



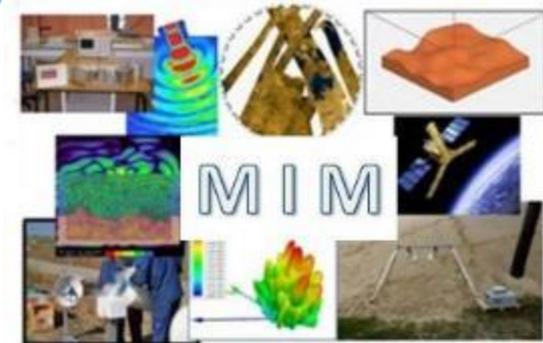
L'analyse électromagnétique des sols, le radar à pénétration de sol (GPR) et les capteurs micro-ondes

→ Quelques rappels EM

→ GPR

→ Capteurs EM

→ Nouvelles approches



Matériaux Interactions Micro-Ondes

François Demontoux



université
de BORDEAUX



Laboratoire de l'Intégration du
Matériau au Système

Quelques rappels de propagation

Équations de Maxwell

$$\text{rot}(\vec{\mathbf{H}}) = \vec{\mathbf{J}} + \frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t}$$

$$\text{rot}(\vec{\mathbf{E}}) = -\frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t}$$

$$\text{div}(\vec{\mathbf{B}}) = 0$$

$$\text{div}(\vec{\mathbf{D}}) = \rho$$

E : champ électrique (V.m^{-1})

D : déplacement électrique (C.m^{-2})

H : champ magnétique (A.m^{-1})

B : induction magnétique (T)

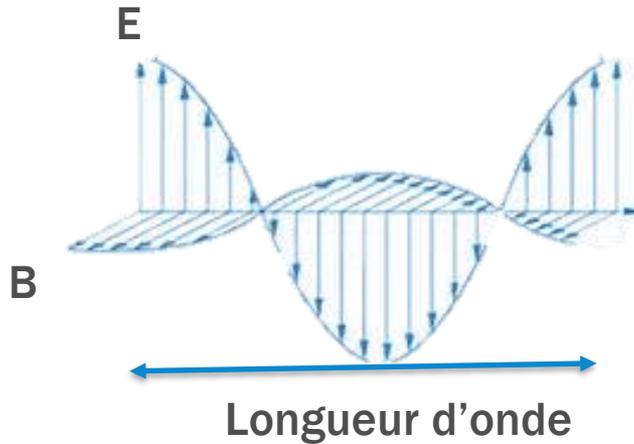
J : densité de courant (A.m^{-2})

ρ : densité volumique de charge (C.m^{-3})



L'analyse électromagnétique des sols – GPR et capteurs MO

Quelques rappels de propagation



Permittivité

Propriété du matériau vis-à-vis du champ électrique

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0 (\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'')$$

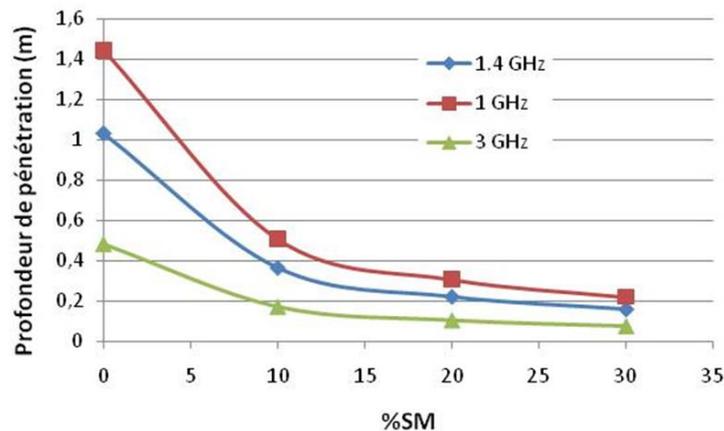
Perméabilité

Propriété du matériau vis-à-vis du champ magnétique

$$\mu = \mu_0 \mu_r = \mu_0 (\mu_r' + j\mu_r'')$$

Longueur d'onde et profondeur de pénétration

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

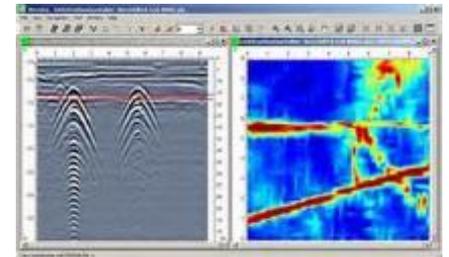


Sol = 17% Argile 36% Sable

Principe GPR et applications actuelles

➤ GPR ?

