

THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PARIS VI

Spécialité

Astronomie et Astrophysique

présentée par

Essam HEGGY

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITE PARIS VI

**Etude et modélisation des performances des radars sondeurs basse
fréquence pour la recherche de l'eau dans le sous-sol de Mars**

Soutenue le 16 septembre 2002

devant le jury d'examen composé de :

P. Paillou	- <i>Observatoire Astronomique de Bordeaux, fr</i>
J. J. Berthelier	- <i>CETP, Saint-Maur, fr</i>
G. Olhoeft	- <i>Colorado School of Mines, Boulder, USA</i>
S. Clifford	- <i>Lunar Planetary Institute, Houston, USA</i>
F. Costard	- <i>Université Paris-Sud, Orsay, fr</i>
P. Encrenaz	- <i>Observatoire de Paris, Paris, fr</i>
J. P. Parneix	- <i>ENS Chimie et Physique de Bordeaux, fr</i>
J.M. Malezieux	- <i>EGID-Université de Bordeaux III, Bordeaux, fr</i>

**Thèse préparée à l'Observatoire Astronomique de Bordeaux
UMR 5804**

Résumé

Les performances des systèmes de sondage radar (radars géologiques, systèmes aéroportés, sondeur orbital) sont liées à leur capacité de pénétration dans les matériaux géologiques qui constituent les sites observés. Notre thématique de recherche consiste à étudier expérimentalement les propriétés géo-électrique du sous-sol martien et à modéliser l'écho radar rétro-diffusé afin, de quantifier les capacités des radars sondeurs basse fréquence (de 1 à 20 MHz) à détecter la présence de possibles réservoirs d'eau situés à quelques centaines de mètres de profondeur dans le sous-sol de Mars. La rugosité des interfaces géologiques et leur géométrie ne contribuant que partiellement à la rétro-diffusion des ondes radar basse fréquence, ce sont principalement les propriétés électromagnétiques des matériaux (permittivité électrique et perméabilité magnétique) qui contrôlent la profondeur de pénétration et l'identification de zones humides. Ainsi, la connaissance des propriétés géo-électriques et de la stratigraphie du sous-sol martien est indispensable pour l'inversion et l'interprétation des futurs données des sondeurs radars.

L'étude menée dans ce travail de thèse concerne principalement trois instruments radar dédiés à la recherche des réservoirs d'eau dans le sous-sol de Mars. Le premier est l'instrument MARSIS (Mars Advanced Radar for Sub-surface and Ionosphere Sounding) qui partira à bord de la mission Mars Express de l'ESA en 2003. Il s'agit d'un sondeur vertical en orbite à 400 km d'altitude, qui fonctionnera dans la bande de fréquence 1.3 à 5 MHz. Le second est un sondeur à 20 MHz SHARAD (SHALLOW sub-surface sounding RADAR) à bord de la plate-forme orbitale Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) de la NASA qui sera lancée en 2005. Le troisième instrument concerne le projet Netlander du CNES qui embarquera en 2007 quatre GPR (Ground Penetrating Radar) qui réaliseront un sondage mono-statique du sous-sol martien depuis sa surface, à une fréquence centrale de 2 MHz. Les profondeurs de pénétration de ces instruments ont été calculées à partir de modèle simple du sous-sol martien, de valeurs sous estimées de la permittivité du sol et des tangentes de perte très faibles. Considérant une dynamique de -60 dB pour MARSIS et SHARAD et de -100 dB pour Netlander, les profondeurs de pénétration ont été estimées jusqu'à 5 km pour les radars de Mars Express et de Netlander, et à environ 1 km pour SHARAD.

