



école
normale
supérieure
paris—saclay



10 ans de l'Institut Farman

ENS Paris-Saclay
27 septembre 2017



Contrôle non destructif électromagnétique pour le génie civil

Projet Labex LaSIPS Rfhydromeca (2015-2017)

Projet Farman HYDEM (2016-2017)

Maria Merlan (SATIE)

Farid Benboudjema (LMT)

Franck Daout, Abdelhatif El Fellahi, Mehdi Ferhat, Françoise Schmitt, Eric Vourc'h (SATIE).

Marc Imbert, Claude Gatabin (CEA Saclay/LECBA :)

Sylvie Lesoille (Andra)

Thierry Bore (University of Queensland)

❖ ESPCI

Laboratoire LPEM (Laboratoire de Physique et d'Étude des Matériaux, ESPCI)

Étude et réalisation d'un système de mesure micro-ondes pour l'estimation de l'hygrométrie de la ressource bois-énergie.

❖ ENS CACHAN

SATIE (Laboratoire Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Énergie)

Project RFHydromeca. Vers le développement de méthodes électromagnétiques de spectroscopie RF large bande pour le suivi et la modélisation des propriétés hydromécaniques de matériaux hétérogènes : conception, réalisation et caractérisation d'une sonde pour les argiles gonflantes.

❖ IESIDE MIB **avansig**

Responsable de recherche et développement chez Avansig (Systèmes de navigation de drones autonomes).

CND électromagnétique pour le génie civil

SATIE / LMT + CEA Saclay / Andra / University of Queensland (Australie)

- ❖ **CND Control non destructif électromagnétique dans le génie civil**
- ❖ **Matériaux du patrimoine bâti: béton, argiles**
- ❖ **Dépôt de déchets radioactifs: Sonde spectroscopique RF**
- ❖ **Travail expérimental du système proposé**
- ❖ **Résultats obtenus**

CND électromagnétique pour le génie civil

SATIE / LMT + CEA Saclay / Andra / University of Queensland (Australie)



Enjeu industriel

Contrôler l'état de santé des ouvrages de génie civil (ponts, viaducs, barrages, tunnels, sites nucléaires...).



Comment ?

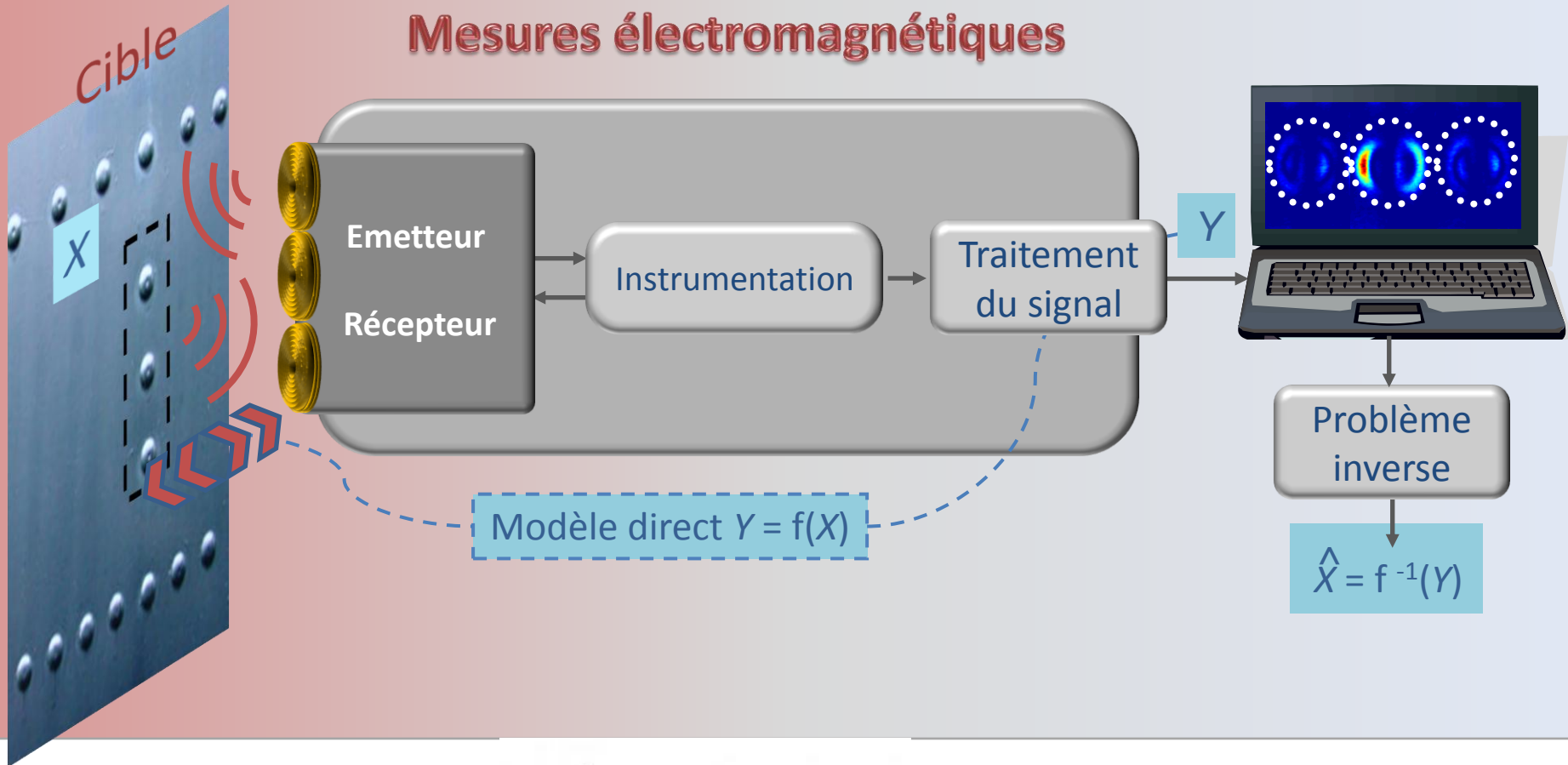
Mesure électromagnétique des propriétés hydromécaniques (densité, teneur en eau) **des matériaux** des ouvrages (bétons, argiles).

Problématique : Contrôle Non Destructif (CND) Electromagnétique

- ❖ **Quoi ?** Détecter, évaluer les anomalies des structures
- ❖ **Pourquoi ?** Assurer la sécurité, réparer...
- ❖ **Comment ?** Mesurer depuis l'extérieur par ondes électromagnétiques
- ❖ **Pour qui ?** Aéronautique, nucléaire, énergies fossiles, génie civil...



Mesures électromagnétiques

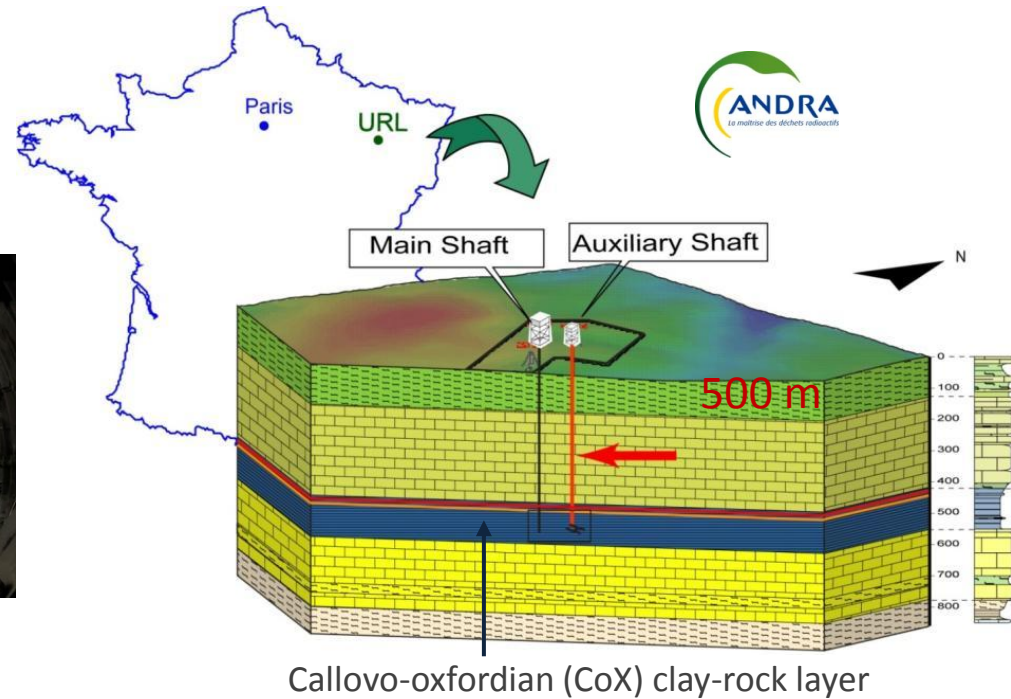


CND électromagnétique pour le stockage des déchets nucléaires

CND des sites de stockage de déchets nucléaires

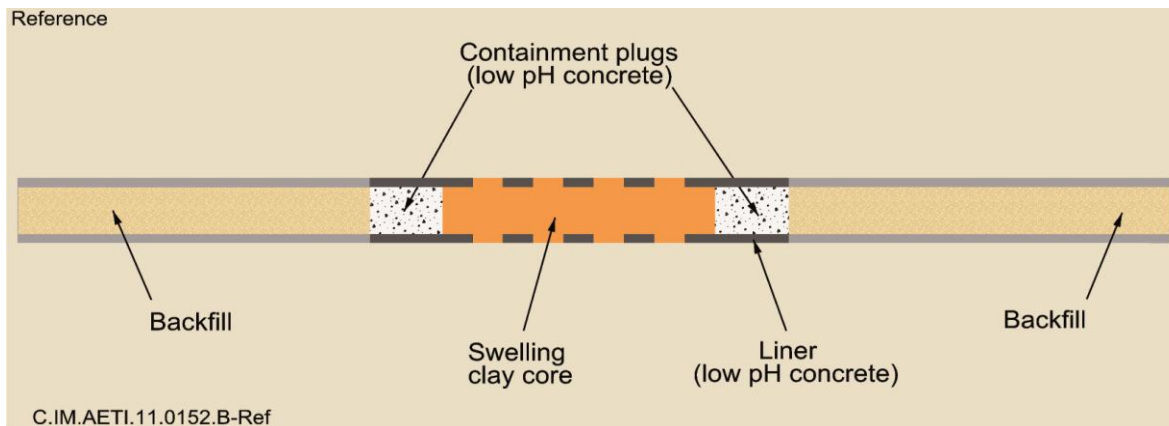


Galeries du site de Bure (France)



Callovo-oxfordian (CoX) clay-rock layer

Les scellements des compartiments sont faits d'argile (roche).

