

---

# Modélisation des antennes électriques du GPR EISS

## Modelling of EISS GPR's electrical antennas

**Marc Biancheri-Astier\*** — **Valérie Ciarletti\*** — **Alain Reineix\*\*** — **Charlotte Corbel\***

\* *Université Versailles St-Quentin ; CNRS/INSU, LATMOS-IPSL  
10-12 avenue de l'Europe, F-78140 Vélizy  
marc.biancheriastier@latmos.ipsl.fr*

\*\* *XLIM institut de recherche - F-87060 Limoges*

---

*RÉSUMÉ. Le radar à pénétration de sol (GPR) baptisé EISS « Electromagnetic Investigation of the Sub Surface » a une profondeur de pénétration kilométrique dans le sous-sol de Mars. Le concept innovant de EISS repose sur le fonctionnement avec plusieurs stations à la surface de la planète (Mars ou autres), qui rend possible des sondages bi-statiques du sous-sol et lui confère ainsi un certain pouvoir d'imagerie du sous-sol. Les résultats présentés sur les performances du radar reposent sur des simulations numériques (FDTD) et sur l'utilisation de modèles analytiques. Des études systématiques ont été menées de façon à optimiser le profil résistif des monopoles qui constituent l'antenne électrique émettrice. L'influence de l'angle entre ces deux monopoles, le couplage entre l'antenne électrique et le sol ont été analysés. Pour finir, une méthode d'estimation de la direction d'arrivée des échos est en étude. Elle devrait permettre à terme d'estimer en trois dimensions la position des réflecteurs enfouis dans le sous-sol.*

*ABSTRACT. Despite several past and present missions to Mars, very little information is available on its subsurface. The LATMOS is currently developing, a ground penetrating radar (GPR) called EISS "Electromagnetic Investigation of the Sub Surface" which its main objective is to perform sounding of the sub-surface down to kilometeric depth. The EISS innovative concept is based on the use of multi stations to conduct subsurface surveys, using bi-static mode. The instrument performances have been studied by numerical simulation (FDTD code) and analytical models. Results about antennas optimization, impact of the angle between the two deployed monopoles, coupling between antenna- and ground are shown. Finally a method to retrieve the direction of arrival for each detected echoes is study that should allow the 3D location of the buried reflecting structures.*

*MOTS-CLÉS : GPR, Propagation des ondes, Sondage du sous-sol, Bi-statique, Onde réfléchie, Couplage antennes-sol, Optimisation d'antennes.*

*KEYWORDS: GPR, Wave propagation, Subsurface surveys, Bi-static, Reflected wave, Coupling between antennas-ground, Antennas optimization.*

---

## 1. Introduction

A ce jour, en dépit des missions passées et présentes (MarsExpress et MRO) vers Mars, peu d'informations sont disponibles sur la structure et la composition du sous-sol de la planète, en dehors de ses calottes polaires et de sa couche très superficielle. Un des objectifs scientifiques de la future mission martienne ExoMars est l'exploration du sous-sol. La recherche d'éventuels réservoirs hydriques, reliques d'une activité aqueuse passée, qui pourraient, selon de nombreux modèles géologiques, avoir subsisté à des profondeurs kilométriques reste d'actualité. Le sondage électromagnétique du sous-sol, méthode de prospection non destructive, apparaît comme une des solutions les plus prometteuses. C'est dans ce contexte que le LATMOS (ex CETH) a conçu le radar à pénétration de sol (GPR) baptisé EISS "Electromagnetic Investigation of the Sub Surface".

## 2. Le radar à pénétration de sol EISS

### 2.1. Principe de l'instrument

Le radar à pénétration de sol (ou GPR acronyme Ground Penetrating Radar) baptisé EISS, version bi-statique du radar TAPIR (Terrestrial And Planetary Imaging Radar) évolution du radar de NetLander (Berthelier et al.,2003), a été sélectionné pour faire partie de la charge utile de la mission ExoMars. Ce radar a été conçu pour recueillir des informations sur la structure et la composition du sous-sol profond de la planète. Du fait, de la permittivité particulièrement élevée de l'eau sous forme liquide, EISS est particulièrement adapté à la détection de réservoirs d'eau liquide qui seraient susceptibles d'exister à des profondeurs kilométriques sous le pergélisol martien. Son principe repose sur l'interaction des ondes électromagnétiques avec les hétérogénéités du milieu lui permettant d'en révéler ses discontinuités afin de caractériser en profondeur l'environnement géologique dans lequel il se trouve.

