



# Modélisation, caractérisation et inversion en propagation d'ondes

## Expérimentation sur le suivi de présence d'eau sur le site du LSBB

### UMR EMMAH équipe TWICS (partie ondes et instrumentation)

G. Lefeuvre-Mesgouez

Slimane Arhab, Olivier Lombard, Arnaud Mesgouez, Gilles Micolau,  
Elisabeth Pozzo di Borgo

Doctorants : Clément Dezord, Hamed Bouaré

Avignon Université, INRA, UMR1114 EMMAH, France

13 novembre 2019



# Plan de la présentation



- 1 Thématiques, Méthodes et Outils
- 2 Modèles et Méthodes
- 3 Inversion
- 4 Expérimentations
- 5 Conclusion

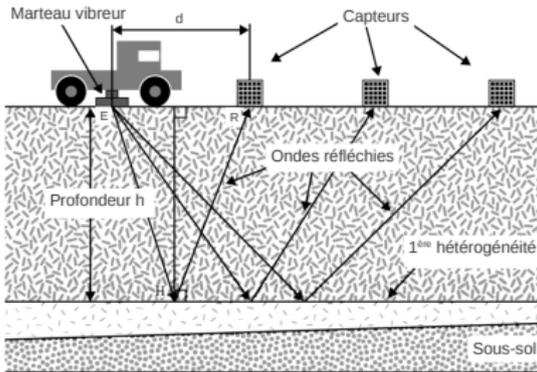
# Plan de la présentation

- 1 Thématiques, Méthodes et Outils
- 2 Modèles et Méthodes
- 3 Inversion
- 4 Expérimentations
- 5 Conclusion

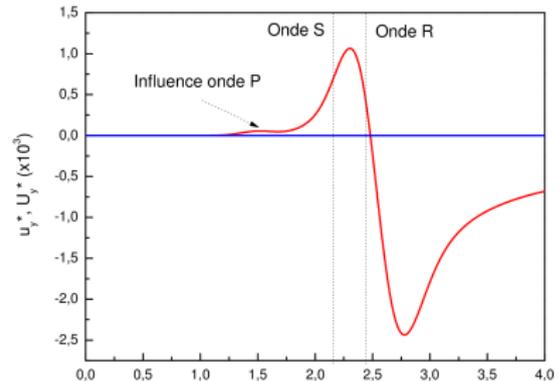
## Thématiques, Méthodes, Outils :



- Mécanique, Physique, Instrumentation ⇒ diversité
- Propagation d'ondes mécaniques / Modélisation mécanique
- Électromagnétisme : propagation et quasi-statique
- Modélisation numérique
- Caractérisation sur la base de données expérimentales. Problème inverse
- Expérimentations



Vibrations du sol soumis à une sollicitation en surface



Déplacement vertical en un point de surface

# Plan de la présentation

- 1 Thématiques, Méthodes et Outils
- 2 Modèles et Méthodes
- 3 Inversion
- 4 Expérimentations
- 5 Conclusion

## Les deux modèles de sols mécaniques considérés



### Viscoélasticité

*Milieu continu* solide

4 paramètres minimum

$\lambda, \mu, \rho$

+ amortissement(s)

Formulation en déplacement ( $u$ )

### Poro(visco)élasticité

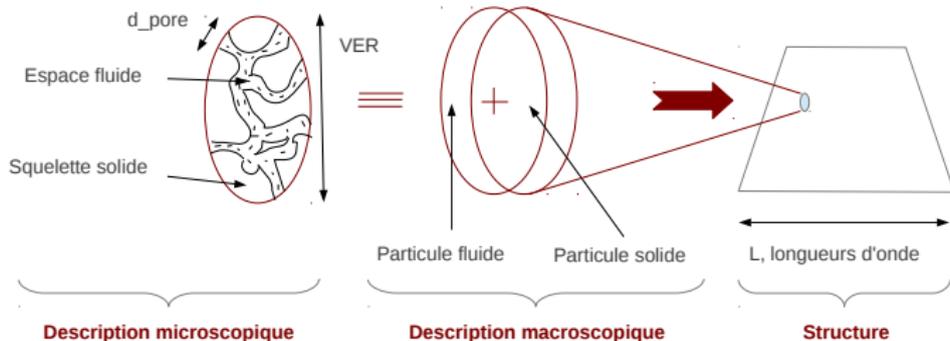
*Milieu continu* classique généralisé à plusieurs phases

10 paramètres

$\eta, \rho_f, \phi / \rho_s, \mu, \lambda_0 / a_\infty, \kappa, \beta$  (3 couplages) et  $m$