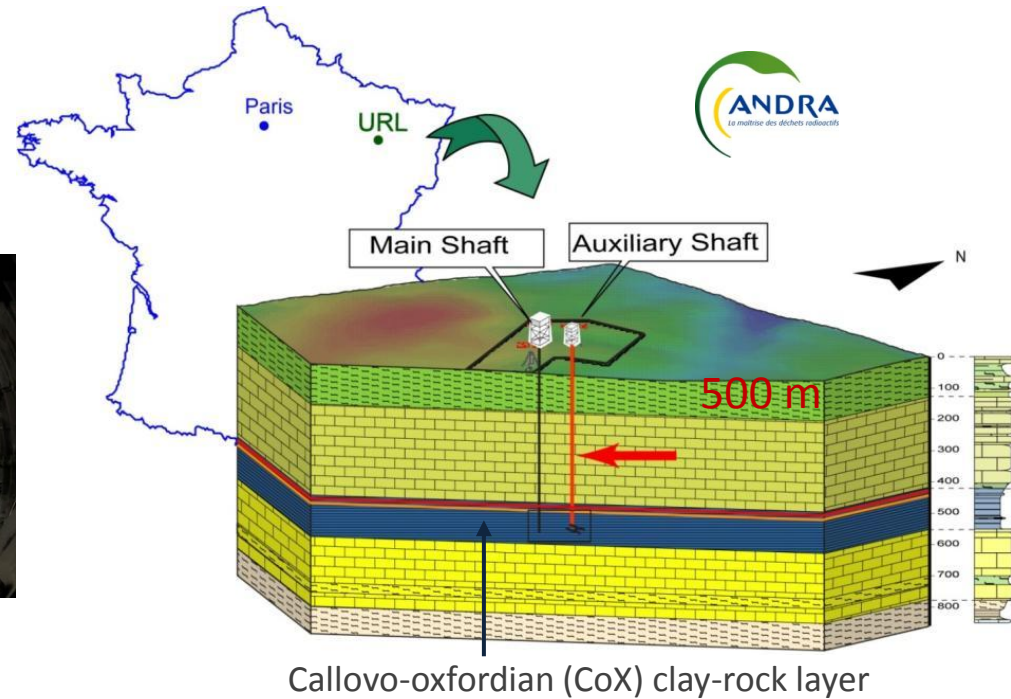


CND électromagnétique pour le stockage des déchets nucléaires

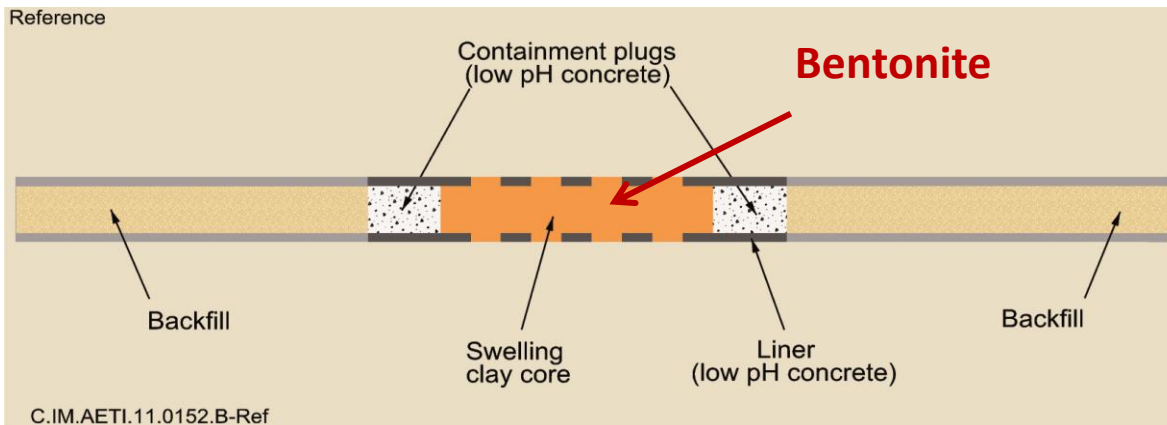
CND des sites de stockage de déchets nucléaires



Galeries du site de Bure (France)



Callovo-oxfordian (CoX) clay-rock layer



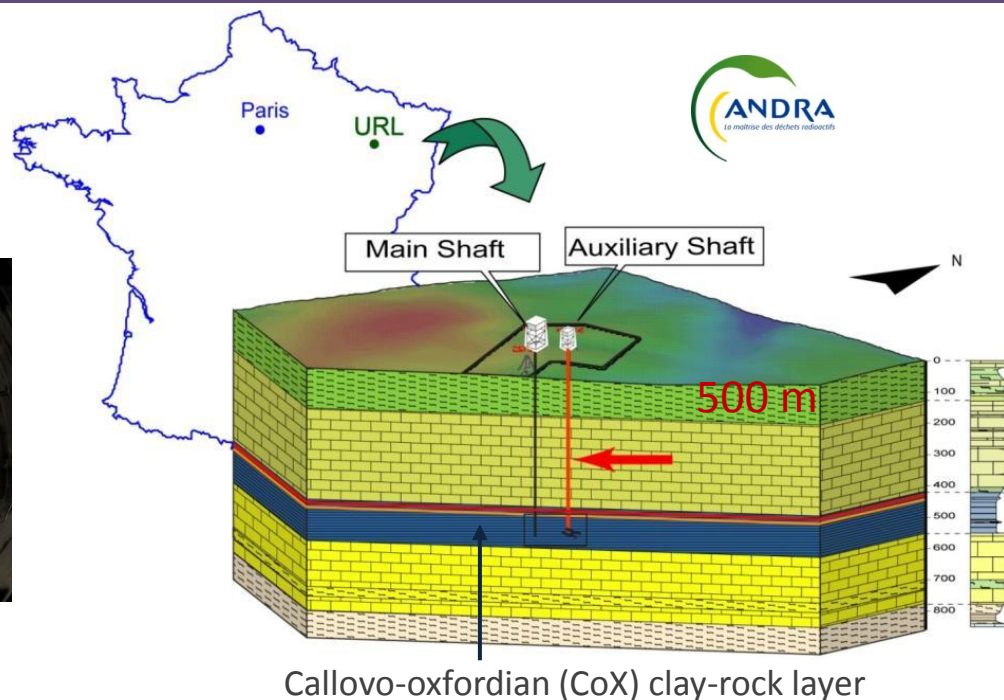
Les scelllements des compartiments sont faits d'argile (roche).

CND électromagnétique pour le stockage des déchets nucléaires

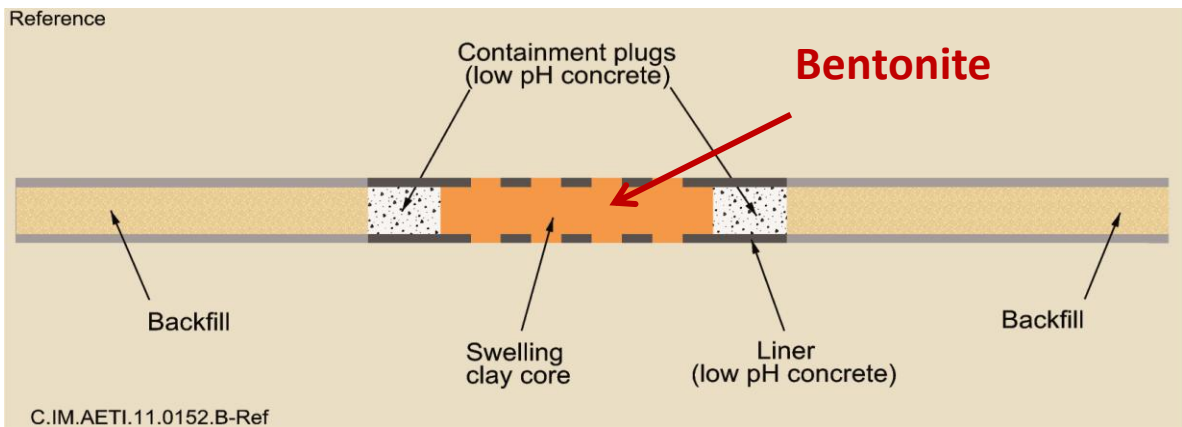
CND des sites de stockage de déchets nucléaires



Galeries du site de Bure (France)



Callovo-oxfordian (CoX) clay-rock layer

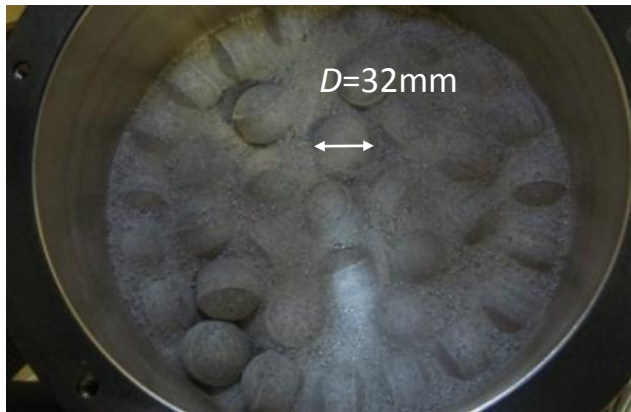


Les scelllements des compartiments sont faits d'argile (roche).

