

Webinaire CFH – 5 Janvier 2021

# Caractérisation des écoulements et propriétés de subsurface par tomographie hydraulique : Applications en milieux hétérogènes

**Pierre Fischer – ATER 20/21**



## Formation

- 2015-2018: Doctorat Univ. Rouen Normandie  
A. Jardani et N. Lecoq



- 2011-2014: Diplômes Ingénieur + Master  
ENGEES  
ENSG



- 2009-2011: CPGE BCPST  
Lycée Henry Poincaré

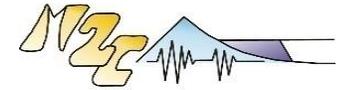


## Expériences professionnelles

- 2020-2021: ATER  
UMR HSM



- 2015-2020: Doctorant/Post-doctorant  
UMR M2C



- 2014: Stages ingénierie + recherche  
IDDEA  
UMR Géorressources



- 2013: Stages ingénierie et recherche  
APRONA  
Univ. Galway

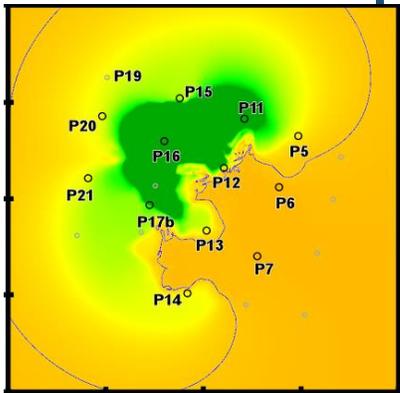
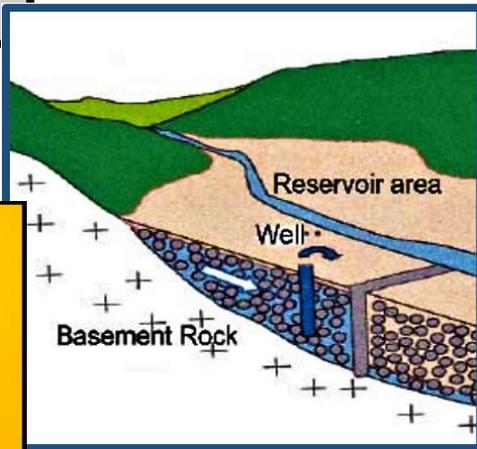
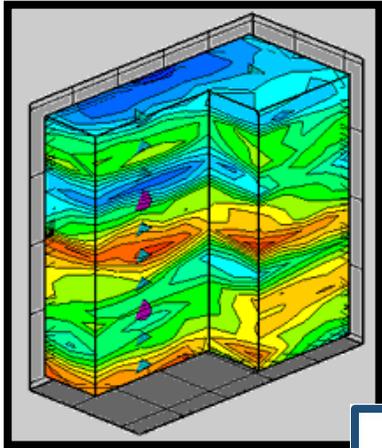


## Caractérisation spatiale des milieux de subsurface

↳ Tomographie hydraulique

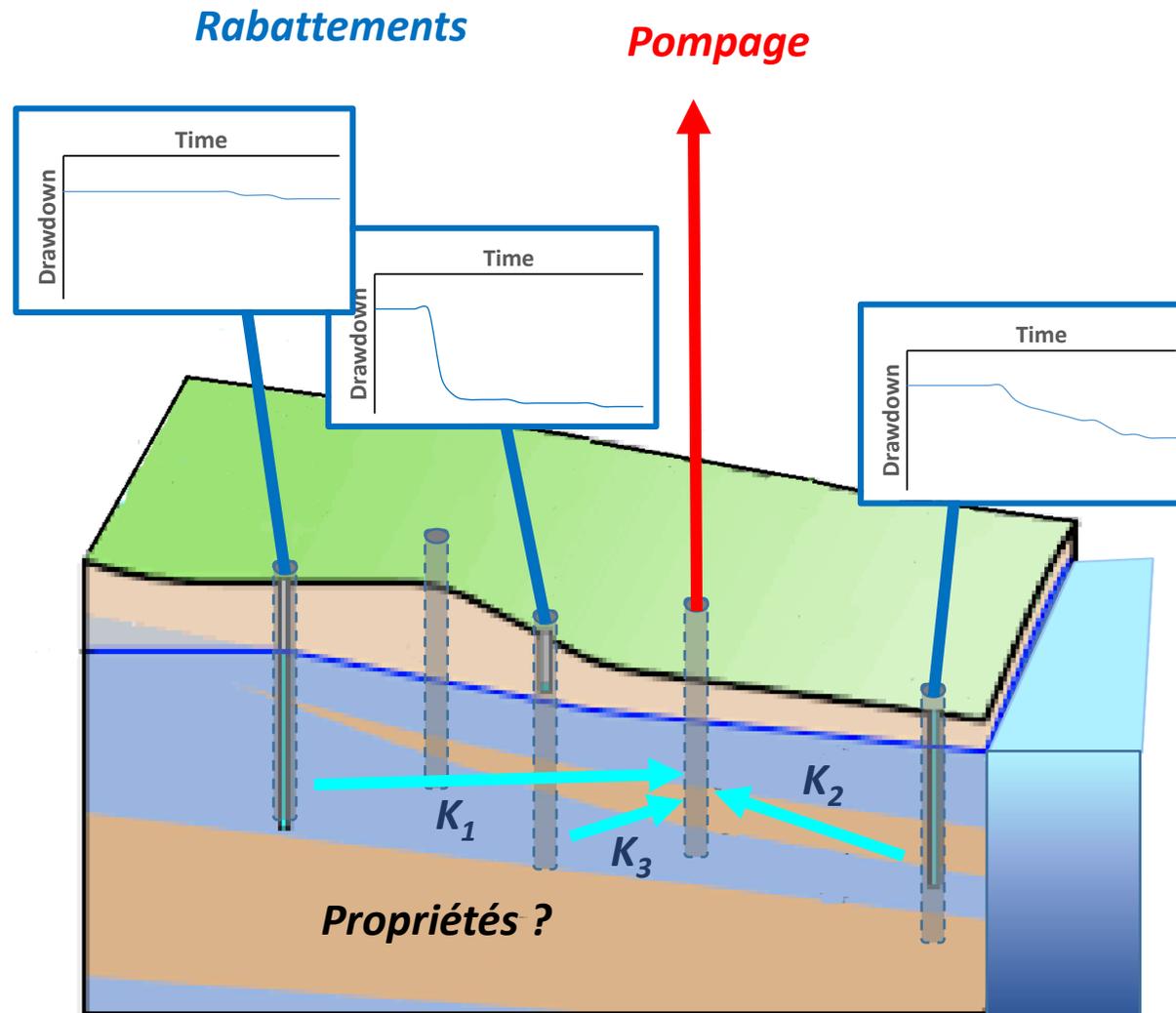
↳ Techniques d'imagerie des milieux hétérogènes  
+  
Réponses hydrodynamiques des milieux

↓  
**Ecoulements dans la zone critique**



## Caractériser spatialement les propriétés hydrauliques d'un aquifère

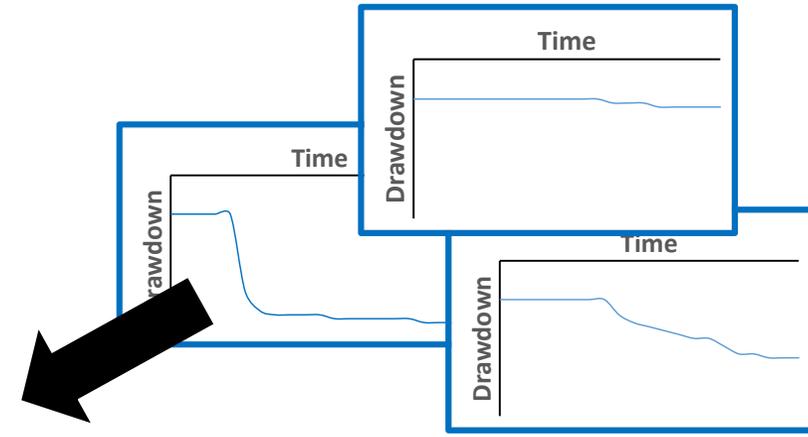
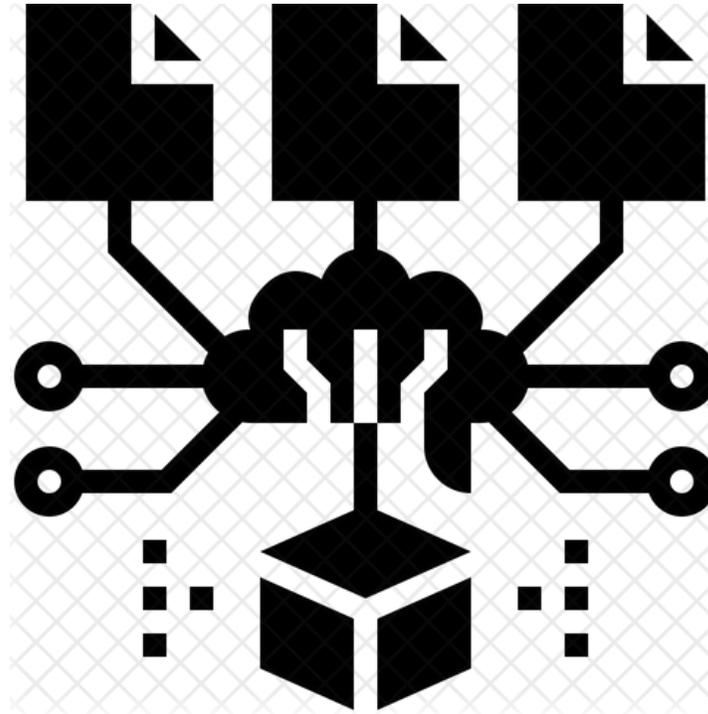
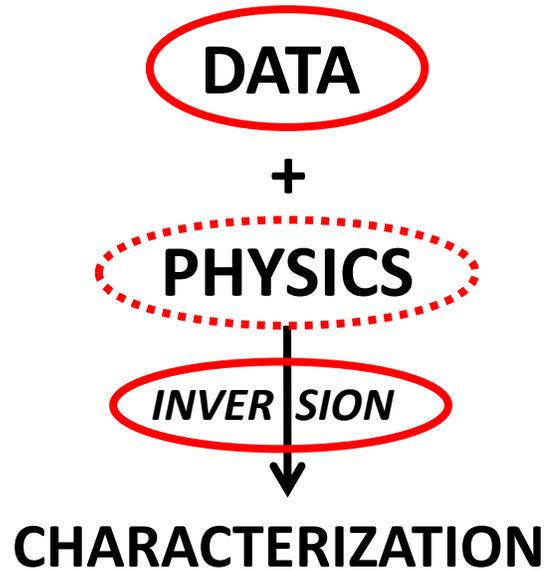
*Disposition « classique »*