+ éventuellement amortissement(s) du squelette solide

Formulation en déplacements solides + relatifs ( $u - w$ )





## Comment?

### Grâce à un code interne éléments-finis / différences finies : FAFEMO

Objectif fixé : **développer un outil numérique robuste et efficace**

- plateforme multiphysique
- résolution d'EDP (Maxwell / Navier / Biot / Richards) : Problème de Cauchy
- architecture modulaire permettant d'aborder différents problèmes avec la même structure

## Comment?

### Grâce à un code interne semi-analytique : KUMA

Objectif fixé : **développer un outil rapide et efficace pour des géométries simples pour servir de benchmark et effectuer des évaluations rapides**

- géométries cartésiennes en multicouches
- géométries cylindriques en multicouches
- peut s'adapter aux ondes électromagnétiques



# Plan de la présentation

- 1 Thématiques, Méthodes et Outils
- 2 Modèles et Méthodes
- 3 Inversion**
- 4 Expérimentations
- 5 Conclusion

## Application dans le cadre de problème inverse



### Objectif :

- **Inverser un paramètre** avec une incertitude sur un des autres paramètres, dans le cadre d'un milieu **ÉQUIVALENT**

### Comment :

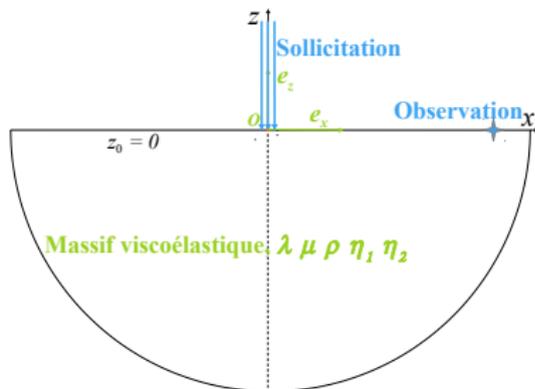
- **Méthode globale par inversion de formes d'ondes complètes** sur un sous-ensemble de l'espace des paramètres, pas d'information a priori, **fonction coût**

### Configuration :

- Géométrie 2D, massif semi-infini homogène isotrope viscoélastique soumis à une excitation transitoire

### Paramètres :

- Masse volumique, coefficients de Lamé, amortissements hystérétiques



## Un autre exemple de problème inverse développé sur les ondes électromagnétiques et mécaniques : méthode locale

### Objectif :

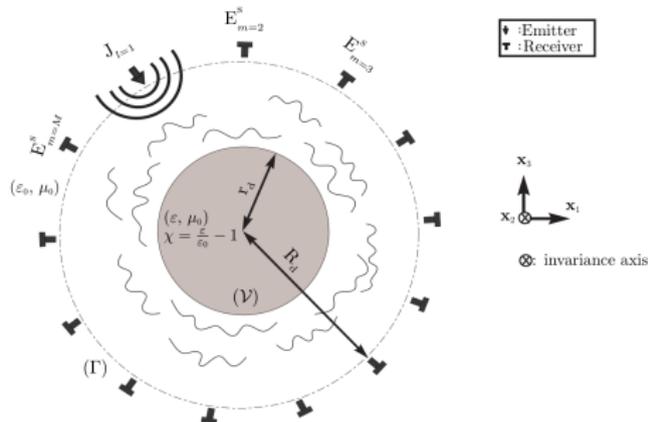
- **Cartographier** finement un paramètre dans le cadre d'un milieu HÉTÉROGÈNE

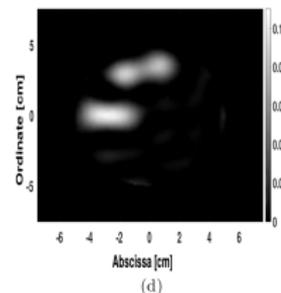
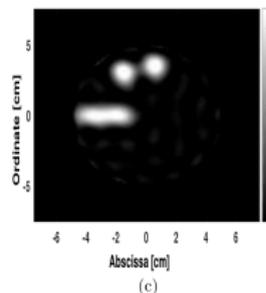
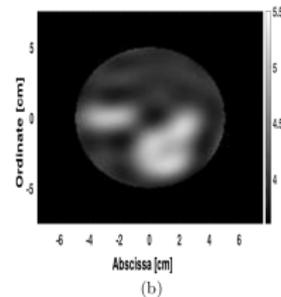
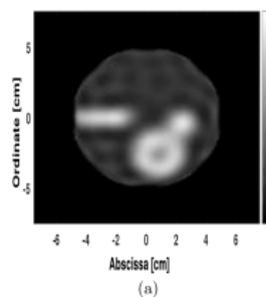
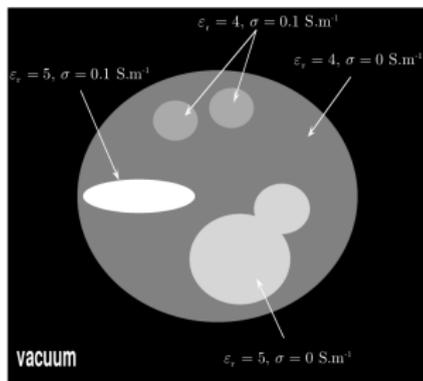
### Comment :