Pour des questions de sécurité le suivi hydrique des argiles est nécessaire

CND électromagnétique pour le stockage des déchets nucléaires

Evolution des scellements de bentonite



Mélange de bentonite (boulettes et poudre) tel qu'il se présente lors de la mise en place d'un scellement.



Bentonite durant la phase d'hydratation.

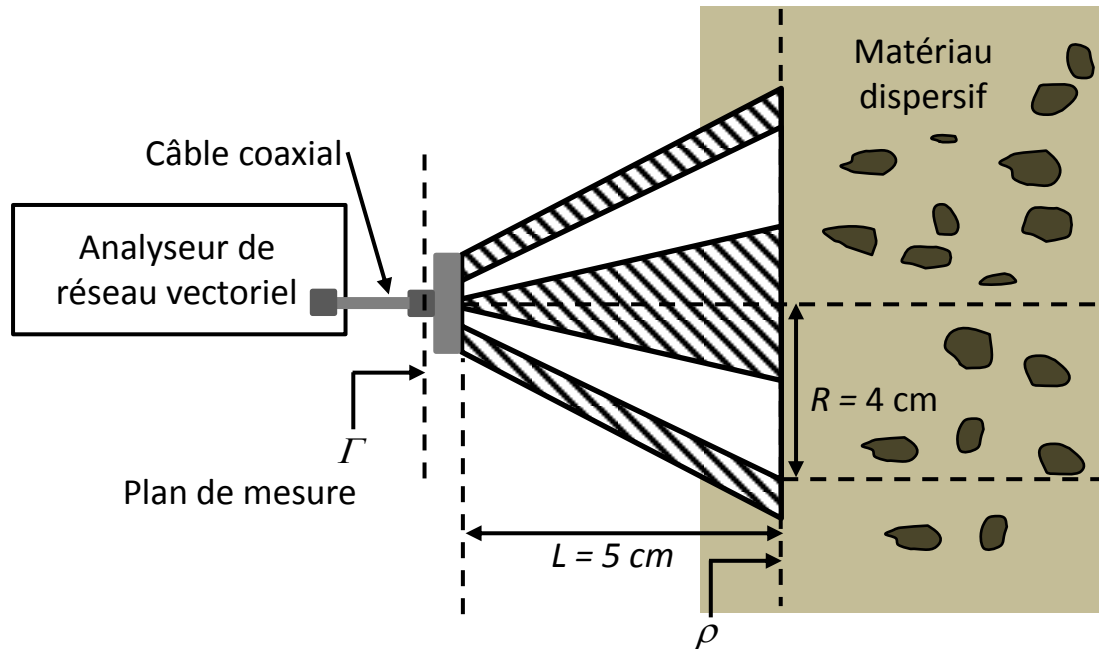
Caractérisation diélectrique

Materiau	Partie réelle (ϵ_r)
Eau	80
Particules solides	$5 < \epsilon_r < 15$
Gaz	1

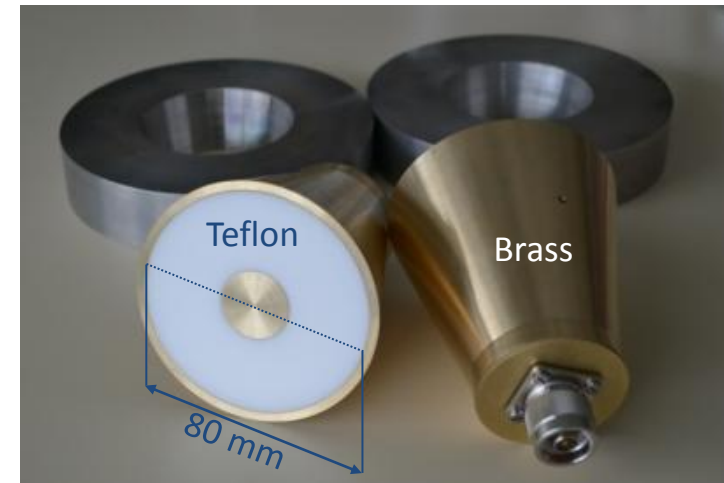
CND électromagnétique pour le stockage des déchets nucléaires

Sonde à effet de bout géante

Principe



Volume élémentaire représentatif de la bentonite : $REV \cong (qq \text{ cm})^3$



Pourquoi ce type de sonde ?

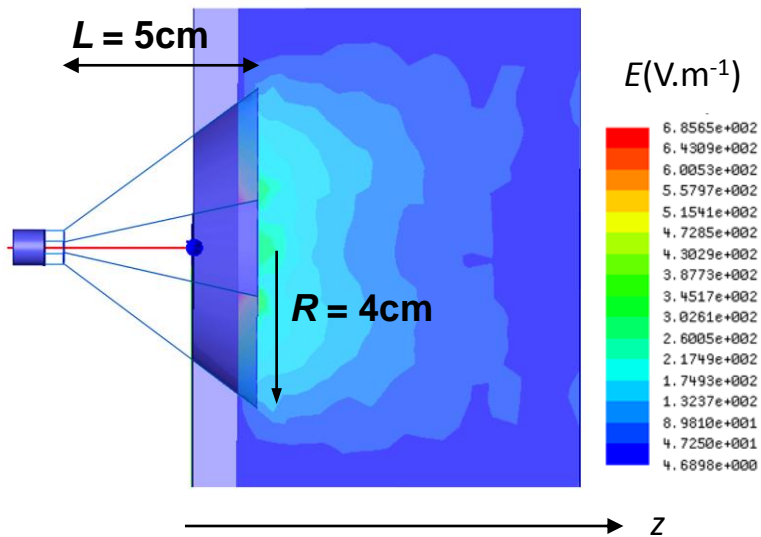
- Matériau dispersif \Rightarrow Mesure large bande
- Matériau hétérogène \Rightarrow Sonde géante
- Mesures in situ \Rightarrow Sonde de réflectométrie

Méthodes électromagnétiques pour le CND des argiles

Sonde à effet de bout géante

Volume sondé ?

Champ électrique rayonné dans une argilite S_{w45}

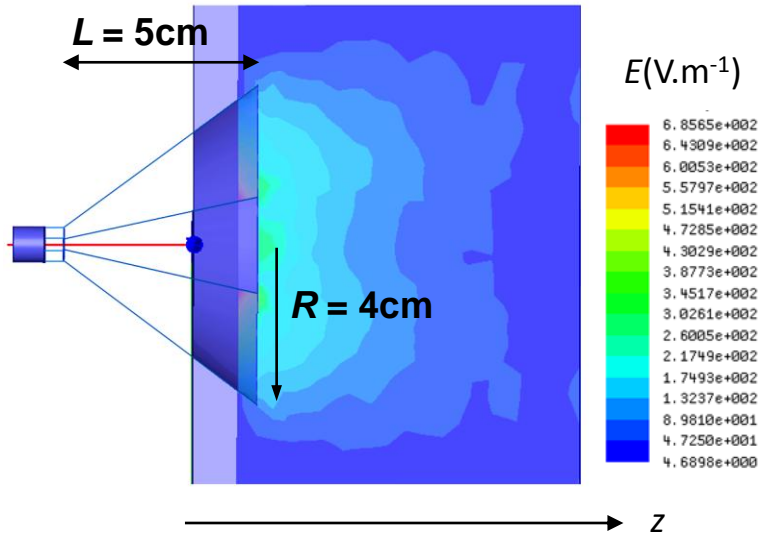


Méthodes électromagnétiques pour le CND des argiles

Sonde à effet de bout géante

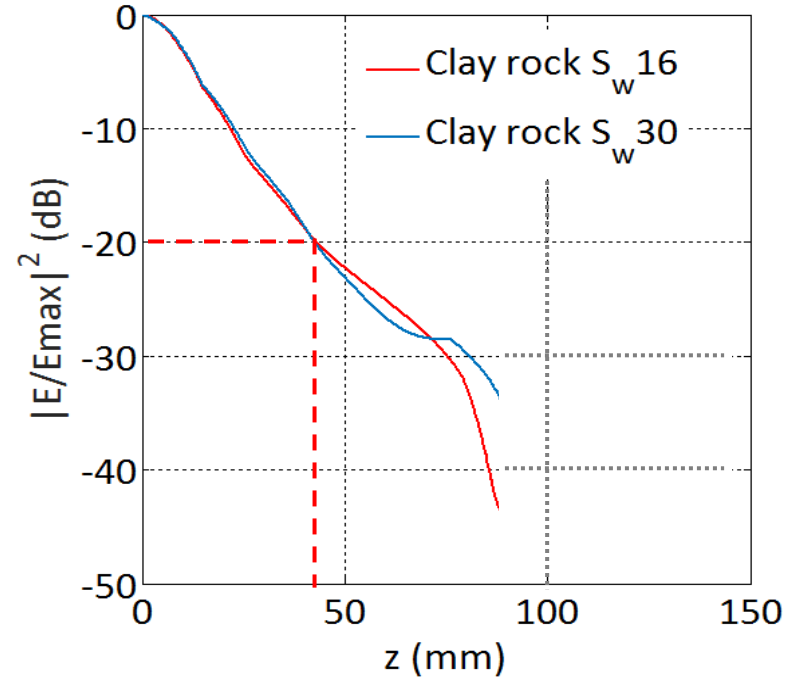
Volume sondé ?

