Étude préparatoire à l'interprétation des données du radar WISDOM pour la mission ExoMars 2018

Sophie Dorizon

▶ **To cite this version:**

Sophie Dorizon. Étude préparatoire à l'interprétation des données du radar WISDOM pour la mission ExoMars 2018. Astrophysique [astro-ph]. Université Paris Saclay (COmUE), 2016. Français. NNT : 2016SACLV012 . tel-01457229

HAL Id: tel-01457229

https://theses.hal.science/tel-01457229

Submitted on 6 Feb 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

NNT : 2016SACLV012

THESE DE DOCTORAT
DE
L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY
PREPAREE A
L'UNIVERSITE VERSAILLES SAINT-QUENTIN EN YVELINES

ECOLE DOCTORALE N° 127
Astronomie et Astrophysique d'Ile de France

Spécialité de doctorat : Sciences de l'Univers

Par

Sophie Dorizon

Étude préparatoire à l'interprétation des données du radar WISDOM pour la mission ExoMars 2018

Thèse présentée et soutenue au LATMOS, Guyancourt, le 11 Mars 2016 à 14h

Composition du Jury :

Mme Quantin-Nataf Cathy	Professeur, Université Claude Bernard/Laboratoire de Géologie de Lyon	Présidente
M. Garambois Stéphane	Maître de conférences, Université Joseph Fourier/IsTerre	Rapporteur
Mme Picon Odile	Professeur, Université Paris-Est Marne la Vallée/ESYCOM	Rapportrice
M. Lesturgie Marc	Professeur, Centrale Supélec/SONDRA	Examinateur
M. Herique Alain	Maitre de conférences Université Joseph Fourier/IPAG	Examinateur
Mme Ciarletti Valérie	Professeur, UVSQ/LATMOS	Directrice de thèse
M. Viso Michel	Responsable thématique Exobiologie, CNES	Invité

université PARIS-SACLAY | ÉCOLE DOCTORALE Astronomie et Astrophysique d'île-de-France

Titre : Étude préparatoire à l'interprétation des données du radar WISDOM pour la mission ExoMars 2018

Mots clés : GPR, Géophysique, Mars, Imagerie, Exobiologie

Résumé : La planète Mars est devenue au cours de ces dernières décennies l'un des objets les plus visités de notre système solaire. Les différents instruments envoyés pour l'étudier nous ont permis de reconstruire partiellement son histoire, et l'on sait aujourd'hui que dans son passé, la planète rouge a connu une période au climat relativement chaud et humide, permettant à l'eau liquide de perdurer en surface et dans le sous-sol. Le parallèle avec les conditions sur Terre au moment supposé de l'apparition de la vie nous amène à aborder Mars d'un point de vue exobiologique : si la vie a émergé sur cette planète, des traces potentielles sont susceptibles d'être trouvées dans le sous-sol, à l'abri de la surface.

La mission ExoMars, programmée pour 2018, enverra sur la surface de la planète un rover équipé d'une suite instrumentale complète pour la recherche de traces de vie, passé ou présente, ainsi qu'une foreuse capable de prélever des échantillons jusqu'à 2 mètres de profondeur. La caractérisation du contexte géologique de la zone d'investigation du rover est primordiale pour identifier les lieux les plus propices à la préservation de ces traces.

Le radar à pénétration de sol (Ground Penentrating Radar) WISDOM (Water Ice Subsurface Deposit Observation on Mars) avec ADRON sont les seuls instruments à bord susceptibles d'obtenir des informations sur les caractéristiques du proche sous-sol le long du trajet du rover avant forage.

Les données recueillies par le radar permettront d'identifier les formations géologiques du sous-sol et de comprendre les processus qui en ont été à l'origine. Cet instrument au fort potentiel, développé au LATMOS (Laboratoire ATmosphères, Milieux, Observations Spatiales) en collaboration avec le LAB (Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux), est basé sur le principe du step-frequency et fonctionne sur une large bande de fréquences, entre 0,5 GHz et 3 GHz : il a été conçu pour explorer les premiers mètres du sous-sol avec une résolution verticale de quelques centimètres, et est actuellement en phase de tests. L'objectif de cette thèse est de développer les outils d'interprétation des données du GPR WISDOM en tentant d'exploiter au mieux les ressources de l'instrument pour caractériser la nature et la structure du sous-sol, apporter des contraintes sur l'histoire géologique du site d'Oxia Planum, sélectionné pour cette mission, et pour guider la foreuse d'ExoMars vers des sites d'intérêt d'un point de vue exobiologique. Ce travail nécessite donc une approche multiple, pratique et théorique, qui passe par le développement d'outils de traitement de données, par la mise au point de modèles analytiques et l'utilisation de modèles numériques pour la modélisation de l'instrument, ou encore la définition de tests et de campagnes de mesures, afin de créer une base de données sur des environnements variés, qui pourront ensuite être comparées aux données martiennes.

Une interprétation complète des données acquises avec WISDOM passe également par l'estimation des paramètres diélectriques des différentes unités géologiques identifiées. Nous avons ainsi développé deux méthodes « quantitatives », qui permettent d'estimer la constante diélectrique en surface et à différentes profondeurs à partir des données. Une approche plus géométrique pour « reconstituer » le sous-sol le plus précisément possible, éventuellement en 3 dimensions, et pour comprendre les processus de dépôts qui ont abouti à la morphologie observée sur les radargrammes a également été initiée. Grâce à la mise au point d'une méthode basée sur l'amplitude des signatures des diffuseurs en fonction de la configuration polarimétrique des antennes, nous avons estimé la position relative des objets par rapport au déplacement du radar le long d'un profil et ainsi permis la reconstitution du sous-sol en 3 dimensions. Ceci permettra à terme un guidage optimal de la foreuse dans le contexte d'ExoMars.

Université Paris-Saclay
Espace Technologique / Immeuble Discovery
Route de l'Orme aux Merisiers RD 128 / 91190 Saint-Aubin, France

Title : Preparatory study for the interpretation of the WISDOM GPR data selected aboard the ExoMars 2018 mission.

Keywords : GPR, Geophysics, Mars, Imaging, Exobiology

Abstract : Mars has become one of the most visited planet in the past few decades. The data collected by instruments allowed to infer the planet evolution, and it is now admitted that in the past, Mars had a relatively warm and wet environment, auspicious for the emergence of life as we know it. This is why one of the current objective of the missions to Mars is to study the planet from an exobiological point of view: if life arose on Mars, potential traces could be found into the subsurface, sheltered from the hostile surface.

The ExoMars 2018 space mission will land on Mars' surface a rover, which will be equipped with a complete instrumental payload for the search of life traces, as well as a drill capable of collecting samples at a depth of 2 meters. The geological context characterization will therefore be essential to identify the most interesting places for potential life traces preservation.

The Ground Penetrating Radar (GPR) WISDOM (Water Ice Subsurface Deposit Observation on Mars) and the neutron detector ADRON will be the only instruments capable of obtaining information about the shallow subsurface before the drilling operations. The data collected by WISDOM will provide the geological deposits identification, which will help reconstructing the local history of the landing site. This instrument developed in the French laboratory LATMOS (Laboratoire ATmosphères, Milieux, Observations Spatiales) in collaboration with the LAB is a step-frequency radar that operates on a wide frequency band, from 0.5 GHz to 3 GHz: it was designed to investigate the first 3 meters of the subsurface with a vertical resolution of a few centimeters, and is currently tested in various environments.

This PhD thesis objective is to develop the interpretation tools for WISDOM data by taking advantage of the specific capacities of the instrument to characterize the nature and structure of the shallow subsurface, and to guide the drill to suitable locations where potential traces of life could be preserved. This work consequently requires both practical and theoretical approaches, with the development of processing chains, analytical and numerical models to simulate the instrument, but also to define tests in well-known environments as well as field tests in various natural places. The idea is to create a WISDOM database in a variety of geological contexts to allow the comparison with Martian data.

A full interpretation of the WISDOM data also requires the estimation of the geological units' dielectric characteristics. We therefore developed two "quantitative" methods that allow the retrieval of the dielectric constant value at the surface and at various depths. A geometrical approach to reconstruct the shallow subsurface was also initiated to help to understand the deposits processes. A method taking advantage of the GPR specific antenna system was developed to estimate the scatterers' relative position compared to the radar trajectory along profiles, allowing the subsurface reconstruction in 3 dimensions for an optimal guidance of the ExoMars rover drill.

Université Paris-Saclay
Espace Technologique / Immeuble Discovery
Route de l'Orme aux Merisiers RD 128 / 91190 Saint-Aubin, France

« La vie est très chère, mais pour ce prix-là on a droit chaque année à un voyage gratuit autour du Soleil. »

Albert Einstein

« Deux possibilités existent : soit nous sommes seuls dans l'univers, soit nous ne le sommes pas. Les deux hypothèses sont tout aussi effrayantes. ».

Arthur Charles Clarke

« La preuve la plus certaine que la vie intelligente existe ailleurs dans l'univers est qu'aucun d'eux n'a essayé de nous contacter. »

Bill Watterson

Remerciements

Que de monde à remercier ! Je commencerai naturellement par exprimer ma reconnaissance envers les membres de mon jury de thèse, Cathy Quantin Nataf, qui a accepté de présider ma soutenance, Odile Picon et Stéphane Garambois, rapporteurs sur mon manuscrit, Marc Lesturgie et Alain Herique, tous deux examinateurs et Michel Viso, invité précieux à ma soutenance. Je les remercie pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail, pour leurs questions pertinentes et leurs remarques judicieuses le jour de ma soutenance, qui m'ont permis d'améliorer mon manuscrit et de porter un regard critique sur ces 3 ans et demi de travail. Bien évidemment, j'adresse mes remerciements infinis au dernier membre de mon jury, Valérie Ciarletti, qui fut ma guide, mon phare dans la nuit, ma bouée de secours pendant ces années. Sans une directrice de thèse aussi compétente, tant du point de vue professionnel qu'humain, je ne serai probablement pas arrivée au bout compte-tenu de toutes mes mésaventures…La pire ayant été le vol de mon ordinateur en Septembre 2015, pendant ma rédaction. Avis à tous les thésards, si vous lisez cette page, c'est le moment de prendre le temps de faire une sauvegarde complète. Pour son soutien inconditionnel, je nourris donc auprès de Valérie une gratitude éternelle (oui oui).

Ma thèse n'aurait pu se dérouler aussi efficacement et agréablement sans l'incroyable équipe dans laquelle j'ai eu l'honneur et le plaisir de m'intégrer, je citerai dans le désordre Rafik Hassen Khodja, Olivier Humeau, Benjamin Lustrement, André-Jean Vieau, Benoit Picard et Alexandre Galic, ou encore Alice Le Gall et Yann Hervé, notre « petit nouveau » ! Que l'on soit parti en mission dans la joie et la bonne humeur ensemble, que l'on ait interagit dans les couloirs du LATMOS ou que j'ai eu besoin d'aide ponctuellement pour une relecture, une oreille attentive pour des répétitions, ils m'ont toujours accueillie avec énormément de sympathie et ont pris le temps de m'expliquer tous les rouages de l'instrument, de m'aider pour chaque test que je voulais effectuer avec le prototype, et ont montré un vif intérêt et un regard critique sur mon travail. Je garderai un souvenir inoubliable de nos campagnes de mesures au Dachstein et de la mission SAFER dans le désert d'Atacama (même si j'étais basée en Angleterre pour cette mission !).

L'équipe WISDOM étant constituée de plusieurs laboratoires français et étrangers, je n'oublie pas non plus l'accueil chaleureux que nous avons reçu au TUD de Dresden. Mes remerciements s'adressent donc également à Dirk Plettemeier, Wolf-Stefan Benedix et Marco Mütze, qui ont toujours été disponibles pour me fournir les informations dont j'avais besoin concernant les antennes de l'instrument, la chaine de traitement des données, et j'en passe. Collaborer avec eux fut une expérience formidable, tout comme mes rencontres avec Stephen Clifford du LPI à Houston, grand chercheur spécialiste de Mars, qui m'a appris énormément de choses sur l'histoire de la planète, tout en faisant preuve d'une extrême gentillesse à mon égard. Les conférences et la mission au Dachstein en sa compagnie ont été de grands moments dans ma courte carrière ! Pour en finir avec l'équipe WISDOM, je remercie enfin les membres du LAB de Bordeaux, Philippe Caïs et Sarah Sufyar, qui ont toujours répondu rapidement à mes questions.

Je tiens également à adresser toute ma gratitude à Alain Reineix et Christophe Guiffaut de l'institut Xlim de Limoges, qui m'ont procuré leur modèle et ont fait preuve de pédagogie et d'une grande patience lorsqu'il s'agissait de m'expliquer son fonctionnement.

Je suis également reconnaissante envers l'équipe du GEOPS qui nous a accueillis à plusieurs reprises pour conduire des tests dans leur chambre froide et qui nous ont fourni l'équipement nécessaire au bon déroulement de ces mesures. Merci donc à François Costard, Marc Biancheri-Astier et Albane Saintenoy.

Je me suis sentie chez moi au LATMOS, et ce depuis mon arrivée. Je remercie Mme Danièle Hauser puis M. Philippe Keckhut de m'avoir accueillie au sein de leur laboratoire. De nombreuses personnes ont contribué à ponctuer mes journées de bons instants. Je remercie les membres des équipes IMPEC et ESTER, mes voisins de couloir, Philippe, Gérard, Lucio, Éric, Lauriane, René, Chiraz, Monique, Danièle, pour les pauses cafés (merci Lucio !) et les repas, alimentés de nombreux débats, de questions tordues, toujours (presque !) dans la bonne humeur. Je suis infiniment reconnaissante envers Olivier Thauvin (même pas à genou !) pour tous les coups de main qu'il m'a apporté et les quelques verres partagés, sans oublier les autres membres du sic, tout comme le personnel administratif, toujours sympathique et réactif.

Le monitorat fut pour moi non seulement une expérience fantastique, mais aussi la découverte d'une réelle vocation. Je suis donc reconnaissante envers l'UVSQ pour m'avoir permis d'en bénéficier, ainsi qu'envers les équipes pédagogiques de physique, de géologie et de médecine qui m'ont accueillie et guidée pour mes premiers pas devant une classe.

Je finirai dans la sphère professionnelle (qui a fini par déborder sur ma sphère privée !) par mes camarades thésards (mais aussi quelques ingénieurs) avec une émotion particulière. Nous avons ensemble partagé de nombreux moments, de joie mais aussi de doute, et je leur suis extrêmement reconnaissante pour l'épaule qu'ils m'ont offerte dans ma période noire post-vol de sac, ou dans mes moments de démotivation. J'espère avoir été un soutien pour eux également, qui n'ont pas forcément eu la chance d'avoir des directeurs de thèse aussi clairs dans les orientations que devait prendre leur travail, aussi présents ou aussi humains que Valérie. Les quelques soirées autour d'un verre à refaire le monde de la recherche (ou le monde tout court) en leur compagnie, les réunions Jeunes Impec, les conférences, les ateliers podcasts, les quelques repas que j'ai partagé avec eux au réfectoire, le collectif auquel nous avons participé ont été autant de petites étincelles qui ont ravivé ma confiance et ma volonté. La liste est longue et j'ai peur d'en oublier, je ne citerai donc pas de nom ici mais tout ce petit monde se reconnaitra j'en suis sure. A ceux qui n'ont pas fini, courage, on finit par y arriver !

Une pensée particulière tout de même pour Lauriane, ma voisine de couloir, arrivée peu après moi au LATMOS et qui est devenue plus qu'une collègue, une véritable amie qui partage mes aspirations et mes doutes sur le monde et l'humanité et qui a supporté mes envolées lyriques sans broncher. Un grand merci à toi Lauriane, et je te souhaite toute la réussite possible pour cette nouvelle aventure professionnelle.

Et Maëva, ah Maëva…Merci merci d'avoir été là, ton dynamisme, ton enthousiasme, tes monologues ☺ ont été pour moi une bouffée d'oxygène. Ma vie sociale n'aurait clairement pas été la même sans toi et toutes tes aventures ! J'en profite pour t'envoyer toutes les ondes positives possibles pour ta rédaction, courage ! Et bien sûr mes camarades de promo, bien joué, on a réussi !

Ce qui se passe au Teich reste au Teich, mais j'ai une pensée pour mes amis du RED, ces (presque) deux semaines passionnantes (merci aux organisateurs de ces rencontres, Muriel Gargaud et Hervé Cottin) passées ensemble, suivies de nombreux weekends chez les uns et les autres ont été inoubliables !

Je sors maintenant du monde (semi) professionnel pour m'adresser à mes amis « antérieurs », qui comptent énormément pour moi : les bretons comme les parisiens, qui m'ont permis de déconnecter lorsque j'en avais besoin, de rire, de jouer, de chanter, de danser au cours de soirées (parfois bien arrosées), merci à eux, ils sont aussi le soutien sans faille qui m'a fait arriver jusqu'au bout. Je leur suis également reconnaissante pour avoir compris mes absences et mon mutisme lorsque la rédaction ou la programmation devenaient trop prenantes, et pour leurs messages de soutien dans les instants de joie comme de peine.

Une grosse pensée pour Maxime, mon compagnon, qui est revenu tout spécialement de Birmanie pour assister à ma soutenance, pour son soutien indéfectible et sa confiance absolue dans ma réussite, même de loin.

Et enfin ma famille, mon roc : d'abord mes parents, toujours là, toujours de bon conseil, qui sont venus à ma soutenance et ont emmagasiné tout le stress à ma place, ce qui m'a permis d'être plutôt libérée lors de ma présentation ! Mes retours en Bretagne dans mon cocon ont été autant de bouffées d'oxygène au cours de ces années. Mon père, toujours constructif, et ma mère, prête à faire 500 km après une journée de travail pour venir me remonter le moral. Sans leur soutien, je n'en serai pas là, je leur suis donc extrêmement reconnaissante pour tout ce qu'ils ont fait pour moi, et pour m'avoir laissé suivre ma voie (sinueuse, je le reconnais) malgré leurs inquiétudes. J'embrasse ma sœur, son compagnon Jérôme et mes deux adorables nièces qui me procurent beaucoup de joie quand le temps me permets de les voir, ma grand-mère, mes oncles et tantes, mes cousins et cousines, présents le jour J ou qui m'ont adressé de nombreux messages de soutien quand ils ne pouvaient pas se déplacer.

J'ai enfin une pensée pour mes grands-parents partis trop tôt, pas très scientifiques mais toujours extrêmement fiers de moi, notamment mon grand-père qui ne souhaitait qu'une chose, ma réussite scolaire et surtout linguistique (l'anglais, il faut apprendre l'anglais !). Avec le caractère international de cette thèse, je pense avoir rempli l'objectif !

J'espère lui faire honneur en lui dédiant ce manuscrit.

Table des matières

Remerciements.....*ii*
Table des Figures.....*x*
Introduction.....*xxxi*

Chapitre 1 : L'exobiologie et Mars, ExoMars

Introduction

1.1 Introduction à l'exobiologie…….....2
1.1.1 L'exobiologie, des origines à la discipline scientifique..... 2
1.1.2 De la Terre vers les autres corps du Système solaire..... 4
1.2 La trilogie martienne : l'Homme et Mars……...…...10
1.2.1 Mars la verte..... 10
1.2.2 Mars la rouge..... 11
1.2.3 Mars la bleue 11
1.3 L'eau, Mars et la vie……..……..14
1.3.1 Tour d'horizon..... 14
1.3.2 Le potentiel exobiologique de Mars 20
1.4 Un exemple de mission spatiale exobiologique : ExoMars……...……24
1.4.1 Présentation et objectifs..... 25
1.4.2 Les terrains potentiels d'atterrissage 27
1.4.3 Autres missions et perspectives sur Mars..... 28

Conclusion

Références

Chapitre 2 : Le sondage des sous-sols par la méthode radar, application à Mars

Introduction

2.1 Les caractéristiques électromagnétiques des matériaux et la propagation des ondes dans les milieux ……...……...…….38
2.1.1 Quelques éléments de vocabulaire 38
2.1.2 Les paramètres constitutifs du milieu..... 39
2.1.2.1 La permittivité électrique..... 39
2.1.2.2 La conductivité électrique 41
2.1.2.3 La permittivité effective relative 41
2.1.2.4 La perméabilité magnétique 42

2.1.3 Caractéristiques de quelques matériaux 43
2.1.3.1 Le cas particulier de l'eau 43
2.1.3.2 Les roches et les sols 45
2.1.4 Conditions attendues sur Mars 46
2.2 La propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux homogènes 49
2.2.1 Les équations de Maxwell 49
2.2.2 Les relations constitutives du milieu 50
2.2.3 Cas idéal de l'onde plane harmonique en milieu homogène 52
2.3 Introduction à la technique GPR 54
2.3.1 Généralités 54
2.3.1.1 Bref historique 54
2.3.1.2 Principe général 56
2.3.2 Le dimensionnement des radars 57
2.3.2.1 La profondeur de détection 58
2.3.2.2 La dynamique de l'instrument : 59
2.3.2.3 La résolution en profondeur de l'instrument 60
2.4 Les radars pour le sondage du sous-sol de Mars 60
2.4.1 L'apport des sondeurs MARSIS et SHARAD sur la connaissance de Mars 60
2.4.1.1 MARSIS (Mars Express) 61
2.4.1.2 SHARAD (MRO) 64
2.4.2 Le radar GPR WISDOM conçu pour la mission ExoMars 2018 66
Conclusion
Références

Chapitre 3 : L'instrument WISDOM

Introduction

3.1 La conception de l'instrument WISDOM 76
3.1.1 Objectifs 76
3.1.2 Un radar à sauts de fréquence 77
3.1.3 Le module électronique de WISDOM 79
3.1.4 Le système d'antennes de WISDOM 80
3.2 Performances de l'instrument 83
3.2.1 Efficacité des additions cohérentes 83
3.2.2 Choix du nombre Nfreq de fréquences utilisées 83
3.2.3 Bilan de liaison de WISDOM 85
3.2.4 Gating 88
3.2.5 Traitement des données de l'instrument WISDOM 89

3.3 Etude comportementale de l'instrument WISDOM……...……92
3.3.1 Mesure incomplète 92
3.3.2 Approximation en champ lointain 95
3.3.2.1 Notion de champ lointain 95
3.3.2.2 Mesure en réflexion sur une plaque conductrice 96
3.4 Les données acquises avec les prototypes de WISDOM……...99
3.4.1 Démarche..... 99
3.4.2 Dachstein Mars Simulation 2012 100
3.4.3 SAFER..... 102
Conclusion
Références

Chapitre 4 : La modélisation du radar WISDOM en interaction avec les milieux naturels

Introduction
4.1 Méthodes de modélisation……109
4.1.1 Simulation simplifiée par lancer de rayons 110
4.1.1.1 Théorie et description 110
4.1.1.2 Quelques exemples..... 114
4.1.1.3 Limites..... 115
4.1.2 La méthode FDTD et le logiciel TEMSI-FD..... 116
4.1.2.1 Théorie et description 116
4.1.2.2 Modélisation du radar WISDOM sous TEMSI-FD..... 117
4.2 Interactions avec un milieu non homogène…….....119
4.2.1 Comportement au passage d'interfaces 120
4.2.1.1 Interfaces lisses..... 120
4.2.1.2 Interfaces inclinées 121
4.2.1.3 Interfaces rugueuses 124
4.2.2 L'hétérogénéité diélectrique des matériaux..... 130
4.3 Modélisation pour l'aide à l'interprétation des données et la prédiction de performances……....133
4.3.1 Expérience en milieu froid 133
4.3.2 Simulation d'une structure biogénique..... 135
4.3.3 Prédiction du comportement de WISDOM sur le site d'Oxia Planum..... 136
Conclusion
Références

Chapitre 5 : Les méthodes d'estimation des propriétés diélectriques du sous-sol

Introduction
5.1 Les méthodes d'estimation des propriétés du sous-sol à partir des données de WISDOM…….....142
5.1.1 Accès à la constante diélectrique en surface..... 142
5.1.2 L'impact de la rugosité sur la restitution de la constante diélectrique..... 146
5.2 La signature des diffuseurs ponctuels : accès en profondeur……..154
5.2.1 Principe..... 154
5.2.2 Méthode développée..... 156
5.2.3 Etude de sensibilité..... 157
5.3 Expérience d'humidification d'un sol…….....158
5.3.1 Motivations et protocole..... 158
5.3.2 Résultats 158
5.4 La campagne SAFER……160
5.4.1 Contexte..... 160
5.4.2 Les variations spatiales de la constante diélectrique en surface 164
5.4.3 Le gradient de la constante diélectrique 169
Conclusion
Références