- **Méthode locale, fonction coût**, méthode de gradient conjugué

### Avantages / Inconvénients :

- **nécessite un maximum de points émetteurs-récepteurs (même si plafond)**
- méthode potentiellement lourde
- permet d'obtenir une reconstruction du milieu avec une **résolution** de l'ordre du dixième de la longueur d'onde
- pas d'hypothèses simplificatrices ni d'approximations

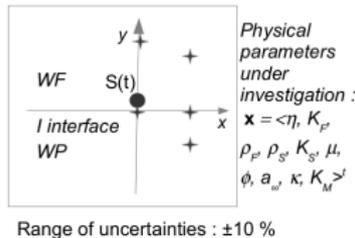




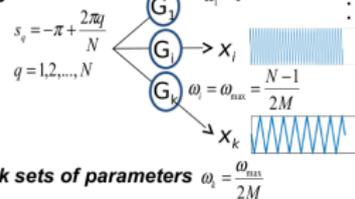
(a): relative permittivity  $\epsilon_r^{GN}(n = 120)$  reconstructed after 120 iterations with the regularized Gauss-Newton. (b): relative permittivity  $\epsilon_r^{CG}(n = 120)$  reconstructed after 120 iterations with the Conjugate-Gradient. (c): conductivity  $\sigma_r^{GN}(n = 120)$  ( $S.m^{-1}$ ) reconstructed after 120 iterations with the regularized Gauss-Newton. (d): conductivity  $\sigma_r^{CG}(n = 120)$  ( $S.m^{-1}$ ) reconstructed after 120 iterations with the Conjugate-Gradient.

## Utilisation de l'analyse de sensibilité

### STEP 1 : Configuration of interest



### STEP 2 : Generation of the numerical experimental design:



### STEP 3 : $Nk$ runs of the forward problem (semi-analytical approach via integral transforms) :

Model  $f(x) = \rho(\eta, K_p, \rho_p, \rho_s, K_s, \mu, \phi, \alpha_w, \kappa, K_M)$  or  $u(\eta, K_p, \rho_p, \rho_s, K_s, \mu, \phi, \alpha_w, \kappa, K_M)$

$\Rightarrow Nk$  sets of results on fluid pressure, pore pressure, solid particle velocity

### STEP 4 : Post-treatment of the $N$ sets of results

Model output  $y=f(x)$



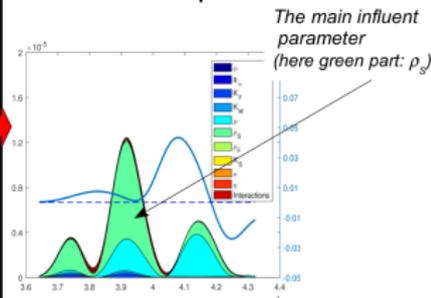
Spectral analysis



Frequencies  $\omega$

$\Rightarrow$  Main effect of  $X_i$  and Total effect of  $X_i$  and  $VT_i$ , ( $i=1, \dots, 10$ )

### STEP 5 : Sensitivity indices and analysis for each parameter



# Plan de la présentation

- 1 Thématiques, Méthodes et Outils
- 2 Modèles et Méthodes
- 3 Inversion
- 4 Expérimentations**
- 5 Conclusion

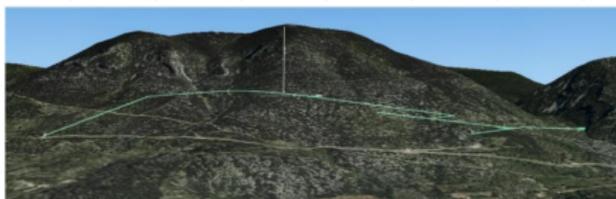
# Une méthode expérimentale originale pour ausculter la présence d'eau

## Site expérimental LABORATOIRE SOUTERRAIN à BAS-BRUIT (LSBB) UMS 3538 UNS / Avignon Université / CNRS

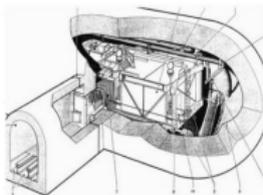
Ancien site militaire  
Rustrel (1971)  
Reconversion 1996