Champ électrique rayonné dans une argilite S_{w45}



Simulations éléments-finis

Atténuation du champ électrique rayonné dans le matériau (argilites S_{w16} et S_{w30}).



20dB d'atténuation à $z = 4\text{ cm}$

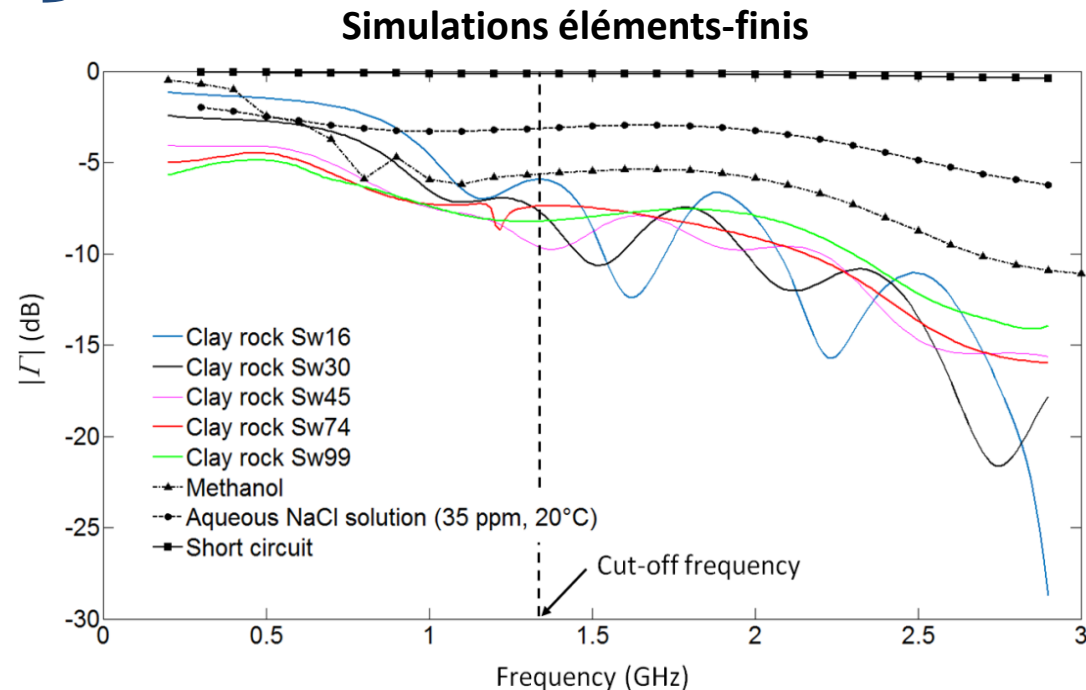
Méthodes électromagnétiques pour le CND des argiles

Sonde à effet de bout géante

Sensibilité à la teneur en eau S_w ?

- Argilite ----- Matériau à caractériser
 - Méthanol
 - Court-circuit
 - Solution d'eau salée
- Milieux de calibration de la sonde

Coefficient de réflexion Γ
pour \neq argilites

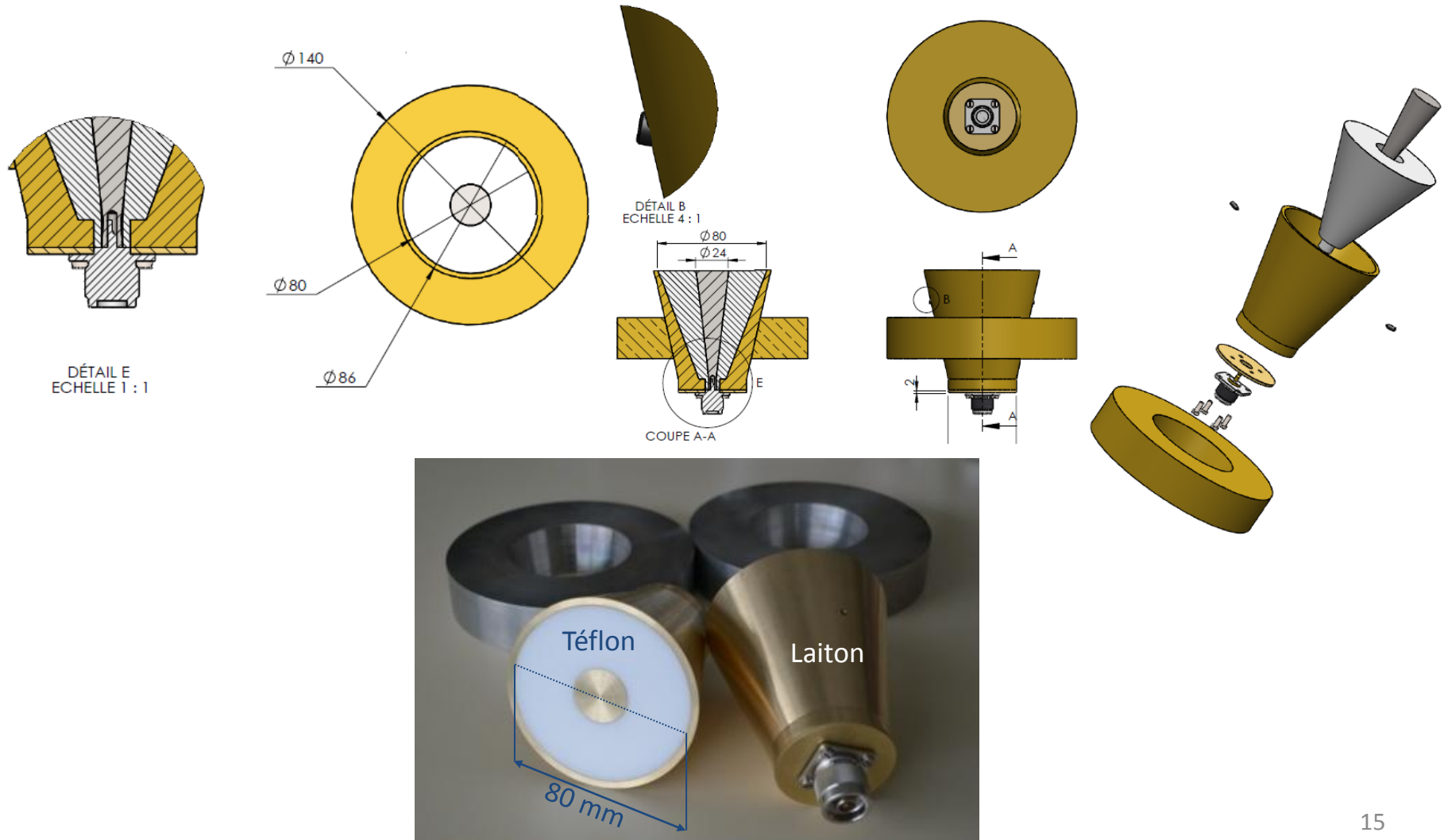


Les sondes s'avèrent sensibles à la teneur en eau des argiles

Méthodes électromagnétiques pour le CND des argiles

Sonde à effet de bout géante

Conception et fabrication



Electromagnetic methods for non destructive evaluation

Dielectric spectroscopy methods for civil engineering

CND nucléaire
Stockage des déchets



Bentonite

Contraintes

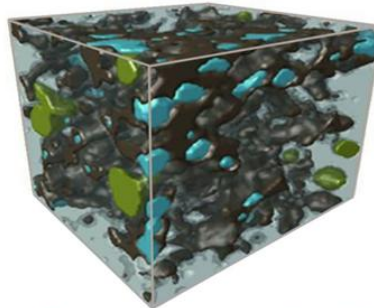
Matériau hétérogène
Dispersif

Paramètres

θ { teneur en eau
densité

Permittivité diélectrique $\epsilon_{r\theta}(f)$

Milieu poreux



θ : teneur en eau, densité...