L'instrument EISS est un GPR impulsionnel opérant, depuis la surface, à des fréquences centrales basses dans la gamme HF (~2-4MHz). L'utilisation de ces fréquences permet de viser des profondeurs de pénétration compatibles avec les modèles géologiques qui prévoient la présence d'aquifères liquides à des profondeurs de l'ordre du kilomètre. La résolution spatiale visée (<100 m) impose de travailler avec des impulsions relativement courtes (1 $\mu$ s) qui dans le domaine spectral se traduisent par une largeur de bande nécessaire de l'ordre du MHz. Il convient également de garder à l'esprit, que pour recueillir des informations sur une zone étendue du sous-sol, il est indispensable de travailler avec des antennes non directives ayant un diagramme de rayonnement large dans le sous-sol.

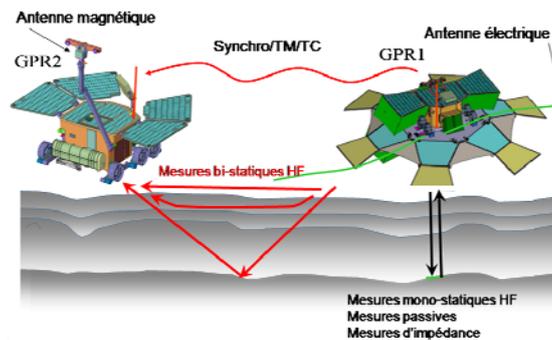
A ces contraintes qui sont déterminantes pour les performances du radar, s'ajoute la contrainte de masse inhérente à toute mission spatiale. L'antenne électrique HF de EISS est donc une antenne filaire constituée de monopoles amortis de 35 mètres chacun ( $\lambda/4$  pour la fréquence 2.14 MHz). Les monopoles sont chargés avec un profil résistif de Wu-King optimisé afin d'obtenir une onde parcourant le

dipôle purement progressive et ainsi éviter tout phénomène de ‘ringing’ qui entraînerait une déformation du signal. Les deux monopoles seront déployés dans des directions opposées à la surface de Mars. L’angle exact entre les directions de déploiement des deux monopoles sera choisi afin d’assurer un rayonnement le plus omnidirectionnel possible.

Le concept innovant de EISS repose sur l’opportunité qui lui est offerte par la présence simultanée à la surface de Mars d’une station fixe (Lander) et d’un véhicule mobile (rover) (Figure 1). En effet, les longues antennes électriques qui sont indispensables à la transmission du signal HF dans le sol, imposent, du fait de leur longueur, d’émettre à partir d’une plateforme immobile. En contre partie, un capteur magnétique de petite taille (~10 cm) qui permet de recevoir ces signaux HF peut être installé à bord du rover mobile. Ce mode de fonctionnement bi-statique permettra d’effectuer des sondages dans une zone considérable plus étendue et de recueillir des données plus complètes sur la structure 3D du sous-sol.

EISS est donc avant toute chose un GPR mais la présence de monopoles électriques déployés sur la surface permet d’envisager d’autres modes de fonctionnement sans ajout de matériel :

- *Le sondage mono-statique du sous-sol* pour la caractérisation des structures géologiques et recherche d’éventuelles traces d’eau dans la zone du sous-sol situé sous le lander,
- *Le sondage bi-statique du sous-sol* pour la localisation en 3D et la caractérisation des structures géologiques profondes à l’échelle du kilomètre et recherche d’éventuelles traces d’eau dans la zone du sous-sol située entre le rover et le lander,
- *La mesure d’impédance d’un monopole électrique* pour l’estimation des caractéristiques géologiques du proche sous-sol,
- *La mesure passive sur un monopole électrique* pour la détection et caractérisation des décharges électriques.



**Figure 1.** Principes de fonctionnement de EISS et aperçu des différentes ondes intervenant dans le processus.

Les résultats présentés dans ce papier concernent uniquement le sondage bi-statique et la mesure d’impédance d’antenne.