- Radar
- Antennes
- Mesures en réflexion et/ou transmission
- Techniques de génération d'ondes : impulsionnelle, step frequency, modulation de fréquence (FMCW) ...
- Équipement portable ou sur chariot
- Respect des normes d'exposition
- Visualisation de ruptures de permittivité
- Profil 2D ou 3D qualitatif et indicatif du sol
- Nécessite une interprétation du signal
- Détection d'objets ou de cavités



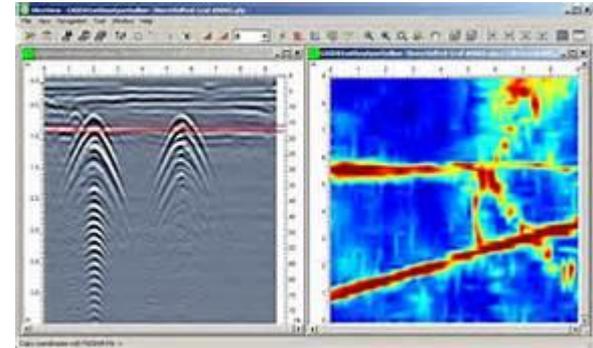
L'analyse électromagnétique des sols – GPR et capteurs MO

Principe GPR et applications actuelles

- Deux grandes familles de GPR :
 - Les antennes ne sont pas en contact avec le sol



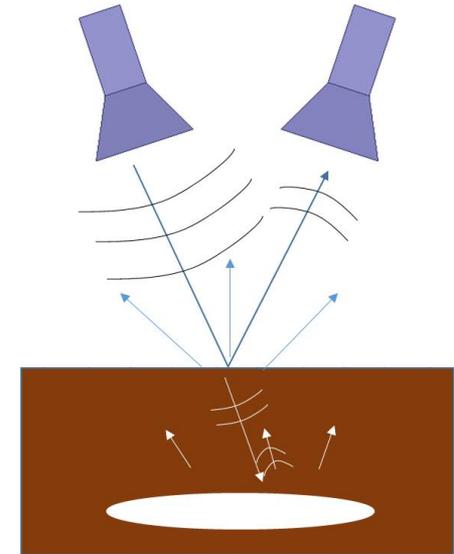
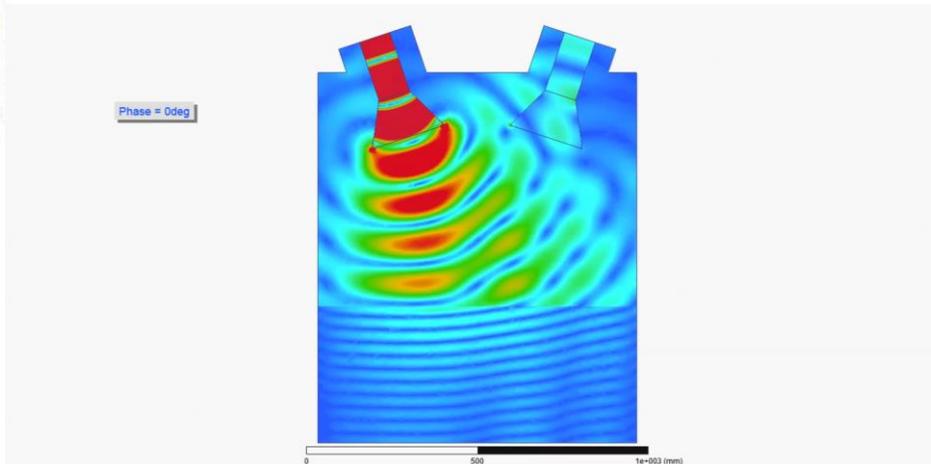
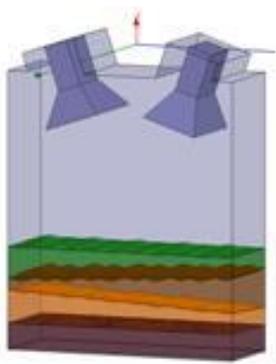
- Antennes en contact avec le sol