Post-doc Maria Merlan

Post-doc Abdelhatif El Fellahi

Electromagnetic methods for non destructive evaluation

Dielectric spectroscopy methods for civil engineering

CND nucléaire
Stockage des déchets



Contraintes

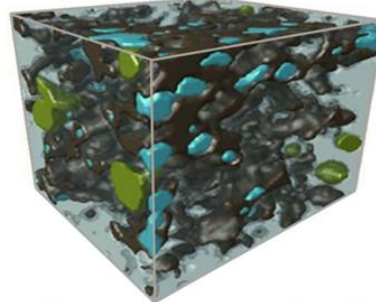
Matériau hétérogène
Dispersif

Paramètres

θ { teneur en eau
densité

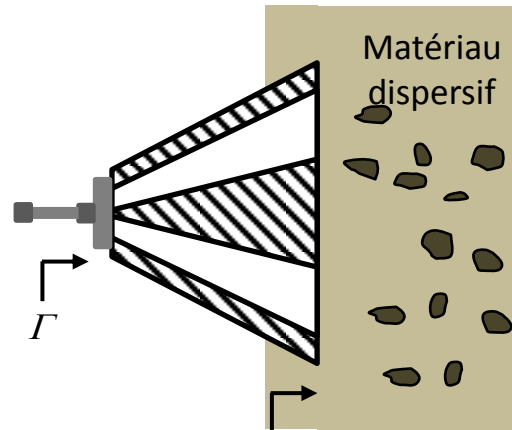
Permittivité diélectrique $\epsilon_{r\theta}(f)$

Milieu poreux



θ : teneur en eau, densité...

Spectroscopie
diélectrique RF



ρ : coefficient de réflexion

$$\rho = f(\text{Permittivité})$$

$$\theta = f(\rho)$$

Post-doc Maria Merlan

Post-doc Abdelhatif El Fellahi

Electromagnetic methods for non destructive evaluation

Dielectric spectroscopy methods for civil engineering

CND nucléaire
Stockage des déchets



Contraintes

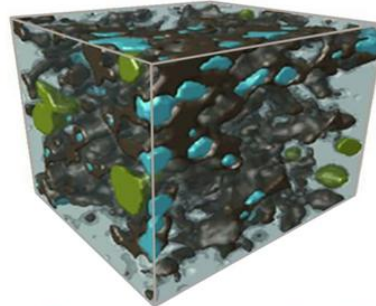
Matériau hétérogène
Dispersif

Paramètres

θ { teneur en eau
densité

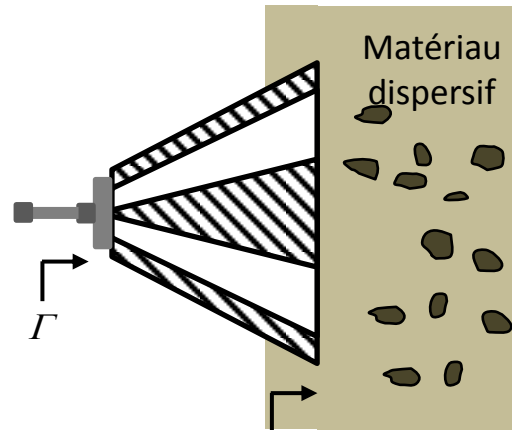
Permittivité diélectrique $\epsilon_{r\theta}(f)$

Milieu poreux



θ : teneur en eau, densité...

Spectroscopie
diélectrique RF



ρ : coefficient de réflexion

$$\rho = f(\text{Permittivité})$$

$$\theta = f(\rho)$$

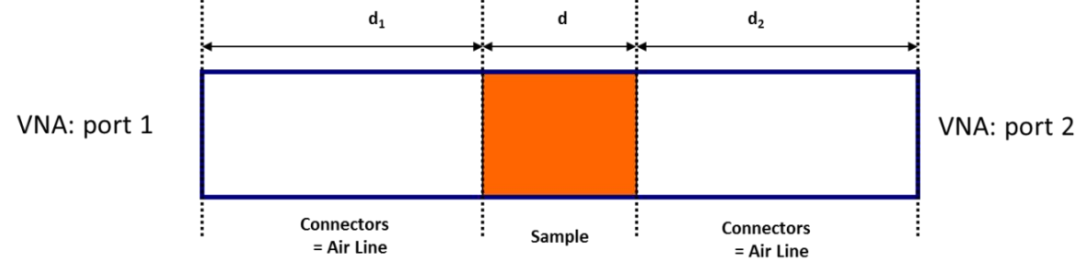
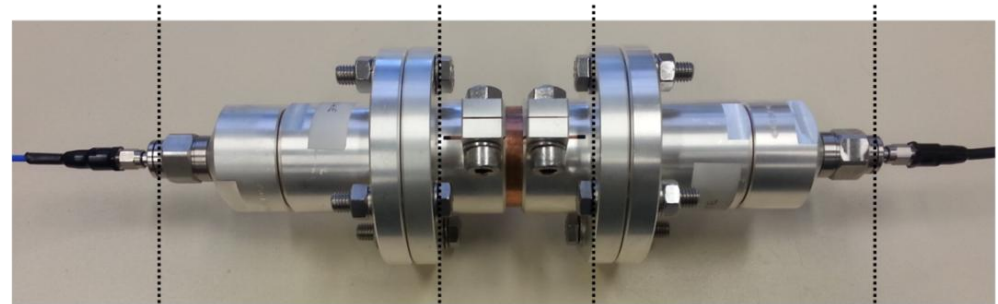
Post-doc Maria Merlan

Post-doc Abdelhatif El Fellahi

CND électromagnétique pour le génie civil

Permittivité de la bentonite ϵ ?

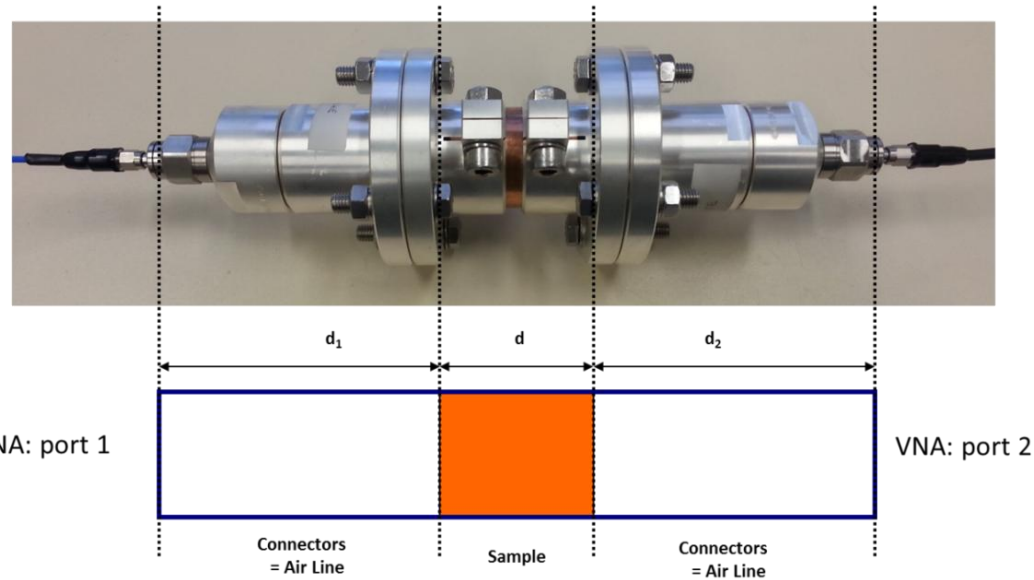
$$\Gamma_a = f(\text{Permittivité})$$



CND électromagnétique pour le génie civil

Permittivité de la bentonite ϵ ?

$$\Gamma_a = f(\text{Permittivité})$$

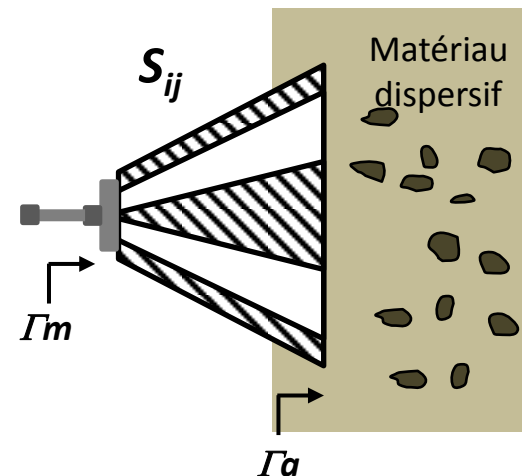


Coefficient de réflexion Γ_a ?