### 2.2. Identification des ondes reçues

Dans cette section, nous allons nous intéresser à identifier les différentes ondes reçues en mode bi-statique. La figure ci-dessous indique les ondes théoriquement présentes lorsque le sous-sol est composé d'une strate 1 homogène d'épaisseur  $d_1$  qui recouvre une strate 2 homogène d'épaisseur infinie.

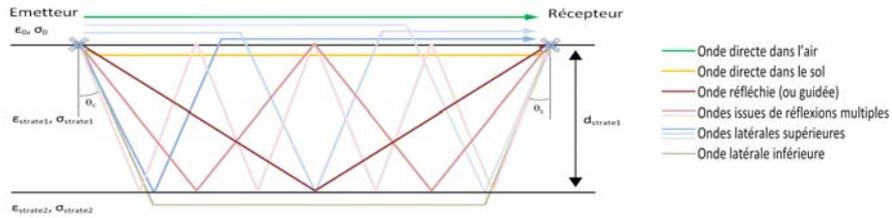


Figure 2. Ondes intervenants en mode bi-statique.

Le temps d'arrivée théorique des ondes principales est donné dans le tableau ci-dessous en fonction de la distance  $\rho$  entre les deux stations :

onde dans l'air	onde dans le sol	onde réfléchies
$tps_{AIR}(\rho) = \frac{\rho}{c}$	$tps_{SOL}(\rho) = \frac{\rho\sqrt{\epsilon_{r1}}}{c}$	$tps_{REFLECHIE\_n}(\rho) = \frac{\sqrt{\rho^2 + (n \cdot 2 \cdot d_1)^2} \cdot \sqrt{\epsilon_{r1}}}{c}$

Le radargramme du signal temporel reçu par la station mobile (Figure 3) permet de visualiser les échos reçus en fonction de leur temps d'arrivée lorsque la distance  $\rho$  varie de 100 à 1000 m. Les temps d'arrivées théoriques des ondes ont été superposés au radargramme.

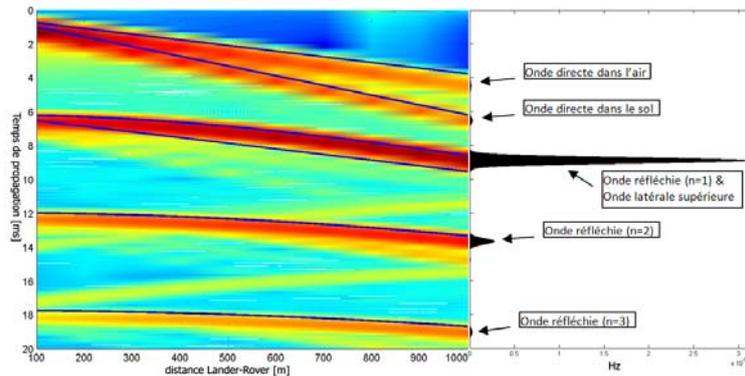


Figure 3. Exemple de radargramme et enveloppe du signal temporel de la composante Hz en fonction de la distance émetteur-récepteur. La strate supérieure a une épaisseur  $d_1$  ( $\epsilon_{r1}=3$ ,  $\sigma=0$ ). Le récepteur est à  $45^\circ$  de l'antenne émettrice.

