

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

M. Biancheri-Astier, V. Ciarletti, A. Le Gall, JJ. Berthelier, A. Reineix, R. Ney, C. Corbel, F. Dolon

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 CETP a proposé d'embarquer au bord de la nouvelle mission 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.

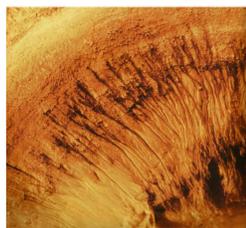
Présence d'eau liquide sur Mars ?

Les conditions actuelles de pression (~6.1mbar) et de température ($T_{moy} = -63^{\circ}C$) 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 comme le suggèrent les images de chenaux d'inondation et d'anciennes vallées fluviales (sondes Viking, Mars Odyssey, MER, Mars Orbiter).



Qu'est-il advenu de cette eau ?

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

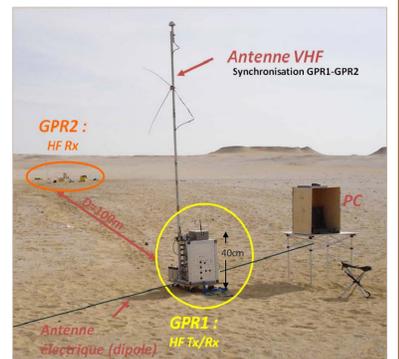


Si l'histoire de l'eau sur Mars est encore mal comprise, beaucoup de scientifiques s'accordent à dire qu'une partie de l'eau martienne est aujourd'hui piégée dans son sous-sol sous forme de glace, dans le pergélisol et éventuellement sous forme liquide à des profondeurs plus importantes variant entre ~1-3km au niveau de l'Equateur, et entre ~7-10km, dans les régions polaires.

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.

EISS envoie des impulsions électromagnétiques au moyen d'une antenne émettrice. Ensuite, l'onde se propage en s'atténuant dans le milieu traversé et se réfléchit sur les interfaces séparant deux couches aux caractéristiques EM différentes (milieu sec / humide).



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

Caractéristique du signal émis :

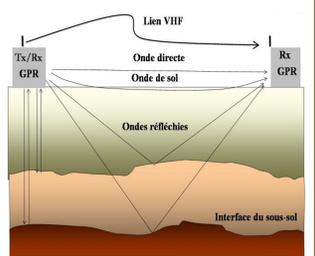
- Fréquences centrales : 2-4 MHz
 - » Profondeur de pénétration importante (> 1 km)
 - » Dimensionnement réaliste des antennes (35m)
- Durée d'impulsions : de 250ns à 10µs
- Intégrations cohérentes : 1 à 2^{31} » amélioration du SNB
- Codage : biphase, BPSK

Antennes :

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

Modes de fonctionnement :

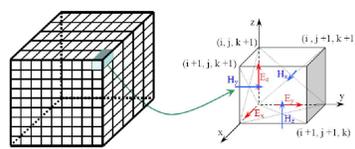
- Passif : Mesure du bruit radioélectrique ambiant
- Mesure d'impédance : déterminer les propriétés EM du sol
- Mono-statique : radar GPR1 en Tx/Rx
- Bi-statique : radar GPR1 en Tx/Rx + radar GPR2 en Rx



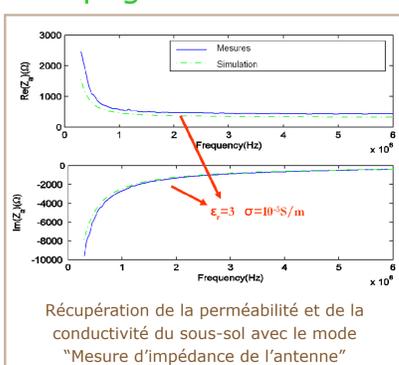
Simulations numériques et analytiques

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 (dispersifs, multicouches, interfaces rugueuses...) 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 (i,j) 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.

