

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

## *Laboratoire Hydrogéochimie et Etudes de Sites*

# L'eau : un vecteur essentiel du transfert de substances radioactives et chimiques dans le milieu souterrain

CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France

Journées SFRP | Antoine Tognelli

3 ET 4 DÉCEMBRE 2014

# Migration d'une pollution dans le milieu souterrain: schéma conceptuel

## Identifier la source

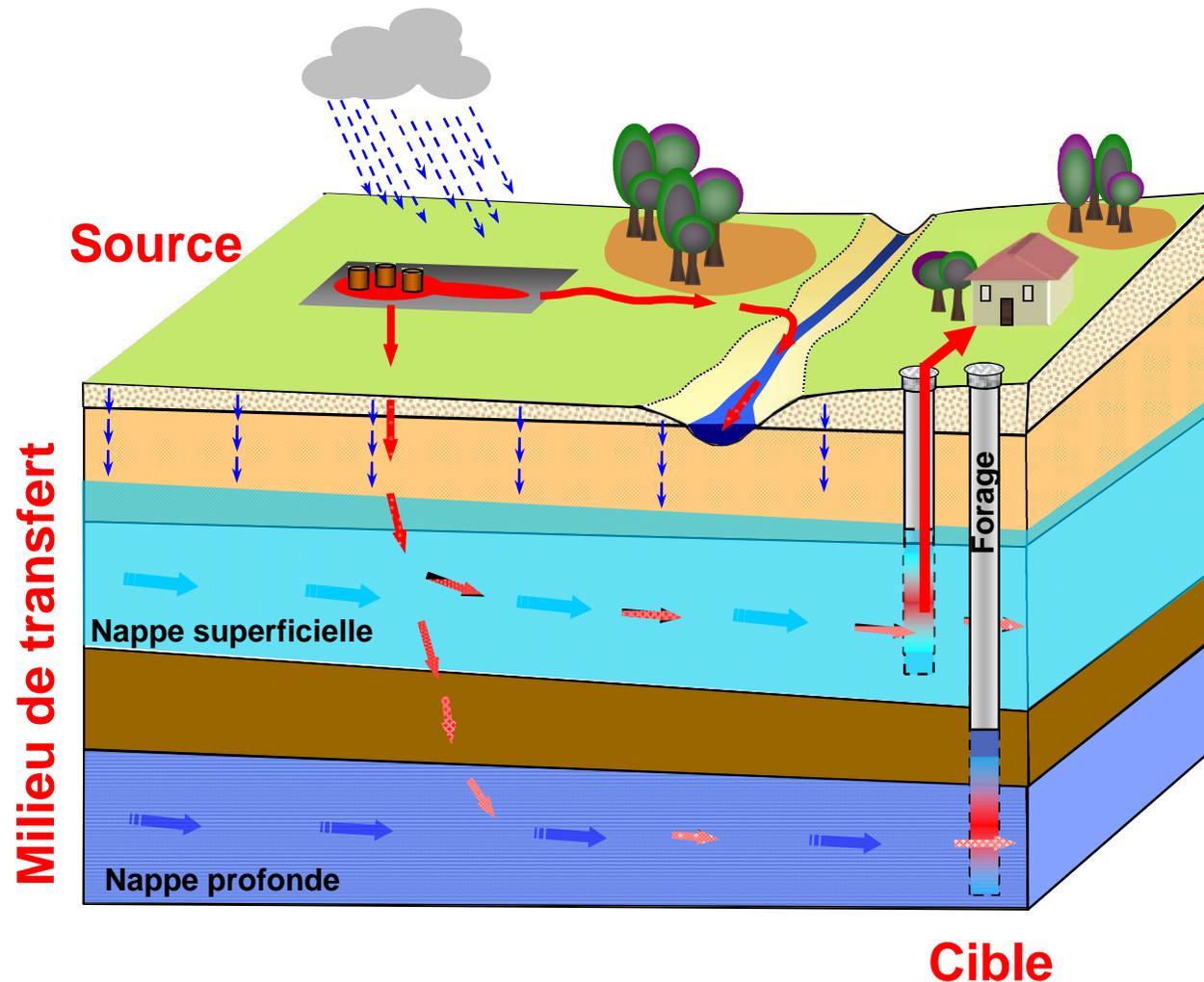
1. Mesurer in-situ
2. Cartographier
3. Prélever
4. Analyser en labo.
5. Quantifier

## Comprendre la dynamique du milieu de transfert

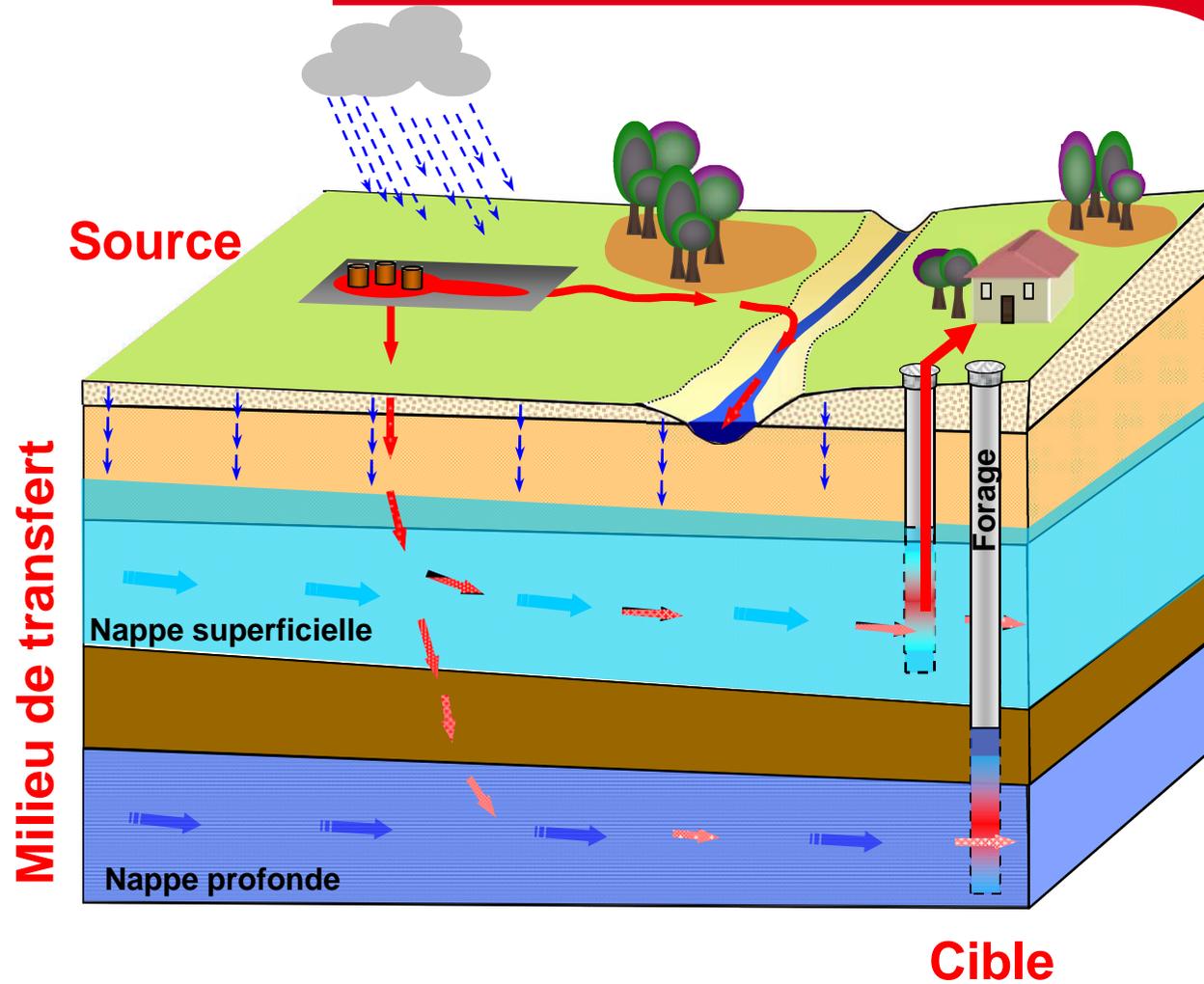
1. Explorer (forages)
2. Instrumenter/Mesurer
3. Interpréter