Chapitre 6 : La reconstitution du sous-sol à partir des données de WISDOM

Introduction
6.1 La localisation des diffuseurs avec le GPR WISDOM……...….176
6.1.1 Une méthode mise au point grâce au système d'antennes de WISDOM 176
6.1.1.1 Principe..... 176
6.1.1.2 Validation en milieu contrôlé 177
6.1.2 Une planification judicieuse de la trajectoire du rover..... 179
6.1.2.1 Principe..... 179
6.1.2.2 Validation 181
6.2 Identification des structures de dépôts……..……..183
6.2.1 Le froid 183
6.2.1.1 Dachstein : les grottes glacées..... 183
6.2.1.2 Neige et glacier..... 189
6.2.2 Le chaud 191

6.2.2.1 Retour sur SAFER : milieu désertique 191
6.2.2.2 L'Etna 197
6.3 Reconstitution du sous-sol en 3 dimensions……..198
6.3.1 Les strates 198
6.3.2 Les diffuseurs 201
Conclusion
Références
Conclusion et perspectives……..……....205
Annexes
Annexe A : Fichier de données WISDOM……i
Annexe B : Liste des communications……ii

Table des Figures

Chapitre 1 : L'exobiologie et Mars, ExoMars

Figure 1.1-1 : Reconstruction de l'histoire de la Terre et de l'apparition de la vie. Figure modifiée à partir de (Bada, 2004) 5
Figure 1.1-2 : En haut : conception d'artiste de la structure interne de Titan. En bas : mosaïque d'images radar à bord de la sonde Cassini révélant la surface de Titan et ses lacs de méthane. Source : JPL-Caltech/NASA, ASI, USGS 6
Figure 1.1-3 : A gauche : image en fausse couleur du côté opposé à Saturne lors du survol de Cassini en 2005. En haut à droite : vue d'artiste du modèle proposé pour la structure interne d'Encelade. En bas à droite : les geysers détectés au pôle sud par la sonde Cassini. Source : NASA/JPL/Space Science Institute..... 7
Figure 1.1-4 : À gauche : mosaïque de photographies prises par l'instrument NAVCAM sur la sonde Rosetta. On remarque le flux de particules qui s'échappent de la comète sous l'influence des rayons solaires. À droite : image de la caméra OSIRIS de la surface du petit lobe de la comète. On distingue une fine couche de poussières sur un matériau plus sombre et rugueux. Source : ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA 8
Figure 1.1-5 : En haut à gauche : image d'Europe prise par la sonde Galileo. En haut à droite : modèle de la structure interne d'Europe. En bas : exemple de figures trouvées sur la croûte glacée. La zone couvre une surface de 70km par 30 km, les couleurs ont été rehaussées pour illustrer les différents dépôts dus aux impacts (zones blanches) et aux remontées d'eau, pure ou comportant des minéraux (zones plus sombres). Source : NASA/JPL 9
Figure 1.2-1: Carte réalisée par Schiaparelli en 1888. Les zones sombres représentent de grandes étendues desquelles partent des canaux en direction du Nord..... 11
Figure 1.2-2 : Résumé de l'exploration spatiale de Mars. Source : Jason Davis / astrosaur.us 13
Figure 1.3-1 : Carte topographique de la planète Mars obtenue grâce à l'altimètre laser MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) à bord de la sonde Mars Global Surveyor (source : NASA/JPL). En haut : les deux pôles. En bas, le planisphère. 14
Figure 1.3-2 : Panel de sites remarquables sur Mars. À gauche : La région de Tharsis Mons, avec ses volcans. Au milieu, en haut : Olympus Mons, le volcan le plus haut du Système solaire. Au milieu, en bas : Valles Marineris avec son réseau immense de canyons. En haut à droite : le cratère Gale. En bas à droite : superposition de dépôts sédimentaires au pied du cratère Gale. Credits : NASA/JPL-Caltech/ESA/DLR/FU Berlin/MSSS 16
Figure 1.3-3 : En haut à gauche : Un réseau complexe de vallées (42°S, 92°W), vu par l'orbiteur Viking. Source NASA/JPL. En haut à droite : Le système de vallées Nanedi Valles (6.0°N 312°E) pris avec l'instrument HRSC (Mars Express). Le réseau s'étend sur environ 800 km. Source : ESA/DLR/FU Berlin. En bas : images de la

sonde Mars Global Surveyor montrant des chenaux inversés dans le delta d'Eberswalde. Source : (Malin and Edgett., 2003). 17
Figure 1.3-4 : Images de l'instrument HRSC. À gauche : vallées de débâcle de Dao et Niger (40°S 270°W). Leur largeur est d'environ 40 km et elles peuvent atteindre 2 km de profondeur de 2400m (source : ESA/DLR/FU). Au milieu : Vue en perspective d'Hephaestus Fossae, sa source serait un impact ayant provoqué la remontée de glace en profondeur, débouchant sur une vallée de débâcle en contexte de pente douce. Source : DLR. À droite : Kasei Valles, l'une des plus grandes vallées de débâcle sur Mars. Source : ESA/DLR. 17
Figure 1.3-5 : Images de la caméra HIRISE (MRO) montrant un exemple de linear gullies le long des pentes du cratère Russell (54°S 13°E). Ceux-ci peuvent atteindre 2 km de longueur. Source: NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona 18
Figure 1.3-6 : Carte de l'hydrogène révélée par le détecteur à neutron HEND (High Energy Neutron Detector) à bord de la sonde Mars Odyssey. Une forte présence d'hydrogène traduit la présence d'eau, qui apparait sous forme de glace aux pôles et de minéraux hydratés aux latitudes plus faibles. Source : Boynton et al., 2002) . 19
Figure 1.3-7 : Échelle des temps géologiques (proposée par Bibring et al., 2006), modifiée par l'adjonction de morphologies associées. 22
Figure 1.4-1 : vue d'artiste du rover de la mission ExoMars. Source : ESA 26
Figure 2.1-1 : Les différents types de polarisations et leur effet sur l'évolution de la partie réelle de la permittivité sur l'ensemble du spectre électromagnétique (modifié d'après Guéguen and Palciauskas, 1992). 41
Figure 2.1-2 : Gauche : parties réelles de la permittivité et de la conductivité de l'eau à 20°C en fonction de la fréquence pour différents taux de salinité S (Source : Stogryn, 1971) ; Droite : partie réelle de la permittivité de la neige pour différent taux d'humidité W (Source : Bradford et al., 2009) 43
Figure 2.1-3 : Modèle de Debye (Debye, 1929) pour les parties réelle et imaginaire de la permittivité relative pour l'eau liquide pure à 25°C et la glace à -15°C, en fonction de la fréquence. Les fréquences géoradar couvrent la gamme de quelques MHz à quelques GHz. 44
Figure 2.1-4 : Constante diélectrique d'échantillons de roches volcaniques en fonction du coefficient de dureté (tiré de ElShafie and Heggy, 2012, adapté de Rust et al., 1999 et Olhoeft and Strangway, 1975). 45
Figure 2.1-5 : Carte de la permittivité réelle à la surface de Mars, obtenue à partir des données MARSIS. Source : Mouginot et al., 2010. 46
Figure 2.1-6 : Image HIRISE révélant la stratigraphie le long des bords d'un cratère. Source : NASA/JPL.... 48
Figure 2.1-7 : Exemple de modèle géoélectrique d'un sous-sol martien (Heggy et al., 2003)..... 49
Figure 2.2-1 : Atténuation d'une onde se propageant dans un milieu homogène en fonction de sa tangente de perte pour 3 fréquences centrales (1 GHz, 100 MHz, 10 MHz)..... 53
Figure 2.2-2 : Pertes estimées (par atténuation et diffusion) en fonction de la fréquence de sondage pour des terrains volcaniques martiens à partir de mesures effectuées sur des analogues terrestres (Heggy et al., 2006). On voit que selon la fréquence, la diffusion peut avoir un impact prépondérant sur les pertes au sein du milieu. 54

Figure 2.3-1 : Stromatolithes en contexte de mer chaude peu profonde. Bien que l'on puisse en trouver sous des formes variées, cette géométrie en forme de champignon est souvent rencontrée. 56
Figure 2.3-2 : A gauche : principe général du GPR ; A droite : le prototype de WISDOM. 56
Figure 2.3-3 : Radargramme traité et exemple de trace associée. L'enveloppe du signal est également représentée. Les données ont été acquises avec le radar WISDOM lors d'une campagne de mesures dans la région de Dachstein en Autriche. Les échos successifs témoignent des contrastes diélectriques au sein du matériau 57
Figure 2.3-4 : Illustration de la dynamique de l'instrument (rouge) pour la mesure d'un signal constitué de deux pics. Dans les deux premiers cas, la dynamique est de 120 dB, contre 60 dB pour le troisième cas. La limite verte représente la sensibilité de l'instrument 59
Figure 2.4-1 : Orosei et al., 2015. A) radargramme obtenu par MARSIS sur la région de Planum Boreanum. B) Simulation des données dans le cas de la seule contribution de la surface au signal retour. C) Profil effectué localisé sur une carte MOLA. 62
Figure 2.4-2 : Carte MOLA de la calotte sud, avec l'épaisseur des SPLD. On note une forte dyssimétrie de l'épaisseur des dépôts, fine dans la direction 180°E mais atteignant 3,5 km près du pôle. Source : Plaut et al., 2007 62
Figure 2.4-3 : Carte stéréographique de la distribution de la permittivité sur la région polaire Nord (Orosei et al., 2015), à partir de (Tanaka et al., 2005) et (Mouginot et al., 2012) 64
Figure 2.4-4 : Illustration de la différence de résolution et de profondeur de pénétration des instruments SHARAD (en haut) et MARSIS (au milieu). Les profils sont indiqués pour chacun des radargrammes sur une carte MOLA de la région polaire Nord. Source : NASA/JPL 65
Figure 2.4-5 : En haut : radargramme des dépôts stratifiés dans la région polaire Nord. En bas : radargramme de la région polaire Sud, révélant les dépôts de glace de CO2 surmontant les dépôts stratifiés, qui sont quant à eux composés d'eau et de poussières. Source : NASA/JPL. 65
Figure 2.4-6 : A guache : radargramme le long de la plaine Amazonis. On remarque les variations d'amplitude du signal rétrodiffusé le long du profil, liées à des changements de matériau. A droite : réflectivité de la surface sur la zone de Vastitas Borealis (Amazonis planum). On distingue très nettement les écoulements de lave se déversant autour d'Olympus Mons (à droite) et dans la plaine Amazonis. Source : Campbell et al., 2008. 66
Figure 2.4-7 : Prototype de WISDOM monté sur un rover lors d'une campagne de mesures dans le désert d'Atacama au Chili. Les antennes sont remarquables à l'avant du rover. Source : LATMOS. 68
Figure 3.1-1 : Principe de fonctionnement du radar à sauts de fréquence 78
Figure 3.1-2 : Schéma des différents composants de l'instrument WISDOM 79
Figure 3.1-3 : Principaux composants de l'instrument WISDOM. Gauche : Module RF ; Droite : Module digital 80
Figure 3.1-4 : Diagrammes de rayonnement de WISDOM à différentes fréquences centrales. À gauche : mesure en champ lointain en chambre anéchoïque. À droite : modélisation en 3D 81

Figure 3.1-5 : Les modules d'antenne de WISDOM en chambre anéchoïque à Dresden (Allemagne). On note la structure avec deux éléments rayonnants en croix qui offre la possibilité de mesurer les co et cross polarisations. 81
Figure 3.1-6 : Configuration d'une antenne le long d'un profil pour les polarisations 1 (à gauche) et 0 (à droite) 82
Figure 3.1-7 : Gauche : Gain des antennes mesuré pour les deux polarisations sur la bande de fréquence utile; Droite : Couplage entre antennes mesuré en domaine fréquentiel pour les quatre configurations de polarisation. 83
Figure 3.2-1 : Traces (domaine temporel) acquises avec le prototype WISDOM pour 4 paramètres de sommation différents. On voit le plancher de bruit diminuer avec l'augmentation du nombre d'échantillons utilisés pour la sommation. 83
Figure 3.2-2 : Effet du repliement sur les données WISDOM sur une bande de fréquence B =2.5 GHz, $\mathrm{tmax} = 150$ ns. a) radargramme complet ($\mathrm{Nfreq} = 1001; \mathrm{T} = 200$ ns) ; b) ($\mathrm{Nfreq} = 501; \mathrm{T} = 100$ ns) ; c) $\mathrm{Nfreq} = 334; \mathrm{T} = 67$ ns) 85
Figure 3.2-3 : Estimation du SNR en fonction de l'environnement et de l'interface ciblée. La limite à 3dB, qui autorise la bonne détection d'un écho, est indiquée en noir. 86
Figure 3.2-4 : Performances de résolution attendues pour WISDOM dans le cas de la détection d'une interface rugueuse ou lisse dans un milieu à pertes importantes ou faibles 87
Figure 3.2-5 : Radargrammes acquis dans des grottes glacées à Dachstein en Autriche. Comparaison entre l'utilisation de toute la bande de fréquence de 0.5 à 3 GHz (gauche), les basses fréquences de 0.5 à 1.5 GHz (milieu) et les hautes fréquences de 2 à 3 GHz (droite). 87
Figure 3.2-6 : principe du gating et paramètres associés. 89
Figure 3.2-7 : Comparaison des signaux sans et avec gating pour différents délais entre la transmission et la réception. 89
Figure 3.2-8 : Exemple de radargrammes obtenus sans (gauche) et avec fenêtrage (droite) 90
Figure 3.2-9 : Illustration de l'effet de l'opérateur sur la médiane qui permet de retirer les signaux constants. Seul le couplage direct entre antennes a été conservé. 90
Figure 3.2-10 : Comparaison entre radargramme non migré (gauche) et migré (droite) pour un milieu à deux couches (air et glace). Les données ont été acquises lors de la campagne de mesures à Dachstein sur une surface glacée. La vitesse qui permet de « rassembler » le plus correctement les hyperboles est estimée à 0.168 $\mathrm{m.ns^{-1}}$, ce qui revient à une constante diélectrique de 3.2, typique de la glace. Les cercles noirs mettent en exergue le rassemblement des hyperboles en leur sommet. Extrait de Dorizon et al., 2015. 92
Figure-3.3-1 : Comparaison des signaux récoltés dans le cas : d'un signal à large spectre (signal initial); d'un signal entre 0.5 et 3 GHz avec les voies I et Q; un signal à bande limitée (0.5-3 GHz) avec la mesure de la partie réelle uniquement 94

Figure 3.3-2 : Limite du champ lointain pour le cas de WISDOM pour deux tailles caractéristiques d'antennes différentes 96
Figure 3.3-3 : Amplitudes mesurées correspondant à l'écho sur le mur d'aluminium pour 3 bandes de fréquences (de haut en bas, All freqs, BF, HF). 98
Figure 3.4-1 : L'étage inférieur des grottes, avec les tests de prélèvements d'échantillons en combinaison spatiale. Source : Groemer et al., 2012. 100
Figure 3.4-2 : L'équipe WISDOM pratiquant des tests dans les grottes gelées à Dachstein. 100
Figure 3.4-3 : A gauche : le rover Bridget en opération dans le désert d'Atacama, équipé des 3 instruments d'ExoMars, WISDOM, CLUPI et PANCAM. Source : RAL Space. A droite : le centre de contrôle à Harwell, UK. Source : SCISYS. 103
Figure 3.4-4 : En haut : le trajet complet du rover Bridget effectué durant les cinq jours de mesures, tracé sur la carte fournie à l'équipe du centre de contrôle au début des tests. En bas : zoom sur la partie ouest, les zones d'intérêt définies et baptisées par les équipes scientifiques sont indiquées en couleur et les flèches rouges représentent les sondages effectués avec WISDOM. 103
Figure 4.1-1 : Configuration du radar 111
Figure 4.1-2 : Illustration du fonctionnement du radar 111
Figure 4.1-3 : Schéma récapitulatif de la configuration de l'environnement 111
Figure 4.1-4 : Exemple de simulation pour un environnement à 4 couches (air, milieux ε_1=2, ε_2=4, ε_3=10), avec 2 interfaces obliques et un réflecteur ponctuel 115
Figure 4.1-5 : Exemple de simulation pour un milieu à 3 couches (air, ε_1=2, ε_2=4), avec une interface composée de 2 demi-droites obliques et d'un réflecteur ponctuel 115
Figure 4.1-6 : Volume de calcul constitué de cellules de Yee, zoom sur le calcul des champs sur les faces et les arêtes pour une cellule. 116
Figure 4.1-7 : Effet du maillage sur la rugosité numérique. La zone grisée représente la surface réellement prise en compte dans la simulation. Source : Besse, 2004. 117
Figure 4.1-8 : Diagramme de rayonnement issu d'une simulation sous TEMSI-FD (gauche) et mesuré en chambre anéchoïque (droite) pour une fréquence centrale de 1 GHz (d'après Hervé, 2015). Le trait en noir représente le plan vertical de l'élément Vivaldi rayonnant. 118
Figure 4.1-9 : Gauche : Exemple de boite de calcul simulée sous TEMSI-FD, avec le modèle d'antenne de WISDOM (rouge). Droite : radargramme obtenu en plaçant une surface rugueuse à l'interface entre les deux milieux 119
Figure 4.2-1 : A gauche : coefficients de réflexion et de transmission en incidence normale en fonction du contraste des indices de réfraction. Cette loi est prise en compte dans le modèle de lancer de rayons qui permet de simuler des radargrammes (droite). On constate bien que plus l'écart entre les indices est important, plus l'amplitude de l'écho augmente. 120

Figure 4.2-2 : Radargrammes simulés par lancer de rayons pour illustrer la différence entre l'écho de l'interface au passage entre un premier milieu et un milieu plus (gauche) ou moins (droite) réfringent. Les échelles en niveau de gris sont symétriques par rapport à 0. 121
Figure 4.2-3 : Simulations par lancer de rayons illustrant l'effet de la pente d'une interface sur la rétrodiffusion : a) pente de 3°, le rayon incident est quasi-perpendiculaire à l'interface, la rétrodiffusion est importante ; b) pente de 6°, rétrodiffusion modérée ; c) pente de 23°, rétrodiffusion très faible 121
Figure 4.2-4 : Amplitude du signal provenant d'une interface oblique normalisée par l'amplitude correspondant à une interface horizontale en fonction de son inclinaison..... 122
Figure 4.2-5 : Simulations par lancer de rayons. Les paramètres sont les mêmes que ceux de la Figure 4.2-3, seule l'ouverture du lobe d'antenne change et est fixée à 5°..... 122
Figure 4.2-6 : Amplitude de l'écho provenant d'une interface inclinée (8° de pente) du signal enregistré en fonction de l'ouverture du lobe d'antenne, normalisée par l'amplitude récupérée pour une ouverture de 90° à partir de simulations par lancer de rayons. 123
Figure 4.2-7 : Conditions de détection d'une interface inclinée en fonction du pas spatial de l'instrument et de la fréquence centrale. Les bandes noires représentent les fréquences limites de l'instrument WISDOM, la droite rouge marque le pas spatial retenu pour les sondages de WISDOM dans le cadre de la mission ExoMars. .. 123
Figure 4.2-8 : Illustration de l'effet dépolarisant des interfaces présentant un pendage. Les flèches rouges représentent les plans de polarisation. 124
Figure 4.2-9 : En haut : surface rugueuse en entrée du modèle et son autocorrélation. Elle sépare une couche d'air d'une couche de glace homogène. Au milieu : radargrammes selon deux polarisations issus de la simulation d'un profil au-dessus de la surface rugueuse et profils des hauteurs de la surface simulée et vue par WISDOM. En bas : autocorrélations et histogrammes des hauteurs le long du profil simulé et vu par WISDOM. 126
Figure 4.2-10 : En haut : Surface rugueuse en entrée du modèle et son autocorrélation. En bas : topographie le long du profil simulé et vu par WISDOM. Les longueurs de corrélation et les écarts-types des hauteurs pour la surface simulée d'une part et déduits des données d'autre part sont également précisés..... 127
Figure 4.2-11 : En haut : surface rugueuse en entrée du modèle et son autocorrélation. En bas : profils des hauteurs de la surface simulée et vue par WISDOM. Les longueurs de corrélation et les écarts-types des hauteurs pour la surface simulée d'une part et déduits des données d'autre part sont également précisés..... 128
Figure 4.2-12 : Déphasage global induit par une surface rugueuse pour la configuration géométrique de WISDOM (noir) et selon le critère de Rayleigh (rouge) en fonction de l'écart-type des hauteurs et de la longueur de corrélation de la surface rugueuse en incidence normale, pour une fréquence centrale de 1GHz. Les traits pleins, (resp pointillés) représentent la limite à $\pi/8$ (resp $\pi/4$) 129
Figure 4.2-13 : Résultats des simulations conduites pour l'étude de la rugosité : comparaison entre les paramètres de rugosité en entrée des simulations et déduits des radargrammes produits sous TEMSI-FD. Les numéros correspondent aux différentes surfaces simulées listées dans le Tableau 4.2-1. La ligne blanche représente la limite entre les cas lisse et rugueux pour WISDOM. 130

Figure 4.2-14 : Caractéristiques des hétérogénéités du milieu simulé (gauche) et radargramme associé. On se trouve dans le cas typique de phénomènes diffusifs. Le cas homogène est également représenté pour comparaison..... 131
Figure 4.2-15 : Caractéristiques des hétérogénéités du milieu simulé et radargramme associé..... 132
Figure 4.2-16 : Caractéristiques des hétérogénéités du milieu simulé et radargrammes associés selon deux polarisations différentes avec toute la bande de fréquences..... 132
Figure 4.3-1 : Illustration des conditions de formation des fentes de glace. La surface de Mars pourrait avoir présenté des paysages similaires pendant une époque non négligeable de son histoire. Source : R. Mitchell/Inkworks for U.S. Fish and Wildlife Service..... 133
Figure 4.3-2 : Expérience conduite en chambre froide au laboratoire GEOPS avec une fente polygonale vide. 133
Figure 4.3-3: Comparaison entre les données et les simulations pour deux ouvertures de lobe d'antenne de 60° et 3°..... 134
Figure 4.3-4 : Radargrammes générés à partir des données récoltées lors du sondage de la cuve de pergélisol présentant une fente au laboratoire GEOPS 135
Figure 4.3-5 : Gauche : Simulation de WISDOM dans un contexte de sondage pour la détection de stromatolithes ; Droite : radargramme récolté..... 136
Figure 4.3-6 : Modélisation du site d'Oxia Planum et amplitude reçue pour chaque interface pour différentes valeurs de a (Hervé, 2015)..... 137
Figure 4.3-7 : Exemple de radargramme simulé pour le site d'Oxia Planum..... 138
Figure 5.1-1 : Simulations TEMSI de la méthode basée sur l'exploitation de l'écho de sol avec la configuration de WISDOM. A gauche : illustration de la simulation pour la mesure sur plaque métallique. A droite : résultats pour l'estimation de la constante diélectrique..... 144
Figure 5.1-2 : Radargrammes des données acquises à Dachstein sur une surface rugueuse en sous-bandes de fréquences. Les figures sont centrées sur l'écho de sol et converties en profondeur en considérant une constante diélectrique de 1. Extrait de Dorizon et al., 2015)..... 147
Figure 5.1-3 : Comparaison de la forme de l'enveloppe de l'écho de sol dans le cas d'une surface lisse (gauche) et rugueuse (droite) sur des données réelles. Extrait de : (Dorizon et al., communication AGU 2013). Les.. 147
Figure 5.1-4 : Les trois critères de détection de la topographie vue par le radar. A gauche, radargramme simulé sous TEMSI-FD pour une surface faiblement rugueuse. A droite, données réelles acquises sur une surface rugueuse au cours d'une campagne de mesures dans des grottes glacées à Dachstein. 148
Figure 5.1-5 : Estimation de la constante diélectrique par méthode basée sur l'écho de sol pour 3 bandes de fréquences sur les différents terrains investigués pendant la campagne de Dachstein. On voit que dans le cas de la surface rugueuse, la constante diélectrique est sous-estimée. Extrait de (Dorizon et al., 2015). 149
Figure 5.1-6 : Résultats des simulations : erreurs sur l'estimation de la constante diélectrique en fonction des paramètres de rugosité de la surface simulée pour 3 bandes de fréquences. La figure de droite représente une

vue de dessus, où les limites à 10% d'erreur sur la constante diélectrique sont indiquées pour chaque bande de fréquences..... 150
Figure 5.1-7 : Les six surfaces sondées par WISDOM pour l'étude de la rugosité. Les orientations des sillons sont données par rapport au déplacement des antennes (sachant que les éléments rayonnants sont diagonaux). 151
Figure 5.1-8 : Configuration pour les surfaces 2 et 3 dans les cas de sillons parallèles et perpendiculaires au déplacement des antennes..... 152
Figure 5.1-9 : Radargrammes acquis sur la surface n°4 et diagrammes de rayonnements associés : en polarisation 0/0, la surface vue par le radar est une moyenne des creux et des crêtes des sillons. En polarisation 1/1, l'orientation du diagramme de rayonnement permet au radar de distinguer les creux des bosses. 152
Figure 5.1-10 : Constante diélectrique estimée pour chaque surface 152
Figure 5.2-1 : Signature radar d'un réflecteur ponctuel 154
Figure 5.2-2 : Simulations par lancer de rayons : erreurs sur les estimations des paramètres du sous-sol en fonction de la constante diélectrique de la couche considérée et de la profondeur du diffuseur si l'on considère une hyperbole exacte lorsque WISDOM détecte un objet..... 155
Figure 5.2-3 : Simulations par lancer de rayon dans la configuration de WISDOM, avec une couche de 30 cm d'air. Impact de l'augmentation de la permittivité sur la signature d'un diffuseur ponctuel situé à 30 cm de profondeur. a) n = 1.1 ; b) n = 2.5 ; c) n = 3.5 ; d) n = 5 155
Figure 5.2-4 : Principe de la méthode des largeurs développée pour restituer les paramètres du sous-sol..... 157
Figure 5.2-5 : Ajout de bruit blanc (gauche) et d'inhomogénéités (droite) dans les milieux simulés pour tester la sensibilité de la méthode d'inversion semi-automatique. Extrait de (Dorizon and Ciarletti, communication EGU 2013)..... 157
Figure 5.3-1 : Influence de la teneur en haut sur le coefficient de réflexion du radar. Expérience conduite avec WISDOM. Extrait de (Dorizon and Ciarletti, communication AGU 2013)..... 159
Figure 5.3-2 : Fonctions d'intercorrélations pour différentes profondeurs. On remarque un décalage de 3 minutes entre la réponse de la surface et à une dizaine de centimètres..... 160
Figure 5.4-1 : Carte aérienne fournie en début de mission, avec les sites d'intérêt sélectionnés par l'équipe scientifique située à Harwell, UK..... 162
Figure 5.4-2 : Données fournies par le système de navigation du rover pour le Sol 6, un long profil d'une centaine de mètres. De haut en bas : altitude, tangage, roulis, et lacet. 163
Figure 5.4-3 : Assemblage de photographies prises par les instruments PANCAM et CLUPI le long du trajet du rover. Source : (Woods et al., 2015)..... 163
Figure 5.4-4 : Constante diélectrique estimée pour les deux copolarisations 0/0 et 1/1 le long du trajet du rover Bridget, avec un zoom sur la grille effectuée sur le site d'Honfleur. 165
Figure 5.4-5 : Répartition spatiale de la constante diélectrique en surface déduite des mesures le long du trajet du rover..... 165

