparaison nécessaire**
- ✓ **Ks** : Comparaison concluante pour des sols perméables (Site N°4).
- ✓  **$h(\theta) / k(\theta)$**  : variabilité des réponses, difficile de voir une tendance générale.
- ❖ **BEST** : Procédure réservée à des sols plutôt perméables (→ temps d'infiltration). Milieu initial SEC.
- ✓ Plusieurs méthodes de valorisation des granulométries mais **basées sur fractions fines**
- ❖ Site N°2 : ?

### ➤ Caractérisation très orientée « Modélisation »

- ✓ Hors essais « Grand Infiltromètre »



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

**Caphéine**

**INERIS**  
EDF  
CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE

Mines  
de Douai  
UNIVERSITÉ

cea  
brgm  
Espaces pour un Territoire



## Evaluation des transferts vers la nappe par essai d'infiltration couplé au traçage non réactif

**BURGEAP**

BURGEAP : Sébastien Kaskassian

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

20

## Projet TRANSAT (ANR PRECODD 2005)

### ➤ Partenaires

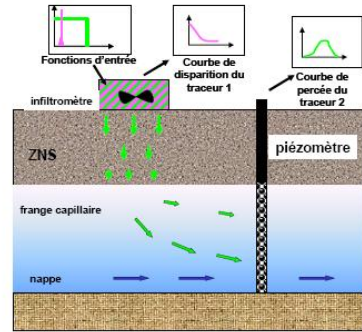


### ➤ Evaluation des TRansferts dans la zone Non SATurée dans un contexte de pollution industrielle localisée

### ➤ Résultats



- ✓ Guide technique
- ✓ Essai d'infiltration couplé à un traçage



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

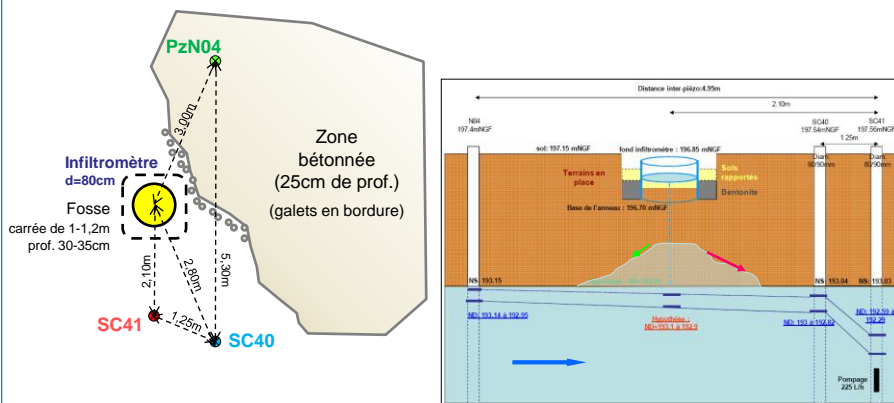
**Caphéine**

21

## Mise en œuvre Caphéine

### ➤ Objectif = caractériser le transfert en ZNS

- ✓ Vitesse d'infiltration en surface
- ✓ Temps et concentration d'impact à la nappe



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

22

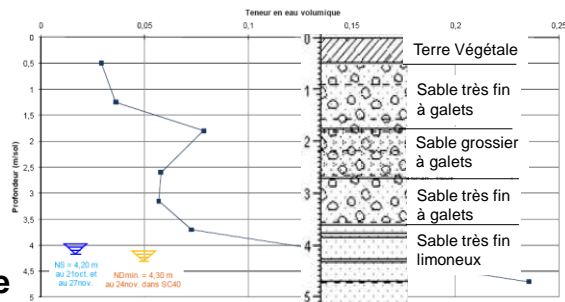
## Essais préliminaires

### ➤ Essais d'infiltration (2h, H # 14 cm, 35 cm prof.)

✓  $V_{inf} = 0,17$  m/h,  $K_v \# 3 \cdot 10^{-5}$  m/s

### ➤ Création de 2 nouveaux piézomètres

✓ Mesure du profil de teneur en eau (sondage en ZNS)