## Evaluer l'impact sur la cible

1. Identifier/localiser
2. Modéliser la migration de la pollution



# IDENTIFIER LA SOURCE DE POLLUTION



## Détection in-situ:

- Emetteurs gamma: *Inspector 1000* (Nal)



- Eléments traces métalliques: *NITON* (Fluorescence X)

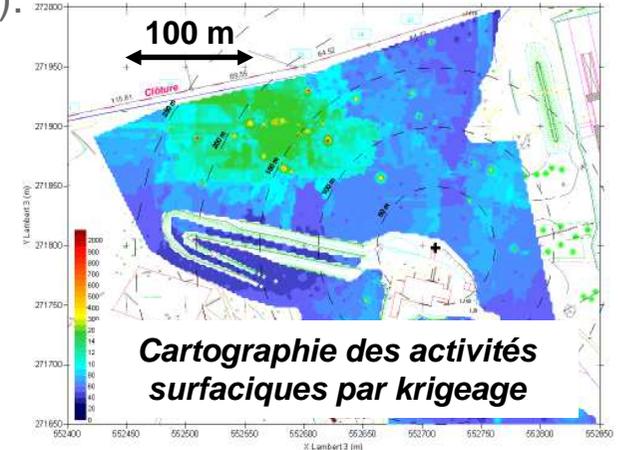


- Organiques: Kits colorimétriques



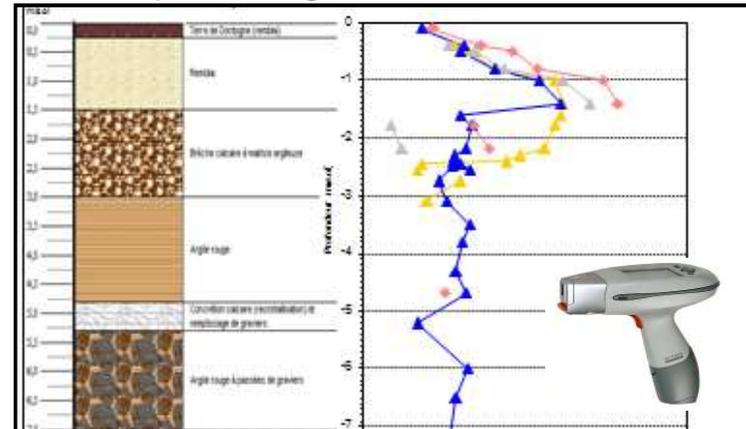
## Cartographies / profils verticaux:

- Géolocalisation (*DGPS*) et Interpolation des mesures (*Isatis-Géovariances*):



- Reconnaissances par forages

7 m



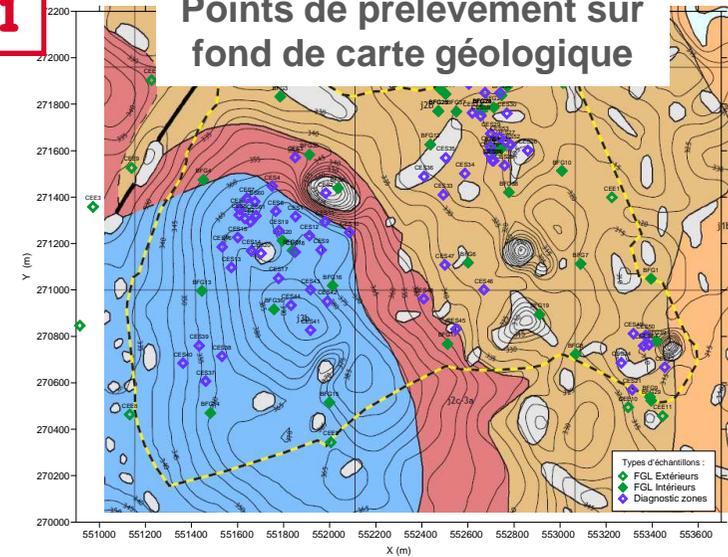
- Prélèvements et analyses en laboratoire

## Fond géochimique local ou marquage ?

1. Localisation des points de prélèvement sur un fond de carte géologique
2. Analyses statistiques des mesures et détermination de la signature naturelle des sols en fonction du substrat (calcaires, argiles,...)
3. Détermination des pollutions avérées

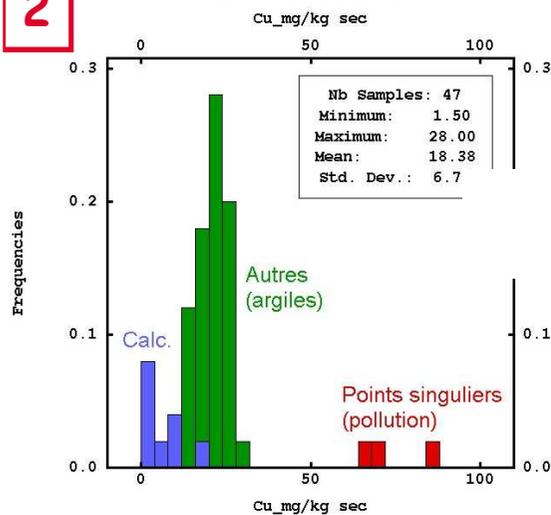
1

Points de prélèvement sur fond de carte géologique

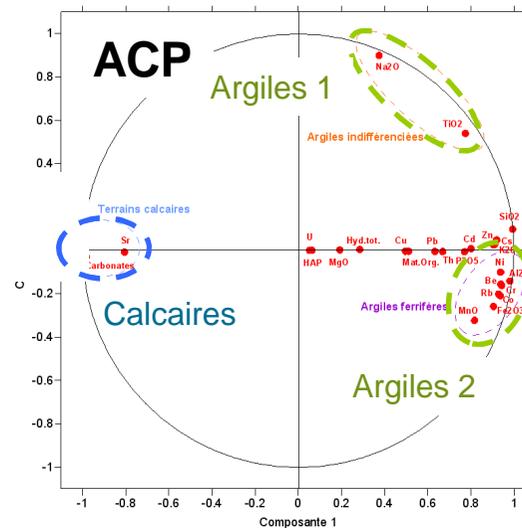


2

Histogram (Cu\_mg/kg sec)