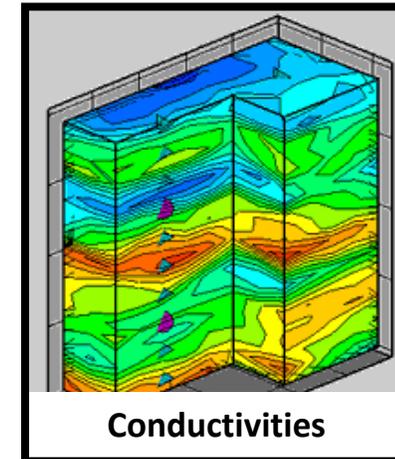
- Une sollicitation (pompage)
- Interprétation séparée des réponses (rabattements)
- Valeurs ponctuelles de  $K$



## Tomographie hydraulique: imagerie par inversion

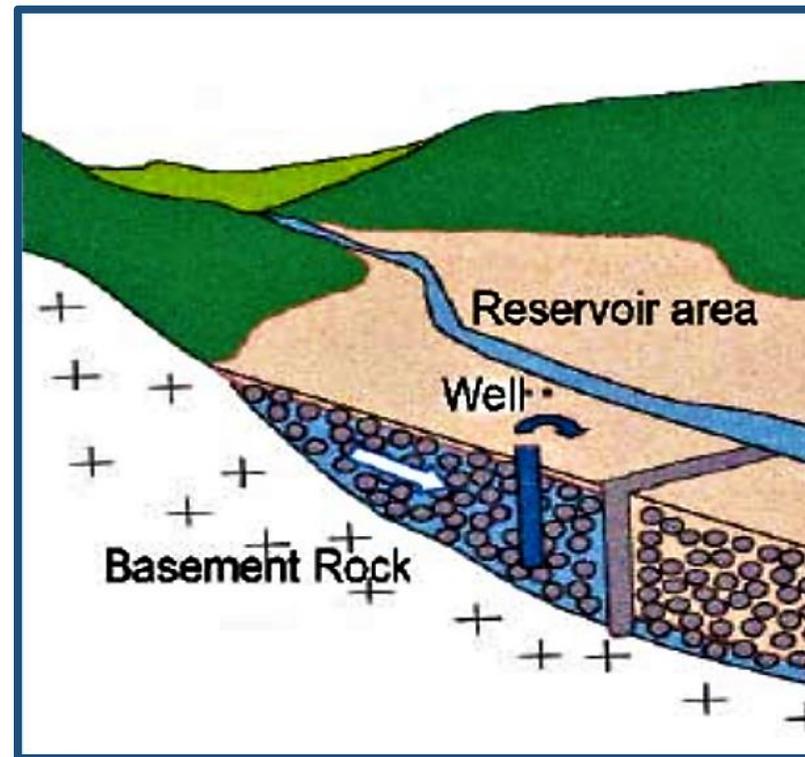


$$S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot (K \nabla h) = q$$



(source: Yeh and Liu 2000)

## Caractériser les écoulements de subsurface



(source: VSF, 2006)

## Caractérisation active d'un milieu hétérogène contaminé

Hydrogeology Journal (2020) 28:2713–2726  
<https://doi.org/10.1007/s10040-020-02233-8>

PAPER

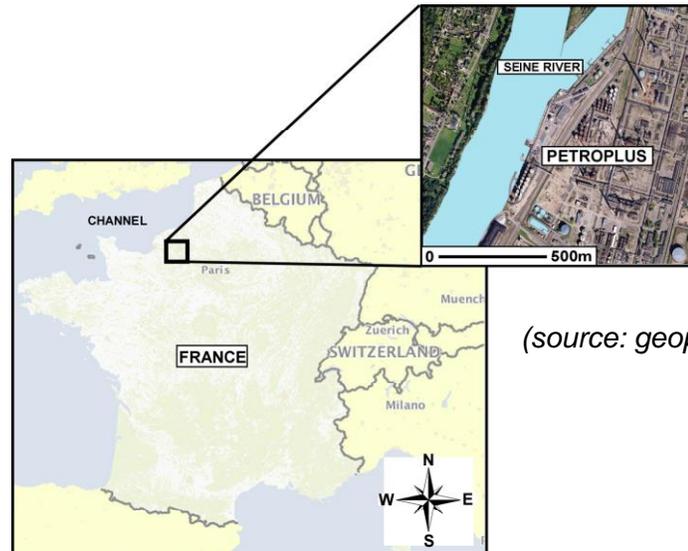
Imaging the hydraulic properties of a contaminated alluvial aquifer perturbed with periodic signals

**Collaboration ADEME / M2C / Valgo**



### Site d'étude

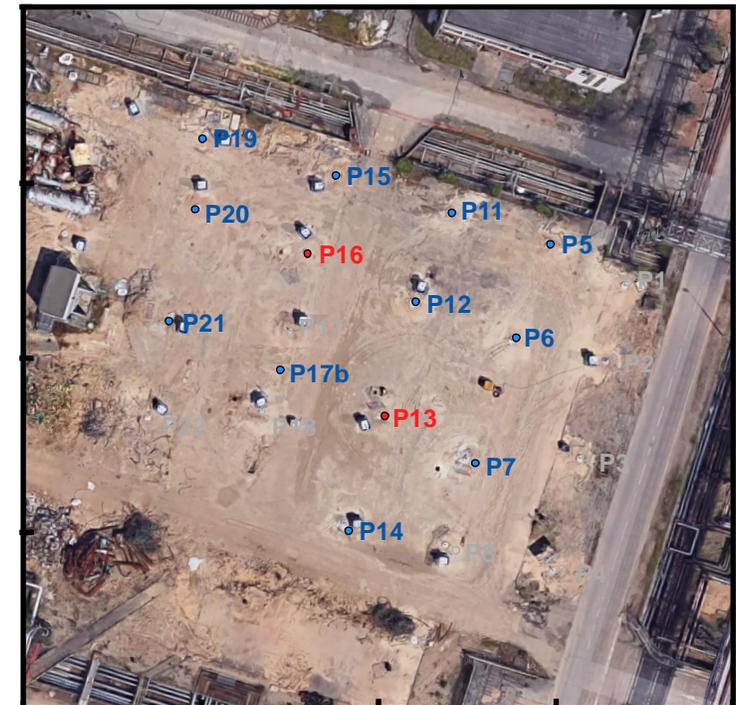
- Site en décontamination (Valgo)
- Près de Rouen
- 100 x 100 m<sup>2</sup>



(source: geoportail.fr)

### Géologie / Hydrogéologie

- Sables et limons / Parties à silex sur 10 m
- Nappe semi-captive
- Influence forte de marée de Seine
- 13 forages



## Caractérisation active d'un milieu hétérogène contaminé

### Propriétés à caractériser

- Diffusivités
- Méthode Quasi-Newton



### Données

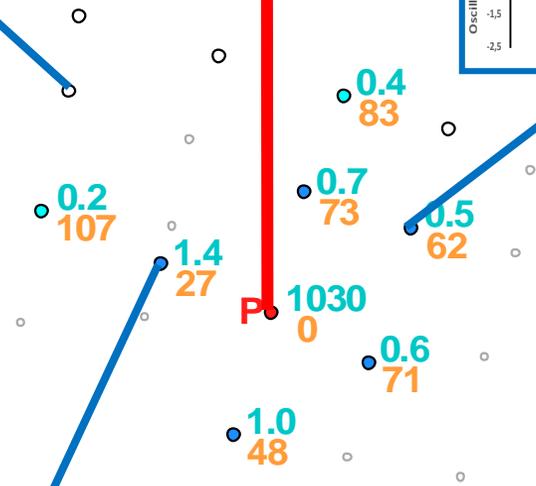
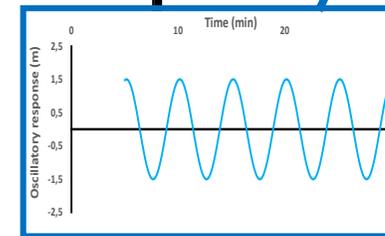
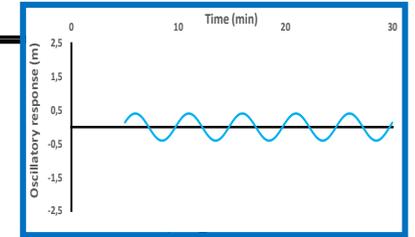
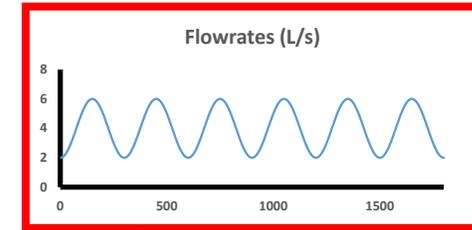
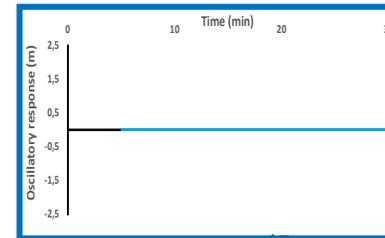
Pompages à débits oscillatoires:

- 2 forages de **pompages**
  - ↳ 2 fréquences de signaux (5 et 10 min)
- Mesures de réponses dans 13 piézomètres
  - ↳ extraction **réponses oscillatoires**