L'analyse électromagnétique des sols – GPR et capteurs MO

Principe GPR et applications actuelles

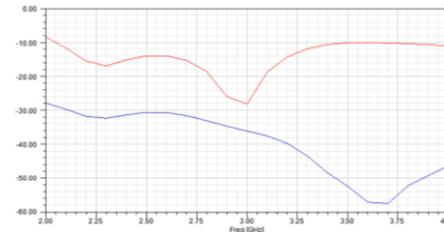
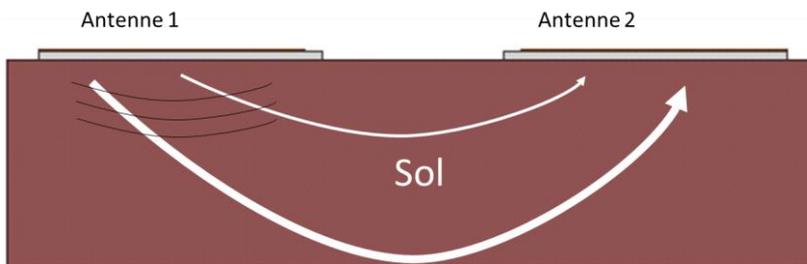
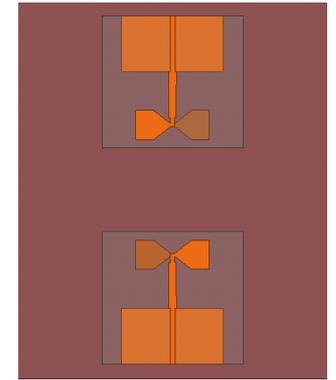
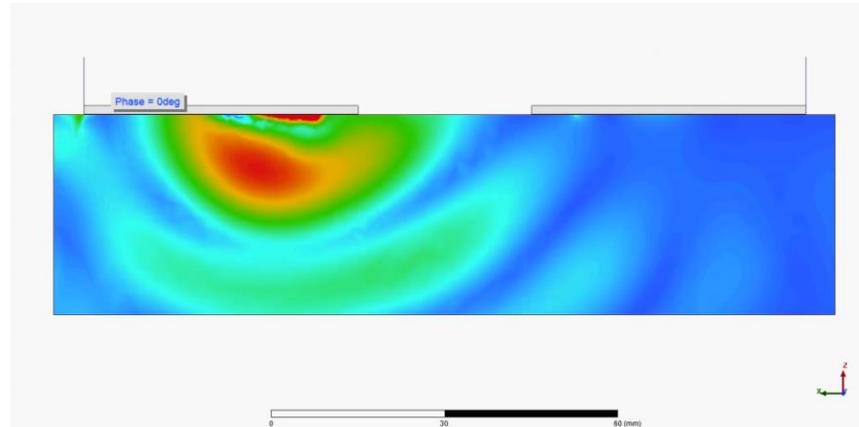
- Les antennes ne sont pas en contact avec le sol



L'analyse électromagnétique des sols – GPR et capteurs MO

Principe GPR et applications actuelles

➤ Antennes en contact avec le sol



Capteurs EM et applications sols actuelles

➤ Capteur capacitif :

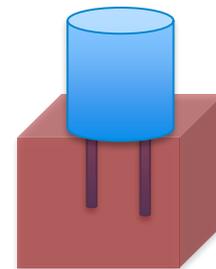
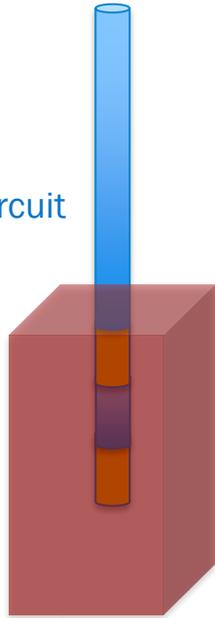
- Mesure de la partie réelle de la permittivité relative à l'aide d'un pont capacitif ou d'un circuit électrique résonant
- Implantation de loi permittivité/teneur en eau
- Mesures très localisée
- Mesures sur une plage limitée de fréquences (entre 1 et 100 MHz)
- Application à la mesure de la teneur en eau du sol

➤ Réflectométrie temporelle (time domain reflectometry, TDR)

- Mesure de la partie réelle de la permittivité relative à partir de la vitesse de propagation des ondes
- Implantation de loi permittivité/teneur en eau
- Mesures sur une plage limitée de fréquences (jusqu'à 1GHz)
- Mesure sur un faible volume
- Application à la mesure de la teneur en eau du sol