### 3. L'antenne électrique du radar EISS

#### 3.1. Description de l'antenne

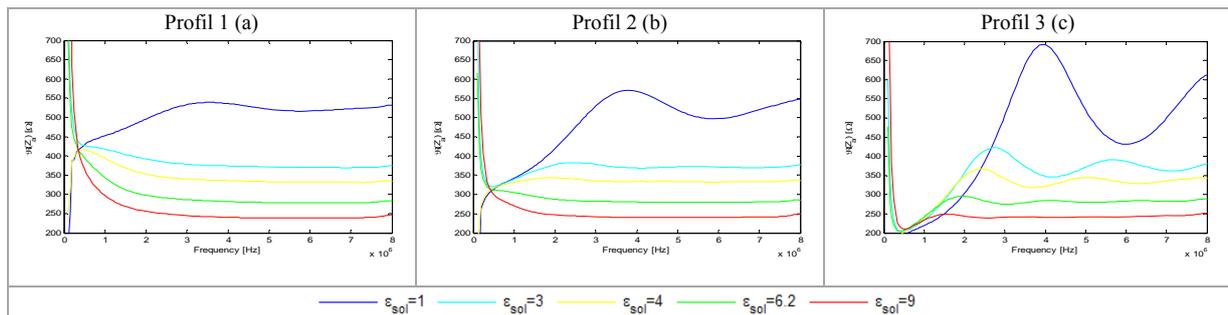
L'impulsion HF utilisée pour sonder le sous-sol est un signal large bande et une simple antenne filaire ne pourrait pas assurer, sur toute la bande de fréquence, un courant nul à l'extrémité de chaque monopole, les réflexions inévitables en bout d'antenne entraîneraient une distorsion de l'impulsion. Pour se prémunir de ces effets néfastes, Wu, King et Shen (Shen et al., 1965) ont proposé, pour une antenne dans le vide, une répartition de charges le long de l'antenne calculée de façon à obtenir une onde purement progressive et ainsi éliminer toute onde stationnaire potentielle.

L'antenne de EISS étant déployée sur le sol, un couplage non négligeable se produit et le profil résistif doit être optimisé pour les caractéristiques supposées connues  $\epsilon_{\text{opt}}$  (permittivité) et  $\sigma_{\text{opt}}$  (conductivité) du sous-sol.

#### 3.2. Optimisation de l'antenne : Profil fréquentiel de l'impédance de l'antenne

Les paragraphes qui suivent sont consacrés à l'étude des performances de ces antennes en termes d'impédance effective de l'antenne et de diagramme de rayonnement. Les performances de trois profils résistifs de référence seront étudiées et comparées en présence de sous-sols homogènes dont la permittivité  $\epsilon_{\text{sol}}$  prendra différentes valeurs. Les caractéristiques exactes du sous-sol de Mars ne sont pas connues, néanmoins une valeur de permittivité de l'ordre de  $\epsilon_{\text{r-sol}}=4$  semble raisonnable (Clifford, 1993). Ces trois profils sont - profil1 : optimisé pour l'air  $\epsilon_{\text{r-opt}}=1$ , - profil2 : optimisé pour un sous-sol de permittivité  $\epsilon_{\text{r-opt}}=4$ , - profil3 : optimisé pour un sous-sol de permittivité  $\epsilon_{\text{r-opt}}=7$ .

Le profil résistif des antennes doit être optimisé en fonction d'une valeur estimée a priori de la permittivité  $\epsilon_{\text{r-opt}}$ , cependant les antennes seront déployées sur un sol dont la permittivité ( $\epsilon_{\text{r-sol}}$ ) peut être différente.



**Figure 4.** Profil fréquentiel de la partie réelle de l'impédance de l'antenne posée sur un sol de permittivité variable et de conductivité nulle.

*Influence de la permittivité du sol :*

L'impédance de l'antenne mesurée au niveau du générateur  $Z_a$  est modifiée par l'impédance du milieu sur lequel l'antenne est déployée, ce phénomène est plus ou moins intense selon le profil résistif de l'antenne. L'impédance du milieu varie à l'inverse de sa permittivité  $\epsilon_r$  ce qui implique une influence de la permittivité  $\epsilon_r$  sur  $Z_a$ . Au-delà de 2MHz, l'impédance devient constante et sa valeur dépend de la permittivité  $\epsilon_r$  du sol le quel repose les antennes (Figure 4).

Afin d'optimiser l'adaptation entre l'électronique du radar et l'antenne, il est important d'avoir une impédance qui soit la plus stable possible. Les ondulations visibles sur la partie réelle de l'impédance (Figure 4c) sont pénalisantes de ce point de vue. Le profil 2 assure une impédance parfaitement linéaire et constante sur la quasi-totalité de la bande passante pour les sols de permittivité supérieure ou égale à 4. De ce point de vue aussi, le profil 2 semble bien adapté à notre cahier des charges.

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

#### **4. Influence de l'angle entre monopoles sur l'amplitude des signaux reçus**

Dans le contexte de la mission ExoMars, l'angle exact entre les directions de déploiement des deux monopoles 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. Ce dernier point est important car la direction que suivra le rover ne sera choisie qu'une fois sur Mars. Une étude systématique reposant sur des simulations électromagnétiques a été effectuée pour vérifier l'impact de l'angle entre les deux monopoles sur le diagramme de rayonnement.