### ➤ Essais de pompage

✓  $K_h \# 2 \cdot 10^{-5}$  m/s et  $S = 28\%$

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

23

## Essais d'infiltration couplé au traçage

### ➤ Essais d'infiltration

- ✓ Charge = 20 cm
- ✓ Anneau foncé à 30 cm de prof.
- ✓ Teneurs en eau sous anneau à  $t_0 = 12$  à 13%  
effet de la pluie ( $\theta \# 3\%$  dans profil initial)
- ✓ Suivi des Niveaux de nappe dans les ouvrages
- ✓ Teneur en eau sous anneau à  $t_{fin} = 22\%$  (quasi-saturé)



### ➤ Essai de traçage

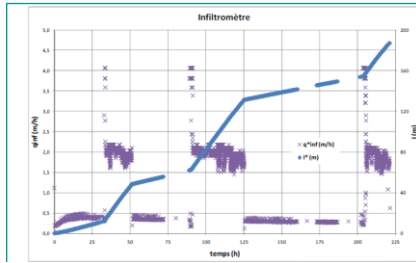
- ✓ Injection de traceur pendant 5h à travers l'infiltromètre
- ✓ Suivi du traceur dans les ouvrages
- ✓ Pompage en SC41 -> assurer une percée du traceur

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

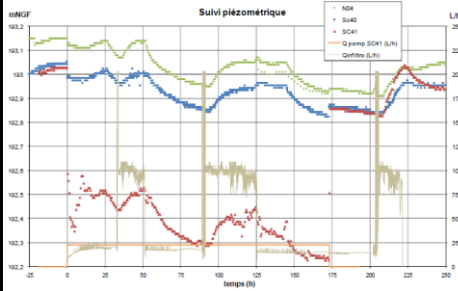
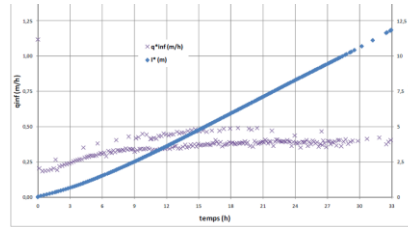
24

## Courbes d'infiltration / niveaux de nappe



### ➤ Débordements (H= 35cm)

- ✓ Défauts de maintien de charge
- ✓ Réponse en nappe



### ➤ 1er jour (H=20cm)

- ✓  $V_{inf} \# 0,4 \text{ m/h}$ ,  $K_v \# 7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

### ➤ Sur 2 heures (H=20cm)

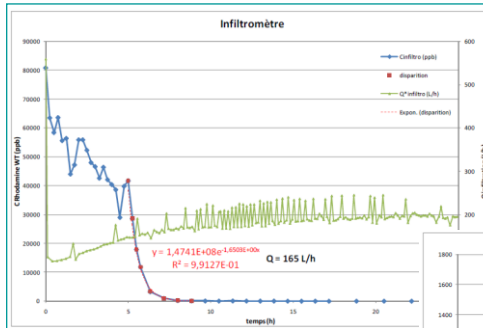
- ✓  $V_{inf} \# 0,2 \text{ m/h}$ ,  $K_v \# 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$
- Piégeage d'air sous l'anneau

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012



25

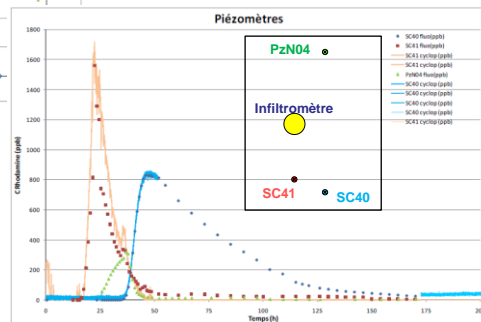
## Suivi du traceur



### ➤ Courbe d'entrée

- ✓ pseudo-créneau
- ✓  $V_{inf} \times 2$
- ✓ Correction par disparition du traceur