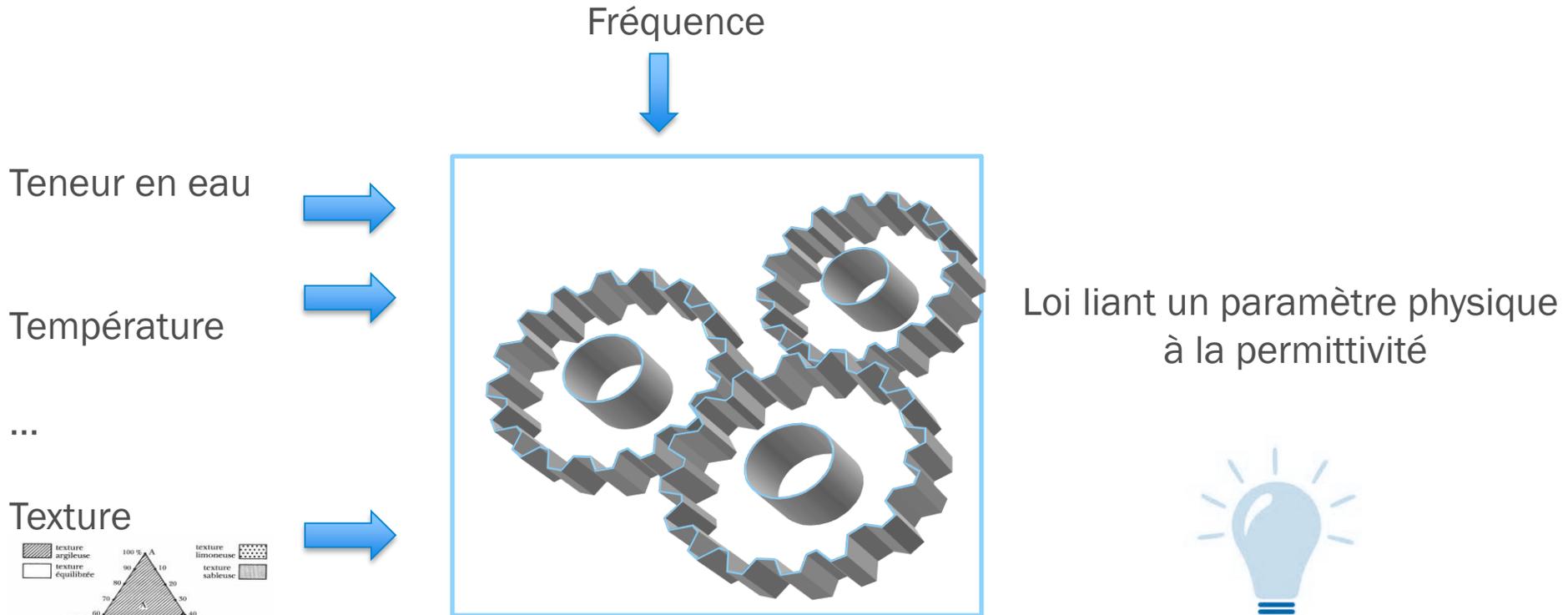
➤ Capteur inductif :

- Production d'un champ magnétique et mesure du signal induit par la présence d'un matériau conducteur
- Dédié à la détection d'objets

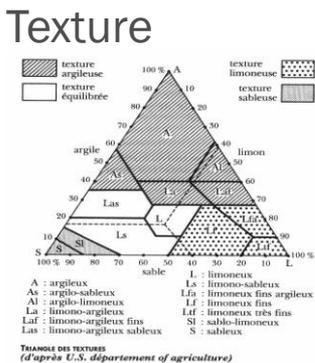


L'analyse électromagnétique des sols – GPR et capteurs MO

Capteurs EM et nouvelles approches



Modèle diélectrique des sols

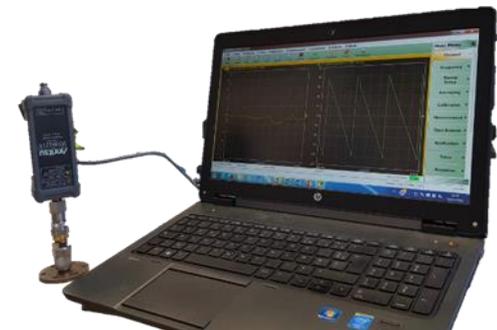
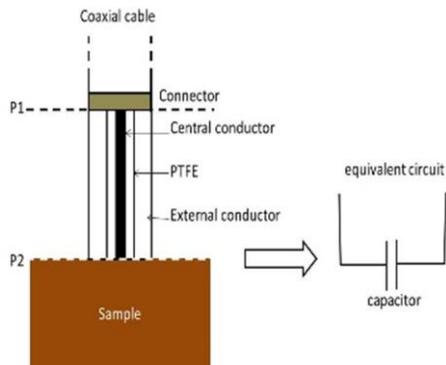