La première étape de notre travail a consisté à étudier les propriétés électriques et magnétiques de matériaux volcaniques et sédimentaires susceptibles d'être présents dans le sous-sol de Mars. Nous avons donc effectué des mesures de permittivité électrique et de perméabilité magnétique des échantillons représentatifs (en termes de composition minéralogique et des conditions de température et porosité) des couches géologiques constituant le modèle général du sous-sol martien proposé par Clifford en 1993, choisis en fonction des connaissances actuelles de la pétrologie et la minéralogie de la surface et du sous-sol de Mars. Les techniques de mesure utilisent deux analyseurs d'impédance HP 4192A et HP 4291A, dans la gamme de 1 à 500 MHz, associés à deux cellules capacitives l'une électriques et l'autre magnétiques. Nous avons étudié les variations des caractéristiques électriques et magnétiques des matériaux en fonction de paramètres comme la porosité et le profil thermique du sous-sol. Cette première étape nous a permis d'établir un profil diélectrique général du sous-sol de Mars à 2 MHz, que nous avons ensuite utilisé pour calculer les profondeurs de pénétration et les atténuations dans le signal radar rétro-diffusé. Ses résultats ont permis ainsi de réévaluer la capacité d'un radar sondeur à détecter la présence de la nappe phréatique dans le sous-sol martien, dans la limite des capacités de détection des instruments de Netlander et de Mars Express. Nous avons ainsi montré, à partir de valeurs de permittivité et de perméabilité mesurées en laboratoire, que les performances des sondeurs radar ont été parfois largement surestimées. Nos résultats indiquent que les profondeurs de pénétration se réduisent à 1 km pour les GPR de Netlander, et moins de 400 m pour les instruments MARSIS et SHARAD.

Si on assume que le modèle de Clifford décrit la majorité des terrains martiens, il serait donc difficile de détecter et de cartographier la nappe phréatique dans le sous-sol martien de façon non ambiguë à l'état actuel des performances des trois sondeurs radar.

Une recherche de sites spécifiques présentant un contexte minéralogique moins riche en oxyde de fer (effet d'atténuation par conduction), ainsi que des conditions géophysiques favorisant un meilleur contraste diélectrique entre les différentes couches du sous-sol, est donc nécessaire à une détection non ambiguë de la présence d'eau dans le sous-sol de Mars.

Dans la deuxième partie de notre travail, nous avons construit quatre modèles géologiques (à partir des observations Viking, MOC et TES de la surface) correspondant à des contextes locaux représentant un intérêt particulier pour la recherche de lentilles d'eau dans le proche sous-sol de Mars. Ces sites pourraient constituer des cibles d'atterrissages potentiels pour les GPR de Netlander. Nous avons ensuite synthétisé en laboratoire des échantillons représentatifs de chacune des couches géologiques de chaque modèle, puis nous avons procédé à la caractérisation électromagnétique des échantillons afin de construire les profils géo-électriques correspondants.

Enfin, nous avons utilisé un code FDTD pour simuler le signal radar rétro-diffusé à 2 MHz pour chacun de ces sites, en considérant les paramètres instrumentaux de Netlander. Nous avons pu ainsi prédire la détectabilité de lentilles d'eau dans le proche sous-sol (profondeur de quelques centaines de mètres) dans les terrains ayant vécu une activité hydrothermale dans leur passé. Les résultats ont montré la possibilité d'identifier les réservoirs d'eau à 400 m de profondeur pour un sondeur radar à 2 MHz du type Netlander.

Les résultats obtenus pendant ce travail de thèse pourront également permettre d'évaluer des systèmes adaptés à la recherche de l'eau dans le sous-sol des régions arides terrestres, où le contexte géologique et géo-électrique est favorable à la pénétration des ondes radar. Ainsi la nappe phréatique nubienne (situé à 600 m de profondeur sous des couches de calcaire et de grés) dans l'Ouest du désert égyptien peut être un site potentiel pour l'étude de l'utilité des sondeurs radar basse fréquence à détecter l'eau à quelques centaines de mètres de profondeurs.

Abstract

The performances of low frequency sounding radars (GPR, aeroported systems, orbital sounder) are strongly related to the ability of the electromagnetic waves to penetrate the geological materials constituting the studied soil. The aim of this research is to study experimentally the geo-electrical and geo-magnetic properties of the Martian sub-surface analogues and to simulate the backscattered radar echo in the frequency band 1-20 MHz, in order to determine the ability of future radar sounding experiments to detect the possible presence of water in the Martian sub-surface, few hundreds of meter deep.