Figure 5.4-6 : Constante diélectrique des échantillons récupérés sur les sites de Zittau (gauche) et Honfleur (droite). 168
Figure 5.4-7 : Gauche : stratigraphie révélée par « forage » sur le site d'Honfleur. Droite : Constantes diélectriques estimées par analyse en laboratoire pour des échantillons prélevés sur les sites de Zittau et d'Honfleur à différentes profondeurs. 170
Figure 5.4-8 : Constante diélectrique estimée à partir de la signature des diffuseurs identifiés sur les radargrammes des sites d'Harwell et Zittau. 170
Figure 6.1-1 : Configuration pour la détection de diffuseurs ponctuels dans le cas de la polarisation 0/0. Le diffuseur n'est éclairé intensément que lorsque les antennes ont dépassé la position horizontale de l'objet. . 177
Figure 6.1-2 : Configuration de l'expérience des cibles suspendues et profils effectués..... 177
Figure 6.1-3 : Radargrammes correspondants au profil n°1 de l'expérience des cibles suspendues. A gauche les données expérimentales, à droite les données simulées correspondant à la meilleure configuration trouvée via la méthode décrite dans le Chapitre 5..... 178
Figure 6.1-4 : Radargrammes correspondants au profil n°1/a de l'expérience des cibles suspendues (la zone correspondant à la sphère est sélectionnée). On note la différence d'amplitude le long des branches de « l'hyperbole » selon la polarisation sélectionnée..... 178
Figure 6.1-5 : Portion de radargramme acquis durant la campagne de Dachstein, qui met en évidence la différence d'amplitude observée pour un diffuseur se trouvant à droite du déplacement des antennes..... 179
Figure 6.1-6 : Illustration de la méthode développée pour localiser la position des diffuseurs pour un cas de données réelles acquises selon une grille d'acquisition durant la campagne de Dahstein. 180
Figure 6.1-7 : Gauche : nuage de points en fonction du nombre d'intersections n_{inter} de portions de sphères. Droite : localisation et volumes restitués des objets à partir des données WISDOM pour n_{inter} =2. 181
Figure 6.1-8 : Zoom sur les volumes restitués (n_{inter} =3) et dimensions des objets correspondants. 182
Figure 6.1-9 : Volume obtenu pour la boite métallique en considérant la deuxième signature. 183
Figure 6.2-1 : Carte des sites étudiés au cours de la Mars Simulation 2012. Les zones investiguées avec WISDOM (A, B, C, D) sont également indiquées. Le site B a fait l'objet d'une grille de sondage, avec 7 profils longitudinaux et 9 transversaux. Modifiée à partir de (Groemer et al., 2012)..... 184
Figure 6.2-2 : Les 3 plateformes utilisées pendant la Mars Simulation 2012. a) le cart WISDOM, b) le Cliffbot, c) le rover Magma-White. 184
Figure 6.2-3 : Histogramme des valeurs de constantes diélectriques déduites de la forme des signatures de diffuseurs identifiées sur les radargrammes. 185
Figure 6.2-4 : Radargrammes acquis sur le site D de Dachstein, non migré (a) et migré (b) en utilisant v = 0.168 $m.ns^{-1}$ pour la vitesse des ondes..... 186
En opposition aux conclusions de Haussmann et Behm (2011), nos données montrent donc que la glace dans la grotte n'est pas homogène, mais stratifiée. Une partie zoomée d'un radargramme converti en distance est présentée sur la Figure 6.2-6 avec une photographie de la stratigraphie apparente le long du trajet touristique de la grotte. Sur la photographie, nous pouvons identifier des couches avec différentes teintes, allant du diaphane

à une couleur brun foncé. Ces couches ont des épaisseurs variant de quelques centimètres à environ dix centimètres. L'image et l'acquisition de données radar n'ont pas été prises au même endroit, ce qui empêche d'effectuer une comparaison quantitative, mais on peut supposer que les couches de glace à l'intérieur de la grotte sont du même ordre d'épaisseur. Les strates identifiées sur la Figure 6.2-5 sont inclinées et varient horizontalement, ce qui nous conforte dans notre idée que ces échos ne proviennent ni d'artefacts instrumentaux (qui produiraient des lignes parfaitement horizontales avec la même amplitude) ni de réflexions multiples. 188
Figure 6.2-6: a) Photographie de la stratigraphie apparente de la glace le long du chemin touristique dans la grotte, entre Tristandom et le site A (voir Figure 6.2-1). b) Radargramme converti en profondeur (ε'=3.2) zoomé sur lequel on peut observer la stratigraphie et la transition entre la glace et le socle rocheux. 188
Figure 6.2-7 : Gauche : photographie de la zone n°1 située au niveau de l'arrivée du téléphérique des Grands Montets, Chamonix. Droite : zone n°2, sur la Vallée Blanche, Chamonix. Les sondages ont été effectués avec l'instrument WISDOM monté sur une luge pour faciliter les déplacements et la fiabilité du pas de 10 cm entre les mesures. 189
Figure 6.2-8 : Radargramme acquis sur la zone n°1 (voir Figure 6.2-7). 190
Figure 6.2-9 : Radargramme acquis sur la Vallée Blanche, avec un zoom sur les quatre premiers mètres de profondeur à droite. Le traitement est passé par l'application d'un gain exponentiel de facteur 2 pour révéler les structures les plus profondes. 190
Figure 6.2-10 : Passage sur la zone de Porto (Sol 2). 192
Figure 6.2-11 : Passage sur la zone d'Honfleur, avec 5 profils parallèles. Les structures que nous avons pu identifier sont soulignées. La flèche noire indique l'emplacement d'un forage programmé par le centre d'opérations à Harwell (voir Figure 6.2-12). 192
Figure 6.2-12 : Forage effectué dans la zone d'Honfleur. On remarque l'orientation inclinée des dépôts et l'apparition d'une couche plus claire à 80 cm de profondeur, en accord avec l'orientation détectée sur les radargrammes de la Figure 6.2-11. 193
Figure 6.2-13 : Sol 4 avec le passage sur Zittau (de 1 m à 5 m sur le radargramme à droite) 194
Figure 6.2-14 : Radargramme acquis sur le profil correspondant au Sol 6 194
Figure 6.2-15 : Trajet correspondant au Sol 6. Les points bleus représentent les bornes des zooms fournis sur la Figure 6.2-14 195
Figure 6.2-16 : Pas d'acquisition réellement observé pour les Sols 2 et 6 (gauche). A droite : histogramme des pas d'acquisition pour toute la campagne de mesures 196
Figure 6.2-17 : Visualisation proposée par SCISYS pour coupler les données de surface et les données WISDOM 197
Figure 6.2-18 : A droite : une des zones investiguées durant la campagne de mesures sur l'Etna. A droite : exemple de radargramme acquis avec quelques couches bien identifiées en jaune. 198
Figure 6.3-1 : Reconstitution 3D de la surface et d'une couche « plongeante » du sous-sol à partir de 5 profils acquis pendant la campagne de mesures sur l'Etna (extrait de Ciarletti et al., 2012). 199

Figure 6.3-2 : Gauche : radargramme des profils acquis sous forme de grille au Dachstein sur le site D (mis bout à bout). Les profils sont séparés par les pointillés rouges. Droite : reconstitution en 3D de la couche identifiée sur les radargrammes. En bleu clair, le haut de la couche, en bleu foncé, le bas de la couche. 199
Figure 6.3-3 : Zoom sur la couche identifiée lors du sondage sous forme de grille (3ème profil) sur le site D. Les signatures en haut et en bas de la couche ont des signes inversés, témoignant du passage vers un milieu plus réfringent en haut et moins réfringent en bas. 200
Figure 6.3-4 : Radargrammes acquis sur le site B à Dachstein, en copolarisation (gauche) et crosspolarisation (droite). On note l'apparition d'une couche inclinée en crosspolarisation, invisible sur le radargramme de gauche..... 200
Figure 6.3-5 : Illustration de l'intérêt de pouvoir suivre des couches du sous-sol jusqu'à des affleurements potentiels. 201
Figure 6.3-6 : Reconstitution 3D du socle rocheux identifié sur le site B, basée sur la méthode décrite en 6.1 202
Figure 6.3-7 : Radargramme acquis sur la diagonale de la grille (voir Figure 6.2-1) sur le site B à Dachstein. 202
Figure 1.1-1 : Reconstruction de l'histoire de la Terre et de l'apparition de la vie. Figure modifiée à partir de (Bada, 2004) 5
Figure 1.1-2 : En haut : conception d'artiste de la structure interne de Titan. En bas : mosaïque d'images radar à bord de la sonde Cassini révélant la surface de Titan et ses lacs de méthane. Source : JPL-Caltech/NASA, ASI, USGS 6
Figure 1.1-3 : A gauche : image en fausse couleur du côté opposé à Saturne lors du survol de Cassini en 2005. En haut à droite : vue d'artiste du modèle proposé pour la structure interne d'Encelade. En bas à droite : les geysers détectés au pôle sud par la sonde Cassini. Source : NASA/JPL/Space Science Institute..... 7
Figure 1.1-4 : À gauche : mosaïque de photographies prises par l'instrument NAVCAM sur la sonde Rosetta. On remarque le flux de particules qui s'échappent de la comète sous l'influence des rayons solaires. À droite : image de la caméra OSIRIS de la surface du petit lobe de la comète. On distingue une fine couche de poussières sur un matériau plus sombre et rugueux. Source : ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA 8
Figure 1.1-5 : En haut à gauche : image d'Europe prise par la sonde Galileo. En haut à droite : modèle de la structure interne d'Europe. En bas : exemple de figures trouvées sur la croûte glacée. La zone couvre une surface de 70km par 30 km, les couleurs ont été rehaussées pour illustrer les différents dépôts dus aux impacts (zones blanches) et aux remontées d'eau, pure ou comportant des minéraux (zones plus sombres). Source : NASA/JPL 9
Figure 1.2-1: Carte réalisée par Schiaparelli en 1888. Les zones sombres représentent de grandes étendues desquelles partent des canaux en direction du Nord..... 11
Figure 1.2-2 : Résumé de l'exploration spatiale de Mars. Source : Jason Davis / astrosaur.us 13

Figure 1.3-1 : Carte topographique de la planète Mars obtenue grâce à l'altimètre laser MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) à bord de la sonde Mars Global Surveyor (source : NASA/JPL). En haut : les deux pôles. En bas, le planisphère. 14
Figure 1.3-2 : Panel de sites remarquables sur Mars. À gauche : La région de Tharsis Mons, avec ses volcans. Au milieu, en haut : Olympus Mons, le volcan le plus haut du Système solaire. Au milieu, en bas : Valles Marineris avec son réseau immense de canyons. En haut à droite : le cratère Gale. En bas à droite : superposition de dépôts sédimentaires au pied du cratère Gale. Credits : NASA/JPL-Caltech/ESA/DLR/FU Berlin/MSSS 16
Figure 1.3-3 : En haut à gauche : Un réseau complexe de vallées (42°S, 92°W), vu par l'orbiteur Viking. Source NASA/JPL. En haut à droite : Le système de vallées Nanedi Valles (6.0°N 312°E) pris avec l'instrument HRSC (Mars Express). Le réseau s'étend sur environ 800 km. Source : ESA/DLR/FU Berlin. En bas : images de la sonde Mars Global Surveyor montrant des chenaux inversés dans le delta d'Eberswalde. Source : (Malin and Edgett., 2003). 17
Figure 1.3-4 : Images de l'instrument HRSC. À gauche : vallées de débâcle de Dao et Niger (40°S 270°W). Leur largeur est d'environ 40 km et elles peuvent atteindre 2 km de profondeur de 2400m (source : ESA/DLR/FU). Au milieu : Vue en perspective d'Hephaestus Fossae, sa source serait un impact ayant provoqué la remontée de glace en profondeur, débouchant sur une vallée de débâcle en contexte de pente douce. Source : DLR. À droite : Kasei Valles, l'une des plus grandes vallées de débâcle sur Mars. Source : ESA/DLR. 17
Figure 1.3-5 : Images de la caméra HIRISE (MRO) montrant un exemple de linear gullies le long des pentes du cratère Russell (54°S 13°E). Ceux-ci peuvent atteindre 2 km de longueur. Source: NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona 18
Figure 1.3-6 : Carte de l'hydrogène révélée par le détecteur à neutron HEND (High Energy Neutron Detector) à bord de la sonde Mars Odyssey. Une forte présence d'hydrogène traduit la présence d'eau, qui apparait sous forme de glace aux pôles et de minéraux hydratés aux latitudes plus faibles. Source : Boynton et al., 2002) . 19
Figure 1.3-7 : Échelle des temps géologiques (proposée par Bibring et al., 2006), modifiée par l'adjonction de morphologies associées. 22
Figure 1.4-1 : vue d'artiste du rover de la mission ExoMars. Source : ESA 26
Figure 2.1-1 : Les différents types de polarisations et leur effet sur l'évolution de la partie réelle de la permittivité sur l'ensemble du spectre électromagnétique (modifié d'après Guéguen and Palciauskas, 1992). 41
Figure 2.1-2 : Gauche : parties réelles de la permittivité et de la conductivité de l'eau à 20°C en fonction de la fréquence pour différents taux de salinité S (Source : Stogryn, 1971) ; Droite : partie réelle de la permittivité de la neige pour différent taux d'humidité W (Source : Bradford et al., 2009) 43
Figure 2.1-3 : Modèle de Debye (Debye, 1929) pour les parties réelle et imaginaire de la permittivité relative pour l'eau liquide pure à 25°C et la glace à -15°C, en fonction de la fréquence. Les fréquences géoradar couvrent la gamme de quelques MHz à quelques GHz. 44
Figure 2.1-4 : Constante diélectrique d'échantillons de roches volcaniques en fonction du coefficient de dureté (tiré de ElShafie and Heggy, 2012, adapté de Rust et al., 1999 et Olhoeft and Strangway, 1975). 45

Figure 2.1-5 : Carte de la permittivité réelle à la surface de Mars, obtenue à partir des données MARSIS. Source : Mouginot et al., 2010. 46
Figure 2.1-6 : Image HIRISE révélant la stratigraphie le long des bords d'un cratère. Source : NASA/JPL.... 48
Figure 2.1-7 : Exemple de modèle géoélectrique d'un sous-sol martien (Heggy et al., 2003)..... 49
Figure 2.2-1 : Atténuation d'une onde se propageant dans un milieu homogène en fonction de sa tangente de perte pour 3 fréquences centrales (1 GHz, 100 MHz, 10 MHz)..... 53
Figure 2.2-2 : Pertes estimées (par atténuation et diffusion) en fonction de la fréquence de sondage pour des terrains volcaniques martiens à partir de mesures effectuées sur des analogues terrestres (Heggy et al., 2006). On voit que selon la fréquence, la diffusion peut avoir un impact prépondérant sur les pertes au sein du milieu. 54
Figure 2.3-1 : Stromatolithes en contexte de mer chaude peu profonde. Bien que l'on puisse en trouver sous des formes variées, cette géométrie en forme de champignon est souvent rencontrée..... 56
Figure 2.3-2 : A gauche : principe général du GPR ; A droite : le prototype de WISDOM. 56
Figure 2.3-3 : Radargramme traité et exemple de trace associée. L'enveloppe du signal est également représentée. Les données ont été acquises avec le radar WISDOM lors d'une campagne de mesures dans la région de Dachstein en Autriche. Les échos successifs témoignent des contrastes diélectriques au sein du matériau..... 57
Figure 2.3-4 : Illustration de la dynamique de l'instrument (rouge) pour la mesure d'un signal constitué de deux pics. Dans les deux premiers cas, la dynamique est de 120 dB, contre 60 dB pour le troisième cas. La limite verte représente la sensibilité de l'instrument 59
Figure 2.4-1 : Orosei et al., 2015. A) radargramme obtenu par MARSIS sur la région de Planum Boreanum. B) Simulation des données dans le cas de la seule contribution de la surface au signal retour. C) Profil effectué localisé sur une carte MOLA..... 62
Figure 2.4-2 : Carte MOLA de la calotte sud, avec l'épaisseur des SPLD. On note une forte dyssimétrie de l'épaisseur des dépôts, fine dans la direction 180°E mais atteignant 3,5 km près du pôle. Source : Plaut et al., 2007..... 62
Figure 2.4-3 : Carte stéréographique de la distribution de la permittivité sur la région polaire Nord (Orosei et al., 2015), à partir de (Tanaka et al., 2005) et (Mouginot et al., 2012)..... 64
Figure 2.4-4 : Illustration de la différence de résolution et de profondeur de pénétration des instruments SHARAD (en haut) et MARSIS (au milieu). Les profils sont indiqués pour chacun des radargrammes sur une carte MOLA de la région polaire Nord. Source : NASA/JPL..... 65
Figure 2.4-5 : En haut : radargramme des dépôts stratifiés dans la région polaire Nord. En bas : radargramme de la région polaire Sud, révélant les dépôts de glace de CO2 surmontant les dépôts stratifiés, qui sont quant à eux composés d'eau et de poussières. Source : NASA/JPL..... 65
Figure 2.4-6 : A guache : radargramme le long de la plaine Amazonis. On remarque les variations d'amplitude du signal rétrodiffusé le long du profil, liées à des changements de matériau. A droite : réflectivité de la surface

sur la zone de Vastitas Borealis (Amazonis planum). On distingue très nettement les écoulements de lave se déversant autour d'Olympus Mons (à droite) et dans la plaine Amazonis. Source : Campbell et al., 2008. 66
Figure 2.4-7 : Prototype de WISDOM monté sur un rover lors d'une campagne de mesures dans le désert d'Atacama au Chili. Les antennes sont remarquables à l'avant du rover. Source : LATMOS. 68
Figure 3.1-1 : Principe de fonctionnement du radar à sauts de fréquence..... 78
Figure 3.1-2 : Schéma des différents composants de l'instrument WISDOM 79
Figure 3.1-3 : Principaux composants de l'instrument WISDOM. Gauche : Module RF ; Droite : Module digital 80
Figure 3.1-4 : Diagrammes de rayonnement de WISDOM à différentes fréquences centrales. À gauche : mesure en champ lointain en chambre anéchoïque. À droite : modélisation en 3D 81
Figure 3.1-5 : Les modules d'antenne de WISDOM en chambre anéchoïque à Dresden (Allemagne). On note la structure avec deux éléments rayonnants en croix qui offre la possibilité de mesurer les co et cross polarisations. 81
Figure 3.1-6 : Configuration d'une antenne le long d'un profil pour les polarisations 1 (à gauche) et 0 (à droite) 82
Figure 3.1-7 : Gauche : Gain des antennes mesuré pour les deux polarisations sur la bande de fréquence utile; Droite : Couplage entre antennes mesuré en domaine fréquentiel pour les quatre configurations de polarisation. 83
Figure 3.2-1 : Traces (domaine temporel) acquises avec le prototype WISDOM pour 4 paramètres de sommation différents. On voit le plancher de bruit diminuer avec l'augmentation du nombre d'échantillons utilisés pour la sommation. 83
Figure 3.2-2 : Effet du repliement sur les données WISDOM sur une bande de fréquence B =2.5 GHz, tmax = 150 ns. a) radargramme complet ($\mathrm{Nfreq} = 1001; \mathrm{T} = 200$ ns) ; b) ($\mathrm{Nfreq} = 501; \mathrm{T} = 100$ ns) ; c) $\mathrm{Nfreq} = 334; \mathrm{T} = 67$ ns) 85
Figure 3.2-3 : Estimation du SNR en fonction de l'environnement et de l'interface ciblée. La limite à 3dB, qui autorise la bonne détection d'un écho, est indiquée en noir. 86
Figure 3.2-4 : Performances de résolution attendues pour WISDOM dans le cas de la détection d'une interface rugueuse ou lisse dans un milieu à pertes importantes ou faibles 87
Figure 3.2-5 : Radargrammes acquis dans des grottes glacées à Dachstein en Autriche. Comparaison entre l'utilisation de toute la bande de fréquence de 0.5 à 3 GHz (gauche), les basses fréquences de 0.5 à 1.5 GHz (milieu) et les hautes fréquences de 2 à 3 GHz (droite). 87
Figure 3.2-6 : principe du gating et paramètres associés. 89
Figure 3.2-7 : Comparaison des signaux sans et avec gating pour différents délais entre la transmission et la réception. 89
Figure 3.2-8 : Exemple de radargrammes obtenus sans (gauche) et avec fenêtrage (droite) 90

Figure 3.2-9 : Illustration de l'effet de l'opérateur sur la médiane qui permet de retirer les signaux constants. Seul le couplage direct entre antennes a été conservé. 90
Figure 3.2-10 : Comparaison entre radargramme non migré (gauche) et migré (droite) pour un milieu à deux couches (air et glace). Les données ont été acquises lors de la campagne de mesures à Dachstein sur une surface glacée. La vitesse qui permet de « rassembler » le plus correctement les hyperboles est estimée à 0.168 $m.ns^{-1}$, ce qui revient à une constante diélectrique de 3.2, typique de la glace. Les cercles noirs mettent en exergue le rassemblement des hyperboles en leur sommet. Extrait de Dorizon et al., 2015. 92
Figure-3.3-1 : Comparaison des signaux récoltés dans le cas : d'un signal à large spectre (signal initial); d'un signal entre 0.5 et 3 GHz avec les voies I et Q; un signal à bande limitée (0.5-3 GHz) avec la mesure de la partie réelle uniquement 94
Figure 3.3-2 : Limite du champ lointain pour le cas de WISDOM pour deux tailles caractéristiques d'antennes différentes 96
Figure 3.3-3 : Amplitudes mesurées correspondant à l'écho sur le mur d'aluminium pour 3 bandes de fréquences (de haut en bas, All freqs, BF, HF). 98
Figure 3.4-1 : L'étage inférieur des grottes, avec les tests de prélèvements d'échantillons en combinaison spatiale. Source : Groemer et al., 2012. 100
Figure 3.4-2 : L'équipe WISDOM pratiquant des tests dans les grottes gelées à Dachstein. 100
Figure 3.4-3 : A gauche : le rover Bridget en opération dans le désert d'Atacama, équipé des 3 instruments d'ExoMars, WISDOM, CLUPI et PANCAM. Source : RAL Space. A droite : le centre de contrôle à Harwell, UK. Source : SCISYS. 103
Figure 3.4-4 : En haut : le trajet complet du rover Bridget effectué durant les cinq jours de mesures, tracé sur la carte fournie à l'équipe du centre de contrôle au début des tests. En bas : zoom sur la partie ouest, les zones d'intérêt définies et baptisées par les équipes scientifiques sont indiquées en couleur et les flèches rouges représentent les sondages effectués avec WISDOM. 103
Figure 4.1-1 : Configuration du radar. 111
Figure 4.1-2 : Illustration du fonctionnement du radar 111
Figure 4.1-3 : Schéma récapitulatif de la configuration de l'environnement 111
Figure 4.1-4 : Exemple de simulation pour un environnement à 4 couches (air, milieux ε_1=2, ε_2=4, ε_3=10), avec 2 interfaces obliques et un réflecteur ponctuel 115
Figure 4.1-5 : Exemple de simulation pour un milieu à 3 couches (air, ε_1=2, ε_2=4), avec une interface composée de 2 demi-droites obliques et d'un réflecteur ponctuel 115
Figure 4.1-6 : Volume de calcul constitué de cellules de Yee, zoom sur le calcul des champs sur les faces et les arêtes pour une cellule. 116
Figure 4.1-7 : Effet du maillage sur la rugosité numérique. La zone grisée représente la surface réellement prise en compte dans la simulation. Source : Besse, 2004. 117