- Courbe de percée
  - ✓ SC41 – 2,1m en aval
  - ✓ Pic à 22,5 h,  $C \# 3,5\% C_0$
  - ✓ Présence en amont

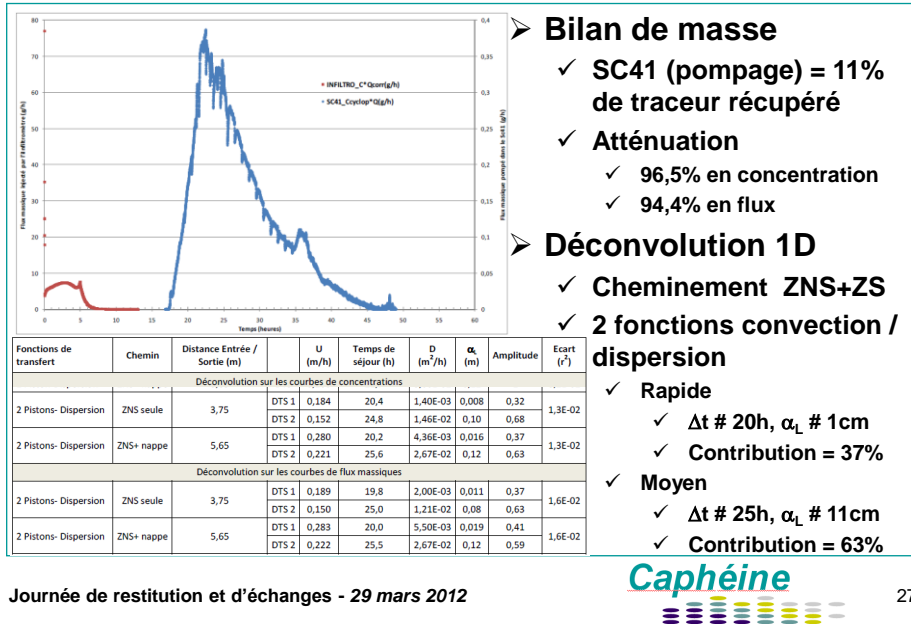


Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012



26

## Interprétation de l'essai de traçage



## Conclusions de l'essai

- **Essais d'infiltration**
  - ✓ Évaluation de  $V_{inf}$  et  $K_{fs}$
  - ✓ Défauts de maintien de charge -> après passage du traceur
- **Essai de traçage**
  - ✓ Évaluation du temps et de la concentration d'impact
  - ✓ Bilan de masse et déconvolution
- **Résultats valables dans les conditions de l'essai (charge dans l'anneau, teneurs en eau initiales ...)**
- **Evaluation d'autres scenarii (faible charge, polluant réactif ...) → autres essais ou simulation numérique**




**Présentation du guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée »**

BRGM : Valérie Guérin

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

## Transfert hydrique en ZNS

- **Comprendre le fonctionnement hydrique de la ZNS du site**
- Courbe caractéristique  $h(\theta)$   $K(\theta)$  nécessaires pour tous les matériaux rencontrés
- **$h(\theta)$   $K(\theta)$  : Trois modes d'acquisition de ces paramètres**
  - bibliographiques, (analogue granulométrique)
  - de laboratoire,
  - de terrain,

18/11/2010  Comité d'utilisateur 06

## Méthodes testées 1/2

### ➤ Comparaison acquisition K avec 5 méthodes sur site n°2 (BRGM)



**Essai en microforage (norme X30-424) :**

- VER plus faible
- précision bonne
- mise en œuvre +/- difficile selon milieu



**Infiltromètre Persan (norme X30-420) :**

- VER moyen
- précision bonne
- mise en œuvre assez aisée



**Perméamètre de Guelph (NF P16-603) :**

- VER faible
- précision assez faible
- perméabilité négative



**Essai Darcy :**

- VER faible
- précision bonne
- facilité de mise en œuvre
- pb intégrité des éch