Our study concern three different low frequency sounding radars, planned to probe the water presence in the Martian sub-surface at depth ranging from few hundreds of meters to few kilometres. The first one is the MARSIS (Mars Advanced Radar for Sub-surface and Ionosphere Sounding) experiment on board of the Mars Express orbiter scheduled for 2003 and operating in the frequency band 1.3 to 5 MHz. The second, is the SHAlow RADar sounding experiment SHARAD, planed for 2005 on board the Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), operating at higher frequency around 20 MHz. Its objective is mainly to detect shallow sub-surface water lenses with a lower penetration depth and a better resolution of the near sub-surface tomography. The third experiment is the Ground Penetrating Radar (GPR) experiment within the Netlander mission planed for 2007 and operating around 2 MHz, searching mainly for deep sub-surface water and mapping the sub-surface layered structures. Considering a dynamic range of -60 dB for MARSIS and SHARAD, and -100 dB for the Netlander GPR, the penetration depths were estimated to be respectively 2.5 km for the radar experiments on board Mars Express and Netlander, and 1 km for SHARAD.

In the first step of our approach, we constructed experimentally a most common geo-electric and geo-magnetic profile representative of the Martian sub-surface starting from the Clifford geological description of the Martian sub-surface by measuring the electric permittivity and magnetic permeability of well defined mixtures of basaltic, volcanic and sedimentary materials that have been reported for Mars. We mainly considered iron oxides (hematite, maghemite, magnetite), clays and evaporites that may be present such as gypsum, and their mixtures with representative amounts of the Martian geological context under the most common petrophysical and geophysical conditions, along the sub-surface profile. This led to synthetic representative samples of the Martian sub-surface materials under adequate conditions of porosity and temperature that should exist in the first 2.5 km of the upper crust. Measurements were elaborated using two frequency analyser HP4192A and HP 4291A connected to both electric and magnetic cells. Results show that the electrical and magnetic losses in first layers of the Martian sub-surface (few hundreds of meters), which are mainly constituted of volcanic sediments rich in iron-oxides materials, could significantly decrease the radar penetration depth initially foreseen, thus limiting the deep sub-surface exploration of the global aquifer. Numerical calculation of the penetration depth using those measurement, gives an average investigation depth of 1 km for the GPR experiment of the Netlander mission and 400 of meters for MARSIS an SHARAD.

Thus, If we assume that major part of the Martian upper crust to be close to the geological description of the Clifford model, then we can expect the performance and results credibility of a low frequency radar global sounding of the Martian deep sub-surface aquifer to be very limited by the presence of electric and magnetic losses in the first volcanic layers.

Such a global model for the Martian sub-surface has to be refined for local water investigation. Thus we started to evaluate experimentally the performances in terms of penetration depth and signal to noise ratio of such radar systems for Martian sub-surface exploration on local selected sites where the geological and geophysical conditions deviated from the standard model. Based on day present available observational records, we constructed four geological models corresponding to four potential landing sites of the Netlander experiment. Those sites present a special interest for the search of water

lenses in the Martian near sub-surface. We conducted series of measurements on the electromagnetic properties of localised volcanic and sedimentary materials that might be present on those sites. This led to the construction of four realistic geo-electrical models of the Martian sub-surface for the 1-20 MHz frequency range, for terrains where young fluvial-like features raise the possibility that liquid water may exist at shallow depths (100 to 400 m deep). Similarly to the general model we used local expected sub-surface petrochemical and geophysical conditions such as temperature gradient, rocks porosity and granulation that may exist along the first few hundreds of meters of the Martian crust.

We finally use the Finite Difference Time Domain (FDTD) technique to simulate the radar wave propagation along those geo-electrical descriptions. We evaluated through this numerical simulation work combined to laboratory measurement, constraints on water identification and what might be an optimal sites for an unambiguous detection of water in the Martian geological context. Sites described are not nominative; they are examples showing the possible configurations for local type of terrains where GPR could hold a significant contribution in uniquely identifying water.

Results of this research could be extended to consider adapted techniques to detect deep sub-surface water in dry desertic regions like the Egyptian western desert, where the geo-electrical properties of the dry calcareous sediments allow a deep penetration of the low frequency GPR waves. The Nubian fossil aquifer at 600 m deep, can thus be a potential target for testing the utility of 2-20 MHz experimental GPR to probe deep sub-surface water.