Figure 4.1-8 : Diagramme de rayonnement issu d'une simulation sous TEMSI-FD (gauche) et mesuré en chambre anéchoïque (droite) pour une fréquence centrale de 1 GHz (d'après Hervé, 2015). Le trait en noir représente le plan vertical de l'élément Vivaldi rayonnant. 118
Figure 4.1-9 : Gauche : Exemple de boite de calcul simulée sous TEMSI-FD, avec le modèle d'antenne de WISDOM (rouge). Droite : radargramme obtenu en plaçant une surface rugueuse à l'interface entre les deux milieux 119
Figure 4.2-1 : A gauche : coefficients de réflexion et de transmission en incidence normale en fonction du contraste des indices de réfraction. Cette loi est prise en compte dans le modèle de lancer de rayons qui permet de simuler des radargrammes (droite). On constate bien que plus l'écart entre les indices est important, plus l'amplitude de l'écho augmente. 120
Figure 4.2-2 : Radargrammes simulés par lancer de rayons pour illustrer la différence entre l'écho de l'interface au passage entre un premier milieu et un milieu plus (gauche) ou moins (droite) réfringent. Les échelles en niveau de gris sont symétriques par rapport à 0. 121
Figure 4.2-3 : Simulations par lancer de rayons illustrant l'effet de la pente d'une interface sur la rétrodiffusion : a) pente de 3°, le rayon incident est quasi-perpendiculaire à l'interface, la rétrodiffusion est importante ; b) pente de 6°, rétrodiffusion modérée ; c) pente de 23°, rétrodiffusion très faible 121
Figure 4.2-4 : Amplitude du signal provenant d'une interface oblique normalisée par l'amplitude correspondant à une interface horizontale en fonction de son inclinaison 122
Figure 4.2-5 : Simulations par lancer de rayons. Les paramètres sont les mêmes que ceux de la Figure 4.2-3, seule l'ouverture du lobe d'antenne change et est fixée à 5°. 122
Figure 4.2-6 : Amplitude de l'écho provenant d'une interface inclinée (8° de pente) du signal enregistré en fonction de l'ouverture du lobe d'antenne, normalisée par l'amplitude récupérée pour une ouverture de 90° à partir de simulations par lancer de rayons. 123
Figure 4.2-7 : Conditions de détection d'une interface inclinée en fonction du pas spatial de l'instrument et de la fréquence centrale. Les bandes noires représentent les fréquences limites de l'instrument WISDOM, la droite rouge marque le pas spatial retenu pour les sondages de WISDOM dans le cadre de la mission ExoMars. .. 123
Figure 4.2-8 : Illustration de l'effet dépolarisant des interfaces présentant un pendage. Les flèches rouges représentent les plans de polarisation. 124
Figure 4.2-9 : En haut : surface rugueuse en entrée du modèle et son autocorrélation. Elle sépare une couche d'air d'une couche de glace homogène. Au milieu : radargrammes selon deux polarisations issus de la simulation d'un profil au-dessus de la surface rugueuse et profils des hauteurs de la surface simulée et vue par WISDOM. En bas : autocorrélations et histogrammes des hauteurs le long du profil simulé et vu par WISDOM. 126
Figure 4.2-10 : En haut : Surface rugueuse en entrée du modèle et son autocorrélation. En bas : topographie le long du profil simulé et vu par WISDOM. Les longueurs de corrélation et les écarts-types des hauteurs pour la surface simulée d'une part et déduits des données d'autre part sont également précisés. 127

Figure 4.2-11 : En haut : surface rugueuse en entrée du modèle et son autocorrélation. En bas : profils des hauteurs de la surface simulée et vue par WISDOM. Les longueurs de corrélation et les écarts-types des hauteurs pour la surface simulée d'une part et déduits des données d'autre part sont également précisés..... 128
Figure 4.2-12 : Déphasage global induit par une surface rugueuse pour la configuration géométrique de WISDOM (noir) et selon le critère de Rayleigh (rouge) en fonction de l'écart-type des hauteurs et de la longueur de corrélation de la surface rugueuse en incidence normale, pour une fréquence centrale de 1GHz. Les traits pleins, (resp pointillés) représentent la limite à π/8 (resp π/4) 129
Figure 4.2-13 : Résultats des simulations conduites pour l'étude de la rugosité : comparaison entre les paramètres de rugosité en entrée des simulations et déduits des radargrammes produits sous TEMSI-FD. Les numéros correspondent aux différentes surfaces simulées listées dans le Tableau 4.2-1. La ligne blanche représente la limite entre les cas lisse et rugueux pour WISDOM. 130
Figure 4.2-14 : Caractéristiques des hétérogénéités du milieu simulé (gauche) et radargramme associé. On se trouve dans le cas typique de phénomènes diffusifs. Le cas homogène est également représenté pour comparaison..... 131
Figure 4.2-15 : Caractéristiques des hétérogénéités du milieu simulé et radargramme associé..... 132
Figure 4.2-16 : Caractéristiques des hétérogénéités du milieu simulé et radargrammes associés selon deux polarisations différentes avec toute la bande de fréquences..... 132
Figure 4.3-1 : Illustration des conditions de formation des fentes de glace. La surface de Mars pourrait avoir présenté des paysages similaires pendant une époque non négligeable de son histoire. Source : R. Mitchell/Inkworks for U.S. Fish and Wildlife Service..... 133
Figure 4.3-2 : Expérience conduite en chambre froide au laboratoire GEOPS avec une fente polygonale vide. 133
Figure 4.3-3: Comparaison entre les données et les simulations pour deux ouvertures de lobe d'antenne de 60° et 3°..... 134
Figure 4.3-4 : Radargrammes générés à partir des données récoltées lors du sondage de la cuve de pergélisol présentant une fente au laboratoire GEOPS 135
Figure 4.3-5 : Gauche : Simulation de WISDOM dans un contexte de sondage pour la détection de stromatolithes ; Droite : radargramme récolté..... 136
Figure 4.3-6 : Modélisation du site d'Oxia Planum et amplitude reçue pour chaque interface pour différentes valeurs de a (Hervé, 2015)..... 137
Figure 4.3-7 : Exemple de radargramme simulé pour le site d'Oxia Planum..... 138
Figure 5.1-1 : Simulations TEMSI de la méthode basée sur l'exploitation de l'écho de sol avec la configuration de WISDOM. A gauche : illustration de la simulation pour la mesure sur plaque métallique. A droite : résultats pour l'estimation de la constante diélectrique..... 144
Figure 5.1-2 : Radargrammes des données acquises à Dachstein sur une surface rugueuse en sous-bandes de fréquences. Les figures sont centrées sur l'écho de sol et converties en profondeur en considérant une constante diélectrique de 1. Extrait de Dorizon et al., 2015)..... 147

Figure 5.1-3 : Comparaison de la forme de l'enveloppe de l'écho de sol dans le cas d'une surface lisse (gauche) et rugueuse (droite) sur des données réelles. Extrait de : (Dorizon et al., communication AGU 2013). Les.. 147
Figure 5.1-4 : Les trois critères de détection de la topographie vue par le radar. A gauche, radargramme simulé sous TEMSI-FD pour une surface faiblement rugueuse. A droite, données réelles acquises sur une surface rugueuse au cours d'une campagne de mesures dans des grottes glacées à Dachstein. 148
Figure 5.1-5 : Estimation de la constante diélectrique par méthode basée sur l'écho de sol pour 3 bandes de fréquences sur les différents terrains investigués pendant la campagne de Dachstein. On voit que dans le cas de la surface rugueuse, la constante diélectrique est sous-estimée. Extrait de (Dorizon et al., 2015). 149
Figure 5.1-6 : Résultats des simulations : erreurs sur l'estimation de la constante diélectrique en fonction des paramètres de rugosité de la surface simulée pour 3 bandes de fréquences. La figure de droite représente une vue de dessus, où les limites à 10% d'erreur sur la constante diélectrique sont indiquées pour chaque bande de fréquences..... 150
Figure 5.1-7 : Les six surfaces sondées par WISDOM pour l'étude de la rugosité. Les orientations des sillons sont données par rapport au déplacement des antennes (sachant que les éléments rayonnants sont diagonaux). 151
Figure 5.1-8 : Configuration pour les surfaces 2 et 3 dans les cas de sillons parallèles et perpendiculaires au déplacement des antennes..... 152
Figure 5.1-9 : Radargrammes acquis sur la surface n°4 et diagrammes de rayonnements associés : en polarisation 0/0, la surface vue par le radar est une moyenne des creux et des crêtes des sillons. En polarisation 1/1, l'orientation du diagramme de rayonnement permet au radar de distinguer les creux des bosses. 152
Figure 5.1-10 : Constante diélectrique estimée pour chaque surface 152
Figure 5.2-1 : Signature radar d'un réflecteur ponctuel 154
Figure 5.2-2 : Simulations par lancer de rayons : erreurs sur les estimations des paramètres du sous-sol en fonction de la constante diélectrique de la couche considérée et de la profondeur du diffuseur si l'on considère une hyperbole exacte lorsque WISDOM détecte un objet..... 155
Figure 5.2-3 : Simulations par lancer de rayon dans la configuration de WISDOM, avec une couche de 30 cm d'air. Impact de l'augmentation de la permittivité sur la signature d'un diffuseur ponctuel situé à 30 cm de profondeur. a) n = 1.1 ; b) n = 2.5 ; c) n = 3.5 ; d) n = 5 155
Figure 5.2-4 : Principe de la méthode des largeurs développée pour restituer les paramètres du sous-sol..... 157
Figure 5.2-5 : Ajout de bruit blanc (gauche) et d'inhomogénéités (droite) dans les milieux simulés pour tester la sensibilité de la méthode d'inversion semi-automatique. Extrait de (Dorizon and Ciarletti, communication EGU 2013)..... 157
Figure 5.3-1 : Influence de la teneur en haut sur le coefficient de réflexion du radar. Expérience conduite avec WISDOM. Extrait de (Dorizon and Ciarletti, communication AGU 2013)..... 159
Figure 5.3-2 : Fonctions d'intercorrélations pour différentes profondeurs. On remarque un décalage de 3 minutes entre la réponse de la surface et à une dizaine de centimètres..... 160

Figure 5.4-1 : Carte aérienne fournie en début de mission, avec les sites d'intérêt sélectionnés par l'équipe scientifique située à Harwell, UK..... 162
Figure 5.4-2 : Données fournies par le système de navigation du rover pour le Sol 6, un long profil d'une centaine de mètres. De haut en bas : altitude, tangage, roulis, et lacet. 163
Figure 5.4-3 : Assemblage de photographies prises par les instruments PANCAM et CLUPI le long du trajet du rover. Source : (Woods et al., 2015)..... 163
Figure 5.4-4 : Constante diélectrique estimée pour les deux copolarisations 0/0 et 1/1 le long du trajet du rover Bridget, avec un zoom sur la grille effectuée sur le site d'Honfleur. 165
Figure 5.4-5 : Répartition spatiale de la constante diélectrique en surface déduite des mesures le long du trajet du rover..... 165
Figure 5.4-6 : Constante diélectrique des échantillons récupérés sur les sites de Zittau (gauche) et Honfleur (droite)..... 168
Figure 5.4-7 : Gauche : stratigraphie révélée par « forage » sur le site d'Honfleur. Droite : Constantes diélectriques estimées par analyse en laboratoire pour des échantillons prélevés sur les sites de Zittau et d'Honfleur à différentes profondeurs. 170
Figure 5.4-8 : Constante diélectrique estimée à partir de la signature des diffuseurs identifiés sur les radargrammes des sites d'Harwell et Zittau. 170
Figure 6.1-1 : Configuration pour la détection de diffuseurs ponctuels dans le cas de la polarisation 0/0. Le diffuseur n'est éclairé intensément que lorsque les antennes ont dépassé la position horizontale de l'objet. . 177
Figure 6.1-2 : Configuration de l'expérience des cibles suspendues et profils effectués..... 177
Figure 6.1-3 : Radargrammes correspondants au profil n°1 de l'expérience des cibles suspendues. A gauche les données expérimentales, à droite les données simulées correspondant à la meilleure configuration trouvée via la méthode décrite dans le Chapitre 5..... 178
Figure 6.1-4 : Radargrammes correspondants au profil n°1/a de l'expérience des cibles suspendues (la zone correspondant à la sphère est sélectionnée). On note la différence d'amplitude le long des branches de « l'hyperbole » selon la polarisation sélectionnée..... 178
Figure 6.1-5 : Portion de radargramme acquis durant la campagne de Dachstein, qui met en évidence la différence d'amplitude observée pour un diffuseur se trouvant à droite du déplacement des antennes..... 179
Figure 6.1-6 : Illustration de la méthode développée pour localiser la position des diffuseurs pour un cas de données réelles acquises selon une grille d'acquisition durant la campagne de Dahstein. 180
Figure 6.1-7 : Gauche : nuage de points en fonction du nombre d'intersections n_{inter} de portions de sphères. Droite : localisation et volumes restitués des objets à partir des données WISDOM pour n_{inter} =2. 181
Figure 6.1-8 : Zoom sur les volumes restitués (n_{inter} =3) et dimensions des objets correspondants. 182
Figure 6.1-9 : Volume obtenu pour la boite métallique en considérant la deuxième signature. 183
Figure 6.2-1 : Carte des sites étudiés au cours de la Mars Simulation 2012. Les zones investiguées avec WISDOM (A, B, C, D) sont également indiquées. Le site B a fait l'objet d'une grille de sondage, avec 7 profils longitudinaux et 9 transversaux. Modifiée à partir de (Groemer et al., 2012)..... 184

Figure 6.2-2 : Les 3 plateformes utilisées pendant la Mars Simulation 2012. a) le cart WISDOM, b) le Cliffbot, c) le rover Magma-White. 184
Figure 6.2-3 : Histogramme des valeurs de constantes diélectriques déduites de la forme des signatures de diffuseurs identifiées sur les radargrammes. 185
Figure 6.2-4 : Radargrammes acquis sur le site D de Dachstein, non migré (a) et migré (b) en utilisant v = 0.168 $m.ns^{-1}$ pour la vitesse des ondes..... 186
En opposition aux conclusions de Haussmann et Behm (2011), nos données montrent donc que la glace dans la grotte n'est pas homogène, mais stratifiée. Une partie zoomée d'un radargramme converti en distance est présentée sur la Figure 6.2-6 avec une photographie de la stratigraphie apparente le long du trajet touristique de la grotte. Sur la photographie, nous pouvons identifier des couches avec différentes teintes, allant du diaphane à une couleur brun foncé. Ces couches ont des épaisseurs variant de quelques centimètres à environ dix centimètres. L'image et l'acquisition de données radar n'ont pas été prises au même endroit, ce qui empêche d'effectuer une comparaison quantitative, mais on peut supposer que les couches de glace à l'intérieur de la grotte sont du même ordre d'épaisseur. Les strates identifiées sur la Figure 6.2-5 sont inclinées et varient horizontalement, ce qui nous conforte dans notre idée que ces échos ne proviennent ni d'artefacts instrumentaux (qui produiraient des lignes parfaitement horizontales avec la même amplitude) ni de réflexions multiples. 188
Figure 6.2-6: a) Photographie de la stratigraphie apparente de la glace le long du chemin touristique dans la grotte, entre Tristandom et le site A (voir Figure 6.2-1). b) Radargramme converti en profondeur (ε'=3.2) zoomé sur lequel on peut observer la stratigraphie et la transition entre la glace et le socle rocheux. 188
Figure 6.2-7 : Gauche : photographie de la zone n°1 située au niveau de l'arrivée du téléphérique des Grands Montets, Chamonix. Droite : zone n°2, sur la Vallée Blanche, Chamonix. Les sondages ont été effectués avec l'instrument WISDOM monté sur une luge pour faciliter les déplacements et la fiabilité du pas de 10 cm entre les mesures. 189
Figure 6.2-8 : Radargramme acquis sur la zone n°1 (voir Figure 6.2-7). 190
Figure 6.2-9 : Radargramme acquis sur la Vallée Blanche, avec un zoom sur les quatre premiers mètres de profondeur à droite. Le traitement est passé par l'application d'un gain exponentiel de facteur 2 pour révéler les structures les plus profondes. 190
Figure 6.2-10 : Passage sur la zone de Porto (Sol 2). 192
Figure 6.2-11 : Passage sur la zone d'Honfleur, avec 5 profils parallèles. Les structures que nous avons pu identifier sont soulignées. La flèche noire indique l'emplacement d'un forage programmé par le centre d'opérations à Harwell (voir Figure 6.2-12). 192
Figure 6.2-12 : Forage effectué dans la zone d'Honfleur. On remarque l'orientation inclinée des dépôts et l'apparition d'une couche plus claire à 80 cm de profondeur, en accord avec l'orientation détectée sur les radargrammes de la Figure 6.2-11. 193
Figure 6.2-13 : Sol 4 avec le passage sur Zittau (de 1 m à 5 m sur le radargramme à droite)..... 194
Figure 6.2-14 : Radargramme acquis sur le profil correspondant au Sol 6 194

Figure 6.2-15 : Trajet correspondant au Sol 6. Les points bleus représentent les bornes des zooms fournis sur la Figure 6.2-14 195
Figure 6.2-16 : Pas d'acquisition réellement observé pour les Sols 2 et 6 (gauche). A droite : histogramme des pas d'acquisition pour toute la campagne de mesures..... 196
Figure 6.2-17 : Visualisation proposée par SCISYS pour coupler les données de surface et les données WISDOM 197
Figure 6.2-18 : A droite : une des zones investiguées durant la campagne de mesures sur l'Etna. A droite : exemple de radargramme acquis avec quelques couches bien identifiées en jaune. 198
Figure 6.3-1 : Reconstitution 3D de la surface et d'une couche « plongeante » du sous-sol à partir de 5 profils acquis pendant la campagne de mesures sur l'Etna (extrait de Ciarletti et al., 2012). 199
Figure 6.3-2 : Gauche : radargramme des profils acquis sous forme de grille au Dachstein sur le site D (mis bout à bout). Les profils sont séparés par les pointillés rouges. Droite : reconstitution en 3D de la couche identifiée sur les radargrammes. En bleu clair, le haut de la couche, en bleu foncé, le bas de la couche. 199
Figure 6.3-3 : Zoom sur la couche identifiée lors du sondage sous forme de grille (3ème profil) sur le site D. Les signatures en haut et en bas de la couche ont des signes inversés, témoignant du passage vers un milieu plus réfringent en haut et moins réfringent en bas. 200
Figure 6.3-4 : Radargrammes acquis sur le site B à Dachstein, en copolarisation (gauche) et crosspolarisation (droite). On note l'apparition d'une couche inclinée en crosspolarisation, invisible sur le radargramme de gauche..... 200
Figure 6.3-5 : Illustration de l'intérêt de pouvoir suivre des couches du sous-sol jusqu'à des affleurements potentiels. 201
Figure 6.3-6 : Reconstitution 3D du socle rocheux identifié sur le site B, basée sur la méthode décrite en 6.1 202
Figure 6.3-7 : Radargramme acquis sur la diagonale de la grille (voir Figure 6.2-1) sur le site B à Dachstein. 202

Introduction

La vie existe-t-elle ou a-t-elle existé ailleurs dans l'Univers ? Cette question a motivé depuis l'Antiquité l'observation des corps célestes et a alimenté l'imaginaire débordant des auteurs de science-fiction, mais ce n'est qu'au cours de ces dernières décennies que des progrès notables ont été réalisés dans ce domaine, nous livrant des éléments de réponse, notamment avec la naissance de la discipline que l'on appelle l'exobiologie et grâce au développement des techniques qui nous permettent d'aller visiter et d'étudier de près les corps de notre système solaire. Parmi ceux-ci, Mars reste une planète au grand potentiel, observée depuis longtemps, avant même l'apparition des instruments astronomiques et activement visitée depuis les années 70 avec la mise en place d'orbiteurs et de rovers arpentant sa surface comme Spirit et Opportunity, ou plus récemment Curiosity. Ainsi, l'étude de la planète rouge et la compréhension de son histoire nous a progressivement amené à nous intéresser de plus en plus à son sous-sol : c'est là que des traces potentielles de vie seraient susceptibles d'avoir été préservées, dans la mesure où celle-ci serait un jour apparue. La technique radar peut intervenir avec pertinence dans ce contexte, puisque son principe est basé sur l'utilisation des ondes radio pour caractériser des phénomènes divers comme la pluie, estimer la vitesse ou la distance d'objets tels que des voitures (nos si populaires radars disséminés sur les routes de France!) mais aussi sonder les sous-sols planétaires, à l'instar de MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding), envoyé à bord de la sonde Mars Express en 2005 et SHARAD (SHAllow RADar) à bord de Mars Global Orbiter (2007), tous deux dédiés au sondage du sous-sol de la planète Mars sur de grandes profondeurs. Ces instruments ont notamment permis de révéler l'étendue et la profondeur des calottes polaires de la planète et d'en estimer le volume d'eau. Ils ont cependant été moins efficaces à faibles latitudes.

Les radars à pénétration de sol ou GPRs (Ground Penetrating Radars) sont spécifiquement conçus pour l'auscultation du sous-sol et fonctionnent sur des gammes de fréquences de quelques MHz à quelques GHz, selon les objectifs de résolution verticale et de profondeur à atteindre. WISDOM, pour « Water Ice Subsurface Deposits Observation on Mars » est un GPR conçu pour faire partie de la mission ExoMars 2018. Il prendra ainsi la suite de MARSIS et SHARAD pour sonder le sous-sol martien, mais cette fois à bord d'un rover qui partira en quête de traces de vie, qu'elle soit passée ou présente. La mission se focalisera sur le proche sous-sol (2-3 m) de la planète rouge, avec pour objectif de caractériser l'environnement en termes de contenu en eau et de géochimie en fonction de la profondeur. WISDOM s'inscrira dans cette mission en apportant un appui stratégique pour la compréhension du contexte géologique de la zone d'atterrissage du rover, en termes de structure, figures de dépôts, de stratigraphie ou de localisation d'objets enfouis. Il sera également déterminant pour guider la foreuse (qui pourra effectuer des forages jusqu'à 2m de profondeur) vers des sites présentant un intérêt exobiologique. Conçu au Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS) en partenariat avec le Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux et l'Université Technologique de Dresden (TUD) en Allemagne, WISDOM fonctionne sur une large bande de fréquences, de 0,5 GHz à 3 GHz, autorisant le

sondage des sous-sols sur quelques mètres de profondeur avec une résolution verticale de quelques centimètres. Les capacités de cet instrument sont nombreuses et tout l'enjeu de ce travail de thèse est d'en tirer parti autant que possible pour fournir une interprétation fine des environnements sondés.

Ce manuscrit est divisé en six Chapitres. Dans le premier, nous aborderons la nouvelle discipline en plein essor que représente l'exobiologie, qui s'intéresse à l'étude de la vie, de ses conditions d'apparition et de sa distribution dans l'Univers, et qui nécessite une approche pluridisciplinaire faisant appel aux domaines de la biologie, de la chimie, de la climatologie, de la géologie ou de la géophysique. Nous nous intéresserons ensuite plus particulièrement à Mars et à la mission ExoMars 2018, dont l'objectif principal est de détecter des traces potentielles d'une activité biologique, en se focalisant sur le proche sous-sol. Après quelques généralités sur les propriétés électromagnétiques des milieux naturels et la propagation des ondes dans le deuxième Chapitre, nous introduirons les bases de la technique GPR et illustrerons les possibilités qu'elle offre à travers les exemples de MARSIS et SHARAD, pour passer ensuite au GPR WISDOM, dont nous décrirons d'abord le principe et les caractéristiques dans le Chapitre 3, pour ensuite illustrer ses performances dans des environnements divers. Le quatrième Chapitre est dédié aux deux techniques de modélisation que nous avons choisies pour l'aide au développement des outils de traitement et d'interprétation des données de l'instrument. Enfin, nous expliquerons les méthodes directes d'interprétation des données du GPR WISDOM que nous avons développées au cours de cette thèse et qui tentent de tirer parti des nombreuses possibilités techniques qu'offre l'instrument, pour une analyse à la fois quantitative et géométrique des données. Ces explications seront ponctuées d'illustrations issues de la modélisation de l'instrument en interaction avec divers types de sous-sols ou de l'analyse des données provenant du prototype de WISDOM, que nous avons pu tester dans de nombreux cas de figures, en environnements contrôlés pour tester nos méthodes et vérifier le comportement nominal de l'instrument mais aussi dans le cadre de campagnes de mesure dans des contextes géologiques divers.