**Granulométrie :**

- VER faible
- facilité de mise en œuvre
- données existes pour matériaux fins

Choix méthodes / profondeur / gamme de perméabilité / incertitudes inévitables

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

31

## Méthodes testées 2/2

### ➤ Comparaison $h(\theta)$ avec trois méthodes sur Site n°2 (BRGM)



**Terrain :** mesure conjointe humidité succion

**Bibliographie :** classe granulométrique USDA

**Cocotte à pression :** VER faible ; précision assez bonne ; fortement dépendant des conditions de milieu et extérieures

Labo : possible uniquement sur des échantillons structurés qui se tiennent  
Terrain : toute la gamme  $h(\theta)$  rarement observable  
Biblio : données disponibles que pour les matériaux fins

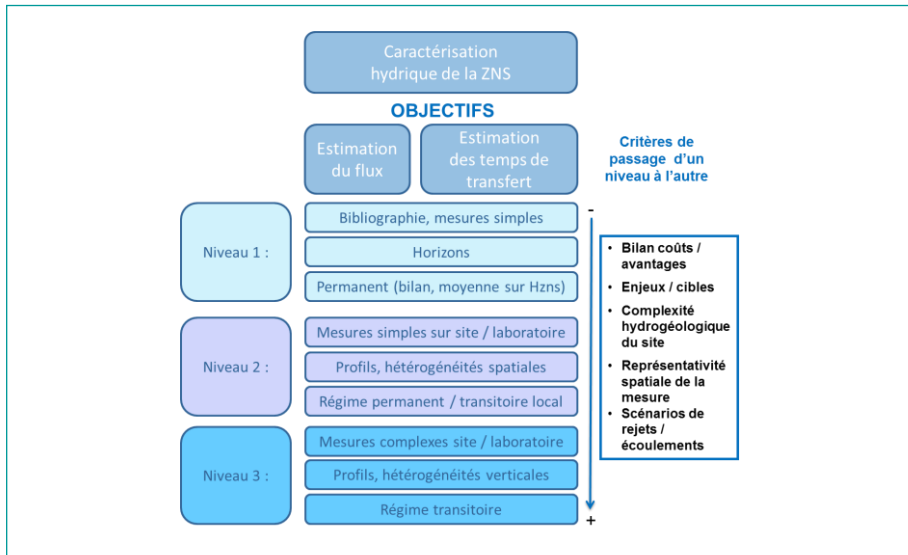
Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