Plate forme de recherche interdisciplinaire



**Système karstique**  
3,3 km galeries (0-518 m)  
Coupe arbitrairement la ZNS



**LSBB**  
Laboratoire Souterrain à Bas Bruit  
Low Noise Interdisciplinary Underground Science & Technology

Infrastructure résistante aux  
effets d'une explosion  
nucléaire : mécanique,  
thermique, radiatif et  
électromagnétique  
= **Environnement Bas bruit**

**Moyens de mesures pérennes**

- Antenne sismique 3D
- Suivis **Hydro-géo-chimiques** des eaux souterraines
- Inclinomètre
- Gravimètre
- **Magnétométrie ultra-sensible**



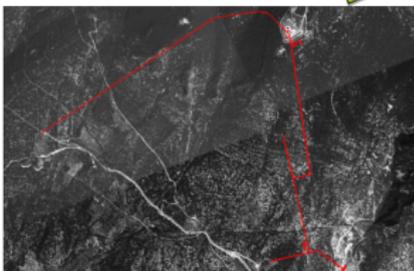
## Une méthode expérimentale originale pour ausculter la présence d'eau

### RÔLE DE L'EAU SUR LE CHAMP MAGNÉTIQUE MESURÉ AU LSBB

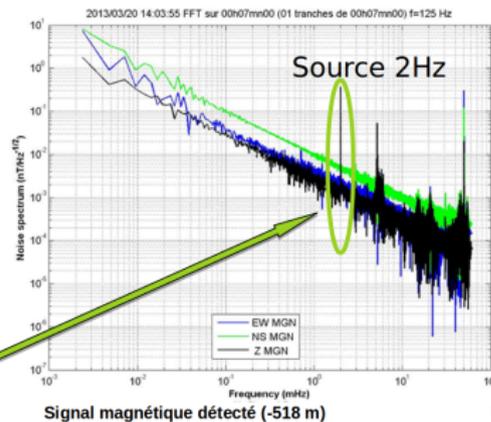
**Dépendance signal magnétique avec l'état hydrique du massif** Gaffet et al. JGI155 (2003)

Exploration systématique par un signal contrôlé en forme, amplitude et fréquence

Boucle décimétrique au sommet du LSBB



- Champ magnétique créé à partir d'une boucle disposée au sommet de la montagne
- Champ magnétique mesuré dans la capsule dépendant de la charge en eau
- ➔ **Impact de la charge en eau du massif karstique sur la fonction de transfert**



## À l'échelle du laboratoire et de la paillasse...



- Boucle de taille métrique

### Comment

- Code de calcul de l'autoinductance ( $L$ ) d'un circuit de forme arbitraire : **INDUCTAN**

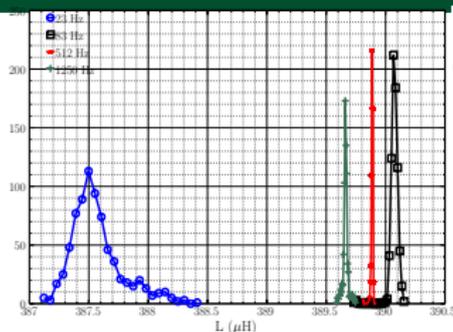


Figure: Boucle forme circulaire

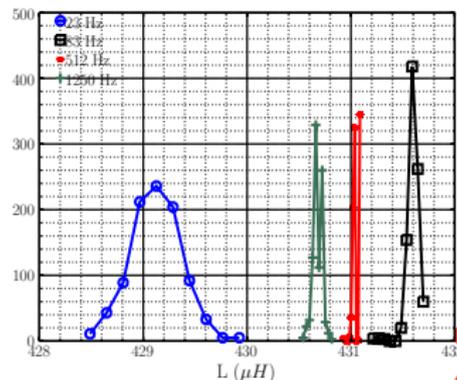


Figure: Boucle forme quelconque

# Plan de la présentation

- 1 Thématiques, Méthodes et Outils
- 2 Modèles et Méthodes
- 3 Inversion
- 4 Expérimentations
- 5 Conclusion

## Conclusion

- Quelle est l'influence de l'eau sur les signaux?
- Modèles et Caractérisations orientés sur les aspects ondulatoires (méca et em) et magnétiques
- Cadre expérimental du LSBB
- Des développements spécifiques en lien avec l'équipe SWIFT (transfert eau, solutés et prise en compte des racines)
- Une partie de l'équipe travaille sur les transferts d'eau et sur l'imagerie (cf exposé précédent, Éric Michel équipes TWICS et DISCOVE)