Ces trois années de thèse ont été effectués au sein du LATMOS (Unité Mixte de Recherche 8190) et de l'Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines (UVSQ), initialement avec l'ED 539 (baptisée STV pour Sciences et Technologie de l'Université de Versailles), et plus récemment au sein de l'ED Astronomie et Astrophysique d'Ile de France (ED 127) de l'Université Paris-Saclay. Elles ont été financées par le Ministère de la Recherche grâce à une bourse ministérielle. Ce travail est en outre issu de collaborations avec de nombreux instituts et laboratoires français, parmi lesquels le Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux (LAB, UMR 5804), l'XLim à Limoges et le laboratoire GEOPS (GEOsciences Paris Sud) à Orsay, mais aussi étrangers, avec le TUD (Teschnische Universität Dresden) en Allemagne et le LPI (Lunar and Planetary Institute) à Houston, Texas, Etats-Unis. Le développement de l'instrument, les campagnes de mesures et les déplacements ont bénéficié de crédits provenant du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) et de son équivalent allemand le DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt).

Et sans plus de détours, plongeons directement au cœur de l'exploration spatiale appliquée à l'exobiologie.

Chapitre 1 : L'exobiologie et Mars, ExoMars

Sommaire :

Introduction

1.1 Introduction à l'exobiologie 2

1.1.1 L'exobiologie, des origines à la discipline scientifique 2

1.1.2 De la Terre vers les autres corps du Système solaire 4

1.2 La trilogie martienne : l'Homme et Mars 10

1.2.1 Mars la verte 10

1.2.2 Mars la rouge 11

1.2.3 Mars la bleue 11

1.3 L'eau, Mars et la vie 14

1.3.1 Tour d'horizon 14

1.3.2 Le potentiel exobiologique de Mars 20

1.4 Un exemple de mission spatiale exobiologique : ExoMars 24

1.4.1 Présentation et objectifs 25

1.4.2 Les terrains potentiels d'atterrissage 27

1.4.3 Autres missions et perspectives sur Mars 28

Conclusion

Références

Introduction

L'exobiologie, qui a pour objet l'étude de la vie et de sa distribution dans l'Univers, est une discipline scientifique en plein essor, relativement jeune. Les missions spatiales récentes et à venir, à destination des différents corps du Système solaire, comportent ainsi une forte composante exobiologique et nécessitent de ce fait une approche pluridisciplinaire et une instrumentation de pointe afin de caractériser les environnements étudiés en termes d'habitabilité. Mars est de ce point de vue un objectif très populaire, puisqu'il est possible que dans son passé, cette planète ait réuni les éléments propices à l'émergence et au maintien de la vie telle que nous la connaissons.

Dans ce chapitre, nous nous proposons, après une brève introduction à l'exobiologie, de relater l'histoire de l'exploration martienne et de dresser la liste des principales caractéristiques de la planète pour tenter ensuite de reconstruire son histoire d'un point de vue hydrogéologique et exobiologique. Nous conclurons sur l'exemple d'ExoMars, dont l'objectif principal est de détecter des traces éventuelles d'une forme de vie, et pour laquelle le radar à pénétration de sol WISDOM, qui fera l'objet de cette thèse, a été sélectionné.

1.1 Introduction à l'exobiologie

1.1.1 L'exobiologie, des origines à la discipline scientifique

1.1.1.1 Une vieille histoire

L'imaginaire collectif foisonne d'idées depuis l'Antiquité sur les autres formes de vie possibles dans l'Univers et les mondes qui les abriteraient. Cette thématique est longtemps restée dans le domaine de la littérature, qu'elle soit philosophique ou de science-fiction. En 1543, Nicolas Copernic publie « De Revolutionibus Orbium Caelestium », où il prétend que la Terre n'est pas au centre de l'Univers, mais qu'elle orbite autour de notre Soleil comme les autres planètes. Même si le concept de pluralité (c'est à dire d'existence d'autres mondes habités) n'y apparaît pas explicitement, cet ouvrage fut le précurseur de nombreuses interrogations auxquelles les savants tenteront de trouver des explications, comme par exemple le tristement célèbre Giordano Bruno. En 1600, ce philosophe italien, accusé d'athéisme et d'hérésie, fût brûlé vif pour avoir avancé qu'il existe une multitude de Terres et de Soleils, faisant de notre planète un exemple de monde habité parmi une infinité d'autres. La théorie de la pluralité des mondes apparait, reprise ensuite par de nombreux astronomes avec le développement des instruments d'optique qui permettent des observations directes des corps présents dans notre Système solaire. L'imaginaire débordant et l'excitation combleront les blancs, comme nous le verrons pour le cas de Mars.

1.1.1.2 Une nouvelle discipline scientifique

C'est bien plus tard que l'étude de la vie deviendra un objet d'étude scientifique à part entière, notamment avec l'invention du mot « exobiologie » pendant le développement du programme Apollo de la NASA dans les années 1960. Les astronautes avaient pour objectif de récolter des échantillons de roches lunaires pour les ramener sur Terre. C'est alors que l'idée d'une contamination potentielle par des micro-organismes extraterrestres fait son apparition. En étudiant ce sujet, Joshua Lederberg, lauréat du prix Nobel de médecine en 1958, introduisit le mot « exobiologie » pour désigner la science qui s'intéresse à la vie extraterrestre. Il ne faudra que très peu de temps pour passer de cette notion de danger de contamination à l'excitation de pouvoir potentiellement détecter des traces de vie ailleurs dans l'Univers. Le programme Viking, à destination de Mars, sera lancé 5 ans plus tard par la NASA, avec l'objectif clairement affiché de détecter des traces de vie. Mais la fameuse question « sommes-nous seuls ? » n'a pas encore trouvé de réponse.

1.1.1.3 Une approche pluridisciplinaire

De façon générale, l'exobiologie (ou astrobiologie) a pour objet l'étude de la vie et de sa distribution dans l'Univers. Cet objectif extrêmement ambitieux nécessite de construire une stratégie scientifique globale pour rechercher (et peut-être trouver) des traces de vie au-delà de la Terre et pour mieux comprendre les mécanismes qui ont mené à son apparition sur notre planète. Cette thématique comprend donc également l'étude des conditions et des processus qui ont abouti à l'apparition de la vie, sur Terre ou ailleurs. Cette science est de ce fait nécessairement pluridisciplinaire, faisant appel aussi bien aux compétences de biologistes que celles de physiciens, astrophysiciens, chimistes, instrumentalistes, géologues, géophysiciens, ou climatologues. Depuis l'expérience de Miller (Miller, 1953), il est communément admis que l'eau, le carbone et une source d'énergie externe (les UV solaires par exemple) constitueraient les « briques » de la vie, les ingrédients nécessaires aux réactions physico-chimiques permettant de synthétiser des molécules organiques complexes à partir de gaz simples et abondants dans l'Univers, autorisant ensuite la complexification des molécules organiques jusqu'aux constituants de la vie (ce que l'on nomme la chimie prébiotique). L'étude de la distribution de l'eau et de la matière organique et de leur évolution dans le Système solaire est donc précieuse pour comprendre comment les « ingrédients » de la vie ont pu être réunis sur Terre et aboutir à la formation d'organismes vivants par évolution chimique. Ceci pourrait également aboutir à la mise en évidence de formes de vie extraterrestres passées ou présentes, comme visent à le faire de nombreuses missions spatiales à destination des corps de notre Système solaire. Il faut également souligner que la communauté scientifique est engagée dans les recherches liées aux exoplanètes, que ce soit pour leur détection ou pour l'étude de leurs atmosphères, que les télescopes seront à même de sonder dans un futur proche, sans oublier les programmes d'écoute comme SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence), qui sondent le ciel à la recherche de signaux extraterrestres. Les méthodes mises en œuvre pour mener à bien ces études sont essentiellement les mesures depuis des plateformes orbitales ou *in situ* (c'est-à-dire

à l'intérieur de l'environnement à sonder) à l'aide d'instruments embarqués dans des sondes spatiales, sans oublier la modélisation numérique et les simulations expérimentales.

1.1.2 De la Terre vers les autres corps du Système solaire

1.1.2.1 Une question terrestre avant tout

D'où vient la vie ? C'est cette simple question qui a donné naissance à l'étude de la vie et des conditions qui ont mené à son apparition sur Terre, et *de facto* à de nombreuses disciplines, qui commencent bien souvent par le préfixe « bio ». Les traces de l'époque de l'apparition de la vie sur Terre (que l'on estime entre 3,5 et 3,8 milliards d'années) sont malheureusement peu nombreuses, effacées par la forte activité tectonique et volcanique de notre planète, il est donc difficile de reconstruire un scénario complet de cette période. Plusieurs hypothèses sur ce que l'on nomme l'environnement primitif terrestre demeurent envisageables à ce jour, notamment au niveau de la date à partir de laquelle la vie a émergé, mais les grandes étapes sont néanmoins identifiées (Figure 1.1-1). Plusieurs études sur les terrains les plus anciens sur Terre, datés à environ 4,0 milliards d'années (certains zircons[1] ont été datés à 4,4 milliards d'années), montrent que de 200 millions à 500 millions d'années après la phase d'accrétion terrestre, la température avait suffisamment baissé pour autoriser une croûte continentale granitique stable, ainsi que la présence d'eau liquide en surface (Martin et al., 2006 ; Mojzsis et al., 2001). Plusieurs scénarios sont encore à l'étude quant à l'origine de l'eau sur Terre, les deux principaux étant :

- ✓ Les roches constituant la Terre auraient pu contenir des molécules d'eau. Lors de l'intense activité volcanique et météoritique, il y a 4,4 milliards d'années, les gaz contenus dans le magma se seraient échappés, formant l'atmosphère.
- ✓ Le bombardement incessant de comètes et de météorites, constituées de glaces et de roches, aurait apporté de l'eau sur la planète, qui se serait vaporisée dans l'atmosphère lors des impacts successifs.

Au cours du refroidissement de la planète, la condensation a ainsi mené à de grandes étendues d'eau liquide, qui auraient subsisté pendant des centaines de millions d'années.

À partir des ingrédients de base que sont l'eau, les molécules organiques et l'énergie, on estime qu'il faudrait quelques centaines de millions d'années de développement dans un environnement chaud, humide, favorisant les réactions chimiques organiques pour parvenir à une complexification progressive de molécules jusqu'à l'apparition d'organismes très simples (Konhauser et al., 2003).

[1] Les zircons sont les plus anciens témoins minéraux terrestres connus. Ils se forment pendant la genèse de roches issues du refroidissement magmatique

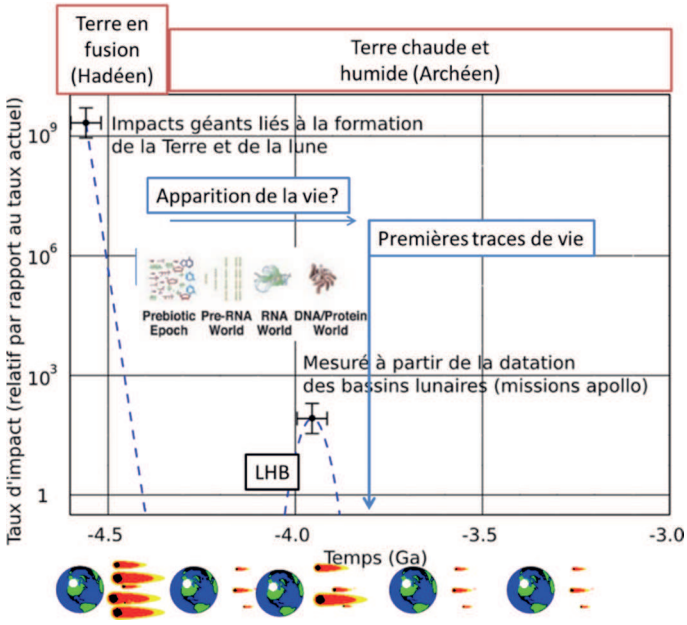


Figure 1.1-1 : Reconstruction de l'histoire de la Terre et de l'apparition de la vie. Figure modifiée à partir de (Bada, 2004)

Pour en savoir plus sur les chainons manquants de cette histoire, on tente de reconstruire en laboratoire les conditions de cette époque, comme avec l'expérience PAMPRE qui reproduit des atmosphères de différentes compositions (Carrasco et al., 2009 ; Gautier et al., 2011), ou avec des modélisations numériques dynamiques comme le modèle atmosphérique de Mars, qui nous a apporté des informations sur les mécanismes de transports atmosphériques liés au méthane ainsi que sur sa concentration dans l'atmosphère (Lefèvre and Forget, 2009). Ces méthodes sont complémentaires et permettent une démarche scientifique rigoureuse. Mais la reconstruction numérique ou en laboratoire des conditions de la Terre primitive ne sont pas les seules solutions pour la compréhension des phénomènes liés à l'émergence et au développement de la vie. En effet, si des environnements présentant les mêmes conditions et les mêmes composants que la Terre primitive ou la Terre ayant abouti à la diversification et au maintien de la vie pouvaient être trouvés et étudiés ailleurs dans notre Système solaire, nous comprendrions plus précisément les mécanismes qui ont abouti à la vie telle que nous la connaissons, remplissant les nombreux blancs dans la reconstruction de son histoire, sur Terre comme ailleurs dans l'Univers. A l'inverse, l'étude de tels objets habitables pourrait également mener à terme à une découverte historique : la présence d'une vie, même primitive, sur un autre corps que le nôtre, aurait des implications sociétales gigantesques, modifiant notre perception toute entière de l'Univers et de la place que nous y occupons. C'est ainsi que ces dernières décennies ont vu défiler de nombreuses missions dédiées à l'exobiologie sur les corps de notre Système solaire, au premier rang desquels Mars, mais aussi Titan et Encelade, notamment avec la mission Cassini-Huygens, et, à la une de l'actualité 2015, la comète 67P/Churyumov Gerasimenko prise en filature par la sonde Rosetta. Avant de nous focaliser sur le potentiel exobiologique de Mars, faisons donc un petit détour par ces corps du Système solaire actuellement au cœur de l'exploration spatiale en exobiologie.

1.1.2.2 Le Système solaire, un laboratoire grandeur nature

Titan et Encelade

Titan, découvert par l'astronome hollandais Christian Huygens en 1655, est la première lune observée autour de Saturne, dont les premières images rapprochées furent obtenues par la sonde Voyager 1 en 1980. Titan possède une atmosphère dense principalement composée d'azote (N_2) et de méthane (CH_4), avec des traces d'autres gaz comme des hydrocarbures, semblable à la composition de notre atmosphère primitive terrestre (Raulin, 2008, Trainer et al., 2006). La sonde Cassini Huygens a non seulement mis en évidence une photochimie complexe à l'origine de molécules organiques (type hydrocarbures) dans la haute atmosphère, mais a également révélé la surface grâce à l'atterrisseur Huygens et le RADAR à bord de l'orbiteur Cassini. Les images montrent un sol de nature sableuse recouvert de poussières et de galets gelés. Le SAR (Synthetic Aperture Radar) à bord de la sonde a quant à lui révélé la présence de vastes lacs, de chenaux de drainage et de systèmes fluviaux (Figure 1.1-2). L'atmosphère de la planète autorise en effet une pression et une température suffisantes (la température en surface est d'environ -180 degrés Celsius et la pression de 1,5 bar) pour que la planète abrite un cycle du méthane et de l'éthane, à l'instar du cycle de l'eau sur Terre.

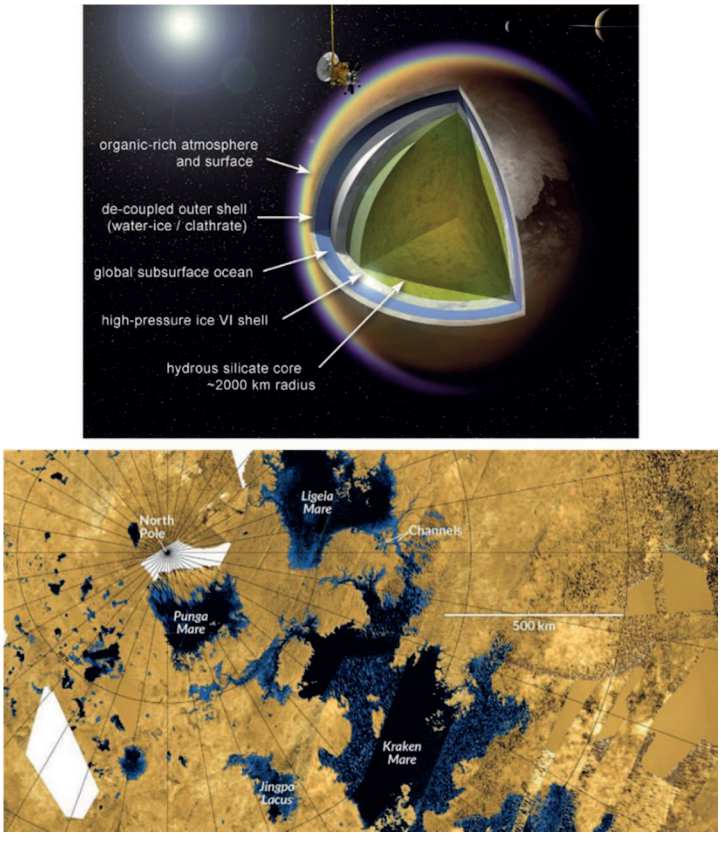


Figure 1.1-2 : En haut : conception d'artiste de la structure interne de Titan. En bas : mosaïque d'images radar à bord de la sonde Cassini révélant la surface de Titan et ses lacs de méthane. Source : JPL-Caltech/NASA, ASI, USGS

Encelade (Figure 1.1-3) est l'un des objets les plus intéressants de notre Système solaire d'un point de vue exobiologique. Ce petit satellite glacé de Saturne de 500 kilomètres de diamètre est l'un des objets les plus actifs étudiés à ce jour. Sa surface a d'abord été photographiée au passage de la sonde Voyager 1. On distingue alors une surface hétérogène, certaines zones étant couvertes de cratères d'impacts, et d'autres présentant une topographie très lisse, signe d'un renouvellement de matériau en surface, parsemée de figures de déformations causées par des mouvements tectoniques, notamment de nombreuses failles. En 2005, la sonde Cassini détecte des geysers en surface, localisés au pôle sud, laissant deviner une activité interne intense. La sonde est repassée près d'Encelade 18 fois après cette découverte, ayant piqué l'intérêt de la communauté des exobiologistes. Les images révèlent d'immenses failles et fractures où la température est plus élevées, baptisées « rayures de tigre », par où s'échappent des jets de vapeurs d'eau riche en matière organique, au fonctionnement comparable à nos dorsales océaniques terrestres qui s'écartent sous la remontée de matériau en profondeur alimentant ainsi la surface (rifts) (Spencer et al., 2013). Les variations dans la trajectoire de la sonde dues au champ gravitationnel de la lune et les données géophysiques recueillies confirment qu'il y aurait bien un océan salé d'environ 10 kilomètres d'épaisseur, abrité sous une couche de glace de 30 à 40 kilomètres d'épaisseur, alimentant ces fameux geysers et failles en eau sous pression enrichie en minéraux. Cet océan serait en contact direct avec le manteau rocheux silicaté, favorisant ainsi les échanges chimiques en phase liquide. Cette activité implique l'existence d'une ou plusieurs sources de chaleur qui alimenteraient les mouvements tectoniques et convectifs. Parmi les sources d'énergie potentielles on trouve les forces de marées dues à Saturne qui induisent des frictions en surface mais également à l'intérieur du satellite, et l'activité radioactive du noyau riche en fer (Hsu, 2015), cependant, le comportement du satellite et les sources d'énergie associées sont encore très mal comprises.

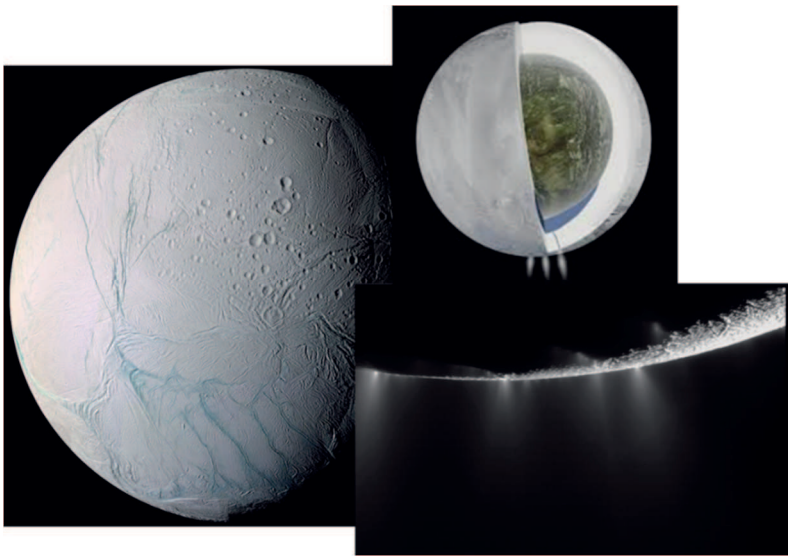


Figure 1.1-3 : A gauche : image en fausse couleur du côté opposé à Saturne lors du survol de Cassini en 2005. En haut à droite : vue d'artiste du modèle proposé pour la structure interne d'Encelade. En bas à droite : les geysers détectés au pôle sud par la sonde Cassini. Source : NASA/JPL/Space Science Institute

L'étude des comètes, miroirs de la période de formation de notre Système solaire

Les comètes sont considérées comme les archives les plus anciennes de notre Système solaire, et ont conservé les traces de la matière présente au moment de sa naissance il y a 4,5 milliards d'années. La composition de leur noyau et de leur coma peut révéler des indices sur les conditions de formation des planétésimaux, embryons de nos planètes et satellites. Les comètes sont composées d'un assemblage de glace et de roches. La plupart des données que nous possédons à l'heure actuelle proviennent d'observations effectuées par télédétection depuis la Terre. Les mesures ont mis en évidence, lors du passage de plusieurs comètes à proximité du Soleil, l'éjection en phase gazeuse de molécules d'eau, mais également de molécules contenant du carbone comme le méthane (Bockelée-Morvan et al., 2000, Cottin et al., 2008). Plusieurs expériences en laboratoire ont tenté de reproduire le comportement des molécules observées en présence de différentes sources d'énergie agissant sur les comètes. Ces expériences conduisent à la production de molécules bien plus complexes que celles observées à ce jour et laissent présager d'une grande complexité du noyau cométaire en termes de composition organique (Despois and Cottin, 2005). Comme évoqué précédemment, les simulations en laboratoire sont complémentaires des observations spatiales, et les missions viennent progressivement compléter nos connaissances.

La sonde Rosetta, lancée en 2004, a parcouru 450 millions de kilomètres jusqu'à atteindre son objectif en juin 2014, avec sa mise en orbite autour de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko (Figure 1.1-4). Les instruments à bord ont confirmé que le noyau de la comète est non seulement riche en matériaux organiques, mais que plusieurs de ces molécules sont effectivement des précurseurs de molécules importantes pour la vie comme les sucres et les acides aminés (Capaccioni et al., 2015). L'hypothèse de l'apport de ces molécules sur Terre par une ou plusieurs sources externes semble donc toujours d'actualité.