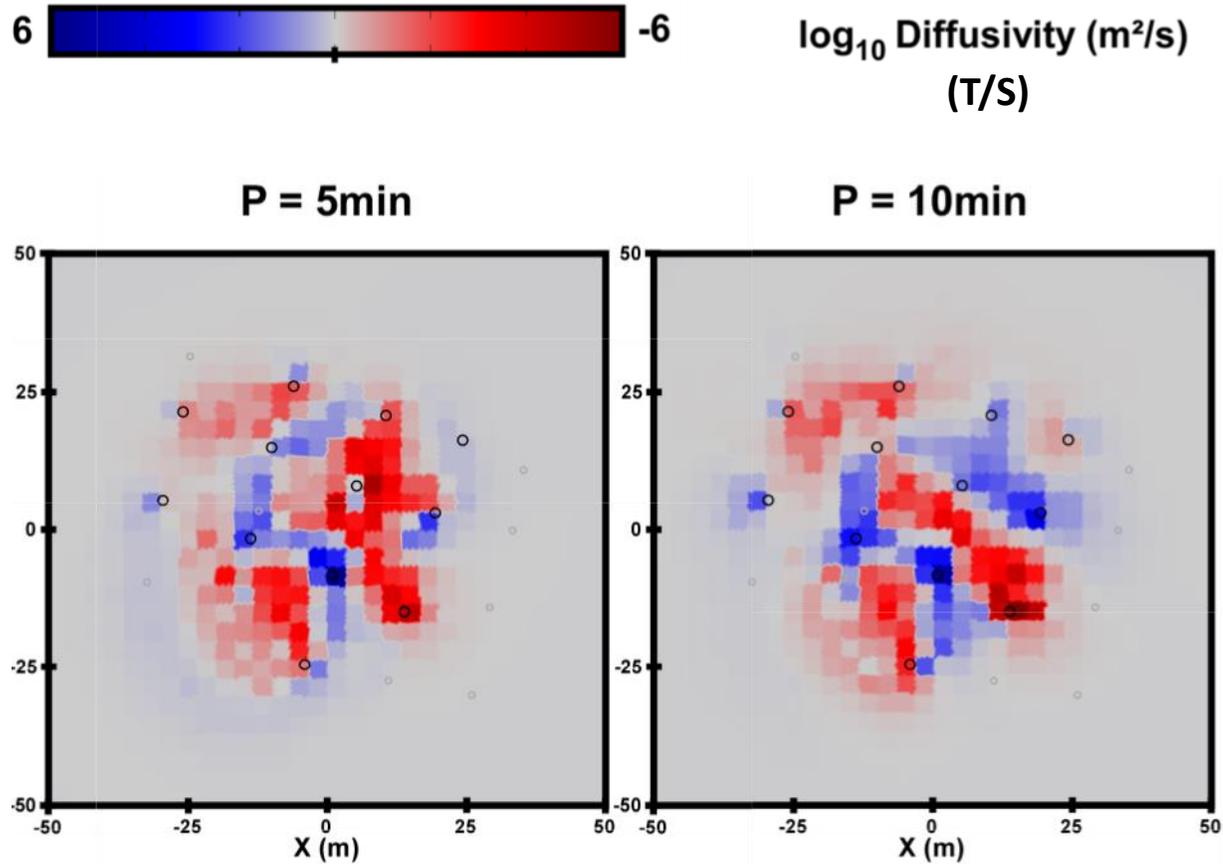
### Modèle physique

- Modèle **2D** équivalent milieu poreux
- Ecoulement de **Darcy** aquifère confiné
  - ↳ domaine fréquentiel

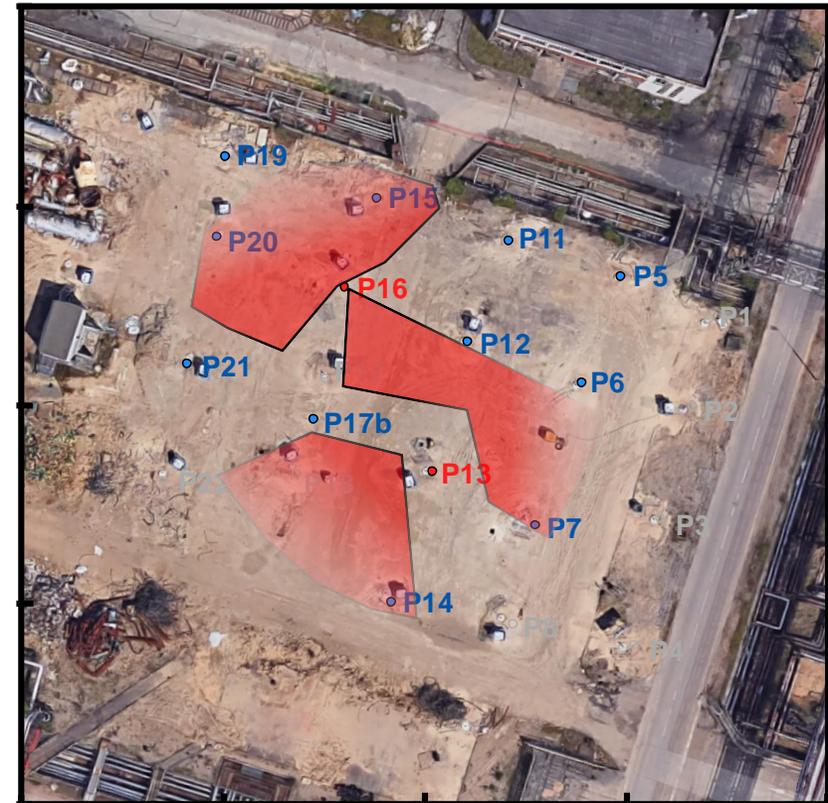


## Caractérisation active d'un milieu hétérogène contaminé

### Résultats d'inversions



❖ Diminution de la fréquence  
=  
Augmentation du rayon  
d'influence



## Caractérisation passive d'un site industriel en activité

Hydrogeology Journal (2020) 28:2559–2571  
<https://doi.org/10.1007/s10040-020-02215-w>

REPORT

Hydraulic characterization of a highly anthropized coastal aquifer subject to tidal fluctuations

### Consortium EDF R&D / M2C



Laboratoire de Morphodynamique  
 Continentale et Côtière  
 UMR CNRS 6143 M2C

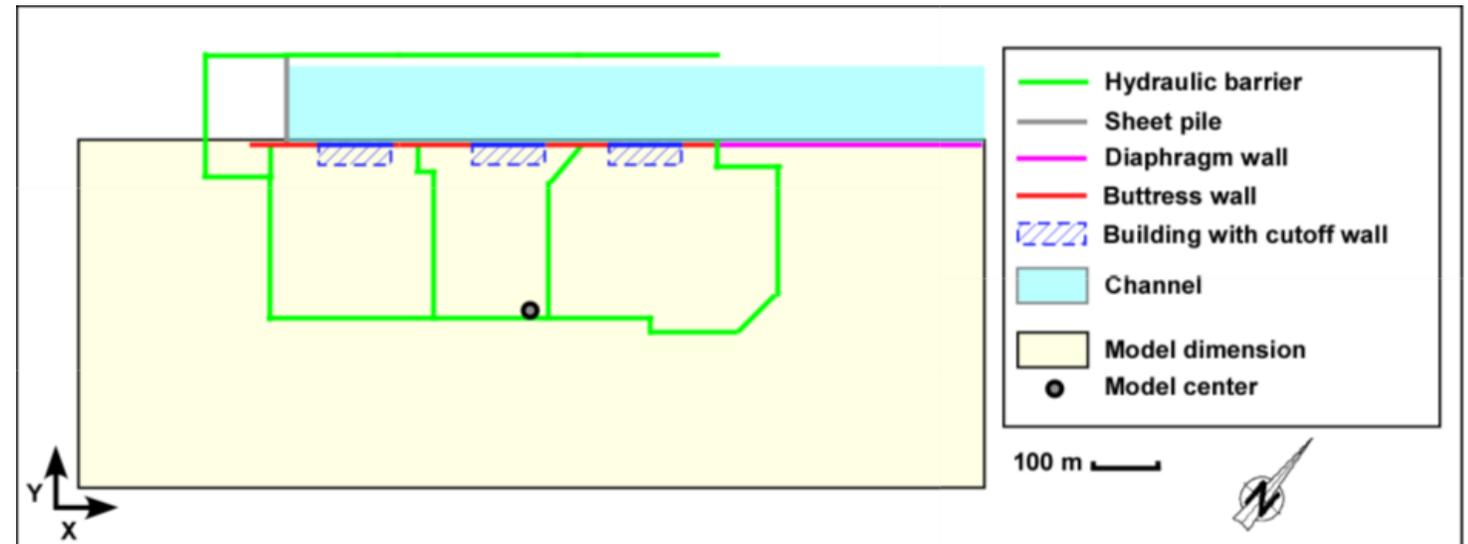


### Site d'étude

- Site industriel en activité
- Fortement anthropisé
- 1300 x 500 m<sup>2</sup>
- Canal soumis à la marée

### Géologie / Hydrogéologie

- Sables et lentilles limoneuses sur 30 m
- Nappe captive
- Présences de structures enterrées (barrières)
- Influence de la marée
- 37 forages



## Caractérisation passive d'un site industriel en activité

### Propriétés à caractériser

- Transmissivités et emmagasinevements
- Méthode Quasi-Newton
- Contraintes géostatistiques



### Données

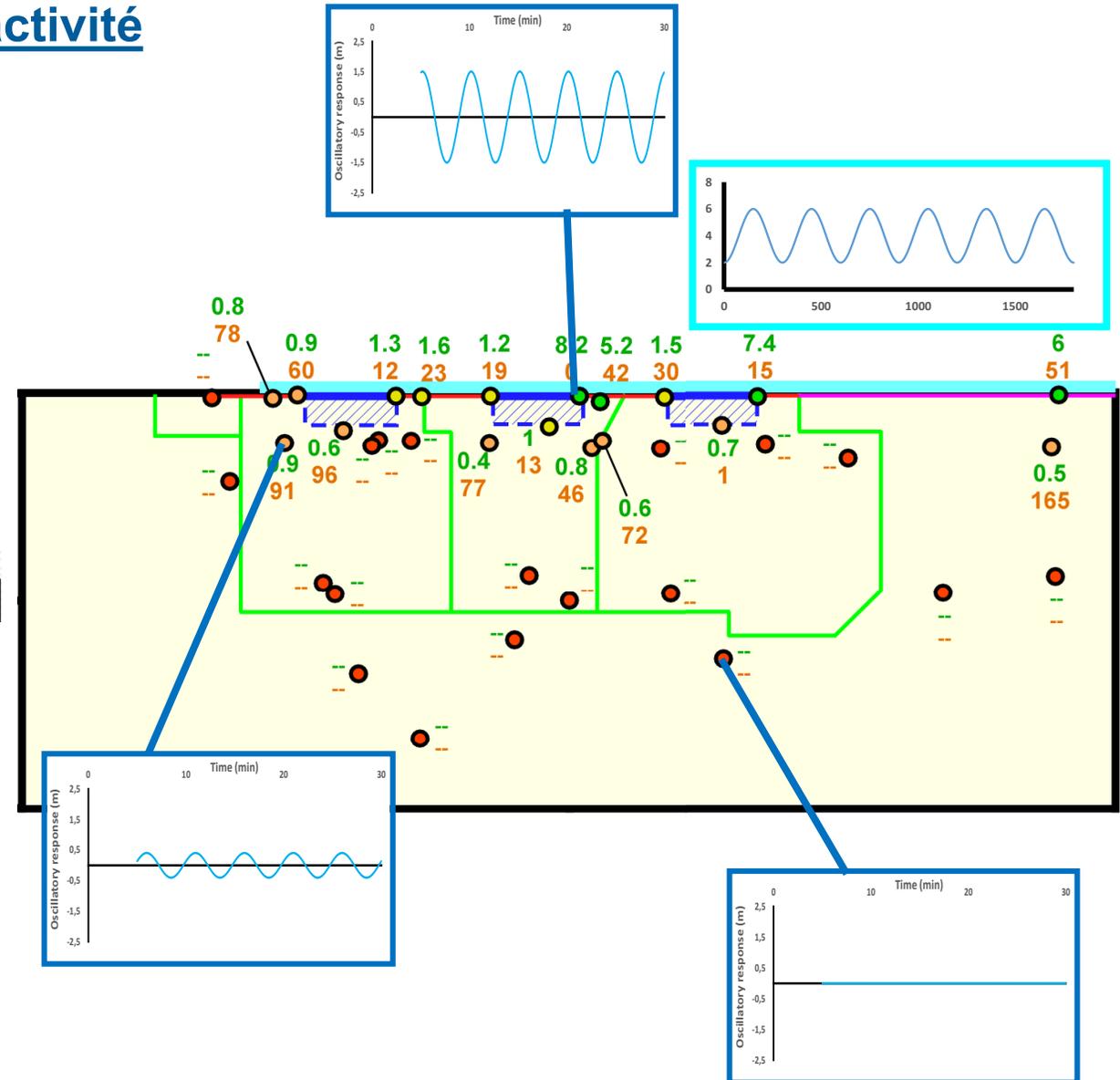
Signal de la marée:

- Canal induisant un signal oscillatoire de marée  
↳ signal de période 12,4 h
- Mesures de réponses dans 37 piézomètres  
↳ extraction **réponses oscillatoires**



### Modèle physique

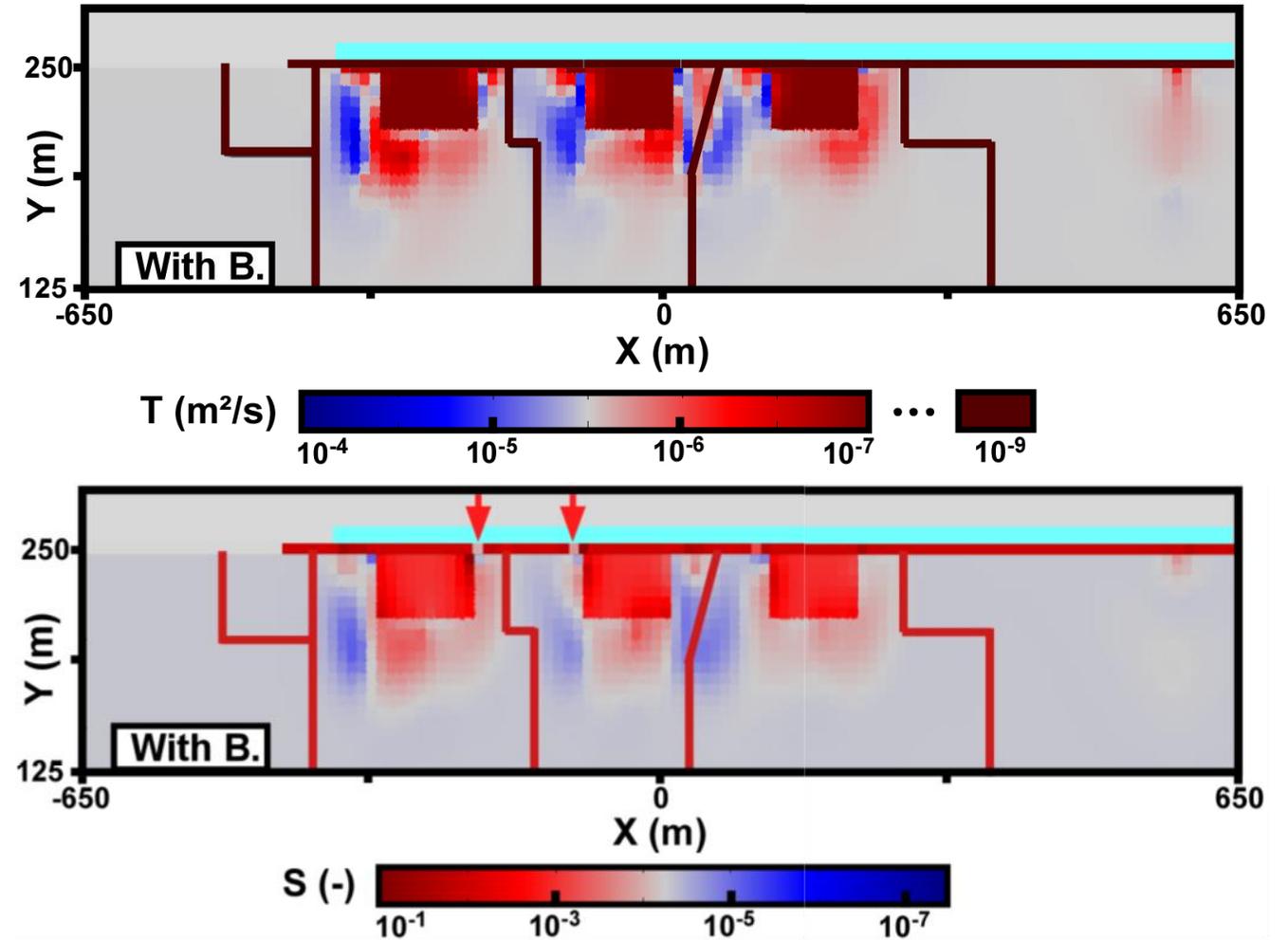
- Modèle 2D équivalent milieu poreux  
+  
1D structures enterrées
- Ecoulement de Darcy aquifère confiné  
↳ domaine fréquentiel



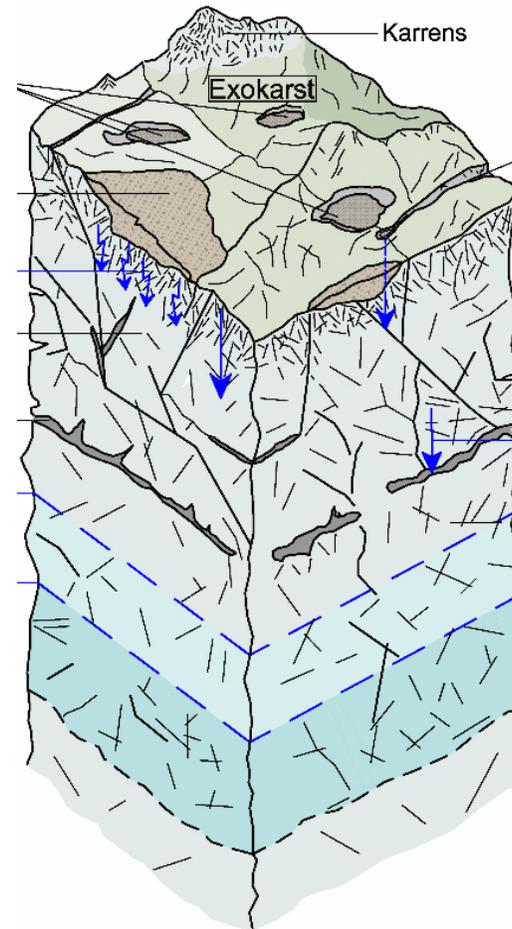
## Caractérisation passive d'un site industriel en activité

### Résultats d'inversions

- ❖ Caractérisation passive par signaux naturels
- ❖ Identification des chemins préférentiels



## Modélisation spatialisée des écoulements en milieu karstique



(source: Stevanović, 2015)

## Caractériser les écoulements en milieu karstique

### Site d'étude des écoulements karstiques

- Site expérimental de recherche:



SNO Karst



MEDICYSS

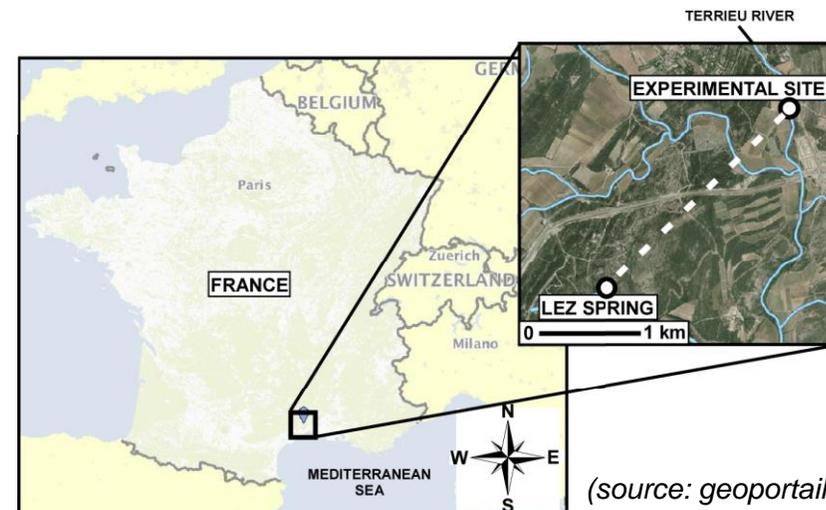
- Près de Montpellier
- 60 x 40 m<sup>2</sup>

### Géologie / Hydrogéologie

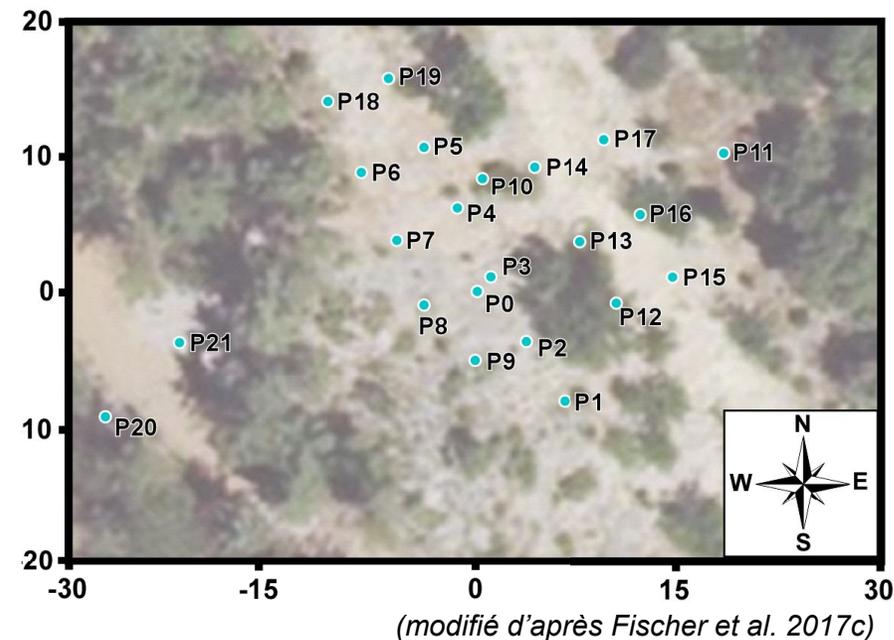
- Calcaires du Jurassique et du Crétacé
- Plan karstifié saturé, confiné entre les deux unités géologiques (35 - 45 m sous la surface du site d'étude)
- Conduits de diamètres 20 à 50 cm
- 22 forages