Traitements statistiques

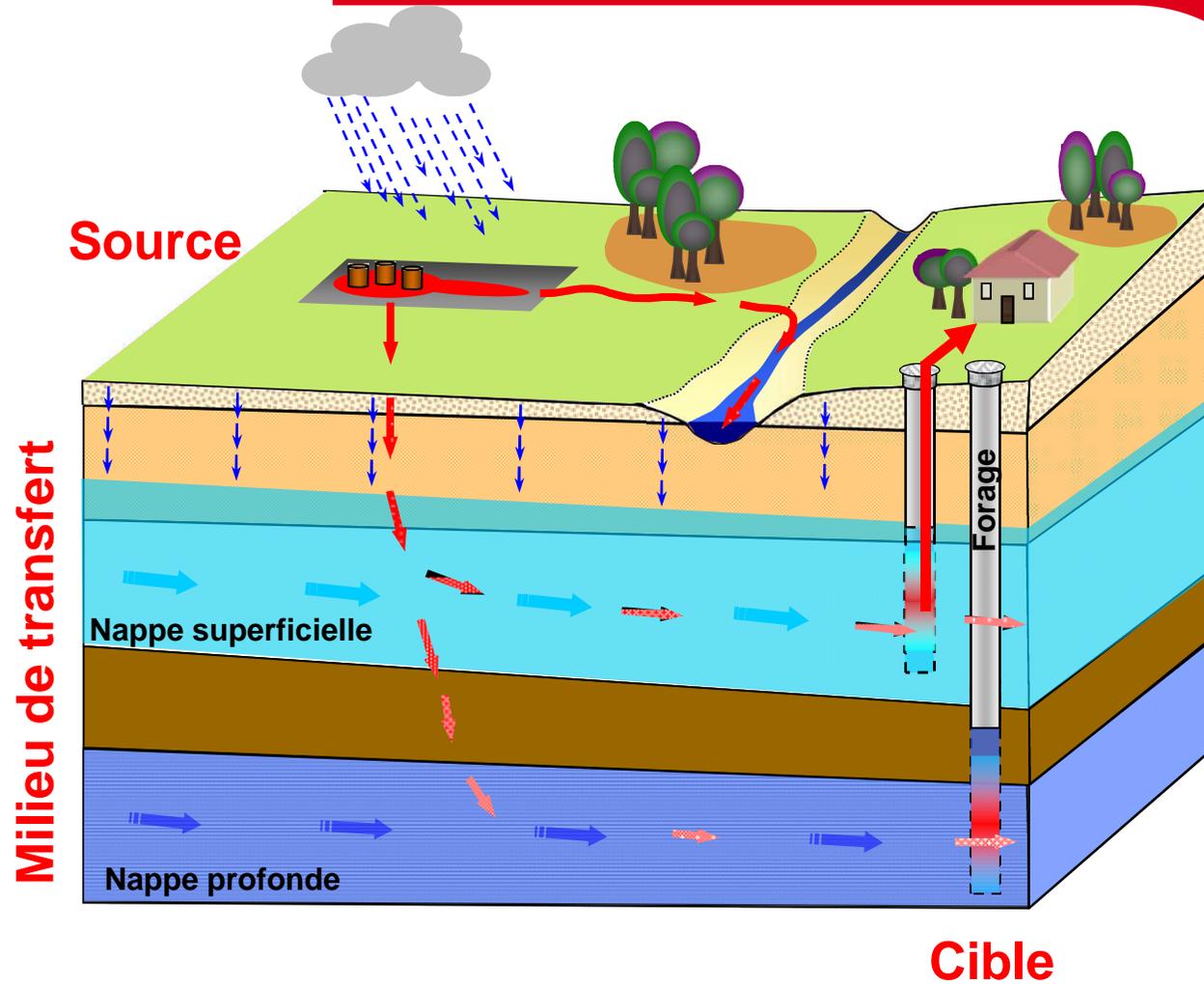


Détermination du fond géochimique naturel local

=> Mise en évidence de pollutions?

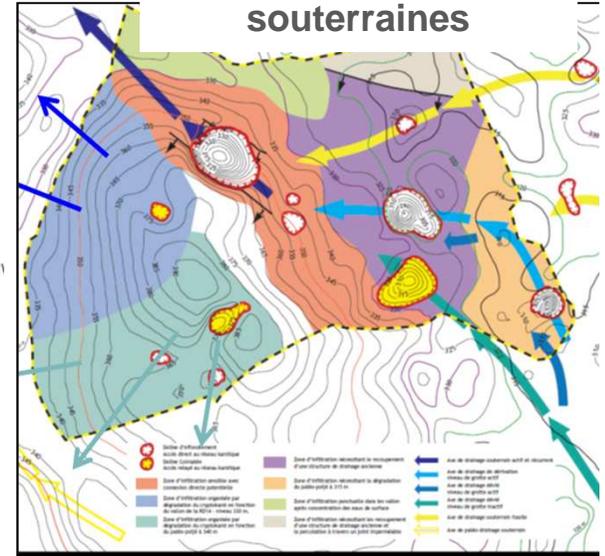
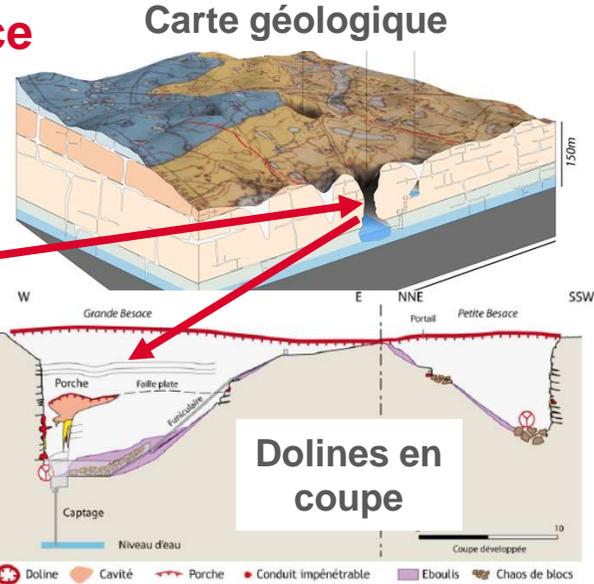
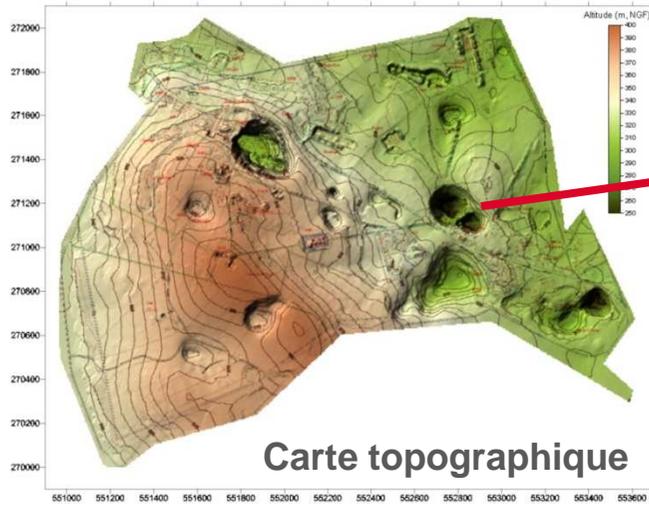
■ FGL (argiles) ■ FGL (calcaires) ■ Anomalies (pollutions)