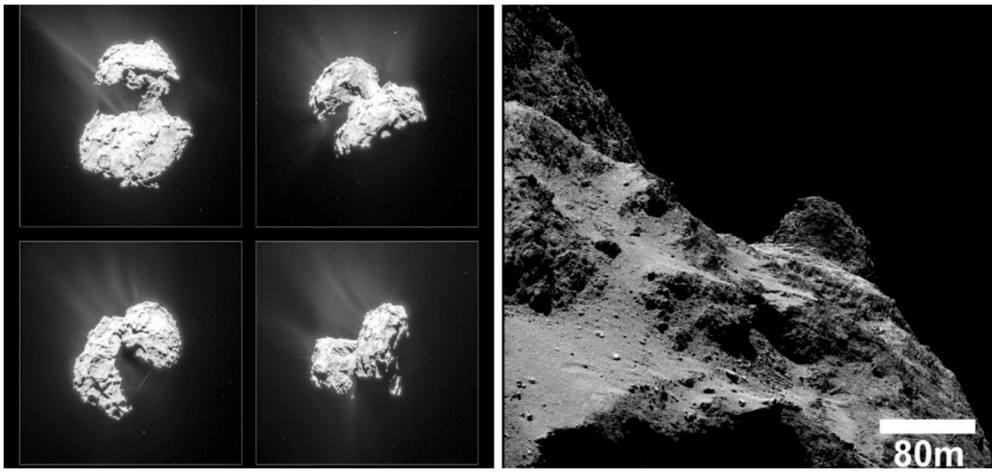


Figure 1.1-4 : À gauche : mosaïque de photographies prises par l'instrument NAVCAM sur la sonde Rosetta. On remarque le flux de particules qui s'échappent de la comète sous l'influence des rayons solaires. À droite : image de la caméra OSIRIS de la surface du petit lobe de la comète. On distingue une fine couche de poussières sur un matériau plus sombre et rugueux. Source : ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA

Europe et les autres satellites Joviens

Europe (Figure 1.1-5), après Ganymède, est le deuxième plus gros satellite Jovien. Il possède un diamètre de 3130 km (soit 90% de celui de la Lune) et se situe à une distance de 670 900 kilomètres de Jupiter, ce qui implique un fort effet de marée sur le satellite. Les sondes Pioneer 10 et Pioneer 11 ont atteint le système de Jupiter en 1973 et ont récolté les premières images des satellites, suivies de près par les sondes Voyager 1 et Voyager 2, qui, avec une meilleure résolution, révèlent l'une des surfaces les moins cratérisées du Système solaire en passant à proximité d'Europe, parsemée de craquelures. L'hypothèse d'une surface très jeune remaniée par les fortes marées, recouverte de glace d'eau et contenant un océan sous-terrain fait alors son apparition. Les résultats les plus impressionnants proviennent cependant de la sonde Galileo, qui a parcouru le système jovien depuis 1995 jusqu'en 2002, pour finir en 2003 avec une dernière descente dans l'atmosphère de Jupiter. On découvre alors que Ganymède est le seul satellite du Système solaire à posséder un champ magnétique interne, probablement engendré par sa différenciation et donc par la rotation de son noyau métallique, comme sur Terre. Sur Europe, on envisage la présence d'un volcanisme silicaté au fond de l'océan, qui pourrait constituer des cheminées hydrothermales (fumeurs noirs), analogues à celles que nous connaissons sur Terre et bien connues pour constituer des milieux propices aux réactions biochimiques complexes. Europe posséderait donc un noyau métallique, une surface composée essentiellement de glace d'eau d'une épaisseur variable de quelques kilomètres, recouvrant un océan d'eau salée d'une centaine de kilomètres de profondeur, en contact direct avec la roche sous-jacente (Sotin et al., 2002). Cet environnement semble ainsi particulièrement adapté aux échanges chimiques. Des remontées d'eau chargée de minéraux, poussant la croûte vers l'extérieur, seraient à l'origine des figures de craquelures teintées présentes sur toute la surface du satellite. Les structures internes de Ganymède (McCord et al., 2001) et Callisto (Zimmer et al., 2000), deux autres satellites Joviens, sont encore ouvertes à discussion, mais on suppose également la présence d'une couche d'eau liquide à l'intérieur de chacun de ces satellites. Cependant celles-ci seraient enfouies plus profondément et piégées entre deux couches de glace d'eau, comme sur Titan, ce qui limiterait fortement le potentiel de croissance organique.

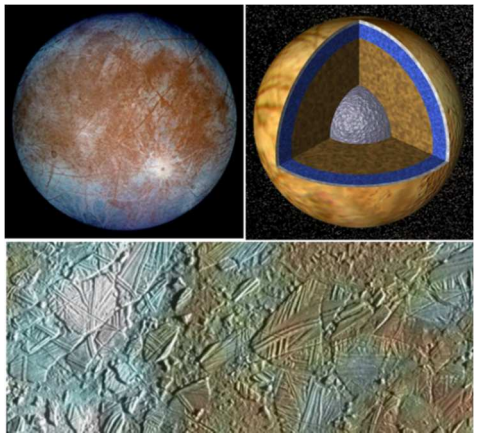


Figure 1.1-5 : En haut à gauche : image d'Europe prise par la sonde Galileo. En haut à droite : modèle de la structure interne d'Europe. En bas : exemple de figures trouvées sur la croûte glacée. La zone couvre une surface

de 70km par 30 km, les couleurs ont été rehaussées pour illustrer les différents dépôts dus aux impacts (zones blanches) et aux remontées d'eau, pure ou comportant des minéraux (zones plus sombres). Source : NASA/JPL

Chacun des corps du Système solaire étudiés en exobiologie se place donc à un niveau différent de notre effort de compréhension de l'origine de la vie sur la Terre, et de la possibilité qu'elle puisse aussi avoir vu le jour ailleurs dans l'Univers : les comètes en tant que sources exogènes des premières briques organiques, Titan en tant que système de production de composés organiques complexes, Encelade qui réunirait les ingrédients et conditions nécessaires à l'apparition de la vie, ou encore Europe qui recèle un océan d'eau liquide souterrain où les interactions entre eau liquide et roches seraient privilégiées. N'en oublions pas pour autant la seule planète du Système solaire à posséder un réel intérêt exobiologique : Mars.

1.2 La trilogie martienne : l'Homme et Mars

Mars a toujours été un objet de curiosité pour l'Homme, dès lors qu'il a levé les yeux vers le ciel. La planète est effectivement visible à l'œil nu (la distance au plus près de la Terre est de 55,758 millions de kilomètres soit 0,3727 u.a), ce qui permet de l'étudier sans recours aux instruments. Durant l'Antiquité, elle fut associée à Arès, dieu de la guerre grec, du fait de sa couleur rouge orangée sombre faisant penser au sang et au feu, pour prendre ensuite le nom de Mars, dieu équivalent dans la culture romaine. En 1600, Johannes Kepler découvre, en tentant de calculer l'orbite de Mars, que les mouvements décrits par les planètes sont des ellipses et non des cercles, résultat qu'il publiera en 1609 et que nous connaissons comme la première loi de Kepler. C'est Huygens, en 1659, qui pour la première fois observe une structure sur le disque de Mars, qui évolue avec le temps. L'engouement est rapide et la communauté des astronomes va commencer à apercevoir et représenter des mers et des continents à la surface de cette planète rouge.

1.2.1 Mars la verte

Durant la fin du XIXème siècle, les observations de la planète Mars, encore peu nombreuses et pratiquées avec des instruments peu performants, ont généré le mythe des canaux martiens, sous l'impulsion de l'astronome Italien Schiaparelli. En 1877, il crut voir et cartographia un réseau de très larges "canaux", qu'il jugea artificiels, sillonnant l'ensemble de la planète Mars (Figure 1.2-1). C'est ainsi que furent baptisées des régions comme Tharsis ou Hellas, noms qui font encore autorité aujourd'hui. L'idée d'une civilisation intelligente utilisant un système de canaux d'irrigation est renforcée par plusieurs observations semblables jusqu'au début du XXème siècle, notamment à travers les travaux de l'astronome Powell, fervent partisan de cette hypothèse, qui fit construire et dédia un observatoire astronomique à Mars. Ces thèmes sont repris dans la littérature et connaissent un succès phénoménal auprès du grand public, alimentant l'imaginaire collectif, et contribuant au mythe des petits

hommes verts. Jusqu'aux années 1960, les variations de la taille des calottes polaires et la présence de taches verdâtres sont prises pour des mers ou de la végétation qui varie au cours des saisons.

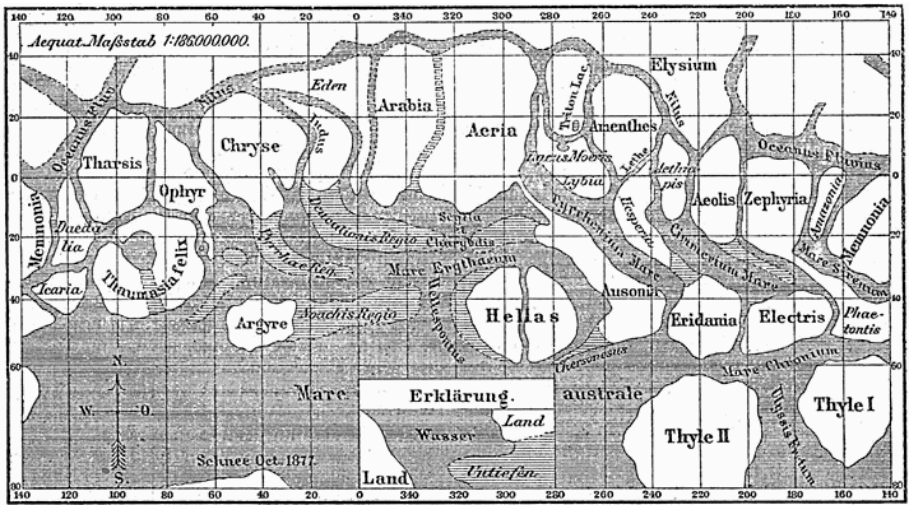


Figure 1.2-1: Carte réalisée par Schiaparelli en 1888. Les zones sombres représentent de grandes étendues desquelles partent des canaux en direction du Nord.

1.2.2 Mars la rouge

À partir du milieu du XXème siècle, les instruments d'observation deviennent plus performants, et, avec le développement de la technologie, l'exploration spatiale débute. Mars devient l'un des enjeux de la course à l'espace entre les États-Unis et l'Union soviétique, dans un contexte de Guerre froide. S'en suit un nombre faramineux de missions (plus d'une trentaine) vers la planète, qui subissent cependant de nombreux échecs, notamment côté Russe où l'on ne dénombre pas moins de sept missions avortées (Mars 1 jusqu'à Mars 7) ou aux résultats très mitigés. Il faut attendre 1967 pour que la sonde américaine Mariner 4 réussisse le premier survol de la planète. Les premières images à très faible résolution de la surface révèlent une Mars aride, sans eau ni végétation, et surtout sans aucune trace de ces fameux chenaux pourtant si populaires. Une énorme déception. En 1971, l'orbiteur Mariner 9 dévoile un paysage plus varié constitué de volcans, de canyons, et de lits de rivières asséchés. Les missions Viking 1 et Viking 2, à partir de 1975, viennent enrichir de 50000 clichés notre connaissance de la surface. Les atterrisseurs y cherchent d'éventuels indices de vie, mais aucune trace d'activité biologique n'y sera détectée. Pire encore, les conditions pour l'apparition et la préservation de la vie sont catastrophiques : l'absence d'eau, l'irradiation permanente des UV et un sol très oxydant interdisent la formation de chaînes carbonées complexes. Mars est rouge, Mars est stérile, et l'intérêt de l'Homme pour cette planète si peu accueillante diminue.

1.2.3 Mars la bleue

En 1996, c'est la découverte controversée de «bactéries» fossiles d'origine martienne dans la météorite SNC (Shergotty, Nakhla, Chassigny) ALH84001 (McKay et al., 1996) qui relance l'hypothèse d'un développement prébiotique éventuel et renouvelle l'intérêt pour la planète Mars, notamment à travers la

question de l'eau. L'aventure Pathfinder en 1997 (Golombek et al., 1997), dont le but est de faire atterrir un rover à la surface, redonne un véritable élan à l'exploration spatiale martienne. Les missions se succèdent, avec l'arrivée en 1999 de la sonde Mars Global Surveyor (MGS), qui cartographie la surface dans sa quasi-totalité, pendant près de 8 ans. La topographie est mesurée à l'aide de l'instrument MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter), révélant de nouvelles morphologies d'écoulements récents (Smith et al., 1999). Il faudra attendre l'arrivée de l'orbiteur Mars Odyssey et les mesures prises par son spectromètre gamma pour confirmer la présence de glace d'eau dans le pergélisol (sol gelé) martien. En 2003, la mission Mars Explorer Rover conçue par la NASA prévoyant l'atterrissage des rovers Spirit et Opportunity, dont le but est de détecter des minéraux associés à une activité hydrologique, est un véritable succès. Ces rovers, conçus pour fonctionner 3 mois, sont en réalité de véritables marathoniens : Spirit prend des mesures pendant six ans et Opportunity, quant à lui, n'en a toujours pas fini avec la planète. Les données récoltée des deux véhicules confirment que l'eau a bien coulé à la surface de Mars, pendant des périodes relativement longues. L'arrivée en 2004 de la sonde Mars Express, la première mission européenne à destination de la planète rouge, a pour mission de recueillir des données sur la surface, l'atmosphère, l'ionosphère et le sous-sol. La sonde comprend un orbiteur et un petit atterrisseur, Beagle 2, chargé de se poser sur la surface et de déceler d'éventuelles traces de vie. Le radar MARSIS (Picardi et al., 2004), qui sonde pour la première fois le sous-sol, confirme la nature des calottes polaires et l'estimation du volume d'eau disponible. Le spectromètre imageur OMEGA (Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité) confirme quant à lui la présence de minéraux hydratés témoignant par le passé d'une activité aqueuse en surface (Bibring et al., 2005 ; Bibring et al., 2006). L'instrument HRSC (High Resolution Stereo Colour Imager) (Jaumann et al., 2007) prend des clichés de qualité sans précédent. En mars 2006, c'est au tour de Mars Reconnaissance Orbiter de se mettre en orbite autour de la planète Mars, avec la caméra HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) à son bord qui livre alors des images d'une résolution jamais égalée jusqu'alors, de 20 cm à 30 cm par pixel (McEwen et al., 2007). La sonde Phoenix atterrit en 2008, et son bras motorisé, après avoir gratté la fine couche de poussières, entre en contact direct avec la glace d'eau sur Mars.

En 2011, c'est l'ambitieux projet Mars Science Laboratory (Grotzinger et al., 2012) qui relance formellement la recherche de traces de vie, encouragée par les découvertes précédentes de la présence d'eau et l'habitabilité potentielle de la planète dans son passé. Le rover Curiosity atterrit à la surface de Mars en août 2012, à proximité du cratère Gale, choisi pour sa position stratégique à la transition entre les hémisphères Nord et Sud, qui présentent une forte dichotomie topographique, et son âge que l'on estime à 3,6 milliards d'années, coïncidant avec l'hypothèse d'une Mars bleue durant ses premiers temps géologiques. Cet âge est cependant très discuté, certains scientifiques estimant que l'eau avait déjà disparu en surface à cette période (Carter et al., 2010). Curiosity est un véritable laboratoire d'analyse sur roues, cinq fois plus lourd que les Mars Exploration Rovers, équipé de caméras, spectromètres, détecteurs de radiations et de capteurs atmosphériques. Des résultats très intéressants en

termes d'habitabilité ponctuent le trajet de Curiosity vers Gale, notamment avec la découverte de ce qu'on suppose être un ancien lit de rivière, parsemé de galets arrondis et donc érodés par un cours d'eau, de caractéristiques très similaires à nos galets de fonds de rivières sur Terre. Il détecte également des traces de méthane dans l'atmosphère, et les analyses révèlent une chimie et un environnement plutôt favorables d'un point de vue exobiologique. Enfin, deux orbiteurs arrivent autour de Mars en septembre 2014, MAVEN (Jakosky, 2008) et Mars Orbiter Mission (le premier orbiteur indien à destination de la planète rouge, Seetha and Satheesh, 2015), tous deux ayant pour mission de reconstituer l'évolution de l'atmosphère martienne.

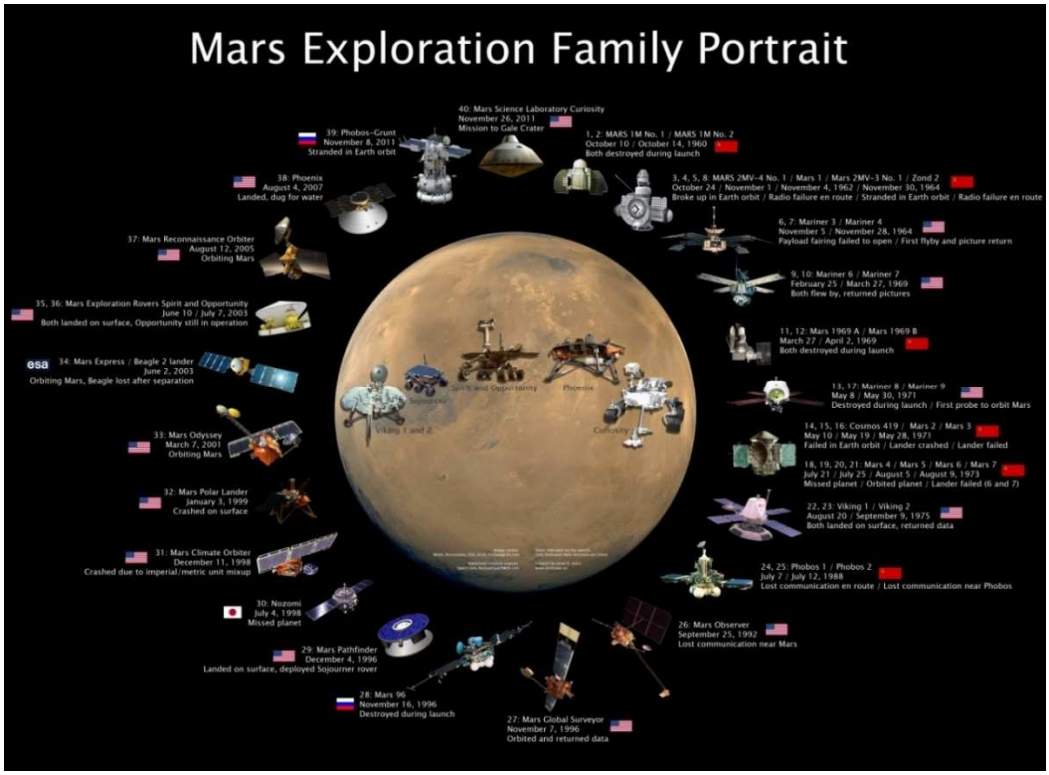


Figure 1.2-2 : Résumé de l'exploration spatiale de Mars. Source : Jason Davis / astrosaur.us

Toutes ces missions successives et les nombreux résultats convergents ont finalement abouti à l'hypothèse d'une ancienne Mars chaude, humide, ayant abrité des rivières, des lacs et des océans en surface pendant une période non négligeable de son histoire : une Mars bleue à ses débuts.

Après ce bref survol de l'histoire de l'exploration martienne par l'Homme, intéressons-nous plus précisément à l'histoire de l'eau sur Mars et à son habitabilité potentielle, qui aujourd'hui encore suscite de nombreux débats.

1.3 L'eau, Mars et la vie

1.3.1 Tour d'horizon

Avant d'aborder la question de l'eau et de sa distribution au cours du temps sur la planète rouge, faisons un petit tour d'horizon des paysages et conditions rencontrés sur Mars.

Topographie

Mars présente une forte dissymétrie entre les hémisphères Nord et Sud, comme l'illustre très bien la carte topographique effectuée par le laser altimètre MOLA (Figure 1.3-1). On parle de dichotomie crustale Nord/Sud. Un brusque changement d'altitude sépare les deux régions, avec des paysages montagneux et très cratérisés au Sud, et des plaines au Nord. La surface martienne est dans sa quasi-totalité recouverte de poussières oxydées, régulièrement transportées dans l'atmosphère à l'occasion de vents violents puis redéposées sur de nouveaux terrains.

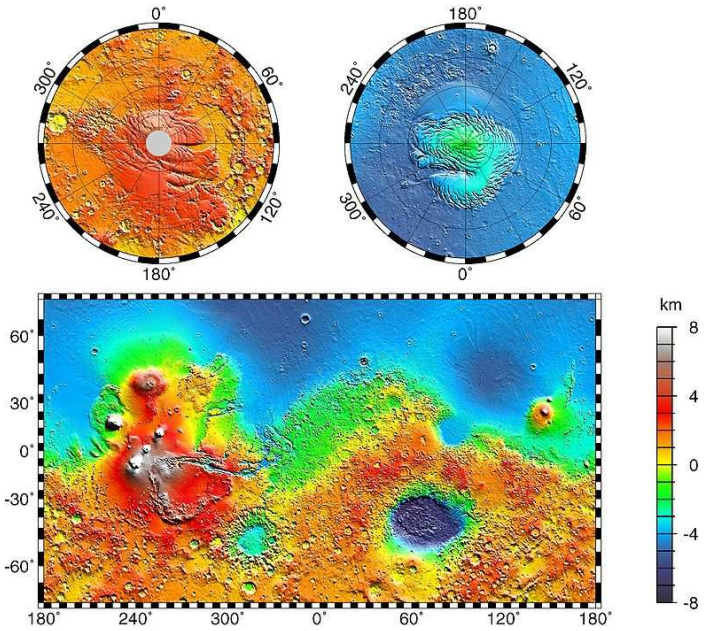


Figure 1.3-1 : Carte topographique de la planète Mars obtenue grâce à l'altimètre laser MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) à bord de la sonde Mars Global Surveyor (source : NASA/JPL). En haut : les deux pôles. En bas, le planisphère.

La topographie générale martienne présente des analogies avec la Lune, comme ses cratères et ses bassins d'impact, mais également une grande variété de structures géologiques, témoignant des processus hydrologiques, volcaniques, tectoniques et éoliens que la planète a pu subir dans son passé. Ainsi, des volcans, des rifts, des vallées, des champs de dunes ou encore des calottes polaires ont été photographiés sur toute la planète. Nous nous proposons ici de répertorier quelques exemples notables de ces structures.

Datation des terrains

La datation des terrains, basée sur la méthode de stratigraphie relative selon laquelle l'âge d'une surface est une fonction de la densité de cratères d'impacts météoritiques, permet de replacer dans le temps les différentes structures identifiées, reconstruisant petit à petit l'histoire de la planète. Les surfaces fortement cratérisées sont considérées comme les plus anciennes. Cette estimation repose sur l'analyse conjointe des cratères lunaires et de la datation des échantillons ramenés sur terre par les astronautes lors des missions Apollo. Un modèle théorique de l'évolution du nombre et des types d'impacts en fonction du temps autorise la datation absolue des terrains. Elle est cependant très approximative et les barres d'erreurs sont importantes, notamment pour les zones les plus jeunes. On distingue communément 3 grandes périodes géologiques pour la planète Mars : le Noachien (de 4,5 milliards à 3,7 milliards d'années environ), l'Hespérien (de 3,7 milliards à 3 ou 2,2 milliards d'années selon les échelles), et l'Amazonien qui perdure encore aujourd'hui. Les terrains les plus vieux se trouvent dans l'hémisphère Sud, alors que les terrains témoignant de la période Amazonienne se trouvent au Nord. Cette échelle est néanmoins très approximative, et les dates varient considérablement selon les scénarii.

Sites remarquables (Figure 1.3-2)

Comme l'illustre la carte topographique de MOLA (Figure 1.3-1), certains sites sur Mars sont facilement remarquables, comme le dôme Tharsis, un gigantesque soulèvement volcanique d'environ huit kilomètres de haut et de 4000 kilomètres de diamètre. Cette région abrite les plus hauts volcans de la planète, avec en première place Olympus Mons (18,4° N, 226° E), d'environ 22 kilomètres de haut et 500 kilomètres de largeur. Ces gigantesques structures, introuvables sur Terre, sont le résultat d'une absence de tectonique des plaques et d'une gravité réduite : les points chauds restent fixes et peuvent alimenter pendant des durées très longues une même cheminée volcanique, ajoutant de la matière au fur et à mesure des éruptions. La faible gravité limite les effondrements et autorise l'ajout progressif de matière, de plus en plus haut. Olympus Mons date d'environ 3.8 milliards d'années (Noachien), cependant des coulées de lave beaucoup plus récentes (2 à 10 millions d'années) ont été identifiées. Un peu plus à l'Est se trouve un système de canyons gigantesque, baptisé Valles Marineris (13°S, 300°E), d'environ 4000 kilomètres de long. On suppose qu'à la suite de la déformation du dôme Tharsis, la croûte aurait commencé à craquer aux alentours, formant ainsi de nombreuses failles à sa périphérie. Sous une telle pression, la croûte se serait fendue et aurait donné naissance à Valles Marineris qui est visible à l'œil nu, telle une énorme cicatrice sur la surface martienne.

On peut également citer le cratère d'impact Gale, de 155 kilomètres de diamètre, situé à la limite géologique matérialisant la dichotomie crustale martienne (5°S, 138°E). Ce cratère a été retenu par la NASA en 2011 pour constituer le site d'atterrissage du rover Curiosity de la mission Mars Science Laboratory. Ce site, daté entre 3,8 à 3,5 milliards d'années (Noachien), aurait été formé en présence de grandes quantités d'eau liquide comme le suggèrent les nombreuses détections de sulfates et d'argiles

dans les parties les plus basses du pic central (nommé le Mont Sharp). Les cratères constituent de bons témoins géologiques, leur structure étant représentative des différentes périodes martiennes. En effet, lors d'un impact météoritique, les matériaux enfouis (et donc plus âgés) se retrouvent dispersés autour du pic central, les couches les plus anciennes se situant à sa base. On peut ainsi révéler des terrains datant de plus de 3,8 milliards d'années, avant le bombardement tardif. Les premières images du Mont Sharp prises avec le rover Curiosity ont révélé des structures de dépôts sédimentaires, familières sur Terre.

