



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

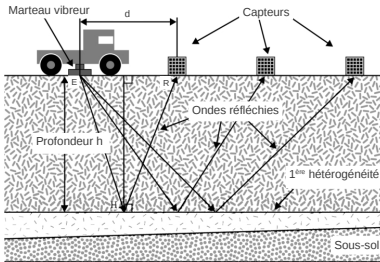
4 Expérimentations

5 Conclusion

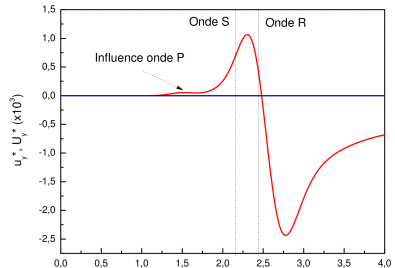
Thématiques, Méthodes, Outils :



- **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

λ, μ, ρ

+ amortissement(s)

Formulation en déplacement (u)

Poro(visco)élasticité

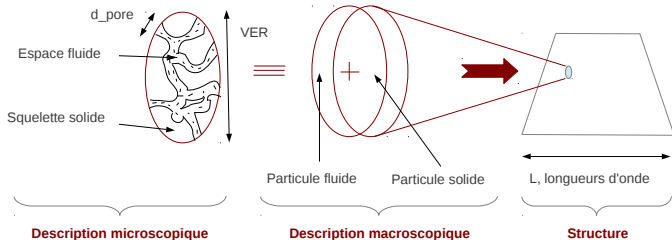
Milieu continu classique généralisé à plusieurs phases

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 :

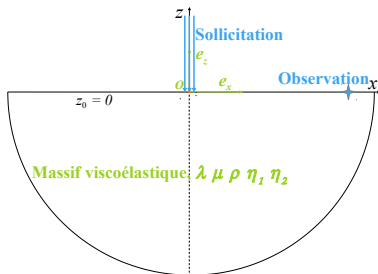
- **Méthode globale par inversion de formes d'ondes complètes** sur un sous-ensemble de l'espace des paramètres, pas d'information a priori, **fonction coût**

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 :

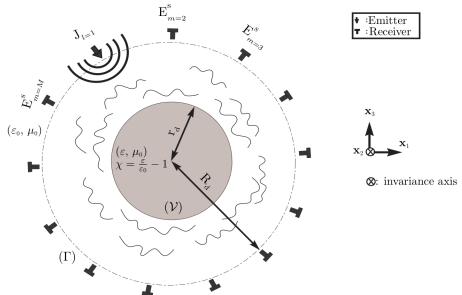
- **Cartographier** finement un paramètre dans le cadre d'un milieu HÉTÉROGÈNE

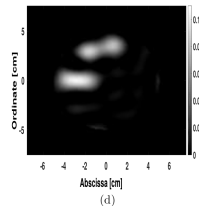
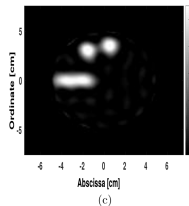
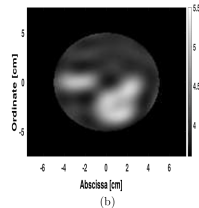
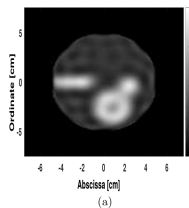
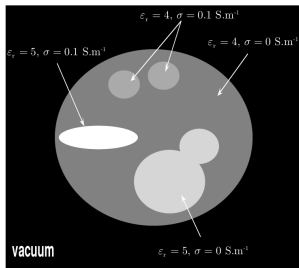
Comment :

- **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



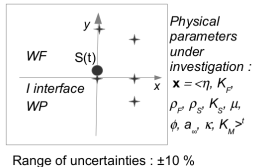


(a): relative permittivity $\epsilon_r^{GN}(n = 120)$ reconstructed after 120 iterations with the regularized Gauss-Newton. (b): relative permittivity $\epsilon_r^{CG}(n = 120)$ reconstructed after 120 iterations with the Conjugate-Gradient. (c): conductivity $\sigma_r^{GN}(n = 120)$ ($S.m^{-1}$) reconstructed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

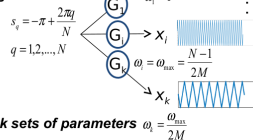


Utilisation de l'analyse de sensibilité

STEP 1 : Configuration of interest



STEP 2 : Generation of the numerical experimental design:



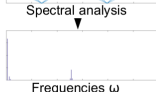
STEP 3 : Nk runs of the forward problem (semi-analytical approach via integral transforms) :

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

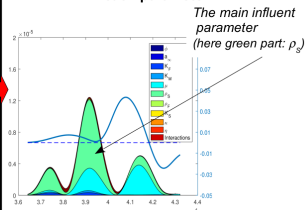
STEP 4 : Post-treatment of the N sets of results

Model output $y=f(x)$



\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

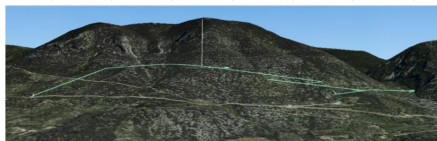
Une méthode expérimentale originale pour ausculter la présence d'eau

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

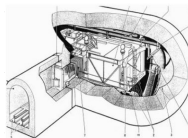
Ancien site militaire
Rustrel (1971)
Reconversion 1996



Plate forme de recherche interdisciplinaire



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



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

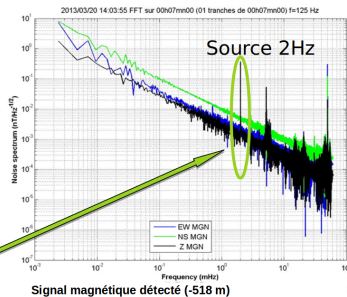
Dépendance signal magnétique avec l'état hydrique du massif Gaffet et al. JGI155 (2003)

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

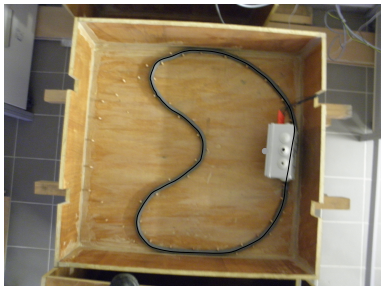
Boucle décadrétrique au sommet du LSBB



- 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**

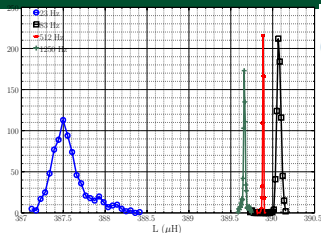


Figure: Boucle forme circulaire

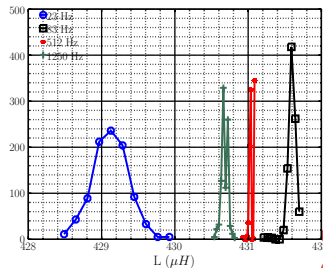


Figure: Boucle forme quelconque

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)