# COMPRENDRE LA DYNAMIQUE DU MILIEU DE TRANSFERT



## Indices surfaciques de circulations souterraines

### 1 Reconnaissances de surface



### 2 Reconnaissances par forages carottés

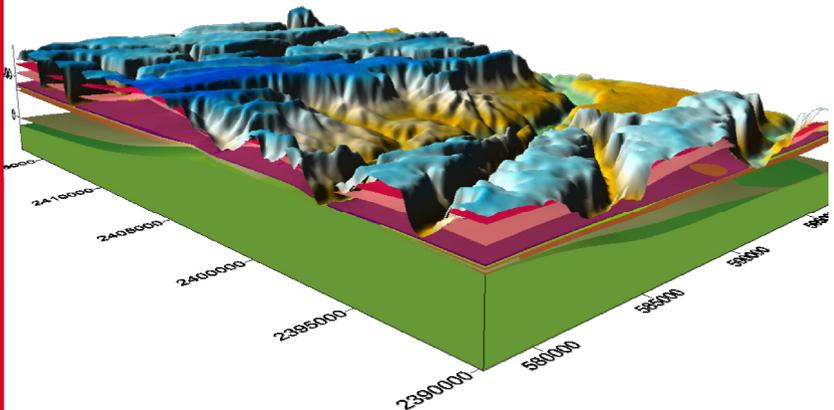


Description **PM-SC25bis**

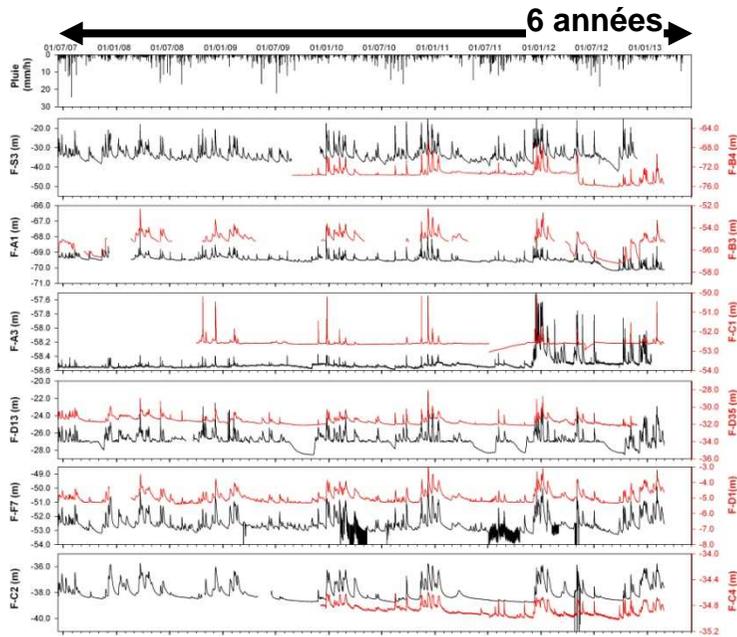
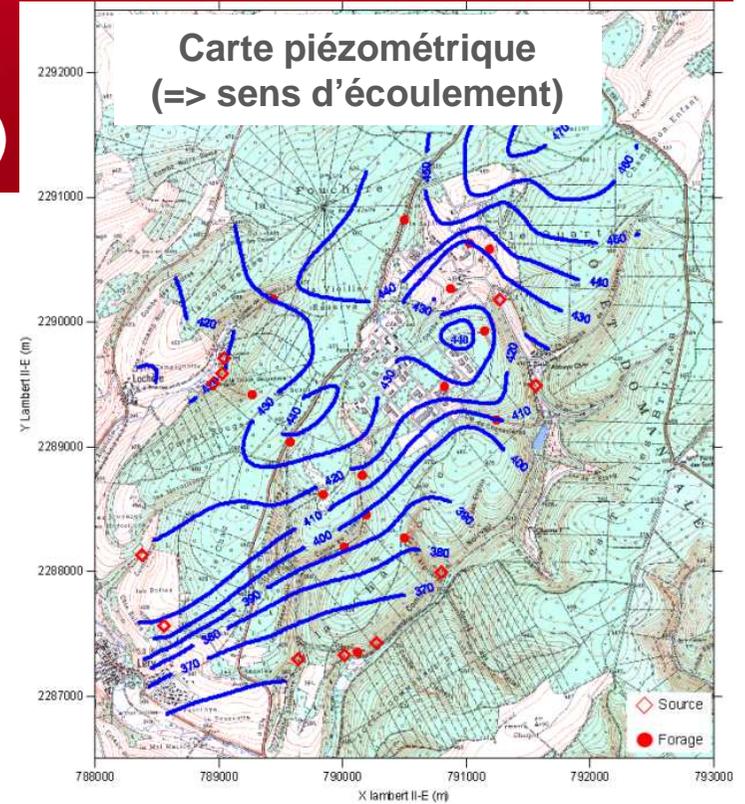
Prof.	Lithologie	Taux de Fracturation	Etage
0	Q Colluvion	0,0	Quaternaire
10	C6a Craie blanche tendre	0,0	Campanien inf.
20	C5b-c Craie compacte		Santonien sup.
30	C5a Craie compacte homogène		Santonien inf.
40	C4c Craie blanche tendre et compacte	100,0	Coniacien sup.
50	C4b Craie blanche tendre		Coniacien moy.
60	C4a Craie blanche tendre		Coniacien inf.
70	C3c-C4a		Turonien sup.-Coniacien inf.

**Log stratigraphique**

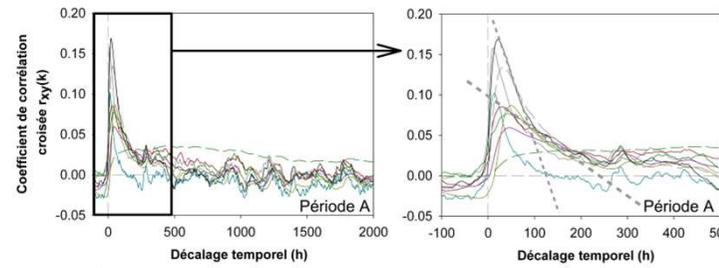
### 3 Carte géologique multicouche



## 1 Acquisition de mesures hautes fréquences

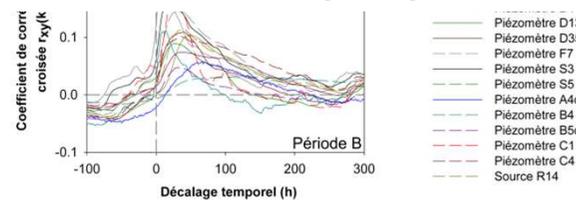


## 2 Exploitation des résultats



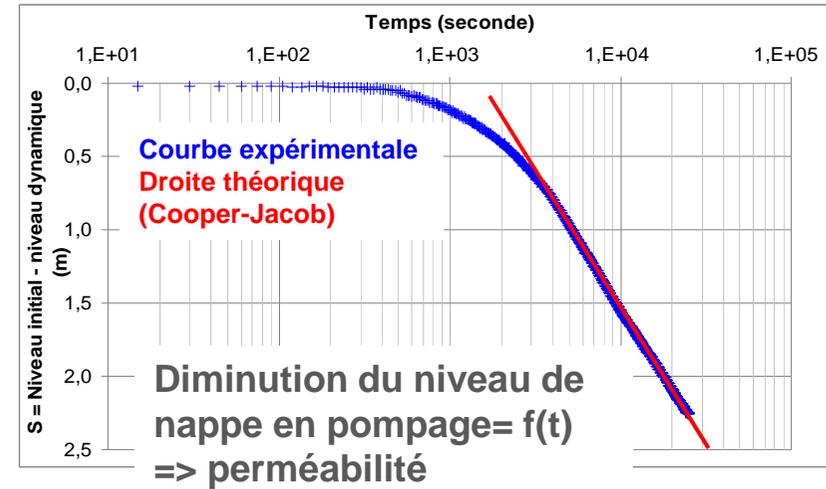
Delbart et al, 2014, Temporal variability of karst aquifer response time established by the sliding-windows cross-correlation method, Journal of Hydrology.

