

# Sondage du sous-sol profond de la planète Mars par le radar à pénétration de sol EISS

M. Biancheri-Astier, V. Ciarletti, A. Reineix, C. Corbel, Y. Simon, R. Hassen-Khodja

A ce jour, la surface de Mars est bien caractérisée. Néanmoins, malgré de multiples missions, très peu d'informations sont disponibles sur son sous-sol. La mission NetLander initiée par le CNES (1998 annulée en 2004), première mission de mesures multi-sites, avait comme objectifs scientifiques l'exploration du sous-sol et la recherche d'éventuels réservoirs hydriques, reliques d'un passé chaud et humide sur Mars, avec la mise en place à la surface de la planète d'un réseau de stations scientifiques. Tous les scientifiques s'accordent à dire que ces réservoirs, s'ils existent, doivent être profondément enfouis sous la surface Martienne au delà du kilomètre à l'Equateur. Un forage à de telles profondeurs étant bien évidemment exclu, le LATMOS a développé un radar pour la mission spatiale ExoMars (ESA), un radar à pénétration de sol ou GPR (Ground Penetrating Radar) baptisé EISS (Electromagnetic Investigation of the Sub Surface), version bi-statique du radar TAPIR (Terrestrial And Planetary Imaging Radar) évolution du radar de NetLander. Le sondage électromagnétique du sous-sol, méthode de prospection non destructive particulièrement adaptée à la recherche d'eau, apparaît comme la meilleure des solutions pour tester la validité des modèles du sous-sol martien.

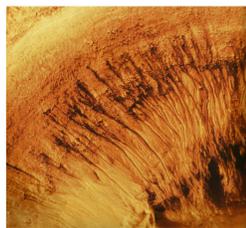
## Présence d'eau liquide sur Mars ?

Les conditions actuelles de pression ( $\sim 6.1$  mbar) et de température ( $T_{\text{moy}} = -63^\circ\text{C}$ ) sur Mars interdisent la présence d'eau liquide à sa surface de façon stable. Pourtant l'existence de structures paléo-hydrologiques incite à penser, qu'un jour, l'eau a coulé sur Mars.



### Qu'est-il advenu de cette eau ?

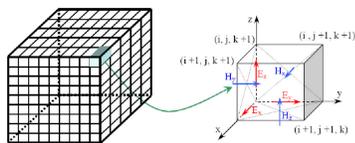
- Echappée avec l'atmosphère ET/OU
- Retenue dans des réservoirs souterrains



Si l'histoire de l'eau sur Mars est encore mal comprise, beaucoup de scientifiques s'accordent à dire qu'une partie de l'eau martienne est aujourd'hui piégée dans son sous-sol sous forme de glace, dans le pergélisol et éventuellement sous forme liquide à des profondeurs plus importantes, de l'ordre du kilomètre.

## Simulations numériques et analytiques

Un code FDTD 3D (TEMSEI-FD) a été développé par l'XLIM pour simuler la propagation des ondes dans des milieux plus ou moins complexes et le comportement des antennes posées sur le sol. Ce code s'appuie sur la résolution rigoureuse des équations de Maxwell dans un volume de calcul divisé en cellules dont la taille a été choisie suffisamment petite pour éviter toute dispersion numérique ( $\lambda/10$ ). De plus, des CPML (Coupled Perfectly Matched Layer) limitent les réflexions des ondes EM sur les murs de la boîte de calcul.



## EISS : radar GPR HF à impulsions polarimétriques

Un GPR est un outil non destructif de prospection d'un milieu opaque. Son principe repose sur l'interaction des ondes électromagnétiques (EM) avec les hétérogénéités de ce milieu. Il s'agit d'un système actif qui éclaire, depuis la surface, une large portion du sous-sol lui permettant d'en révéler ses discontinuités afin de caractériser son environnement géologique.

La mesure du temps d'aller-retour des échos reçus permet d'évaluer la profondeur de la couche réflectrice. L'amplitude et la forme du signal renseignent sur sa nature.