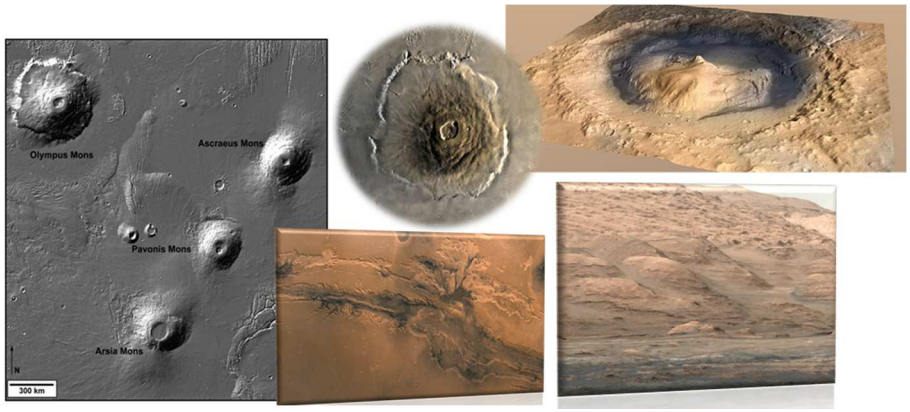


Figure 1.3-2 : Panel de sites remarquables sur Mars. À gauche : La région de Tharsis Mons, avec ses volcans. Au milieu, en haut : Olympus Mons, le volcan le plus haut du Système solaire. Au milieu, en bas : Valles Marineris avec son réseau immense de canyons. En haut à droite : le cratère Gale. En bas à droite : superposition de dépôts sédimentaires au pied du cratère Gale. Credits : NASA/JPL-Caltech/ESA/DLR/FU Berlin/MSSS

Morphologies d'écoulement (Figure 1.3-3)

Nous avons déjà évoqué les nombreux indices qui ont confirmé que l'eau liquide a coulé à la surface de Mars, en abondance. Parmi ces indices, on trouve des morphologies typiques d'écoulement, comme les réseaux paléo-hydrographiques (valley networks), qui sont les témoins du passage de l'eau qui a creusé la roche, sous formes de méandres rejoignant une rivière principale ou de réseaux de rivières (Figure 1.3-3), très similaires à nos réseaux hydrographiques terrestres. On peut également rencontrer des chenaux inversés (inverted channels), qui, cimentés par le passage de l'eau, sont devenus plus résistants à l'érosion, laissant les terrains environnants disparaître autour d'eux tandis que leur structure en forme de tunnel a persisté. On observe principalement ces morphologies dans les anciens terrains cratérisés de l'hémisphère Sud, ce qui suggère une activité fluviatile de longue durée pendant la période Noachienne (Baker et al., 1991).

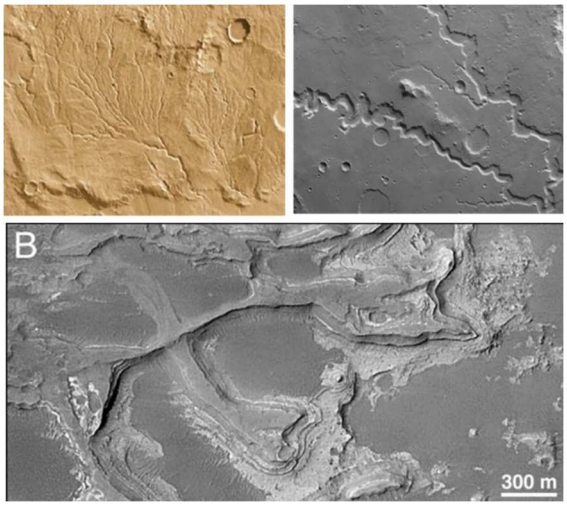


Figure 1.3-3 : En haut à gauche : Un réseau complexe de vallées (42°S, 92°W), vu par l'orbiteur Viking. Source NASA/JPL. En haut à droite : Le système de vallées Nanedi Valles (6.0°N 312°E) pris avec l'instrument HRSC (Mars Express). Le réseau s'étend sur environ 800 km. Source : ESA/DLR/FU Berlin. En bas : images de la sonde Mars Global Surveyor montrant des chenaux inversés dans le delta d'Eberswalde. Source : (Malin and Edgett., 2003).

D'autres morphologies d'écoulement, plus récentes, ont également été identifiées (Figure 1.3-4). Celles-ci sont présentes sous des formes de profondes vallées de débâcle (outflow channels), très larges (plus de 100 km pour la plupart) et très longues (jusqu'à 2000 km). Ces morphologies sont attribuées, comme sur Terre, à des évènements catastrophiques. On en trouve notamment suite à la libération brutale de grandes quantités d'eau souterraine, parfois présente sous forme de glace, qui provoque des écoulements torrentiels extrêmement violents (Baker et al., 1992, Baker, 2001) après remontée à la surface. Ces vallées de débâcle sont principalement localisées dans les plaines du Nord, et sont assimilées à la période Hespérienne, voire Amazonienne. Les remontées d'eau ou de glace auraient pu être provoquées par le volcanisme ou une activité tectonique, précipitant ainsi l'eau vers les dépressions du Nord (Carr, 2007). Toutes ces morphologies sont les témoins d'écoulements de surface, cependant leurs origines sont encore largement débattues.

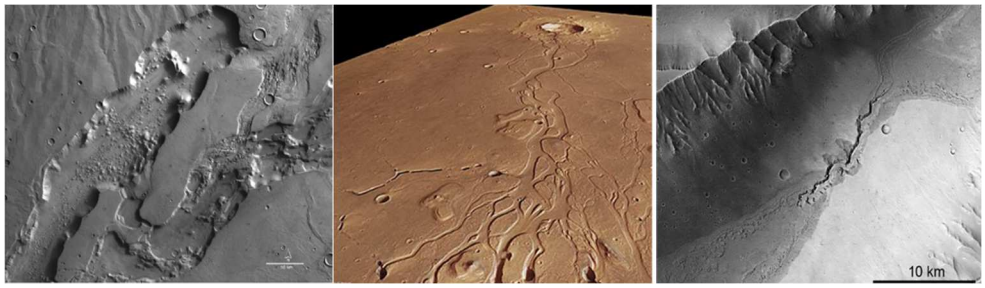


Figure 1.3-4 : Images de l'instrument HRSC. À gauche : vallées de débâcle de Dao et Niger (40°S 270°W). Leur largeur est d'environ 40 km et elles peuvent atteindre 2 km de profondeur de 2400m (source : ESA/DLR/FU). Au milieu : Vue en perspective d'Hephaestus Fossae, sa source serait un impact ayant provoqué la remontée de glace en profondeur, débouchant sur une vallée de débâcle en contexte de pente douce. Source : DLR. À droite : Kasei Valles, l'une des plus grandes vallées de débâcle sur Mars. Source : ESA/DLR.

Les ravines (linear gullies)

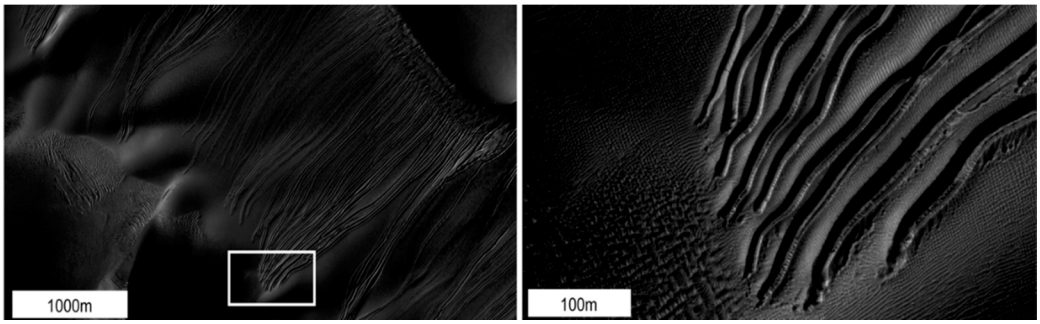


Figure 1.3-5 : Images de la caméra HIRISE (MRO) montrant un exemple de linear gullies le long des pentes du cratère Russell (54°S 13°E). Ceux-ci peuvent atteindre 2 km de longueur. Source: NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona

Les linear gullies (Figure 1.3-5) sont caractérisés par une largeur relativement constante et une forme de V bien reconnaissable. Certains dateraient « seulement » de quelques millions d'années. Cette morphologie a longtemps été considérée comme une preuve d'écoulements d'eau liquide sur Mars, cependant plusieurs phénomènes peuvent en être à l'origine, comme la descente progressive de blocs de glace de CO_2 (Diniega et al., 2013) lors de leur sublimation. Déstabilisés, les blocs se mettraient alors à rouler ou à glisser le long de la pente, s'arrêtant par frottements, puis se sublimeraient dans l'atmosphère. Les dernières analyses (Ojha et al., 2015) tendent cependant à prouver qu'il s'agiraient bien d'écoulements de saumure (eau liquide très concentrée en sels).

Dans la partie Nord de la planète à de hautes latitudes, des structures assez exotiques de lacs gelés pérennes occupant les dépressions des cratères ont également pu être observées.

L'atmosphère

L'atmosphère martienne est environ 170 fois plus ténue que sur Terre, avec une pression au sol de 600 Pa en moyenne. Elle est majoritairement composée de de dioxyde de carbone (95 %), de diazote (3 %) et d'argon (1,6 %), et contient des traces de dioxygène, de monoxyde de carbone, d'eau et de méthane (Formisano et al., 2004, Mumma et al., 2009), ce qui peut être intéressant d'un point de vue exobiologique. Les mesures de méthane effectuées par le rover Curiosity montrent qu'une source encore inconnue de méthane serait présente sur Mars (Meyer and Vasavada, 2015). La formation du méthane sur Terre est étroitement liée à l'activité biologique, mais il ne s'agit pas d'une preuve de présence de vie étant donné qu'il peut aussi se former de manière abiotique. Les sondes MAVEN et Mars Orbiter Mission ont pour but d'apporter de nouveaux éclairages quant aux variations spatio-temporelles du méthane dans l'atmosphère martienne, contraignant ainsi ses origines (Yung and Chen, 2015). On peut également noter la présence de nuages composés de glace d'eau et de cristaux de glace de CO_2 (Listowski, 2013).

Le champ magnétique

Mars ne possède pas de champ magnétique, cependant il n'en a pas toujours été ainsi puisque les résultats de la sonde Mars Global Surveyor montrent que sur les terrains âgés de plus de 3 milliards d'années, il existe un magnétisme rémanent dans la croûte martienne (Acuna et al., 1999). Ceci est confirmé par des mesures sur des météorites martiennes (Weiss et al., 2002). À ses débuts, Mars possédait donc un champ magnétique, qui s'est cependant arrêté très tôt, contrairement à la Terre.

Les calottes polaires

Les calottes polaires constituent les plus grands réservoirs d'eau connus sur la planète. Elles varient au cours des saisons, rétrécissant en été et se couvrant de dépôts givrés en hiver. C'est grâce aux observations du spectromètre gamma à bord de la sonde Mars Odyssey que l'on a déterminé la nature de cette glace présente en grande quantité, qui n'est autre que de la glace d'eau (Boynton et al., 2002). Les principaux résultats concernant les régions polaires proviennent des sondeurs radars MARSIS et SHARAD, ainsi que du détecteur à neutrons HEND, qui ont accumulé une quantité importante d'informations sur leur morphologie.

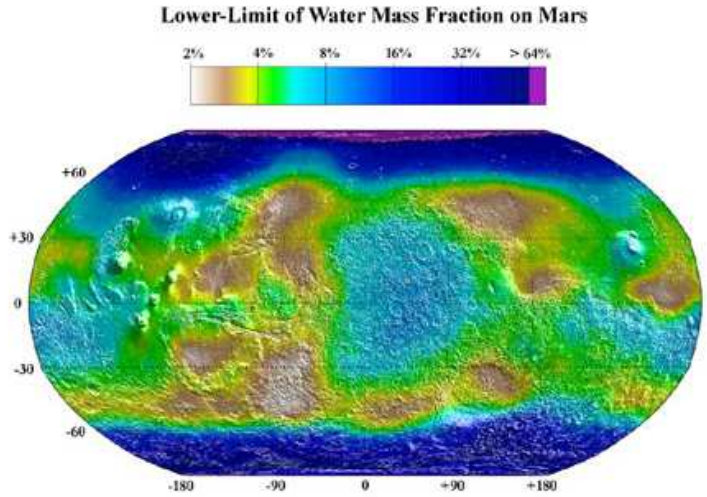


Figure 1.3-6 : Carte de l'hydrogène révélée par le détecteur à neutron HEND (High Energy Neutron Detector) à bord de la sonde Mars Odyssey. Une forte présence d'hydrogène traduit la présence d'eau, qui apparait sous forme de glace aux pôles et de minéraux hydratés aux latitudes plus faibles. Source : Boynton et al., 2002)

Le sous-sol

Si la quantité de données recueillies sur l'atmosphère et la surface de Mars est très importante et a permis de reconstruire des scénarios cohérents quant à la distribution de l'eau en surface durant son histoire, les informations disponibles sur le sous-sol martien, hormis les calottes polaires, sont extrêmement réduites. Seuls les sondeurs MARSIS et SHARAD (Milkovitch et al., 2009), ainsi que les détecteurs d'hydrogène de l'instrument Gamma Ray Spectrometer (GMS) ont apporté de nouveaux éclairages, identifiant la présence de glace dans le sous-sol à l'échelle planétaire, cependant les informations sur les structures géologiques et les figures de dépôts enfouies sont difficilement accessibles du fait de la nature des

matériaux présents en surface. Les minéraux hydratés sont en effet difficiles à pénétrer pour les ondes radar. Nous reviendrons sur l'apport de MARSIS et SHARAD sur la connaissance du sous-sol martien dans le prochain Chapitre.

1.3.2 Le potentiel exobiologique de Mars

1.3.2.1 La reconstruction de l'histoire hydrogéologique

L'objectif de nombreuses missions envoyées vers la planète rouge, comme nous l'avons vu, est de recueillir les données complémentaires pour la reconstruction de son histoire, notamment à travers l'étude de la distribution de l'eau au cours des temps géologiques et de l'existence possible de la vie sur Mars. La recherche de l'eau est en effet une étape non seulement nécessaire pour la compréhension de l'évolution géologique, géomorphologique et climatique de la planète, mais aussi dans la perspective de la recherche d'une vie éventuelle, passée ou présente, comme nous l'avons vu dans la première partie. La présence d'eau fournirait également des ressources in-situ pour de futures explorations humaines. Comme expliqué précédemment, l'hypothèse d'une planète Mars primitive au climat chaud et humide et à l'atmosphère plus épaisse permettant un cycle hydrologique en surface semblable à celui de la Terre a vu le jour dans les années 1970, et diverses formations géologiques liées à l'action de l'eau liquide (lits de rivières asséchées, deltas, anciens lacs…) ont été observées depuis à la surface de Mars. La planète a en effet conservé de très vieux terrains en surface, car contrairement à la Terre, elle aurait cessé son activité tectonique beaucoup plus tôt. Avec l'arrivée en orbite martienne des sondes Mars Express (2004) et MRO (2006), les indices en surface sur l'environnement passé de Mars ne sont plus seulement morphologiques mais également minéralogiques. Les spectro-imageurs OMEGA et CRISM embarqués sur ces sondes ont détecté des minéraux hydratés (argiles et sulfates) ne pouvant apparaître qu'en présence d'eau liquide, dont la nature renseigne sur les conditions environnementales au moment de leur formation (Bibring et al., 2005, Bibring et al., 2006, Mustard et al., 2008). C'est en se basant sur le nombre croissant de données acquises depuis 2004, sur les mécanismes de formation des minéraux détectés et sur les contraintes atmosphériques déduites des mesures de rapports isotopiques des éléments (Mahaffy et al., 2013, Atreya et al., 2013) qu'une lecture de l'histoire de Mars émerge.

Au début de la formation du Système solaire, la surface martienne, à l'instar de la Terre, a été fortement affectée par un bombardement météoritique intense. Les traces de cette période sont clairement visibles dans l'hémisphère Sud, tandis que l'hémisphère Nord apparait plus jeune, beaucoup plus lisse. Plusieurs théories expliquant cette dichotomie ont été avancées : certains considèrent la présence d'un océan, dont l'âge et la durée dans le temps sont également débattus, recouvrant l'hémisphère Nord, (Baker, 2001, Clifford and Parker, 2001, Di Achille, 2010). Ce scénario n'est cependant confirmé par aucune ligne de rivage visible, et on privilégie l'hypothèse d'un important impact sur la partie Nord de la planète juste après son accrétion (Nimmo et al., 2008). Après différenciation de la planète et apparition de son champ magnétique, cette zone aurait été envahie par les eaux sous la forme de précipitations à l'échelle globale

au cours du refroidissement de la planète, comme pour le scénario terrestre. Plusieurs arguments confortent cette théorie, notamment le fait que l'on retrouve des traces d'argiles hydratées partout sur la planète, et pas uniquement au Nord (Carter et al., 2010). L'atmosphère martienne était alors très dense. Mais cette phase aurait pris fin très tôt, il y a environ 4 milliards d'années, au moment de l'arrêt du champ magnétique martien dû au refroidissement rapide de la planète -on estime en effet que la taille de Mars ne lui permettait pas de conserver suffisamment de chaleur pour maintenir son activité tectonique et magnétique au-delà de 500 millions d'années- et de la disparition d'une majeure partie de son atmosphère (Montmessin, 2015). L'origine et la date de cette disparition est néanmoins discutée, elle pourrait provenir d'un ou plusieurs gros impacts météoritiques qui auraient soufflé l'atmosphère, combiné à un effet non négligeable de l'arrêt du champ magnétique, permettant au vent solaire de capturer les éléments les plus légers. Le volcanisme aurait alors fait remonter des roches basaltiques du manteau, recouvrant les plaines du Nord et masquant la plupart des argiles hydratées. S'en serait suivies, pendant la période du bombardement tardif, des périodes transitoires de mobilisation de l'eau stockée sous forme de glace interstitielle dans le sol martien très poreux, à la faveur de changements climatiques dus à une forte obliquité et/ou à des émissions volcaniques de gaz à effet de serre, provoquant des écoulements parfois massifs, mais sporadiques, les conditions de pression et de température en surface ayant fondamentalement changé. Selon ce scénario, entre 4,1 milliards à 3,7 milliards d'années, durant toute la période du Noachien, Mars aurait donc connu un sous-sol chaud et humide où avaient lieu des processus hydrothermaux entretenus par le bombardement météoritique, le volcanisme et le gradient géothermique. Cette hypothèse est confortée par l'analyse des argiles détectées qui auraient en fait été formées dans des conditions correspondant à celles du sous-sol martien, et non à la surface (Ehlmann et al., 2013), ou encore par la détection dans des zones réduites de carbonates en surface (Boynton et al., 2009). Ce scénario d'une planète Mars primitive à la surface froide et aride est de plus en accord avec les modélisations atmosphériques effectuées en laboratoire pour tenter de comprendre quel a pu être le climat martien il y a plus de 3,7 milliards d'années (Fastook et al., 2012). Cette sous-surface, où les interactions entre eau liquide et roches ont été favorisées et où la chaleur a été préservée plus longtemps qu'en surface, a pu constituer un environnement idéal pour le développement et l'hébergement de systèmes vivants.

Certains chercheurs proposent ainsi de revoir l'échelle classique des ères géologiques martiennes. Ils suggèrent en effet un découpage basé sur ces récents résultats (Bibring et al., 2006) :

Mars aurait connu à ses débuts des conditions semblables à la Terre, de 4,5 milliards à 3,8 milliards d'années. Cette première ère, baptisée le Phyllosien, est caractérisée par la présence de phyllosilicates, des argiles qui se seraient formées par altération des roches sous une couche d'eau liquide, ou dans un sous-sol gorgé d'eau. Cette période est donc représentative d'un climat tempéré, avec de l'eau liquide en surface à l'échelle globale. Les conditions d'habitabilité étaient alors très semblables à celles de la Terre primitive. Cette période aurait pris fin avec le refroidissement de la planète et l'arrêt de son champ

magnétique. L'atmosphère aurait alors disparu, initiant les conditions arides, froides et stériles en surface que nous connaissons aujourd'hui. La deuxième ère, nommée le Theiikien, témoignerait de la forte activité volcanique de la planète autour de 3,8 milliards d'années. Les composés soufrés éjectés dans l'atmosphère auraient alors créé des conditions acides en surface, et les éruptions auraient ponctuellement provoqué la remontée de grandes masses de glace se déversant sur le sol, menant à la formation de sulfates. Cette période serait donc caractérisée par ce type d'évènement volcanique violent, autorisant de façon transitoire l'eau liquide en surface, avec un sous-sol cependant très humide (et donc potentiellement habitable). Enfin, le Sidérikien constituerait la période la plus longue de la planète, qui aurait débuté il y a 3,5 milliards d'années. Cette ère est caractéristique d'une très faible activité aqueuse, et de l'oxydation progressive des roches par l'atmosphère, déposant à la surface des oxydes ferriques qui lui donnent peu à peu cette couleur rouge qui nous est familière.

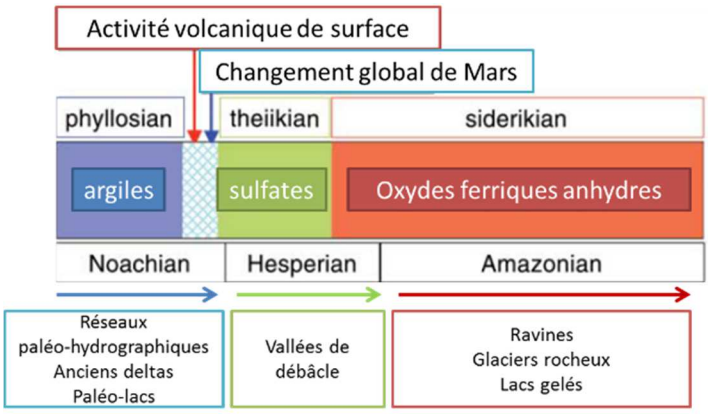


Figure 1.3-7 : Échelle des temps géologiques (proposée par Bibring et al., 2006), modifiée par l'adjonction de morphologies associées.