### Corrélations croisées pluie-piézométrie

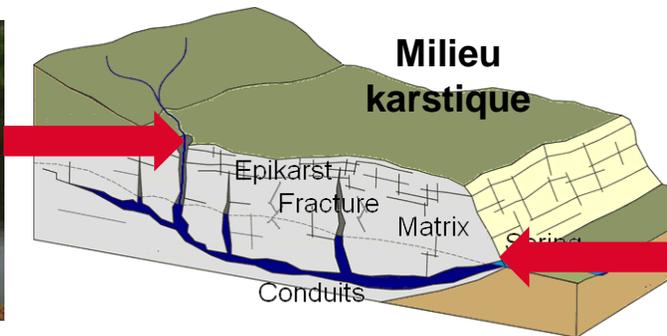


**Temps de transfert de la pluie vers la nappe < 50 h (ZNS=50 m)**

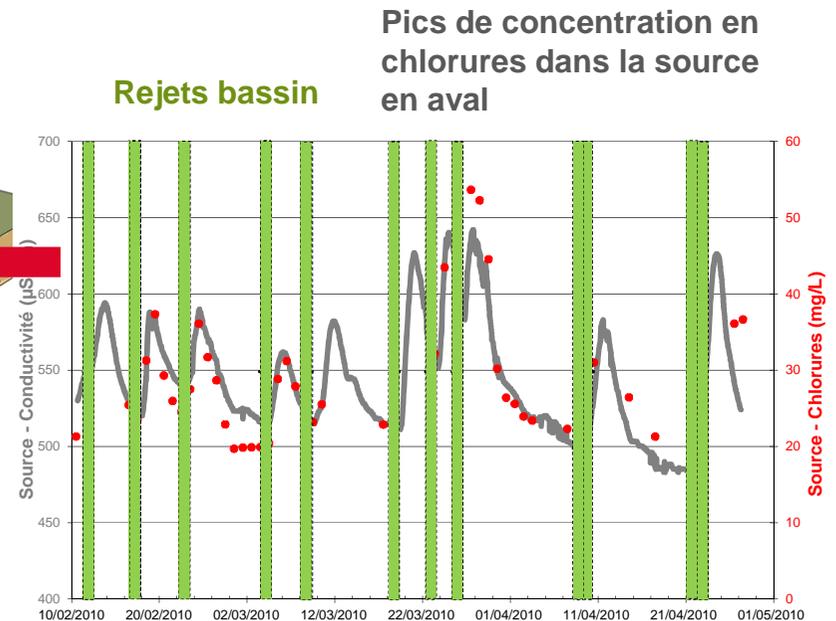
## 1 Mesure de la perméabilité des aquifères



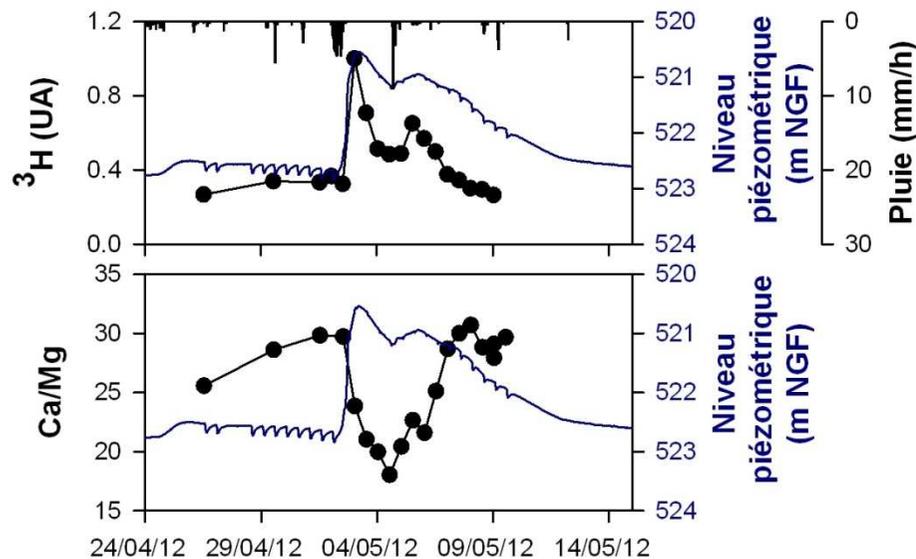
## 2 Mesure de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines



L'eau souterraine parcourt  
1,5 km en 24h.  
Taux de dilution: 20

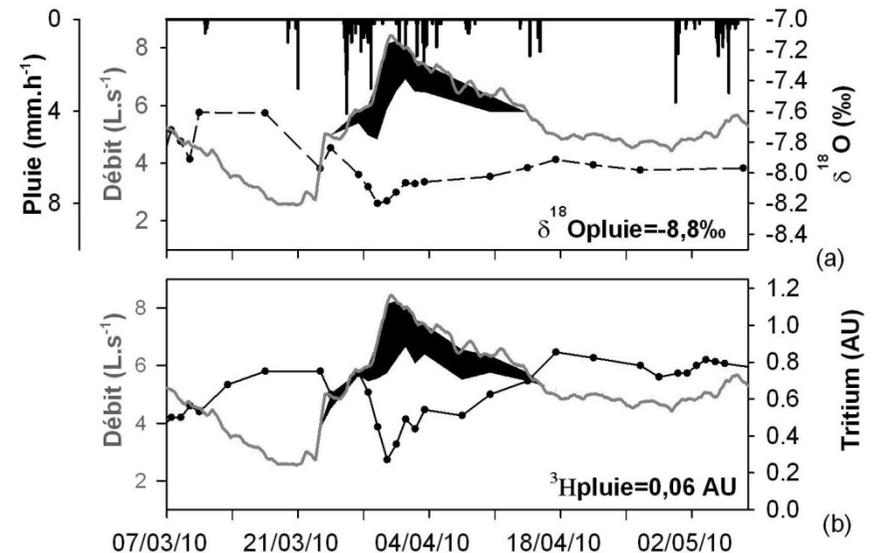


**L'augmentation de l'activité en tritium dans le forage est corrélée à l'augmentation du niveau de nappe**

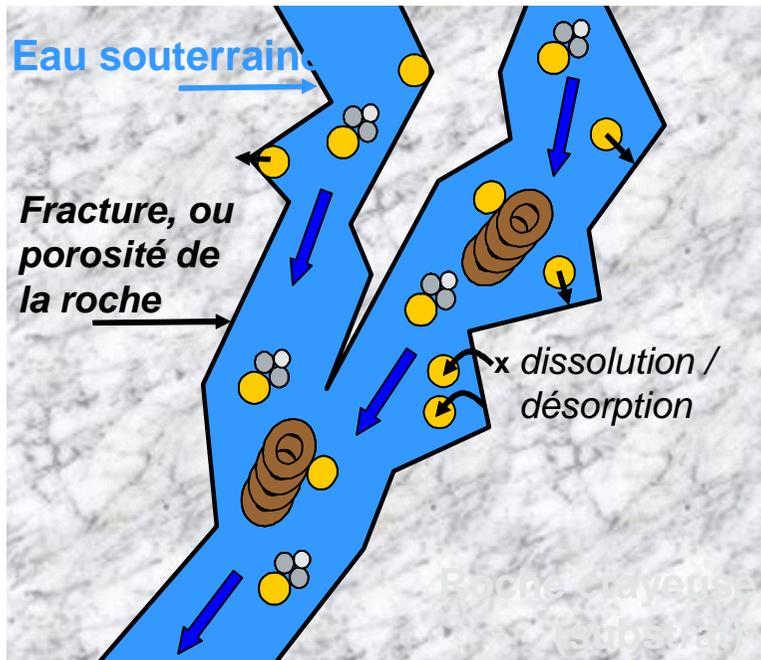


**=> Remobilisation d'eau de la zone non saturée marquée en tritium**

**La diminution de l'activité en tritium dans la source est corrélée à l'augmentation du débit de la source**



**=> Arrivée d'eau de bassin moins marquée en tritium**



**Terme Source** : pépite d'uranium métal oxydé  $UO_2$

**Spéciation** (pH neutre et matrice carbonate) : Très majoritairement :  $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ ,  $Ca_2UO_2(CO_3)_3$