(Jazayeri Noushabadi 2009)



(source: geoportail.fr)



(modifié d'après Fischer et al. 2017c)

## Caractériser les écoulements en milieu karstique

### Propriétés caractérisées

- Transmissivités
- Méthodes CADI et DNDI



### Données

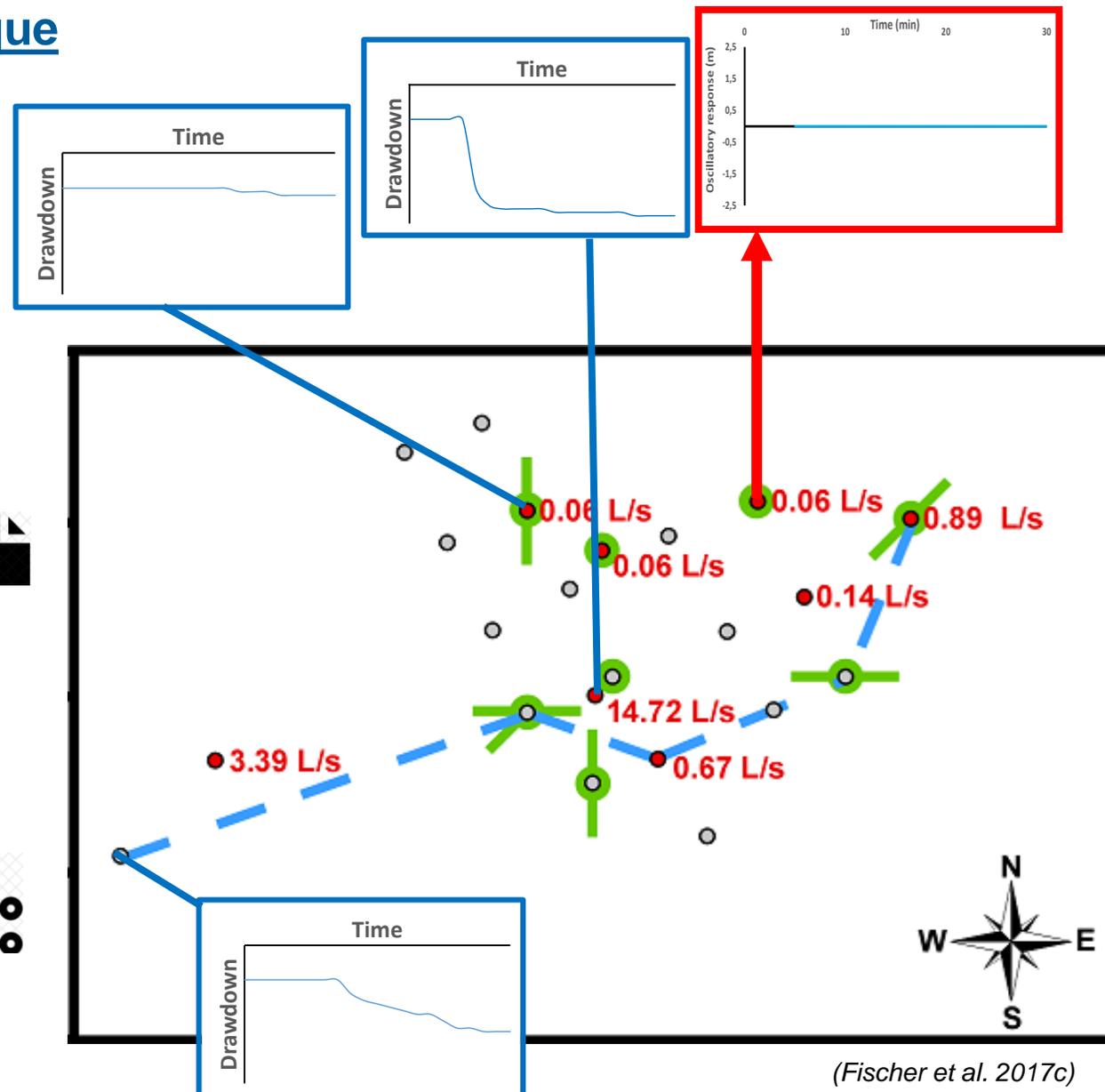
Pompages à débits constants:

- 8 forages de **pompages**
- Mesures de réponses dans 22 piézomètres



### Modèle physique

- Modèle 2D équivalent milieu poreux du plan karstifié
- Ecoulement de Darcy aquifère confiné  
↳ domaine quasi statique



(Fischer et al. 2017c)

# Caractériser les écoulements en milieu karstique

## Résultats d'inversions

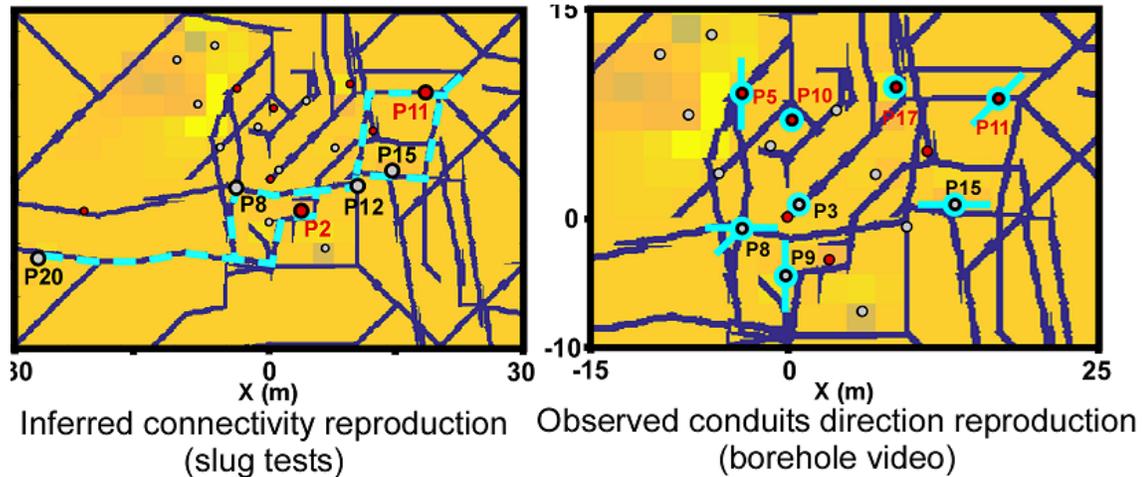
### Méthode CADI

#### Water Resources Research

##### RESEARCH ARTICLE

10.1002/2017WR020921

### Identifying Flow Networks in a Karstified Aquifer by Application of the Cellular Automata-Based Deterministic Inversion Method (Lez Aquifer, France)

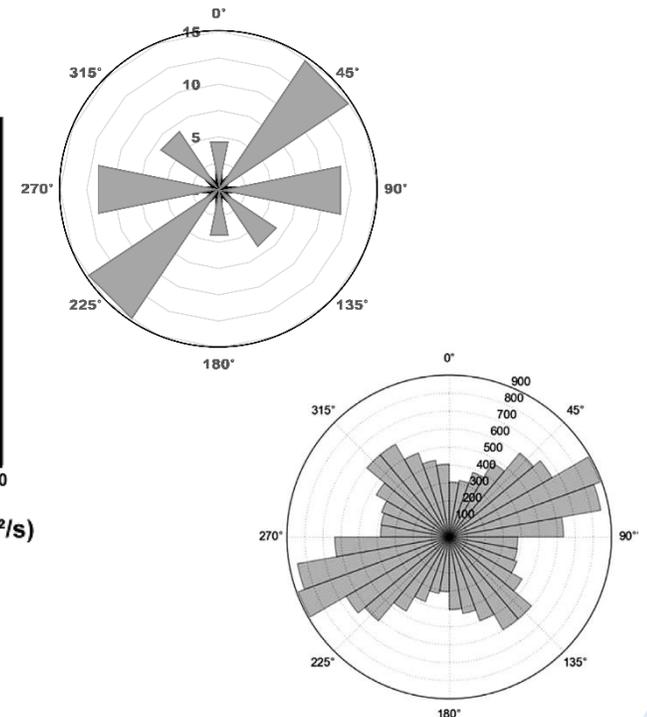
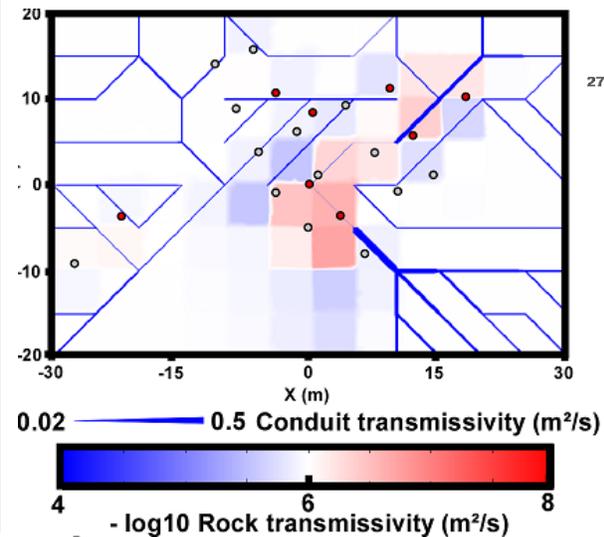


### Méthode DNDI

#### Advances in Water Resources

Advances in Water Resources 137 (2020) 103523

### Hydraulic tomography in coupled discrete-continuum concept to image hydraulic properties of a fractured and karstified aquifer (Lez aquifer, France)