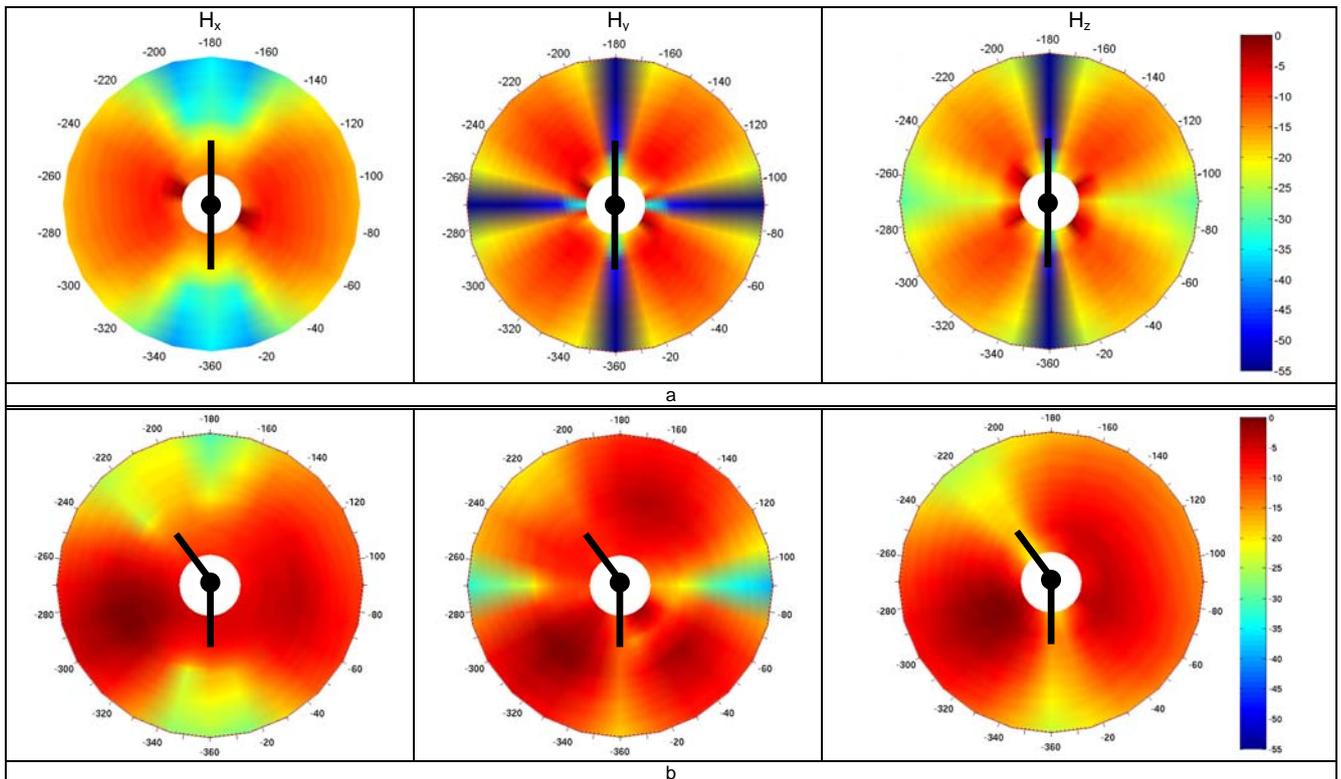
##### **4.1. Principe de calcul du champ rayonné par un dipôle non aligné**

Afin d'étudier le rayonnement de monopoles non alignés sur le maillage orthogonal du code TEMSI-FD, les simulations ont été faites en utilisant des sources ponctuelles de courant et un pas spatial adapté à l'angle entre les deux monopoles. Cette méthode a été validée par la simulation de monopoles alignés et orthogonaux. 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 monopole est alors considéré comme la somme de dipôles élémentaires parcourus par des courants d'intensité variable (Principe de Huygens).