### Caractéristique du signal émis :

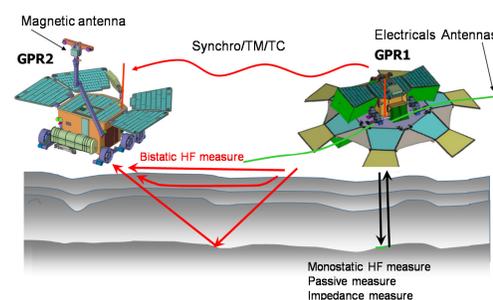
- Fréquences centrales : 2-4 MHz
  - » Profondeur de pénétration importante ( $> 1$  km)
  - » Dimensionnement réaliste des antennes (35m)
- Durée d'impulsions : de 250ns à 10µs
- Intégrations cohérentes : 1 à  $2^{31}$  » amélioration du SNB

### Antennes :

- 2 monopôles électriques chargés résistivement »  $E_x$
- 1 antenne magnétique orientable »  $H_x, H_y, H_z$

### Modes de fonctionnement :

- Passif : Mesure du bruit radioélectrique ambiant
- Mesure d'impédance : déterminer les propriétés EM du sol
- Mono-statique : radar GPR1 en Tx/Rx
- Bi-statique : radar GRP1 en Tx/Rx + radar GPR2 en Rx



Système de déploiement de l'antenne électrique

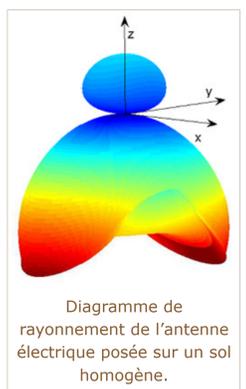
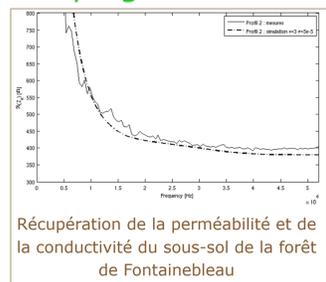


Diagramme de rayonnement de l'antenne électrique posée sur un sol homogène.

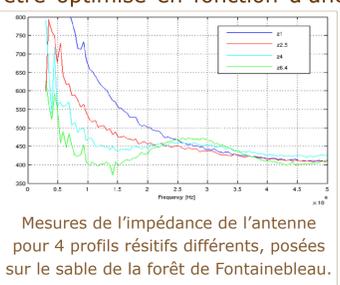
## Couplage entre l'antenne électrique et le sous-sol (Publication en cours GJR Remote Sensing)



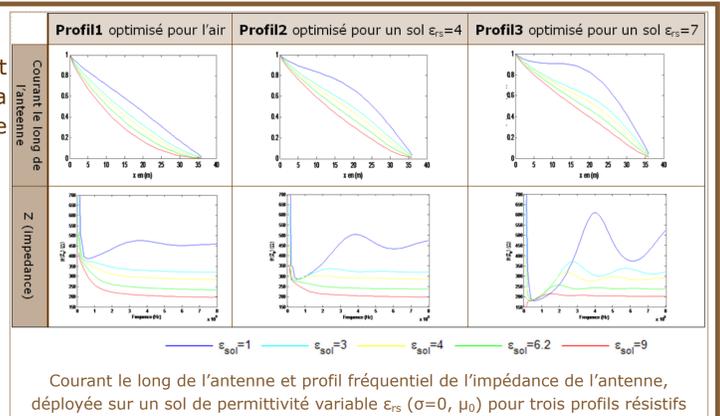
Les performances de trois profils résistifs de référence seront étudiées et comparées en présence de sous-sols homogènes dont la permittivité  $\epsilon_{r\text{-sol}}$  prendra différentes valeurs. Le profil résistif des antennes doit être optimisé en fonction d'une valeur estimée a priori de la permittivité  $\epsilon_{r\text{-opt}}$ , cependant les antennes seront déployées sur un sol dont la permittivité ( $\epsilon_{r\text{-sol}}$ ) peut être différente.