## Caractériser les écoulements en milieu karstique

### Propriétés caractérisées

- Transmissivités et emmagasinelements
- Méthode CADI



### Données

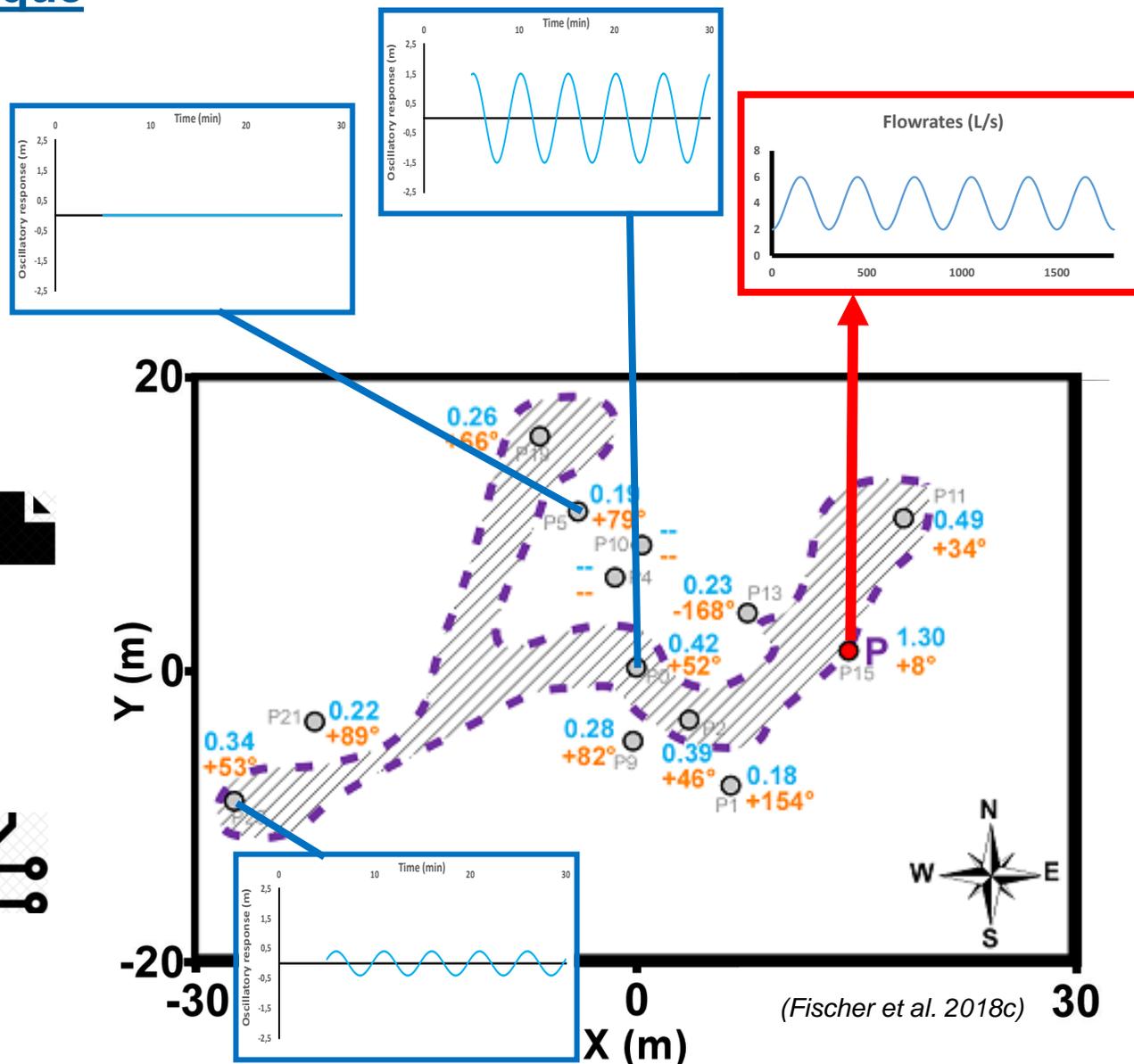
Pompages à débits oscillatoires:

- 4 forages de **pompages**
  - ↳ 2 fréquences de signaux (2 et 5 min)
- Mesures de réponses dans 13 piézomètres
  - ↳ extraction **réponses oscillatoires**



### Modèle physique

- Modèle 2D équivalent milieu poreux du plan karstifié
- Ecoulement de Darcy aquifère confiné
  - ↳ domaine fréquentiel



## Caractériser les écoulements en milieu karstique

### Résultats d'inversions basses et hautes fréquences

Advances in Water Resources

Advances in Water Resources 119 (2018) 227-244

Harmonic pumping tomography applied to image the hydraulic properties and interpret the connectivity of a karstic and fractured aquifer (Lez aquifer, France)

Journal of Hydrology

Journal of Hydrology 559 (2018) 1039-1053

Hydraulic analysis of harmonic pumping tests in frequency and time domains for identifying the conduits networks in a karstic aquifer

#### ❖ Fréquences plus élevées (période 2 min.)

↳ Ecoulement principalement dans les conduits les plus importants

#### ❖ Fréquences plus basses (période 5 min.)

↳ Ecoulement dans les conduits, mais également dans les fractures et fissures

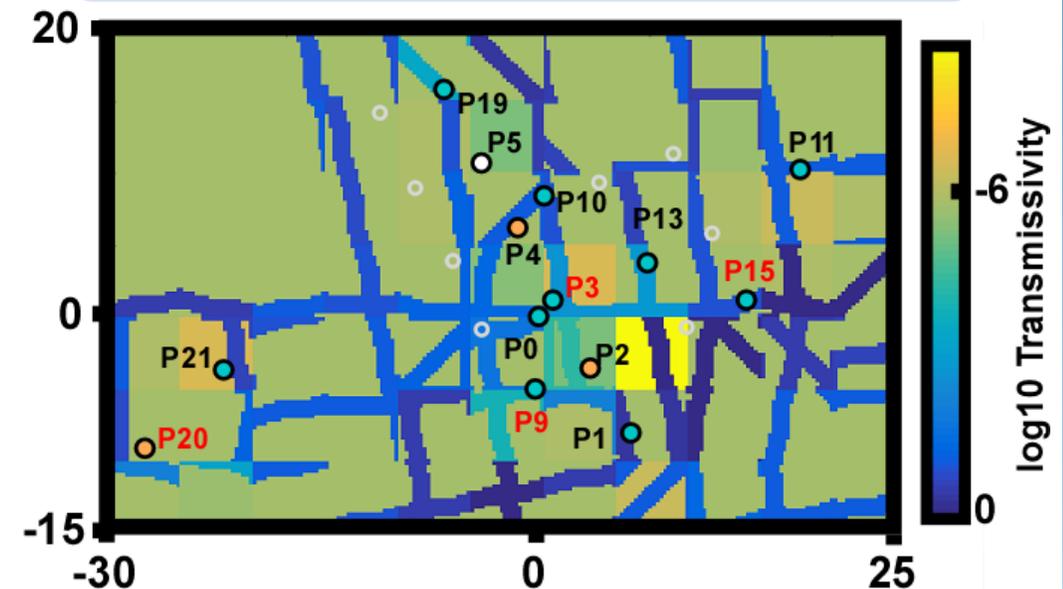
#### HIGHER FREQUENCY INFORMATION :

Borehole connectivity to the main conduits network

- In or close to (< 50 cm) the conduits network
- 1 or 2 m away from the conduits network
- More than 2 m away from the conduits network

#### LOWER FREQUENCY INFORMATION :

Localization of the karstic structures (conduit, fissures, fractures,...)



(Modifié d'après Fischer et al. 2018c)

### Avantages

- ❖ Permet une caractérisation spatialisée du milieu et des écoulements
- ❖ Allie données mesurées et physiques d'écoulements
- ❖ Méthode adaptable à différentes applications (échelles, écoulements, ...)

### Limites

- ❖ Requiert une connaissance à priori du milieu
- ❖ Nécessite l'utilisation de plusieurs forages permettant la multiplication des sources et des réponses

## Caractérisations intégrative multiphysiques

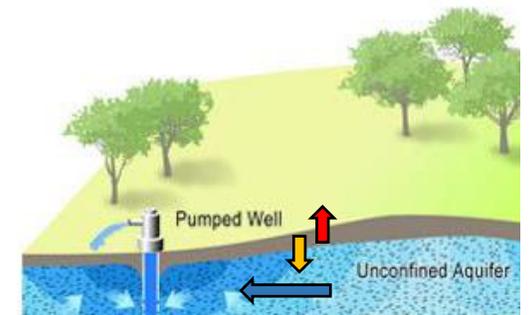
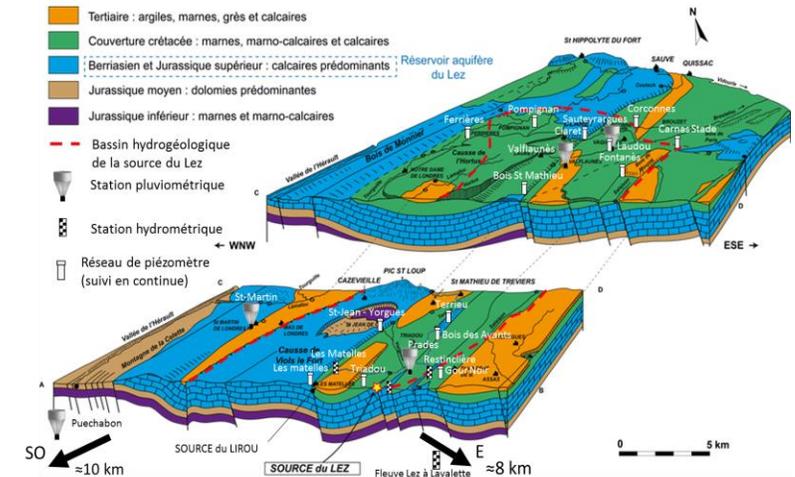
↳ Caractérisation grande échelle de l'aquifère du Lèz

↳ Intégrations de nouvelles physiques d'écoulements

↳ Ecoulements non-saturés (interface ZNS – ZS)

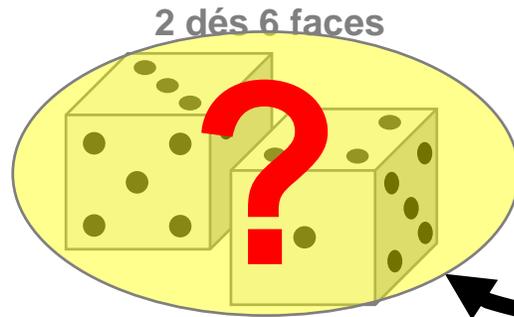
↳ Ecoulements en charge (source karstique du Lèz)

↳ Ecoulements surface libre (recharge localisées des karsts)



**Merci pour votre attention**



Problème inverse: principe général

Calcul du score du jet de dés

+

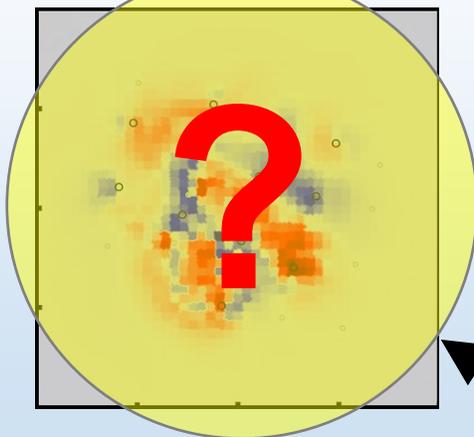
$$4 + 3$$

Problème direct

Réponse  
(Score de jet)