*d'après US department of agriculture

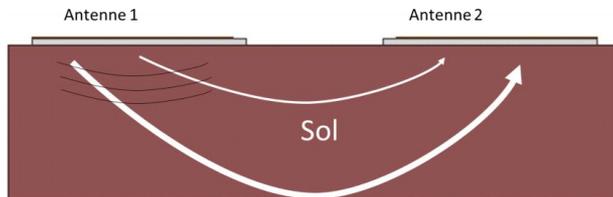
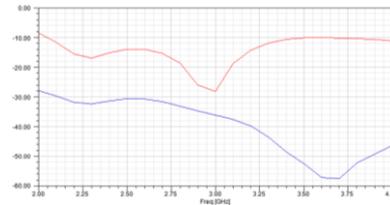
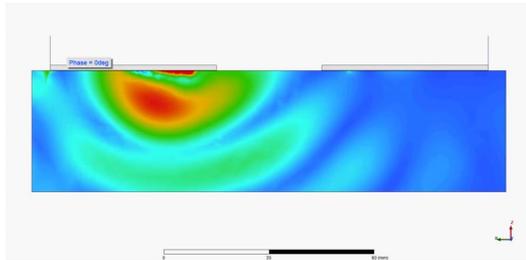
L'analyse électromagnétique des sols – GPR et capteurs MO

Nouvelles approches sondes capacitives

- Sonde capacitive à effet de bout
 - Mesure de la partie réelle et imaginaire de la permittivité relative à l'aide de mesure en réflexion
 - Mesures très localisée
 - Mesures sur une large plage de fréquences (100 MHz ... 10 GHz)
 - Spectroscopie MO large bande + mesure complète de la permittivité
- Possibilité de relier ces mesures à de nombreux paramètres physique des sols
- Création de capteurs multiphysique



➤ Reconstruction de profils de propriétés physiques de sols



Extraction d'un profil de permittivité

Modèle diélectrique

Obtention d'un profil de propriétés physiques des matériaux

L'analyse électromagnétique des sols – GPR et capteurs MO

Capteurs communicants - communication Sigfox ou LoRa

Sigfox cloud

Station
de base
SigFox

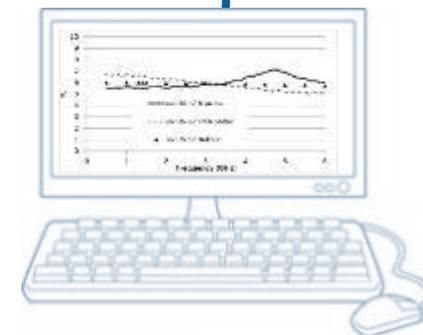


SigFox Backend server



HTTP callback

Serveur



868 MHz



Mesures In-situ



5 décembre 2017

L'analyse électromagnétique des sols – GPR et capteurs MO

Quelques liens utiles

- Contact :
 - François Demontoux : francois.demontoux@ims-bordeaux.fr
- Quelques liens sur le GPR
 - <http://www.usradar.com/about-ground-penetrating-radar-gpr/>
 - <https://geomodel.com/>
 - <https://www.geophysical.com/gssi-news>
 - <http://radar-de-sol.fr/radar-de-sol-que-choisir/>
- Laboratoire IMS, équipe MIM
 - <https://www.ims-bordeaux.fr/fr/recherche/groupes-recherche/59-ondes/mim/42-MIM>
- Capteurs
 - <https://www.agralis-services.fr/sondes-sentek/>
 - <http://www.sentek.com.au/>
 - <https://www.decagon.com/en/soils/volumetric-water-content-sensors/>
 - <http://www.corhize.com/fr/sondes-pour-le-pilotage-de-l-irrigation/55-sondes-capacitives-a-profil-aquacheck>
 - www.aquacheck.co.za
 - <https://www.specmeters.com/>
 - <https://imko.de/en/products/soilmoisture>

Questions ?

Merci de votre
attention