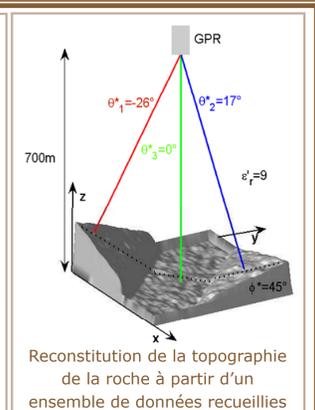
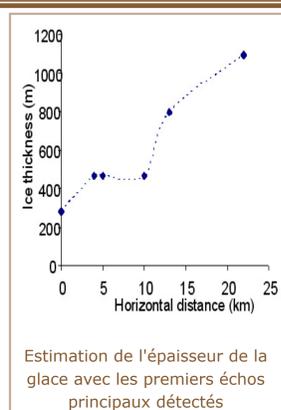
Les simulations numériques issues TEMSEI-FD prennent généralement le relais d'un travail de modélisation analytique et donnent accès à des résultats quantitatifs.



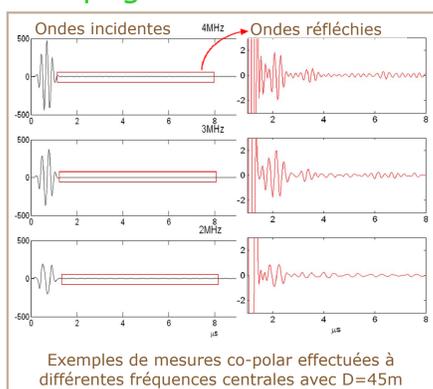
Campagne de mesures en Antarctique : observations mono-statiques



Des observations mono-statiques ont été réalisées avec TAPIR (EISS en mode "mono-statique") sur la calotte glaciaire en Terre Adélie. Durant cette campagne RANETA, huit sondages ont été effectués à des distances de la côte allant de 5km à 45km et correspondant à des altitudes au-dessus du niveau de la mer à partir de 285m à plus de 1000m. L'interface roche-glace a été détectée dans tous les sondages avec des signaux clairs sur l'antenne magnétique et électrique. L'épaisseur mesurée des glaces montrent que, pour tous les sites étudiés, la roche a été détectée à une profondeur proche du niveau de la mer. A plusieurs reprises, plus d'un écho a été détecté. Un ensemble complet de données (cinq composantes du champ EM) a été enregistré, des algorithmes ont été développés et ensuite utilisés pour isoler les origines (facettes du sous-sol) dans le but de récupérer un écho et de reconstituer la topographie rocheuse du site.

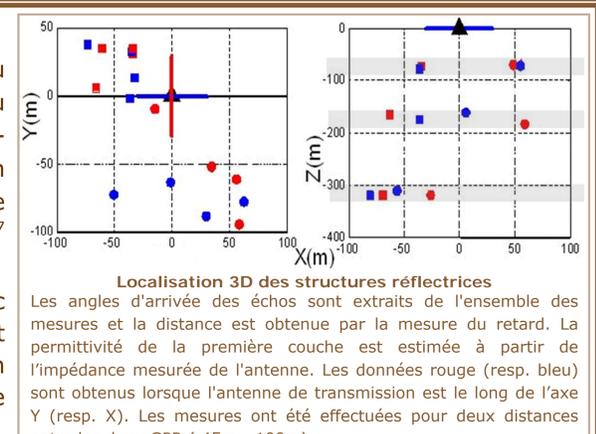


Campagne de mesures dans l'ouest du désert Egyptien : observations bi-statiques



Des observations bi-statiques ont été réalisées sur le plateau calcaire d'Abou Saied à environ 30 km à l'ouest de l'oasis Farafrah (600km au sud-ouest du Caire). Ces mesures ont été effectuées avec différentes fréquences centrales (2-5MHz) avec une durée d'impulsion de 500ns afin d'assurer une résolution raisonnable. Des mesures co-polar ont été effectuées pour deux distances de séparation entre les deux radars Tx&Rx (45m et 100m) ainsi que l'ajout de 2^{27} additions cohérentes dans le but d'améliorer le rapport signal / bruit.

Le profil résistif du sous-sol obtenu par inversion de données TEM & VES avec d'autres mesures de GPR commerciaux ont montré que le sous-sol du Plateau est stratifié horizontalement et renferme ~60m de calcaire marin (Farafrah limestone) recouvrant ~180m de schiste argileux (Esna shale). Le sommet de l'aquifère nubien passe sous le plateau à une profondeur estimée de 240m.



Le radar EISS proposé pour la mission EXOMARS 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 GEP et une petite antenne magnétique située sur le rover sera utilisée comme récepteur.