7

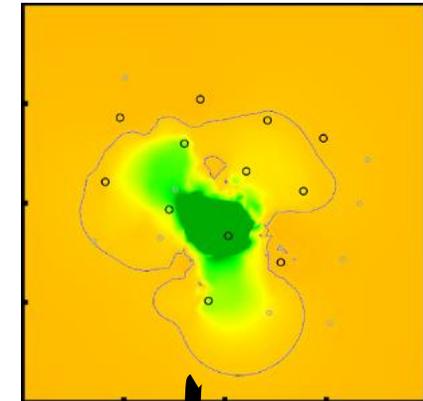
Problème inverse

Distribution de  $m$   
propriétés hydrauliques

+

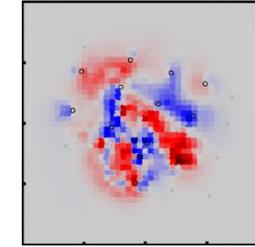
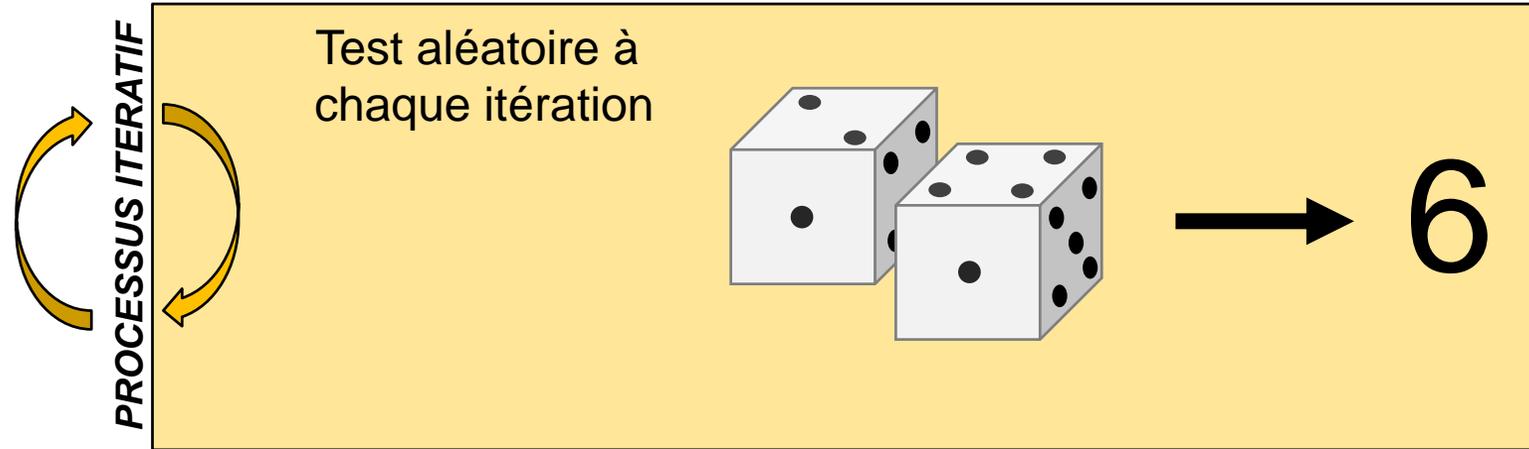
Loi d'écoulement

$$S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot (K \nabla h) = q$$

 $n$  réponses  
(Charge hydraulique)

## Problème inverse: Optimisation itérative (recherche de solutions)

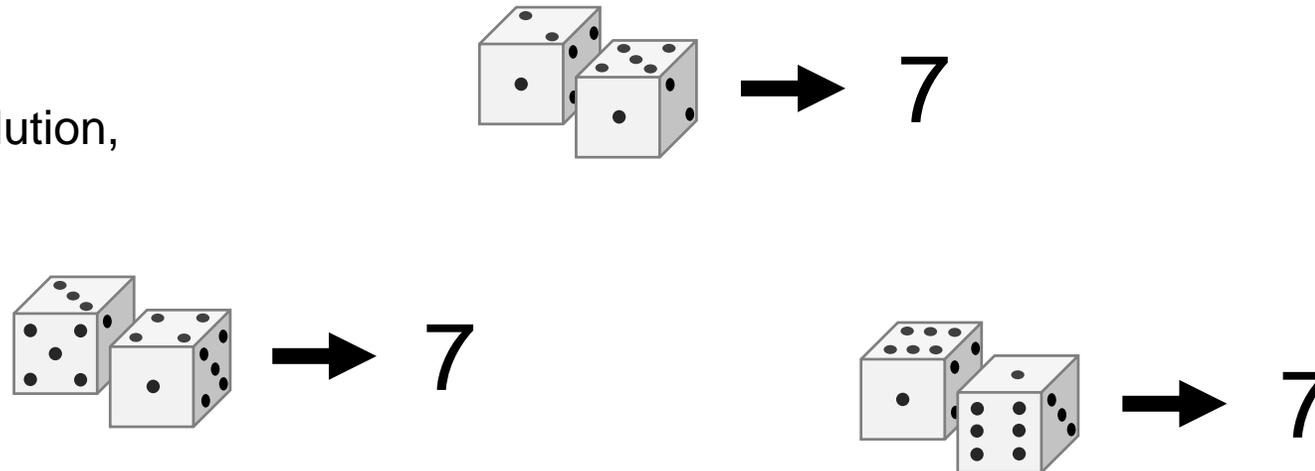
### Stochastique

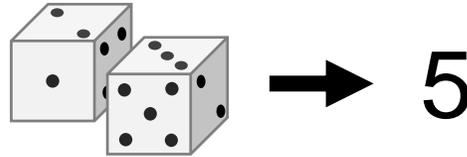


Génération aléatoire  
de champs de  
propriétés hydrauliques

### Finalisation

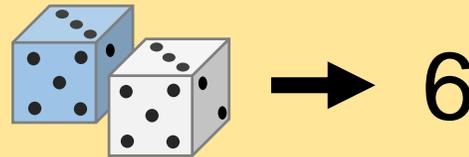
Sélection de plusieurs solution,  
méthode globale



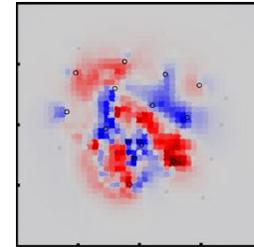
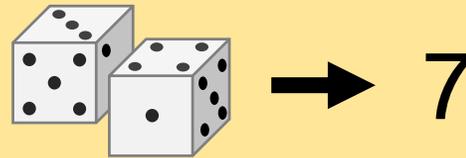
**Problème inverse: Optimisation itérative (recherche de solutions)****Déterministe****Initialisation**

PROCESSUS ITERATIF

Analyse de sensibilité



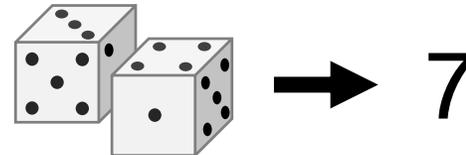
Actualisation

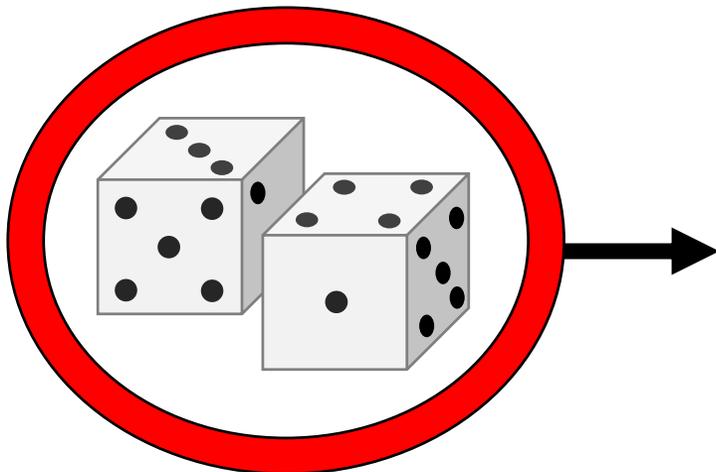


Calcul de la sensibilité spatiale et actualisation par méthode de Newton

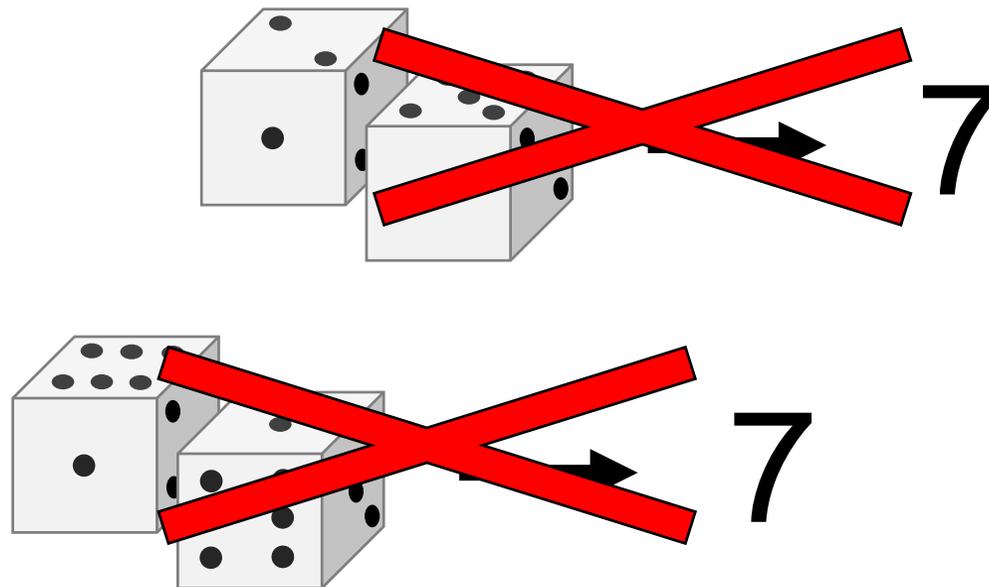
**Finalisation**

Convergence à une seule solution,  
dépendante du modèle initial

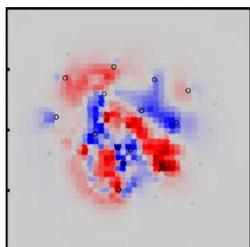
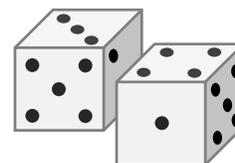
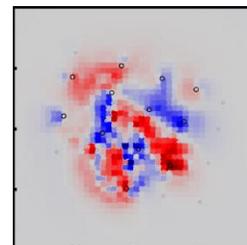


**Problème inverse: Contraintes***Problème sous-déterminé ...*

7



7

*... constraint sur des valeurs à priori*Valeur de face à priori  
comprise entre 2 et 5Valeurs à priori sur les  
propriétés hydrauliques*... constraint sur les variations*Variation entre les 2 dés  
inférieure à 2Variations géostatistique de la  
distribution du champ de propriétés