Cas de ligne adapté 50 Ω :

~~$$\Gamma_a = \Gamma_m e^{j\gamma L} = \Gamma_m e^{j4\pi L/\lambda}$$~~

Calibration TRL— Fonction de transference



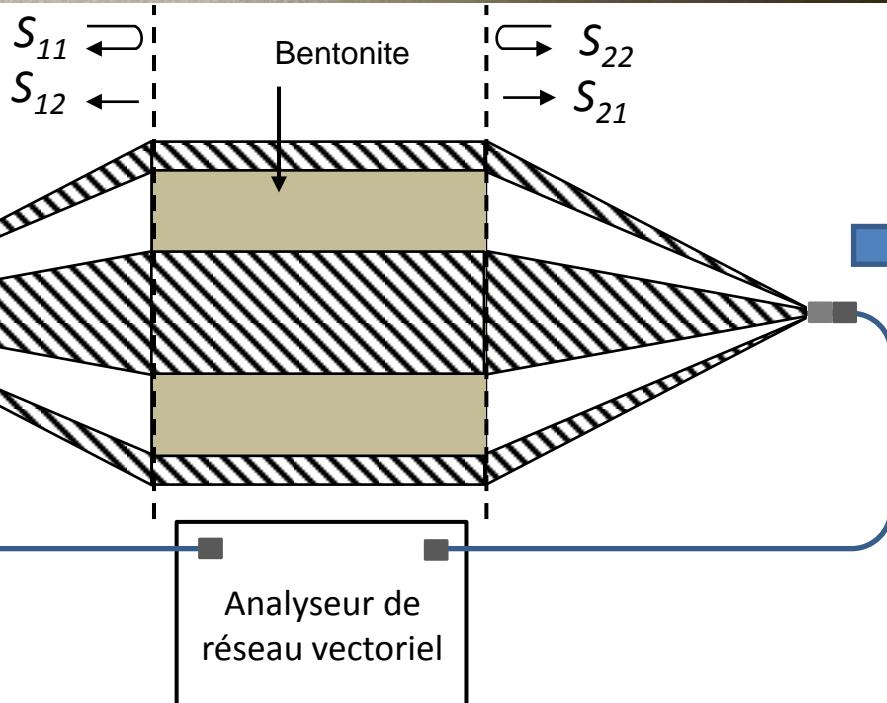
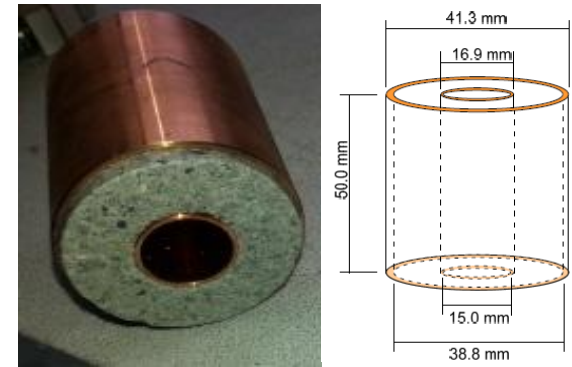
Méthodes électromagnétiques pour le CND des argiles

Cellule coaxiale en émission réflexion

Principe



Echantillon de bentonite



Cette configuration permet la mesure de 4 paramètres S_{ij}

Détermination de $\epsilon_r(f)$...
Hyp. monomode...

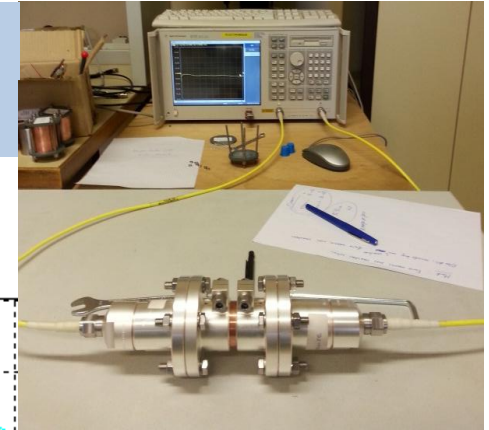
[Ref] N. Wagner and K. Lauer, "Simultaneous determination of the dielectric relaxation behavior and soilwater characteristic curve of undisturbed soil samples," 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, 2012, pp. 3202-3205

Méthodes électromagnétiques pour le CND des argiles

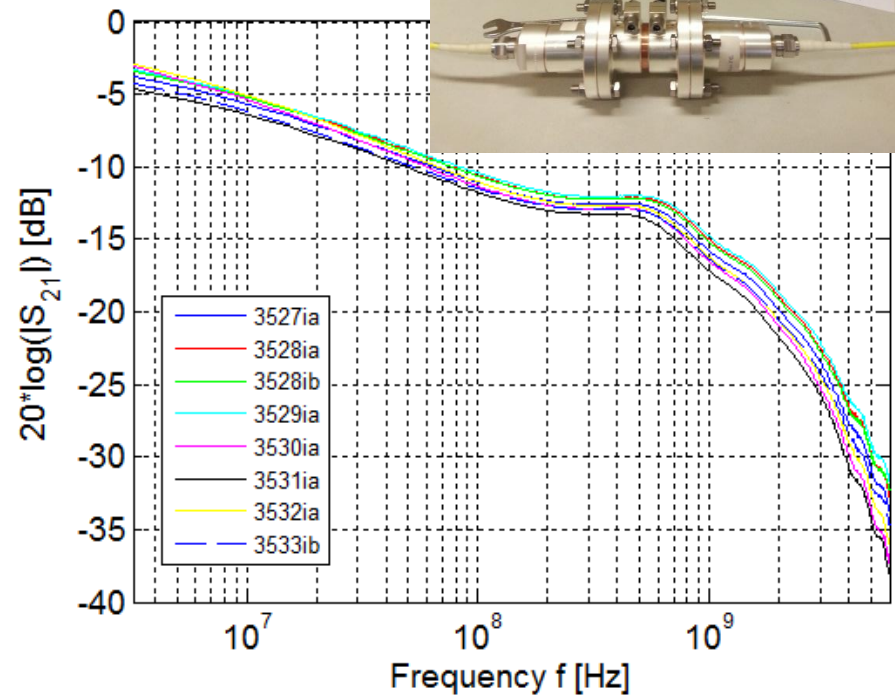
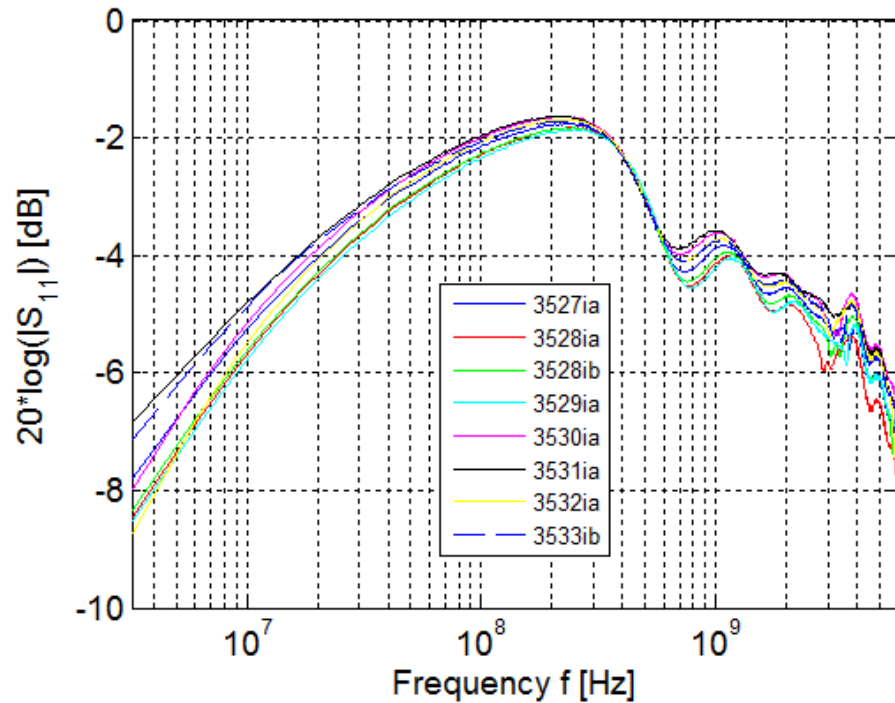
Cellule coaxiale en émission réflexion

Mesures de S_{ij}

Bentonites ayant $\neq S_r$



$$60.60 \leq S_r \text{ (\%)} \leq 83.29 \rightarrow 10.8 \leq W \text{ (\%)} \leq 13.19$$



Les caractéristiques hydriques des bentonites influencent les S_{ij}

Nota : Faibles variations de teneur en eau W entre les échantillons considérés

Méthodes électromagnétiques pour le CND des argiles

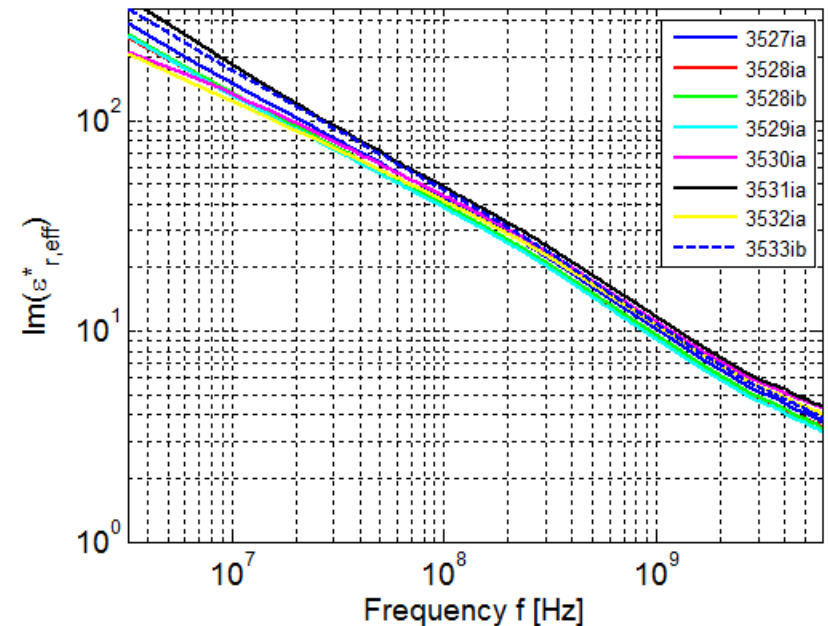
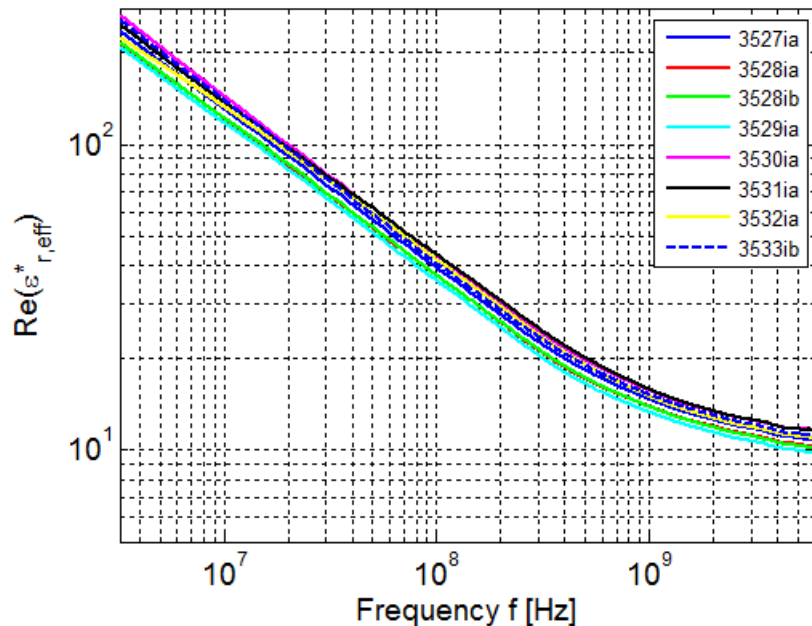
Cellule coaxiale en émission réflexion