**Mobilité** de l'uranium gouvernée par  $Ca_2UO_2(CO_3)_3$  et potentiellement complexe colloïdal

**Rétention** forte de  $UO_2(CO_3)_2^{2-}$  sur les surfaces minérales

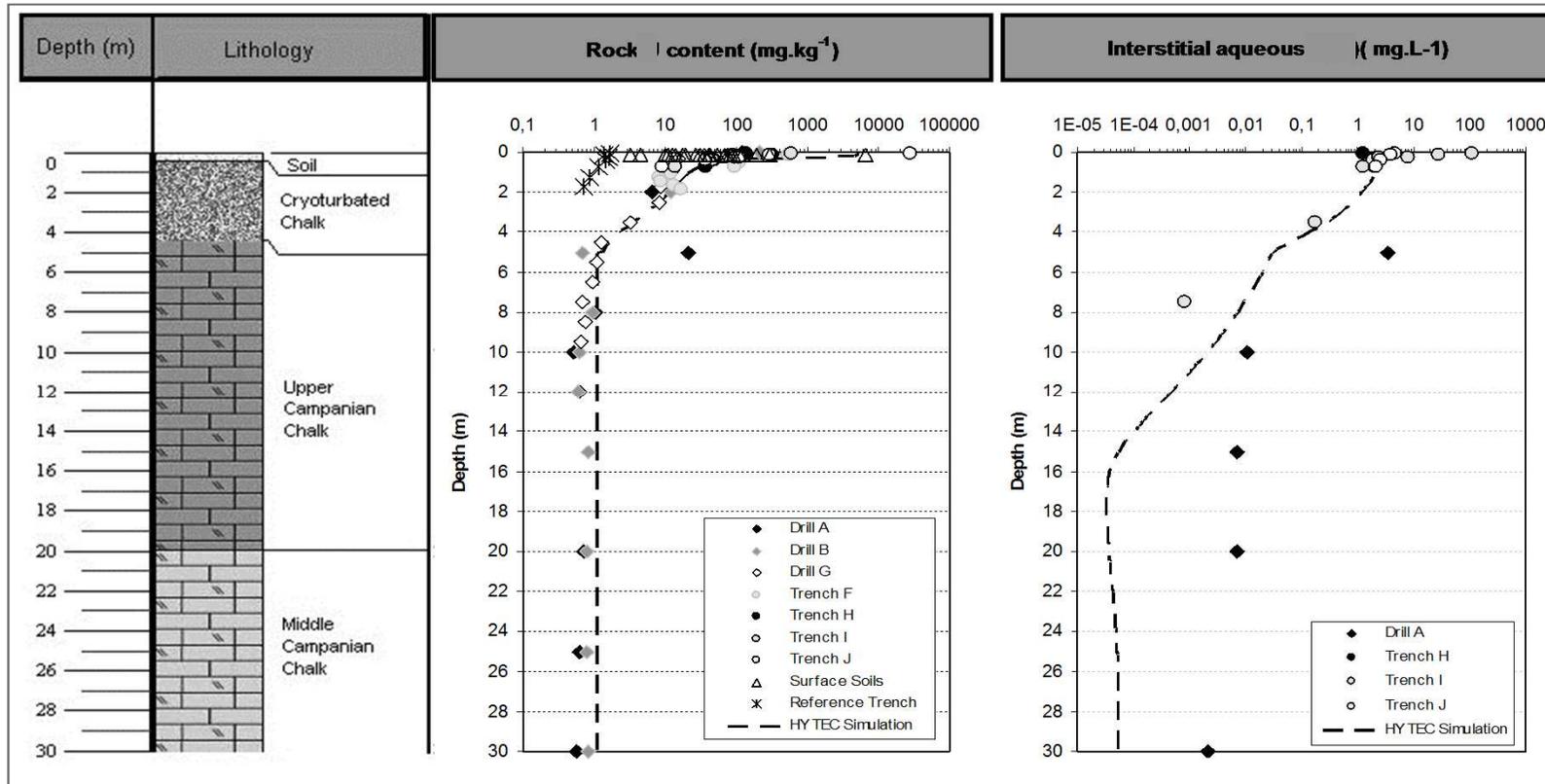
*Transport of radionuclides in an unconfined chalk aquifer inferred from U-series disequilibria. Geochim. Cosmochim. Acta, 70, 5437 (2006). Hubert, A., Bourdon, B., Pili, E. et Meynadier, L*

*Investigation of U-colloid interactions in soil by dual field-flow fractionation/capillary electrophoresis hyphenated with inductively coupled plasma-mass spectrometry. Talanta, 85: 2504 (2011). Claveranne-Lamolère, C., Aupiais, J., Pointurier, F. et Potin-Gautier, M.*

*Colloidal transport of uranium in soil: size fractionation and characterization by field-flow fractionation-multi-detection. Journal of Chromatography A, 1216: 9113 (2009). Claveranne-Lamolère, C., Aupiais, J., Pointurier, F. et Potin-Gautier, M.*

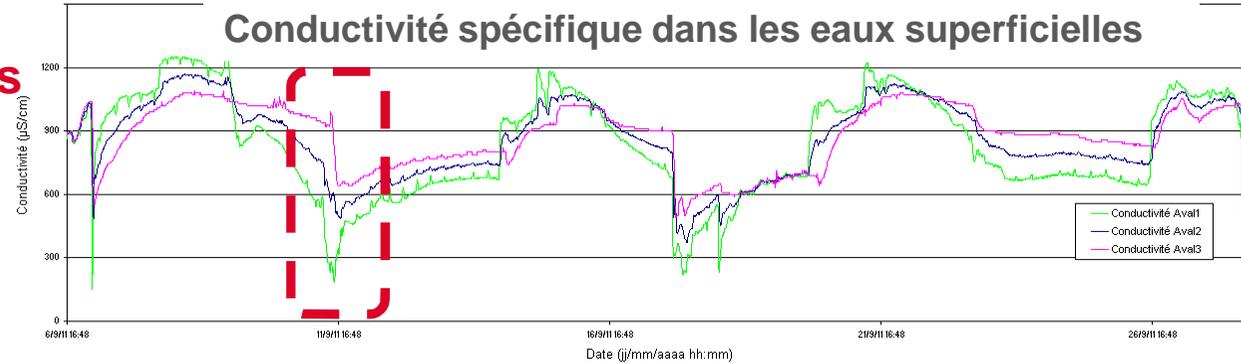
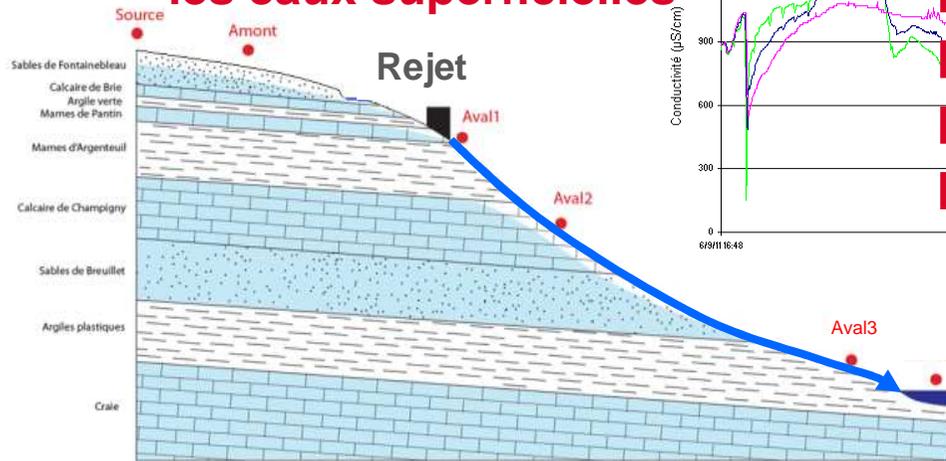
*Assessing Migration of Uranium through Chalk Substrate: Field Study and Reactive Transport Modelling. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Environmental Pollution and Remediation. Montreal, August 2012. P. Crancon et al*

## Modèle de migration en champs proche avec rétention dans la craie



**Mesure et modélisation sont cohérentes aussi bien dans la phase solide que dans la phase liquide (eau interstitielle ZNS)**