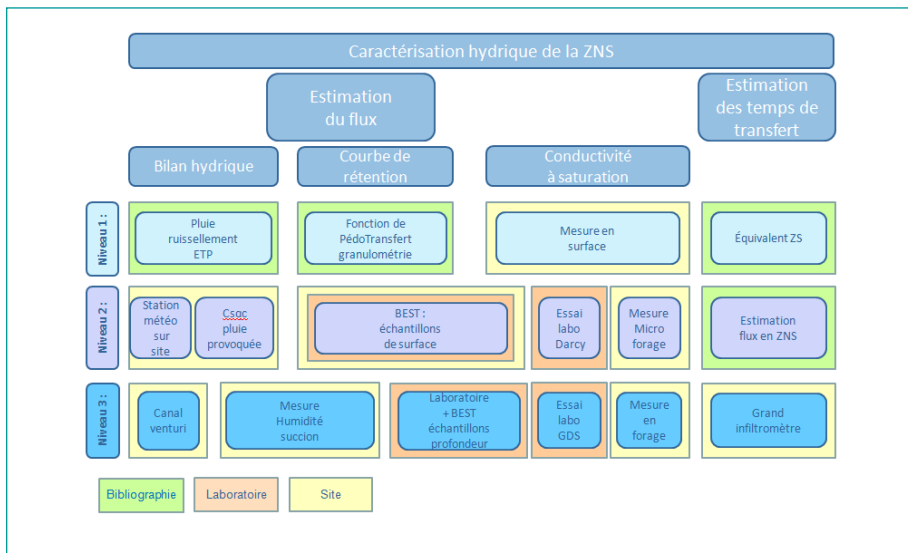
32



## Définition d'objectifs et de niveaux



## Définition d'objectifs et de niveaux



## Définition d'objectifs et de niveaux

	Paramètres à acquérir / expérience à mener	Informations fournies
Caractérisation hydrique pour écoulement en régime capillaire et/ou mixte (selon scénarios de déversement)	<u>Niveau 1</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Humidité sur échantillons, ETP site, Ruissellement sur estimation de pente</li> <li>– <math>h(\theta)</math> et <math>k(\theta)</math> par FPT sur granulométrie</li> <li>– <math>K_s</math> par FPT / BDD</li> <li>– Vitesse moyenne 1D à l'échelle ZNS (sans transitoire) avec bilan des infiltrations moyennes annuelles / <math>K_s</math></li> </ul>	Préparation à la modélisation des écoulements non saturés
	<u>Niveau 3</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>– ruissellement par canal venturi</li> <li>– acquisition de <math>h(\theta)</math> et <math>k(\theta)</math> in-situ {suction ; TDR}</li> <li>– <math>h(\theta)</math> et <math>k(\theta)</math> labo en imbibition et drainage</li> <li>– <math>K_s</math> par infiltration in-situ : forage, fosses</li> <li>– Essai d'infiltration et de traçage grand infiltromètre en adaptant la mise en œuvre au milieu et au scénario</li> </ul>	Amélioration de la compréhension des mécanismes : <ul style="list-style-type: none"> <li>– Vérification d'hypothèses de fonctionnement</li> <li>– Fonctionnement global de la ZNS (temps de séjour, atténuation)</li> </ul>

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

35

## 9 fiches techniques

Fiche technique n°1 : Méthode BEST sur SITE pour l'acquisition des paramètres des lois de sols ;

Fiche technique n°2 : Essai en forage ouvert à charge variable selon norme AFNOR NF X30-423 pour la détermination de la conductivité hydraulique à saturation ;

Fiche technique n°3 : Méthode Porchet KS

Fiche technique n°4 : Méthode Porchet en forage KS

Fiche technique n°5 : Essai d'infiltration simple anneau de grande dimension, couplé à une opération de traçage ; KS

Fiche technique n°6 : Profil instantané au laboratoire à l'aide de capteurs d'humidité et de suction pour obtention de la courbe de rétention ;

Fiche technique n°7 : Méthode BEST LABORATOIRE pour l'acquisition des paramètres des lois de sols ;

Fiche technique n°8 : Essai au perméamètre de Guelph KS

Fiche technique n°9 : Essai au perméamètre PERSAN® KS



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

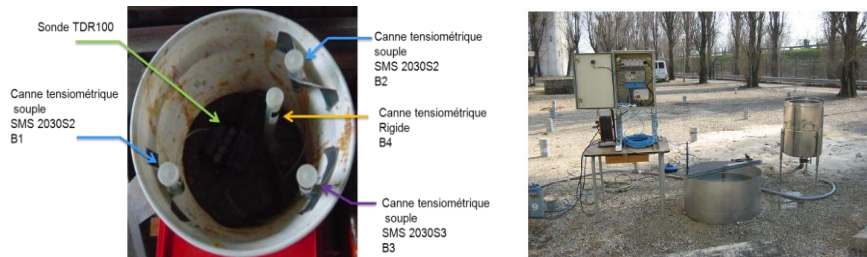
**Caphéine**

36

## Conclusion

### Les plus

- Recherche méthodes possibles pour matériaux alluvionnaires (Best Labo + courbe de rétention labo)
- Validation de la méthode BEST (conditions aux limites)
- Mise en œuvre essai grand infiltromètre « transat »



Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

37

## Conclusion 1/2

- Mise en œuvre de tests à différentes échelles spatiales temporelles
- Comparaisons de méthodes
- Elaboration d'une méthodologie
- Issues d'un REX de terrain

**Reste à améliorer la connaissance des flux en milieu granulaire type alluvion grossière et remblais**

Journée de restitution et d'échanges - 29 mars 2012

**Caphéine**

38