Mesures de S_{ij}
Bentonites ayant $\neq S_r$



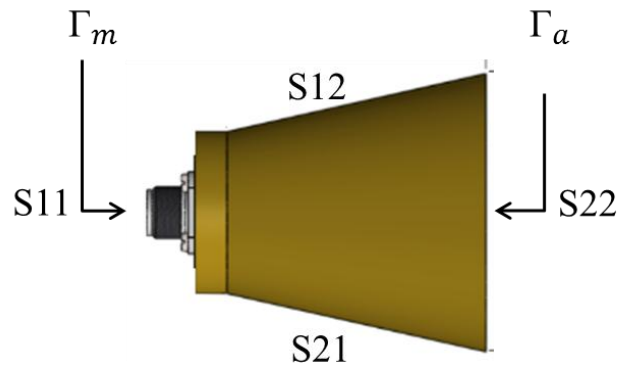
Spectres diélectriques $\epsilon_r(f)$

$$60.60 \leq S_r \text{ (\%)} \leq 83.29 \rightarrow 10.8 \leq W \text{ (\%)} \leq 13.19$$



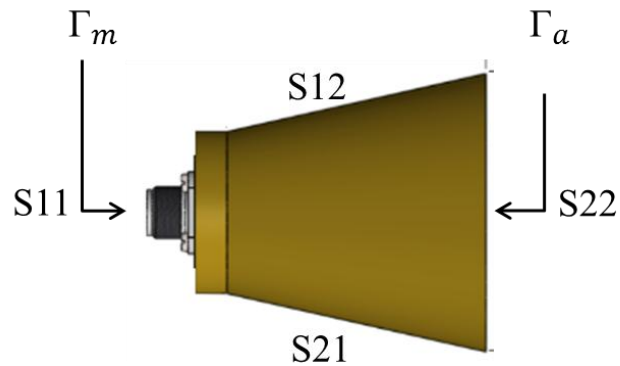
Méthodes électromagnétiques pour le CND des argiles

Determination of the S-parameters of the probe (TRL method)

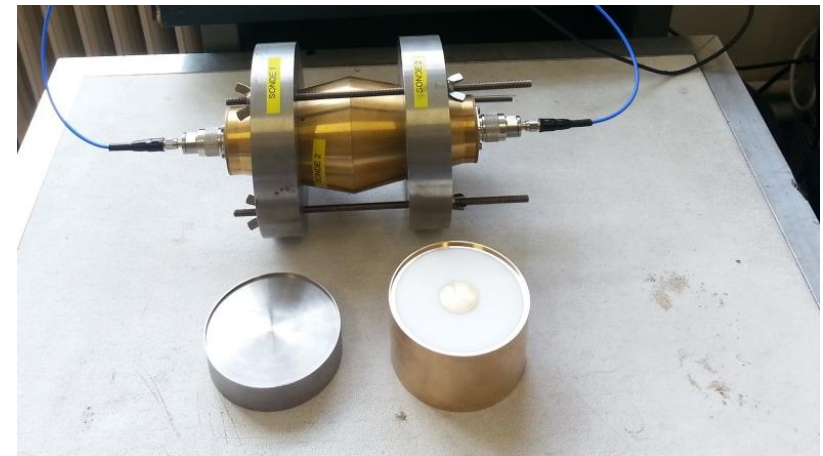
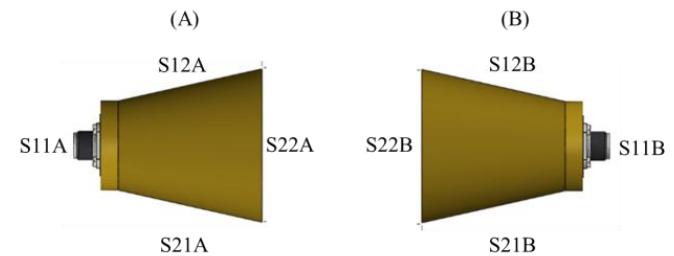


Méthodes électromagnétiques pour le CND des argiles

Determination of the S-parameters of the probe (TRL method)

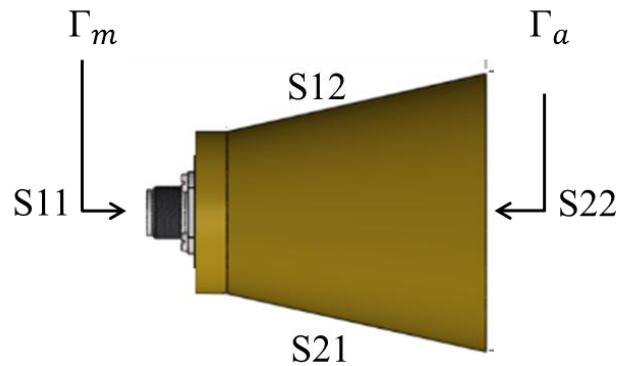


Two probes
Holding structure
3 set of measurements (T-R-L)

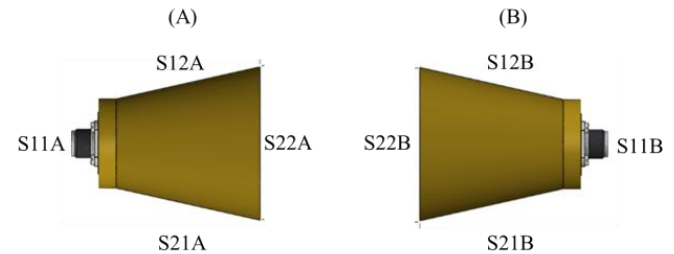


Méthodes électromagnétiques pour le CND des argiles

Determination of the S-parameters of the probe (TRL method)

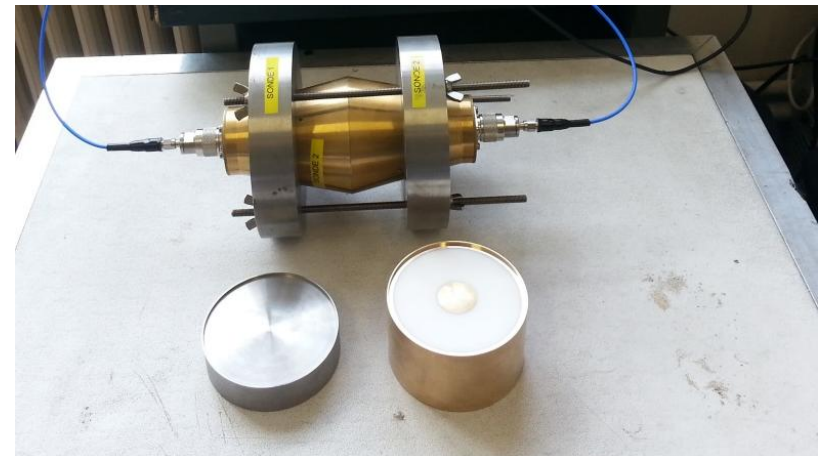


Two probes
Holding structure
3 set of measurements (T-R-L)



$$\Gamma_m = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_a}{1 - S_{22}\Gamma_a}$$

$$\Gamma_a = \frac{S_{11} - \Gamma_m}{S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12} - S_{22}\Gamma_m}$$