## 1 Vitesse de transfert dans les eaux superficielles

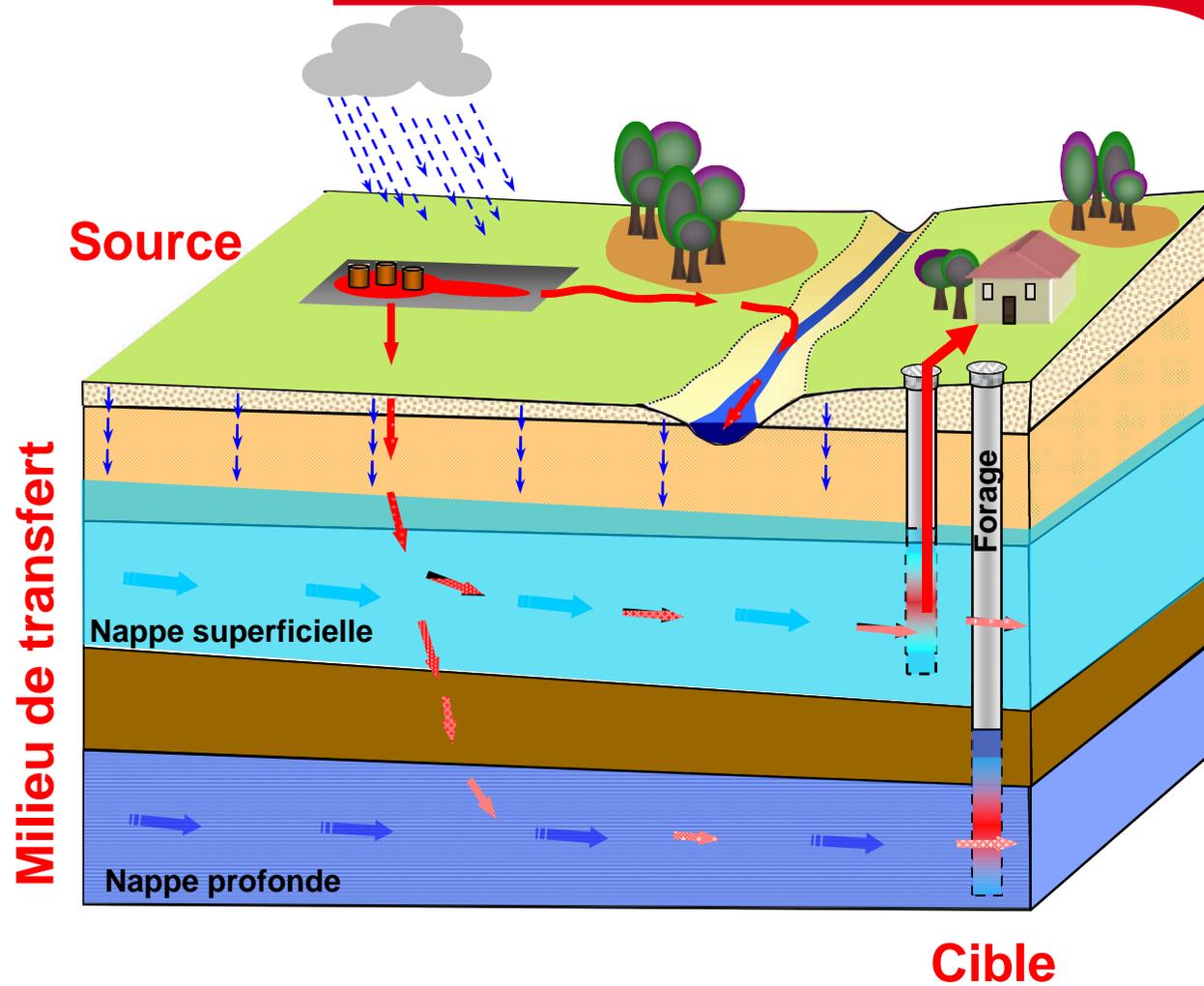


**=> Temps de transfert vers la rivière avale : 40 à 120 min**

## 2 Station de prélèvement automatique

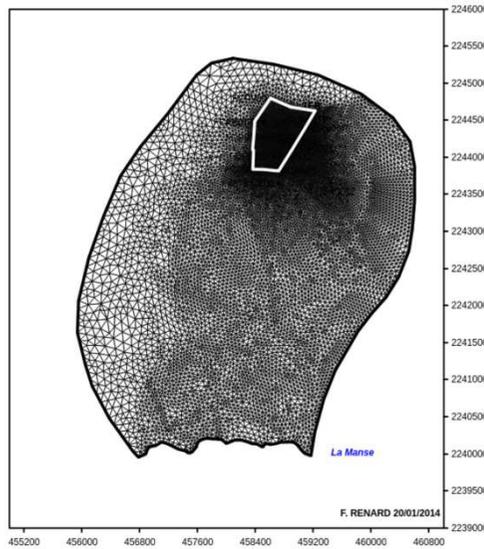


# EVALUER L'IMPACT SUR UNE CIBLE

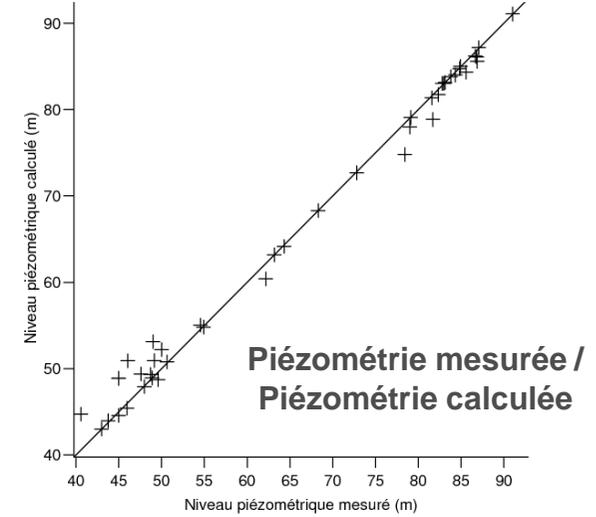
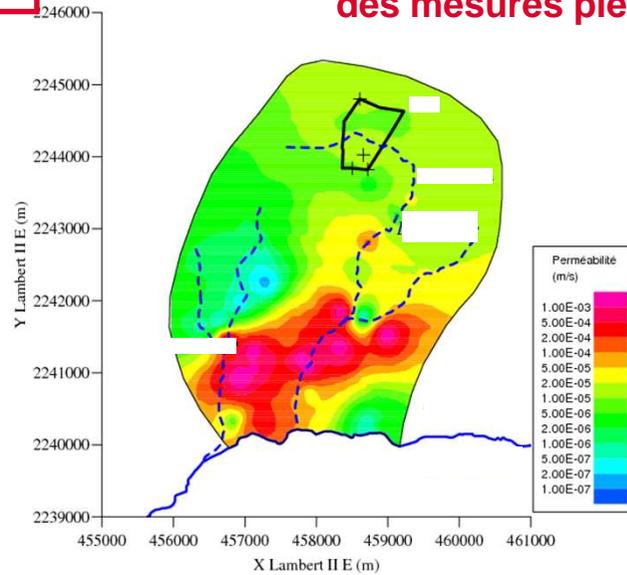