Nous constatons que lorsque le profil résistif de l'antenne est optimisé pour un sous-sol de permittivité forte, relativement au sous-sol présent sous l'antenne, l'impédance de celle-ci fluctue dans la bande passante du radar et des phénomènes de ringing apparaissent.

On peut exploiter ce couplage pour déterminer la permittivité du sous-sol qui permettra de convertir les retards mesurés en distances (Le Gall et al., 2006).



Mesures de l'impédance de l'antenne pour 4 profils résistifs différents, posées sur le sable de la forêt de Fontainebleau.



Courant le long de l'antenne et profil fréquentiel de l'impédance de l'antenne, déployée sur un sol de permittivité variable  $\epsilon_{rs}$  ( $\sigma=0, \mu_0$ ) pour trois profils résistifs

## Influence de l'angle entre antenne : Mode bi-statique (Publication en cours IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing)

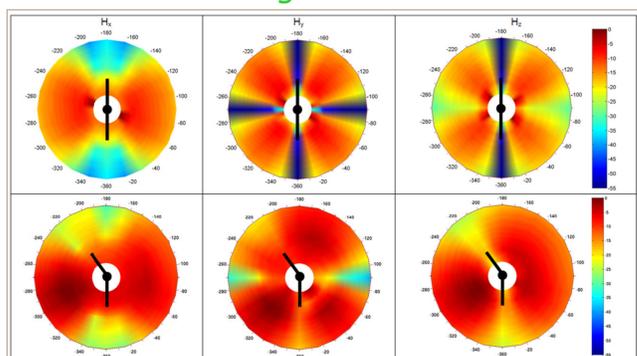


Figure. Carte de l'amplitude maximale du champ magnétique reçu au niveau de la station mobile, correspond à l'onde réfléchi  $n=1$ . L'échelle est en dB, normalisée par le max du champ reçu à 100m.

Dans le contexte de la mission ExoMars, l'angle exact entre les directions de déploiement des deux monopôles ne sera pas de  $180^\circ$  mais sera choisi afin de minimiser le contact avec la structure et les panneaux solaires de la station fixe, tout en assurant un rayonnement le plus omnidirectionnel possible.

Afin d'étudier le rayonnement de monopôles non alignés sur le maillage orthogonal, les simulations ont été faites en utilisant des sources ponctuelles de courant et un pas spatial adapté à l'angle entre les deux monopôles. A chaque source est associée une fonction temporelle décrivant la forme de l'excitation. Son amplitude est calculée analytiquement en tenant compte de la décroissance du courant le long de l'antenne en fonction du sous-sol. Chaque monopôle est alors considéré comme la somme de dipôles élémentaires parcourus par des courants d'intensité variable (Principe de Huygens).

Les trois composantes du champ magnétiques sont calculées pour un récepteur situé entre 100 et 500m de l'émetteur dans une direction variant de  $0$  à  $360^\circ$ . Avec un dipôle aligné, on note des "zéros" de réception (niveau de réception très faible). La configuration monopôles non alignés ne fait pas apparaître de telles zones critiques et permet d'assurer sur les signaux directs comme sur ceux réfléchis un niveau significatif sur chacune des composantes du champ magnétique quelque soit la position du récepteur

Le radar EISS est basé sur la capacité du mode bi-statique de TAPIR. L'idée originale de EISS est d'utiliser l'opportunité qui lui est offerte, par la présence simultanée à la surface de Mars d'une station fixe (GEP : Geophysical Environmental Package) et d'un rover (station mobile). EISS permettra d'accomplir des sondages bi-statiques du sous-sol : les longs dipôles (antennes) seront chargés de transmettre les ondes électromagnétiques du Lander et une petite antenne magnétique située sur le rover sera utilisée comme récepteur.