Electromagnetic methods for non destructive evaluation

Exemples of works: Dielectric spectroscopy methods for civil engineering

PROBLÈME

CND nucléaire
Stockage des déchets



Bentonite

Contraintes
Matériau hétérogène
Dispersif

Paramètres
 θ { teneur en eau
densité

Post-doc Maria Merlan

Post-doc Abdelhatif El Fellahi

Electromagnetic methods for non destructive evaluation

Exemples of works: Dielectric spectroscopy methods for civil engineering

RÉSULTATS

CND nucléaire
Stockage des déchets



Bentonite

Contraintes
Matériau hétérogène
Dispersif

Paramètres
 θ { teneur en eau
densité

Post-doc Maria Merlan

Post-doc Abdelhatif El Fellahi

Electromagnetic methods for non destructive evaluation

Exemples of works: Dielectric spectroscopy methods for civil engineering

CND nucléaire
Stockage des déchets



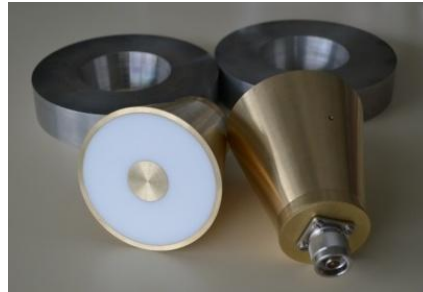
Bentonite

Contraintes

Matériau hétérogène
Dispersif

Paramètres

θ { teneur en eau
densité



RÉSULTATS

Post-doc Maria Merlan

Post-doc Abdelhatif El Fellahi

Electromagnetic methods for non destructive evaluation

Exemples of works: Dielectric spectroscopy methods for civil engineering

RÉSULTATS

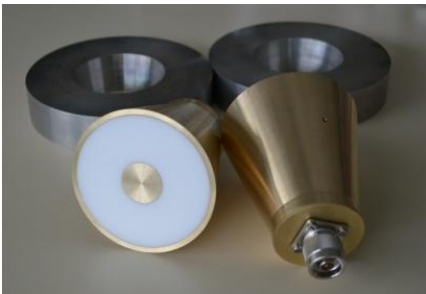
CND nucléaire
Stockage des déchets



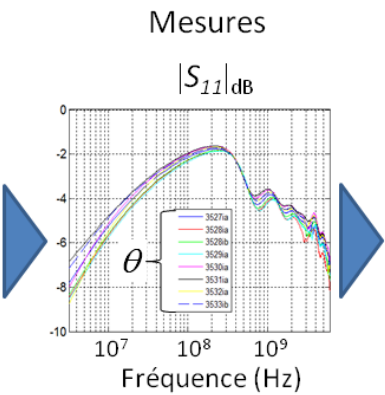
Bentonite

Contraintes
Matériau hétérogène
Dispersif

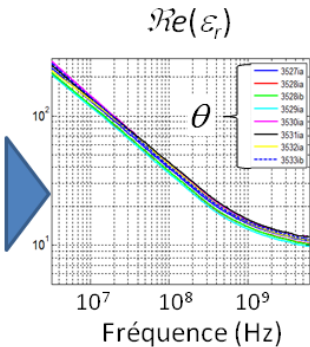
Paramètres
 θ { teneur en eau
densité



Spectroscopie diélectrique RF
Cellule coaxiale



Traitement du signal
Problème inverse
Monte Carlo Markov Chain (MCMC)




Electromagnetic methods for non destructive evaluation

Exemples of works: Dielectric spectroscopy methods for civil engineering

RÉSULTATS

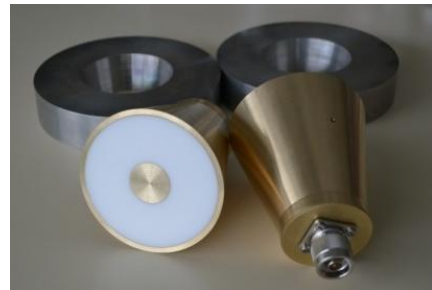
CND nucléaire
Stockage des déchets

Bentonite


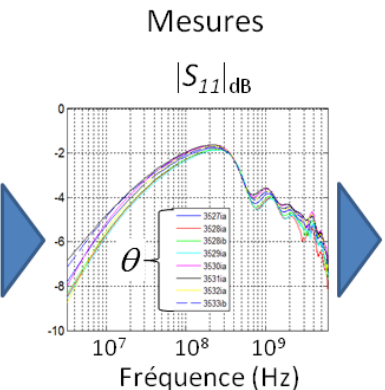
Contraintes
Matériau hétérogène
Dispersif

Paramètres
 θ { teneur en eau
densité



Spectroscopie diélectrique RF

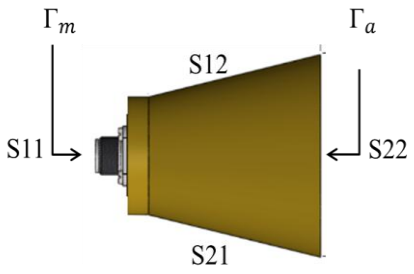
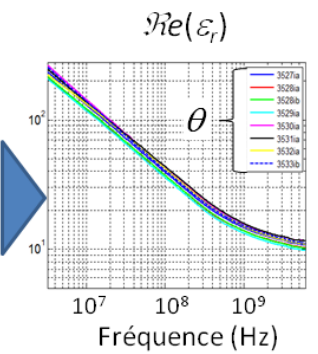
Cellule coaxiale

Traitement du signal

Problème inverse

Monte Carlo Markov Chain (MCMC)



$$\Gamma_m = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_a}{1 - S_{22}\Gamma_a}$$

$$\Gamma_a = \frac{S_{11} - \Gamma_m}{S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12} - S_{22}\Gamma_m}$$


Post-doc Maria Merlan
Post-doc Abdelhatif El Fellahi

Electromagnetic methods for non destructive evaluation

Exemples of works: Dielectric spectroscopy methods for civil engineering

RÉSULTATS

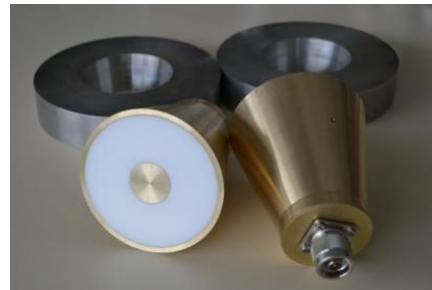
CND nucléaire
Stockage des déchets




Bentonite


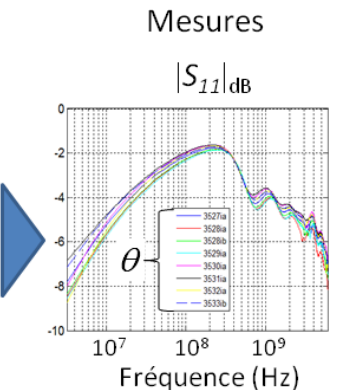
Contraintes
Matériau hétérogène
Dispersif

Paramètres
 θ { teneur en eau
densité



Spectroscopie diélectrique RF

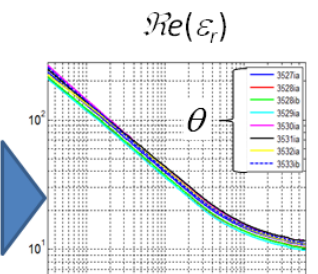
Cellule coaxiale

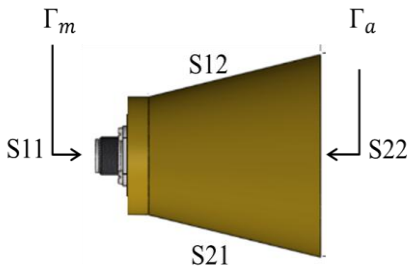
Traitement du signal

Problème inverse

Monte Carlo Markov Chain (MCMC)



Simulation versus Instrumentation



$$\Gamma_m = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}}{1 - S_{22}\Gamma_m}$$

$$\Gamma_a = \frac{S_{11} - \Gamma_m}{S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12} - S_{22}\Gamma_m}$$

Post-doc Maria Merlan
Post-doc Abdelhatif El Fellahi

CND électromagnétique pour le génie civil

SATIE / LMT + CEA Saclay / Andra / University of Queensland (Australie)

❖ Projet Lasips 2015 SATIE/CEA/Andra/University of Queensland

❑ Dvpt de méthodes pour le CND des argiles ➔ pour la sécurité des déchets nucléaire

❖ Projet Farman Hydem en cours...

❑ Dvpt de méthodes pour le CND de matériaux bio-sourcés pour les bâtiments

❑ Stage de M2R : Mehdi Ferhat (élève EEA), mars 2017...

❖ Dvpt des relations avec l'University of Queensland (Australie)

❑ Mai- Juillet 2017 : Eric Vourc'h : visiting academic

❑ Mai – aout 2017 : Stage de recherche de Mathieu Bajodek (élève M1, EEA)

Collaborations

Génie électrique (EEA)

Instrumentation Traitement du signal

SATIE

SATIE

L2S

Mécanique

cea
SACLAY

LMT
CACHAN

Bauhaus-
Universität
Weimar

THE UNIVERSITY
OF QUEENSLAND
AUSTRALIA

EPIC

ANDRA

Collaborations internationales



Bauhaus-
Universität
Weimar

THE UNIVERSITY
OF QUEENSLAND
AUSTRALIA



école
normale
supérieure
paris—saclay



10 ans de l'Institut Farman

ENS Paris-Saclay
27 septembre 2017



Contrôle non destructif électromagnétique pour le génie civil

Projet Labex LaSIPS Rfhydromeca (2015-2017)

Projet Farman HYDEM (2016-2017)

Maria Merlan (SATIE)

Farid Benboudjema (LMT)

Franck Daout, Abdelhatif El Fellahi, Mehdi Ferhat, Françoise Schmitt, Eric Vourc'h (SATIE).

Marc Imbert, Claude Gatabin (CEA Saclay/LECBA :)

Sylvie Lesoille (Andra)

Thierry Bore (University of Queensland)