# VALIDER UN MODELE NUMERIQUE A PARTIR DES OBSERVATIONS ET MESURES DE TERRAIN

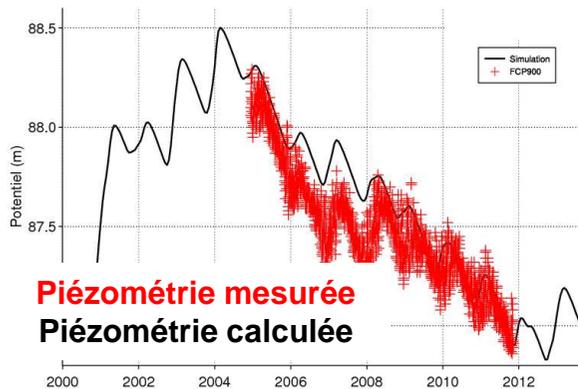
## 1 Maillage de la zone d'étude



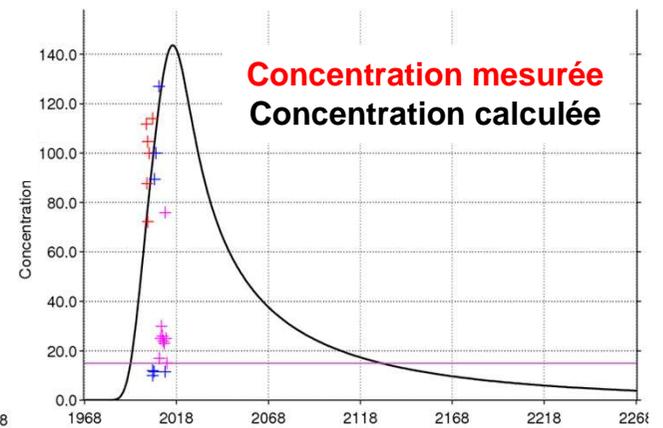
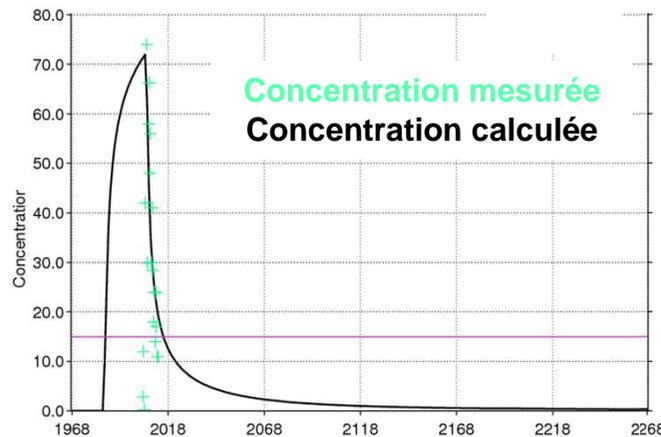
## 2 Détermination du champ de perméabilité du modèle par recalage des mesures piézométriques (permanent)



## 4 Détermination de la porosité efficace de l'aquifère par recalage des mesures piézométriques (transitoire)

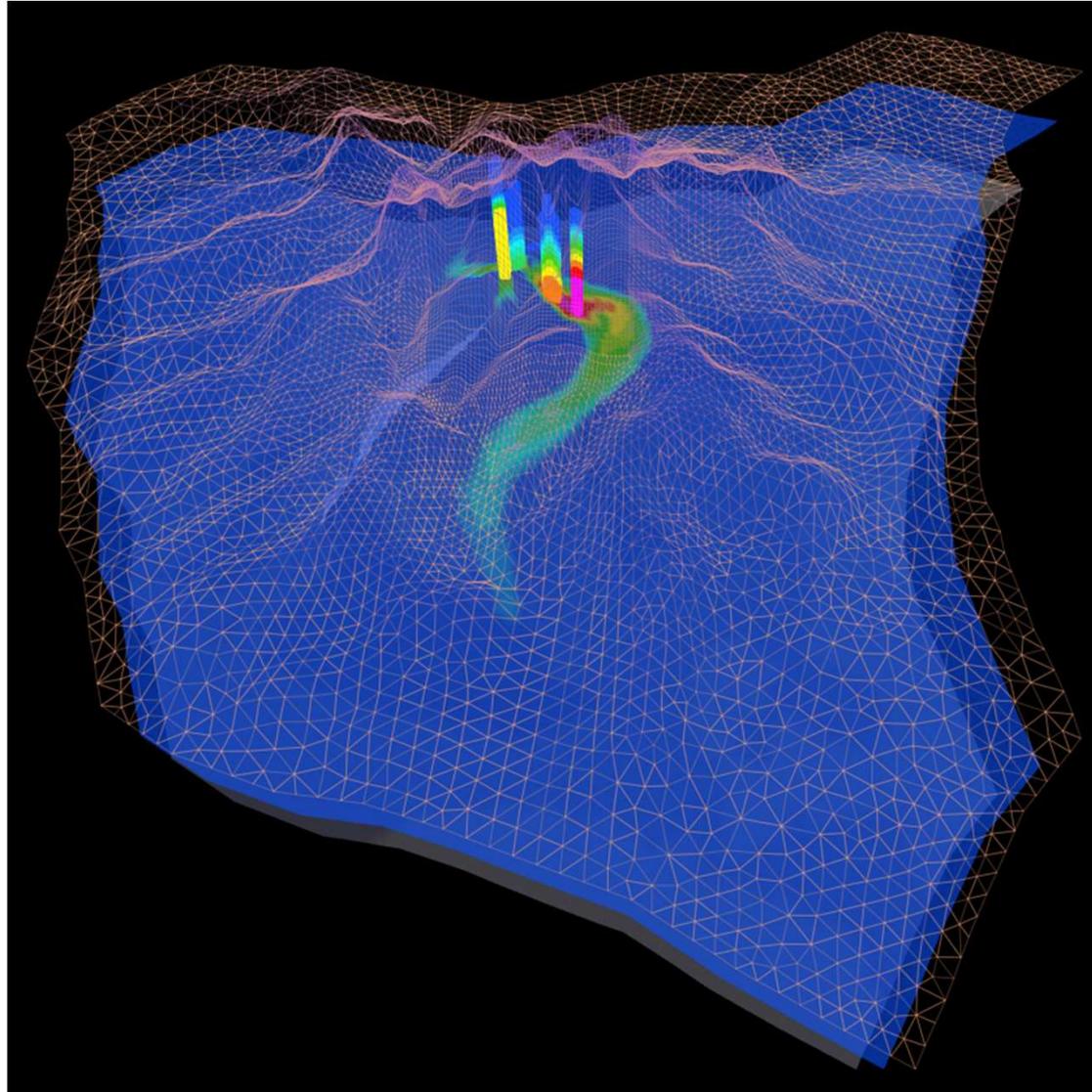


## 5 Validation du modèle de transport souterrain sur les mesures effectuées dans les piézomètres



# EVALUER LES ACTIVITES EN NAPPE A LONG TERME

Evolution de l'activité en radionucléide dans la nappe en fonction du temps



## Les 2 composantes du milieu souterrain pour le transfert de polluants:

### L'hydrodynamique

- Identifier les aquifères potentiellement impactés par la pollution (bibliographie, reconnaissances de surface et souterraines).
- Mesurer les paramètres de la dynamique de l'eau dans le milieu souterrain (perméabilité, porosité efficace, gradient hydraulique, paramètres spécifiques de la zone non saturée,...).
- Valider un modèle numérique hydrodynamique à partir des mesures expérimentales (piézométrie, débit de source, débit de rivière,...).

### L'hydrochimie

- Caractériser la géochimie naturelle des eaux de l'aquifère étudié (analyses de carottes de roches, prélèvements d'eau souterraine) et **modéliser** le fond géochimique « eaux »)
- Mesurer les paramètres qui conditionnent les équilibres entre les radionucléides et le milieu souterrain (solubilité, spéciation, sorption/desorption, colloïdes,...)
- Valider un modèle numérique « géochimie-transport » à partir des mesures expérimentales (analyses de sols ou de carottes de roche, analyses d'eau,...)

**MODELISER L'IMPACT**  
**(codes de calcul: METIS, THYRSIS, HYTEC,...)**

# MERCI

---

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives  
Centre de Bruyères-le-châtel | 91290 ARPAJON Cedex  
T. +33 (0)1 69 26 46 50 | F. +33 (0)1 69 26 70 65

Direction des applications militaires  
Département analyse, surveillance, environnement  
Service radioanalyse, chimie, environnement

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019