Problème inverse: « Encodage » probabiliste*Approche Bayésienne*

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}$$

A = Modèle généré

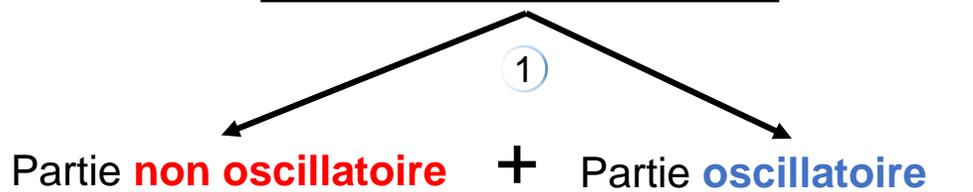
B = Données mesurées

*Fonction objective à minimiser*Ecart réponses  
simulées/mesuréesIncertitudes sur  
les réponsesDistribution  
géostatistiquePropriétés à  
prioriChamp de  
propriétés

$$\psi = \underbrace{(\mathbf{h}_{\text{mes}} - \mathbf{h}_{\text{sim}})^T \mathbf{C}_h^{-1} (\mathbf{h}_{\text{mes}} - \mathbf{h}_{\text{sim}})}_{\text{Contraintes sur les données}} + \underbrace{(\mathbf{p}_{\text{prior}} - \mathbf{p})^T \mathbf{C}_p^{-1} (\mathbf{p}_{\text{prior}} - \mathbf{p})}_{\text{Contraintes sur les propriétés}}$$

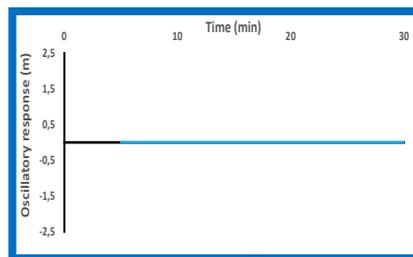
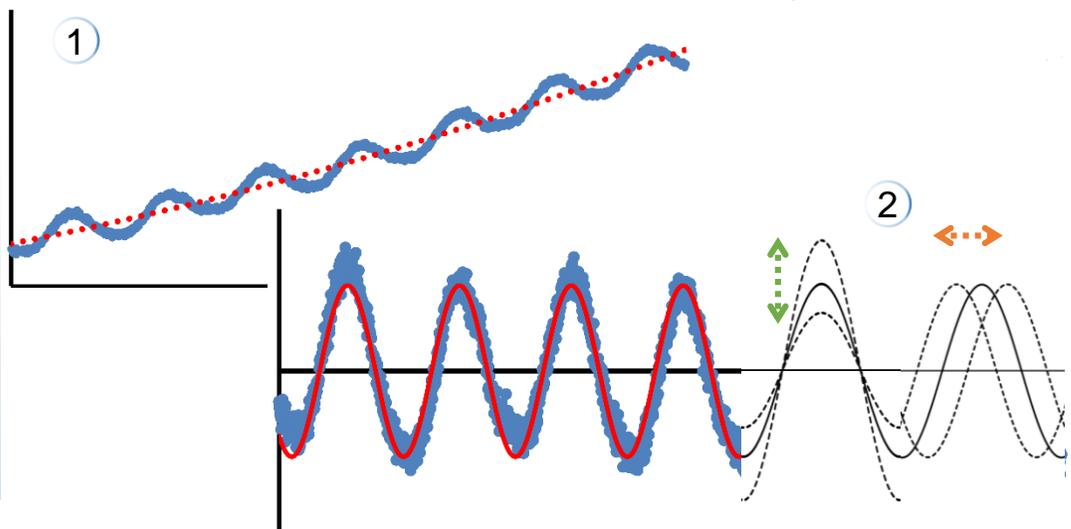
Interprétation des réponses oscillatoires

Réponses de rabattement

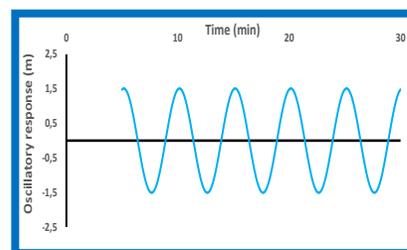


②

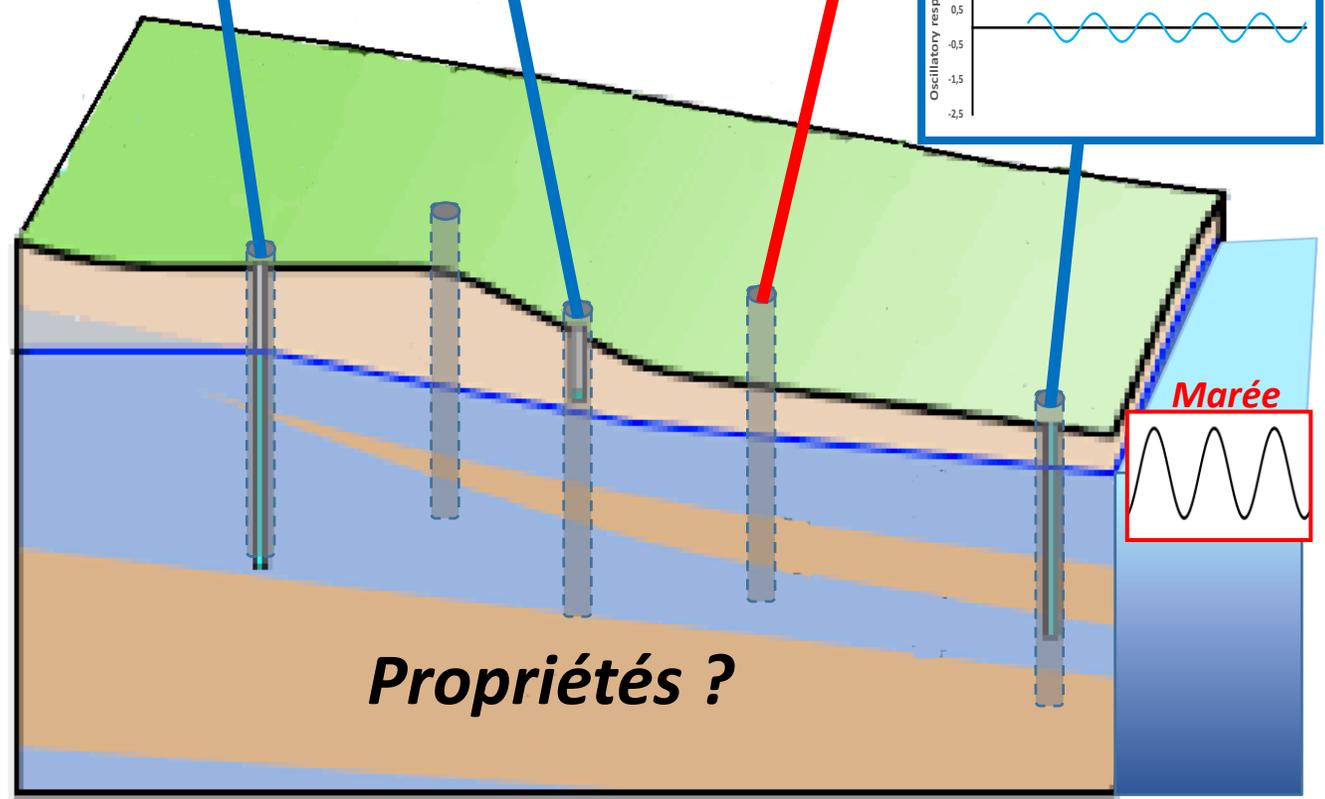
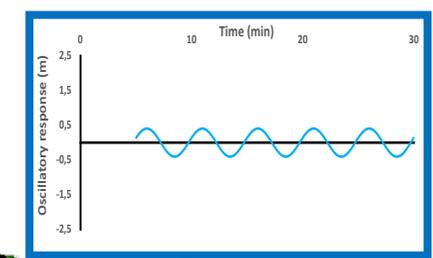
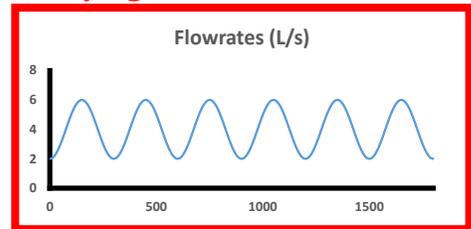
Interprétation d'**atténuation** et de **déphasage**  
(transformée de Fourier)



*Réponses oscillatoires*



*Pompage*



## Contraintes structurales de distributions des propriétés

### Contraintes adaptées aux milieux fracturés et karstiques

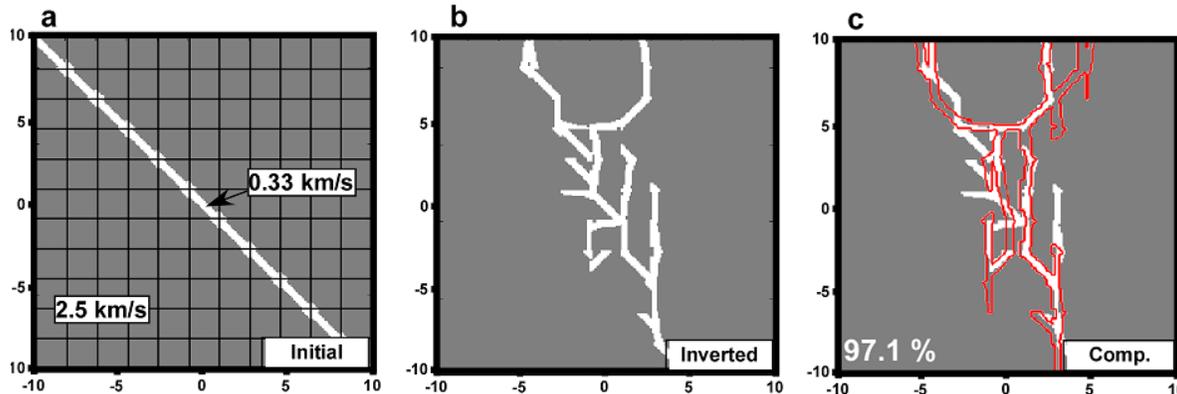
#### Méthode CADI

##### Water Resources Research

##### RESEARCH ARTICLE

10.1002/2016WR019572

#### A cellular automata-based deterministic inversion algorithm for the characterization of linear structural heterogeneities



#### Méthode DNDI

##### Advances in Water Resources

Advances in Water Resources 112 (2018) 83–94

#### Hydraulic tomography of discrete networks of conduits and fractures in a karstic aquifer by using a deterministic inversion algorithm