##### **4.2. Amplitude des signaux reçus (cas de l'onde réfléchie)**

Les Figures ci-dessous permettent de visualiser l'effet de l'angle entre les deux monopoles émetteurs sur l'amplitude du champ magnétique au niveau du récepteur, en présence d'un sous-sol composé d'une strate homogène de permittivité  $\epsilon_{r-sol}=4$

( $\sigma=0$ ) d'une profondeur de 100m qui recouvre une seconde strate infinie  $\varepsilon_{r-sol2}=9$  ( $\sigma=0$ ) de façon à générer un réflexion à l'interface des deux strates. 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°. Les cartes de champs magnétiques présentées sont calculées pour l'écho échos identifiant l'onde réfléchi (avec une seule réflexion dans le sous-sol). La configuration monopoles alignés  $\theta_{ant}=180^\circ$  est présentée ainsi que celle correspondant à deux monopoles faisant un angle  $\theta_{ant}=225^\circ$ .



**Figure 5.** 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. Fig a :  $\theta_{ant}=180^\circ$  ; Fig b :  $\theta_{ant}=225^\circ$

Avec un dipôle aligné (Figure 5a), on note que dans l'axe du dipôle les composantes  $H_y$  et  $H_z$  sont nulles et que la composante  $H_x$  est également nulle dans la direction perpendiculaire au dipôle. La configuration monopoles non alignés (Figure 5b) 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. Et ainsi permet de recueillir des informations de qualité et complètes sur le sous-sol autour des antennes électriques.

## 5. Conclusion et perspectives

L'interprétation des données radar nécessite la connaissance de la permittivité et de la conductivité du sol étudié afin de convertir les temps d'arrivées des ondes reçues en distances. Accéder aux caractéristiques électriques du sol, sans retours d'échantillons et sans caractérisation électrique in situ revêt un grand intérêt. EISS propose de procéder à la fois au sondage du sous-sol par technique radar mais aussi de fournir une estimation de la permittivité de la couche supérieure du sous-sol.

L'étude du couplage entre les antennes électriques et le sol a permis de mettre en évidence l'influence des caractéristiques géoélectriques du milieu sur les paramètres instrumentaux (courant, impédance de l'antenne). En retour, la mesure de ces paramètres, notamment l'impédance de l'antenne, peut fournir des informations sur le sous-sol. Le but n'est donc pas de réduire ce couplage mais de l'exploiter.

Les études menées en fonction du profil résistif choisi sont primordiales. Elles permettent d'optimiser le profil résistif qui sera retenu de façon à assurer une transmission correcte de l'impulsion et faciliter dans la mesure du possible l'adaptation avec l'étage électronique du radar. Un nouveau profil résistif a été proposé, qui sera validé par des mesures sur sites.

EISS est un radar qui a été conçu pour fonctionner surtout en mode bi-statique avec un récepteur susceptible de se déplacer à la surface de Mars. Une étude préliminaire visant à estimer l'angle d'arrivée des échos détectés et à en déduire la position en 3D des structures réfléchissantes enfouies dans le sous-sol a été initiée. Elle sera validée, dans un premier temps, de façon systématique sur un jeu complet de données simulées et, dans un second temps, lors de campagnes de mesures sur sites naturels bien documentés.

## Bibliographie

- Berthelier, J. J., Ney, R., Ciarletti, V., Martinat, B., Hamelin, M., Costard, F., Paillou, P., Nevejans, C., Kofman, W., Trotignon, J. G., Grandjean, G., Zamora, M., and Nagy, A. (2003). GPR, a ground-penetrating radar for the NetLander mission. *Journal of Geophysical Research*, 108(E4) :8027(doi :10.1029/2002JE001866).
- Clifford, S. M. (1993). A model for hydrologic and climatic behaviour of water on Mars. *Journal of Geophysical Research*, 98(E6) :10973–11016.
- Le Gall, A., Reineix, A., Ciarletti, V., Berthelier, J. J., Ney, R., Dolon, F., and Corbel, C. (2006). An estimation of the electrical characteristics of planetary shallow subsurfaces with TAPIR antennas. *Journal of Geophysical Research*, 111(E06S06) :doi :10.1029/2005JE002595.
- Shen, L. C. and King, R. W. P. (1965). Correction to the cylindrical antenna with non reflecting resistive loading by Wu and King. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 13(6) :998.