1.3.2.2 Implications pour la recherche de traces de vie sur Mars

Bien qu'aucune trace de vie, passé ou présente, n'ait été détectée à ce jour par les instruments envoyés pour étudier la planète Mars, trouver des traces d'activité biologique est tout à fait envisageable. C'est pourquoi la planète rouge reste aujourd'hui une cible de choix pour la recherche spatiale en exobiologie, avec plusieurs projets actuellement en préparation. Contrairement à la Terre, qui, comme nous l'avons vu possédait probablement des conditions favorables au maintien de la vie sur de très longues périodes, l'habitabilité à la surface de Mars a pu être très hétérogène dans l'espace et dans le temps. Nous savons en effet, à travers l'histoire de l'eau sur Mars, que bien qu'elle ait coulé pendant des millions d'années, l'eau liquide ne serait pas restée stable en surface après les pertes du champ magnétique et de l'atmosphère, autour de 4 milliards d'années. Certes, pendant les premiers 500 millions d'années, les conditions sont supposées avoir été très similaires à celles rencontrées sur Terre (entre 4,5 milliards et 4 milliards d'années). Mais sur Terre, l'apparition de la vie s'est produite dans des conditions Archéennes chaudes et humides, ce qui n'était plus le cas pour Mars après le LHB. Cependant, les

périodes d'apports d'eau liquide transitoires entre 4 milliards et 3,5 milliards d'années, même avec des conditions moins favorables que sur Terre, auraient pu permettre à la vie d'apparaitre en plusieurs endroits et à différentes périodes de manière totalement indépendante, puis de survivre et de se développer par cycles de dormance et de réveils successifs. Ces discontinuités impliquent que, si la vie est apparue sur Mars, elle a dû y rester assez primitive du fait d'un manque de temps nécessaire au processus d'évolution (Westall et al., 2013). Des traces éventuelles de bactéries ou de formes de vie très simples dans les roches du sous-sol datant du Noachien pourraient être présentes, et reconnaissables tout comme sur Terre (Chivian et al., 2008), mais il ne faut guère espérer détecter des traces fossiles d'organismes multicellulaires. Les époques Hespérienne et Amazonienne sont interprétées comme similaires à l'état actuel de Mars : un environnement froid, sec, sans réel rôle de l'eau (Bibring et al. 2006). On peut néanmoins évoquer des traces d'activités hydrologiques souterraines récentes, de quelques millions d'années seulement, et peut-être même quelques dizaines d'années, qui laissent supposer qu'en profondeur, Mars abriterait encore un système hydrothermal (Clifford 1993; Fishbaugh et al., 2007; Malin and Edgett, 2000), autorisant le renouvellement de minéraux via des échanges chimiques, ce qui pourrait fournir un environnement propice à la préservation de la vie, à l'instar de ce qui se passe sur Terre pour les bactéries survivant dans le sous-sol. On peut également se demander s'il existe des signatures morphologiques ou même topographiques de la vie. Dietrich et Perron se sont intéressés à ce sujet et ont ouvert des pistes intéressantes (Dietrich and Perron, 2006) : il apparait que sur Terre, la vie a une influence non négligeable sur l'évolution des paysages, comme la topographie des montagnes, la sinuosité des cours d'eau ou le taux de sédimentation. Dans leur étude, les deux chercheurs se sont attachés à discriminer l'effet des processus abiotiques de celui des processus biotiques en termes de géomorphologie. Dans le cas d'une planète au même climat que celui rencontré sur Terre, mais abiotique, les paysages seraient légèrement différents. L'absence de vie empêcherait le transport et le stockage de l'eau, provoquant des précipitations violentes. Ceci entrainerait une érosion rapide des sols menant à moins d'infiltration, plus de lessivage des sols, et donc à une érosion et un flux de débris plus importants. Les rivières seraient donc moins sinueuses, plus grossières et le réseau moins développé, tandis que les montagnes seraient plus saillantes, et les paysages plus rugueux en général. Les conditions de ces conclusions concernent des organismes plus développés que ceux attendus sur Mars, excluant l'activité d'organismes simples de type procaryote, néanmoins le rapprochement entre les paysages sur une Terre abiotique telle que décrite dans ce modèle et les paysages martiens, qui n'ont pas subi l'influence d'une vie développée en surface, est flagrant, ce qui tend à valider l'hypothèse des deux chercheurs. Dans un contexte de recherche de vie plus complexe (comme la végétation) ou en terrain inconnu, on pourrait alors s'appuyer sur les occurrences de morphologies de montagnes ou de rivières à l'échelle globale pour contraindre davantage la présence (ou l'absence) de cette vie. La même démarche dans le cas de Mars mène à envisager la possibilité de trouver des paysages typiques d'activité

bactérienne, comme les stromatolithes[2], qui, une fois la question de leur origine biogénique (ou non) réglée, pourraient être de forts indicateurs d'une activité biologique primitive.

Aujourd'hui, et probablement depuis environ 3,8 milliards d'années, les conditions à la surface de Mars sont hostiles à la vie, ainsi qu'au maintien de ses signatures. Si l'on souhaite avoir une chance de détecter de potentiels indicateurs d'activité biologique, c'est dans le sous-sol qu'il faut la saisir, de préférence dans des environnements présentant des structures de dépôts sédimentaires en milieu aqueux : c'est en effet dans ce type d'environnement que les molécules organiques ou les bactéries potentielles, piégées lors des dépôts successifs puis isolées de l'atmosphère très tôt par superposition de couches argileuses, ont le plus de chance d'avoir été préservées. Ce choix repose sur les indices récoltés sur Terre, qui tendent à montrer que les mécanismes de la chimie prébiotique impliquaient une participation active du support minéral à la stabilisation, l'édification et l'évolution de systèmes moléculaires complexes. De plus, les instruments existants en matière d'analyse de molécules organiques sont très précis et relativement spatialisables.

Espérons donc que ce sous-sol nous réserve bien des surprises, car c'est avec cet espoir que la mission ExoMars a été lancée, avec pour objectif principal d'aller étudier le proche sous-sol à la recherche de traces de vie, passée ou présente.

Les mêmes réflexions sont de mise pour une détection éventuelle d'eau liquide : sa présence durable à la surface de Mars est considérée comme improbable. Compte tenu de la pression et de la température à la surface, l'eau liquide se sublime presque instantanément dans l'atmosphère. Cependant, des éléments suggèreraient sa présence temporaire dans des conditions particulières : pendant l'été et à de faibles latitudes, la température des premiers centimètres du sous-sol peut atteindre 273 K pendant plusieurs heures par jour, ce qui est suffisant pour faire fondre la glace et créer des films d'eau liquide sur les grains constituant les roches. Cette hypothèse est renforcée par le fait que les sondes Viking et Pathfinder ont révélé un large excédent en chlorures (Navarro-González et al., 2010), ce qui a pour effet de baisser la température de fusion. L'ajout de certaines conditions minéralogiques, comme la présence de sel, ralentirait le processus de regel et ferait perdurer l'eau à l'état liquide dans des cavités isolées de l'atmosphère martienne pendant de longues périodes au cours de l'année, rendant l'hypothèse d'une activité hydrothermale possible (Villanueva et al., 2015).

1.4 Un exemple de mission spatiale exobiologique : ExoMars

Mars aurait réuni les conditions nécessaires à l'apparition de la vie durant le Noachien, son premier éon géologique (de 4.1 à 3.7 milliards d'années), de manière analogue à la Terre pendant l'Archéen. Mais comment savoir si la vie est apparue ou non dans cet environnement? Comment reconnaître les fameuses

[2] Les stromatolithes sont des structures laminaires souvent calcaires qui se développent en milieu aquatique peu profond, marin ou d'eau douce. Ces structures sont souvent caractéristiques d'une activité biogénique.

traces qui témoignent de son passage, sans doute possible? Nous l'avons vu, cette question nécessite une stratégie coordonnée consistant à rechercher des signes tangibles biochimiques, géochimiques, et morphologiques de la vie dans un milieu adapté à son maintien. Toutes les analyses dont le but est de détecter des traces de vie doivent ainsi être effectuées en regard du contexte géologique et environnemental du milieu étudié. Pour mettre en place cette stratégie pluridisciplinaire, on imagine des suites instrumentales complètes de plus en plus performantes, et l'on se base sur les environnements caractéristiques que l'on peut trouver sur Terre qui sont potentiellement préservateurs de traces de vie, ainsi que sur le type de vie envisagé pour le cas de Mars.

1.4.1 Présentation et objectifs

Au début des années 2000, l'Agence Spatiale Européenne (ESA) a lancé le projet ExoMars dont la vocation est l'étude de l'environnement martien, de son atmosphère et de la composition de son sol, avec un objectif spécifique qui est la recherche de traces de vie passée ou présente. Du fait de difficultés financières, ce projet a été repoussé de nombreuses fois et a connu plusieurs modifications en termes de charge utile, de plateformes et de collaborations (interrompue avec la NASA et actuellement avec l'agence spatiale Russe Roscosmos)

Ce projet s'articule à ce jour autour de deux missions :

Une mission en 2016, qui aura pour objectif de mettre en orbite martienne un satellite relais qui, d'une part, aura pour mission de délivrer une caractérisation détaillée de la composition et de l'évolution spatio-temporelle de l'atmosphère de Mars, notamment pour les gaz trace (et ainsi de déterminer leur origine), et d'autre part, servira de relais de télécommunications vers la Terre pour les missions présentes et futures. Un petit atterrisseur instrumenté de courte durée de vie sera déposé à la surface de Mars en 2016. Il s'agit essentiellement pour l'ESA de faire la preuve de sa capacité technologique à atterrir sur Mars. La charge utile de cet atterrisseur, élégamment baptisé Schiaparelli, est assez réduite et essentiellement focalisée sur des mesures météorologiques. Elle comprend un instrument de mesure de la vitesse et de la direction du vent (Met Wind), des capteurs d'humidité (DREAMS-H), de pression (DREAMS-P), et de température (Marsterm), ainsi qu'une sonde qui mesurera le champ électrique à la surface de Mars, Micro-Ares (Déprez et al., 2014). L'orbiteur embarquera quatre instruments : NOMAD (Nadir and Occultation for MArs Discovery), un spectromètre à large bande balayant le spectre des ultraviolets à l'infrarouge (Vandaele et al., 2011), ACS (Atmosphere Chemistry Suite), qui comporte trois canaux destinés à étudier l'atmosphère martienne dans l'infrarouge (Trokhimovskiy, 2014), CaSSIS (Colour and Stereo Surface Imaging System), un imageur haute résolution (5m/pixel) capable de produire des images stéréoscopiques (Thomas et al., 2014) et FREND (Fine Resolution Epithermal Neutron Detector), un détecteur à neutron utilisé pour cartographier l'hydrogène à la surface de Mars (Malakhov, 2013).

Le deuxième volet de la mission, prévu pour 2018, est, quant à lui, plus ambitieux. L'objectif est de poser à la surface de Mars un véhicule équipé d'une foreuse et d'instruments scientifiques dédiés à l'étude du sol et du proche sous-sol. Pour l'Europe, les enjeux technologiques de cette mission sont notamment de démontrer la capacité à être mobile en surface grâce à un véhicule, d'accéder au sous-sol via une foreuse pour le prélèvement d'échantillons, qui seront préparés et distribués pour être analysés par les instruments embarqués. Les objectifs scientifiques principaux du rover ExoMars sont de rechercher des signes de vie passée et présente sur Mars et d'étudier l'exobiologie martienne et son habitabilité potentielle à travers l'analyse des variations de l'environnement géochimique avec la profondeur. Cette mission cherchera donc à répondre à l'une des questions marquantes de notre époque en essayant d'établir si la vie a existé et est toujours active sur Mars. Équipé d'une caméra panoramique et d'une foreuse capable de prélever des échantillons jusqu'à 2 mètres de profondeur, le véhicule transportera un ensemble complet d'instruments analytiques dédiés à la recherche en géologie, exobiologie et géochimie, nommé charge utile Pasteur. Il parcourra plusieurs kilomètres à la recherche de signes de vie passés ou présents, étudiant, collectant et analysant des échantillons du sous-sol. L'étude de la surface sera assurée par les instruments PanCam (Panoramic Camera) (Griffiths et al., 2006), ISEM (Infrared Spectrometer for ExoMars) (Korablev et al., 2014) et CLUPI (CLose UP Imager) (Josset et al., 2012). La recherche de zones d'intérêt pour le prélèvement d'échantillons en sous-sol s'effectuera à l'aide du radar à pénétration de sol WISDOM (Water Ice and Subsurface Deposits Observation On Mars) (Ciarletti et al., 2011) et du détecteur à neutrons Adron (Nikiforov et al., 2013), capable de cartographier l'hydrogène en proche sous-surface (de l'ordre de quelques mètres de profondeur). Les échantillons collectés seront ensuite analysés par les instruments MicrOmega (spectromètre infrarouge) (Leroi et al., 2009), RLS (Raman Spectrometer) (Edwards et al., 2012) et MOMA (Mars Organic Molecule Analyser) (Becker et al., 2009). L'instrument MaMiss (Mars Multispectral Imager for Subsurface Studies) sera quant à lui capable de faire de la spectroscopie en sous-sol, dans les forages creusés par le rover (De Angelis et al., 2014).

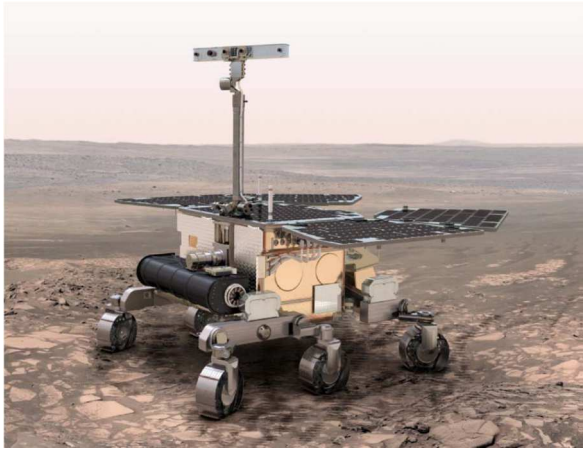


Figure 1.4-1 : vue d'artiste du rover de la mission ExoMars. Source : ESA

Le LATMOS est très impliqué dans ce projet puisqu'il a participé (et participe toujours) à la conception et au développement de trois des instruments choisis pour faire partie de la mission ExoMars, à savoir le radar WISDOM, qui constitue l'objet de cette thèse et sera donc la vedette de ce manuscrit, ainsi que l'instrument Micro-Ares qui mesurera le champ électrique à la surface de Mars lors du volet 2016 de la mission ExoMars, et enfin MOMA qui analysera les échantillons à la recherche de molécules organiques.

1.4.2 Les terrains potentiels d'atterrissage

Après des mois de lutte acharnée et de sélections successives, 4 sites potentiels d'atterrissage étaient encore en lice pour devenir la zone d'investigation de la mission ExoMars en Octobre 2015. Les terrains sont présélectionnés à l'aide des connaissances accumulées au cours de l'exploration planétaire sur la reconstitution de l'histoire hydrogéologique martienne et de son habitabilité potentielle. Le site d'atterrissage pour le rover d'ExoMars doit ainsi répondre à plusieurs critères qui prennent en compte la pertinence scientifique du lieu mais aussi les aspects de sécurité vis à vis du rover, pour l'atterrissage, puis la pérennité de la mission. L'objectif principal de la mission étant de rechercher des traces de vie, celle-ci doit se dérouler sur un site témoin de la période habitable de la planète, autrement dit âgé de plus de 3,6 milliards d'années, idéalement dans un milieu de nature sédimentaire présentant des affleurements en surface. Le site d'atterrissage doit donc se situer entre le Noachien et le début de l'Hespérien (de 3,2 à 3,7 milliards d'années). La présence de traces d'activité aqueuse sera également un critère déterminant, tout comme la présence ou non de poussières, que l'on espère la moins abondante possible.

Les contraintes liées à la sécurité du rover sont cependant nombreuses, et limitent fortement les options en termes de sites potentiels d'atterrissage : tout d'abord, l'ellipse d'atterrissage pour ExoMars couvre 104 km de grand axe pour 19 kilomètres au plus large, tandis que le robot ne parcourra que quelques kilomètres. Ceci nécessite un endroit présentant des affleurements à fort potentiels scientifiques sur plus de 100 kilomètres par 19 kilomètres. Ensuite, le site devra se situer à une altitude inférieure à -2000 m pour assurer le freinage lors de la descente du rover, et devra être relativement plat.

Les quatre sites qui étaient en compétition sont décrits ci-dessous :

- ✓ Hypanis Vallis (11.9°N, 34°E) : Cette vallée se situe sur un système de chenaux inversés, considéré comme un ancien delta de lac ou de rivière. Les affleurements montrent une succession de dépôts sédimentaires, qui pourraient donner accès à des échantillons âgés de plus de 3;45 milliards d'années. Cependant, aucune détection de minéraux hydratés n'y a été faite.
- ✓ Aram Dorsum (7.9°N, 348.8°E) : Le site date du Noachien et contient des roches sédimentaires. Il est traversé par un canal inversé (inverted channel) de 80 km de long et 1.2 km de large, et possède des dépôts récents (100 Ma), néanmoins, le spectromètre CRISM y a détecté peu de

minéraux hydratés. Le site contient en outre des obstacles dus au relief escarpé et aux pentes raides.

- ✓ Mawrth Vallis (22°N, 342 °E) : Cette zone constitue la plus ancienne vallée de débâcle (outflow channel) connue sur Mars, et contient beaucoup de minéraux hydratés. On observe également une grande variabilité verticale dans les dépôts sédimentaires, avec la présence d'argiles riches en fer surmontés par des sédiments riches en aluminium, témoignant d'un environnement passé humide.
- ✓ Oxia Planum (18.20°N, 335.45°E) : Ce site expose une large portion d'argiles dont l'âge d'exposition est inférieur à 100 millions d'années en surface, repérés grâce aux instruments OMEGA et CRISM. À l'instar de Mawrth Vallis, Oxia Planum présente une grande variété de minéraux et de structures de dépôts. On a notamment identifié des traces d'érosion fluviatile par des réseaux de vallées datant du Noachien, ainsi que par des vallées de débâcles formés durant l'Hespérien. C'est l'une des zones, avec Mawrth Vallis, qui présente le plus de roches datées de plus de 3,8 milliards d'années observées par spectroscopie.

Tous ces sites présentent un intérêt exobiologique certain, cependant, de par leur variabilité en termes de composition, d'échelles de temps et de traces d'activité aqueuse, les sites de Mawrth Vallis et d'Oxia Planum semblent les plus prometteurs, avec la palme de la sécurité pour le rover revenant à Oxia Planum, qui comporte des terrains relativement plats. Les phases de sélection du site se sont poursuivies jusqu'à la fin 2015, et c'est finalement Oxia Planum qui a été choisi pour devenir le site d'investigations d'ExoMars 2018.

1.4.3 Autres missions et perspectives sur Mars

En ce qui concerne les prochaines missions à destination de Mars, il est important d'évoquer la mission InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) de la NASA, dont le lancement, initialement programmé en mars 2016 a été très récemment repoussé en 2018 pour des problèmes techniques liés au sismomètre. Il s'agit d'un atterrisseur qui se posera à la surface de Mars et qui, par l'utilisation d'un sismomètre baptisé SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure), étudiera le sous-sol sur des profondeurs importantes (~400 km, Panning et al., 2015). InSight comportera également un capteur de flux de chaleur s'enfonçant jusqu'à 5 mètres sous la surface du sol. Ceci constitue une très bonne synergie instrumentale avec le radar WISDOM pour une étude approfondie de la structure du sous-sol martien, puisque ce dernier a été conçu pour sonder le proche sous-sol de Mars jusqu'à quelques mètres de profondeur. La mission a été retenue en 2012 dans le cadre du programme Discovery de la NASA, dont le crédo est « better, faster, cheaper» (traduire meilleur, plus vite, moins cher!). Sa mission est de révéler l'épaisseur des différentes couches qui composent la planète jusqu'au noyau, et d'étudier les morphologies qui témoigneraient d'une activité tectonique, toujours dans le but d'en apprendre plus sur l'histoire de Mars et des autres planètes telluriques du Système solaire. La mission Mars 2020 initiée par le Jet Propulsion Laboratory (JPL) en collaboration avec la NASA, a pour

objectif de faire atterrir un nouveau rover à la surface de Mars, très semblable à Curiosity. Celui-ci aura pour objectif principal la récolte d'échantillons et leur préparation en vue d'un retour ultérieur sur Terre via une mission dédiée de retour d'échantillons, qui n'est cependant ni planifiée, ni financée à ce jour. Le calendrier prévisionnel pour cette deuxième mission la place aux alentours d'un lancement en 2020/2025. Enfin, mentionnons le but ultime de l'exploration spatiale de Mars depuis ses débuts : la mission habitée vers Mars. Celle-ci, estimée extrêmement couteuse, nécessite néanmoins la mise au point de nouvelles techniques pour pouvoir subvenir aux besoins humains sur de longues durées, en termes de santé (protection contre les rayons cosmiques, prévention des effets physiologiques de l'absence de gravité, problèmes psychologiques), de support pour la vie (alimentation, oxygène, eau) et d'équipements.

Conclusion

L'exobiologie a pour but de percer les nombreux mystères de la vie. Sur Terre, la chimie prébiotique a donné naissance aux molécules complexes qui ont permis l'apparition des premiers êtres vivants. L'origine des ingrédients nécessaires à cette chimie, que sont l'eau et les molécules organiques, pourrait être une combinaison de sources endogènes et exogènes. Les processus physico-chimiques jusqu'à l'apparition d'une forme simple de vie à partir de molécules organiques complexes sont encore mal compris. Pour apporter des contraintes sur les chaînons manquants de l'histoire de la vie sur Terre, on peut chercher du côté des autres corps du Système solaire, qui présentent de nombreuses similitudes avec notre environnement primitif. La communauté scientifique opte pour une stratégie pluridisciplinaire, tant au niveau des moyens engagés comme des modélisations de plus en plus fines, des expériences en laboratoire ou des missions d'exploration planétaire, que des disciplines, où biologistes, chimistes, climatologues, géophysiciens et géologues travaillent de concert pour déterminer les mécanismes et les conditions environnementales ayant mené à l'apparition puis au maintien de la vie. L'espoir de détecter un jour des traces univoques d'activité biologique est très présent, comme l'illustre notre intérêt pour Mars. La planète rouge est en effet la plus visitée de notre Système solaire, et nous savons aujourd'hui qu'elle a connu une période de quelques centaines de millions d'années où les conditions étaient similaires à celle de la Terre primitive, à savoir un environnement chaud et humide avec une atmosphère dense, ainsi que la présence de rivières, de lacs et peut-être d'océans en surface. La vie, d'après les résultats terrestres, nécessiterait globalement cette échelle de temps pour émerger et se maintenir en équilibre. Elle aurait donc pu se développer également sur Mars. Les planètes ont cependant pris des chemins différents lorsque le refroidissement de Mars a mené à l'arrêt de son champ magnétique et à la disparition de son atmosphère, laissant une surface froide et stérile. On en sait en revanche peu sur les conditions dans le sous-sol, que ce soit durant la période primitive de Mars ou encore aujourd'hui. Si la sous-surface était effectivement habitable pendant suffisamment de temps, elle aurait pu représenter une niche écologique pour des organismes primitifs. Il est donc nécessaire d'accéder à la « troisième dimension » que représente le sous-sol martien pour une étude exobiologique approfondie. C'est de ce constat que la mission spatiale ExoMars a émergé. Un rover, équipé d'une suite instrumentale comportant notamment une foreuse, un laboratoire d'analyse d'échantillons et un radar à pénétration de sol, partira à la recherche de traces de vie passée ou présente, dans le sous-sol, à l'abri de la surface. Une analyse conjointe de l'environnement géologique et des traces détectées dans les échantillons apportera de nouvelles contraintes pour une interprétation complète d'un point de vue exobiologique. Le GPR WISDOM, sélectionné pour faire partie de la charge utile Pasteur, sera avec ADRON l'unique instrument capable de sonder le sous-sol. Il identifiera, localisera et caractérisera les structures de dépôts en proche sous-surface afin de définir le contexte géologique du site d'atterrissage et de trouver des lieux où des traces de vie potentielles pourraient avoir été préservées, afin de guider le rover vers des sites d'intérêt pour les prélèvements d'échantillons.

Références

Acuna, M.H., Connerney, J.E.P., Lin, R.P., Mitchell, D., Carlson, C.W., McFadden, J., Cloutier, P. (1999). Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment. Science, 284(5415), 790-793.

Atreya, S. K., Trainer, M. G., Franz, H. B., Wong, M. H., Manning, H. L., Malespin, C. A., Jones, J. H. (2013). Primordial argon isotope fractionation in the atmosphere of Mars measured by the SAM instrument on Curiosity and implications for atmospheric loss. Geophysical research letters, 40(21), 5605-5609.

Bada, J. L. (2004). How life began on Earth: a status report. Earth and Planetary Science Letters, 226(1), 1-15.

Baker, V.R., Strom, R.G., Gulick, V.C., Kargel, J.S., Komatsu, G., Kale, V.S. (1991). Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars. Nature *352*, 589-594; doi:10.1038/352589a0

Baker, V. R., Carr, M.H., Gulick, V.C., Williams, C.R., Marley, M.S. (1992). Channels and valley networks. *Mars*, *1*, 493-522.

Baker, V.R. (2001). Water and the Martian landscape. Nature, 412(6843), 228-236.

Becker, L., Cornish, T., Antione, M., Cotter, R., Evans-Nugyen, T., Doroshenko, V., Ehrenfreund, P. (2009). MOMA-Ldms: Instrument concept and results. Geochim. Cosmochim. Acta, 73(13), A101-A101.

Bibring, J. P., Langevin, Y., Gendrin, A., Gondet, B., Poulet, F., Berthé, M., Drossart, P. (2005). Mars surface diversity as revealed by the OMEGA/Mars Express observations. Science, 307(5715), 1576-1581.

Bibring, J. P., Langevin, Y., Mustard, J. F., Poulet, F., Arvidson, R., Gendrin, A., Berthé, M. (2006). Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data. Science, 312(5772), 400-404.

Bockelée-Morvan, D., Lis, D. C., Wink, J. E., Despois, D., Crovisier, J., Bachiller, R., Gérard, E. (2000). New molecules found in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp). Investigating the link between cometary and interstellar material. Astronomy and Astrophysics, 353, 1101-1114.

Boynton, W. V., Feldman, W. C., Squyres, S. W., Prettyman, T. H., Brückner, J., Evans, L. G., Shinohara, C. (2002). Distribution of hydrogen in the near surface of Mars: Evidence for subsurface ice deposits. Science, 297(5578), 81-85.

Boynton, W. V., Ming, D. W., Kounaves, S. P., Young, S. M. M., Arvidson, R. E., Hecht, M. H., Smith, P. H. (2009). Evidence for calcium carbonate at the Mars Phoenix landing site. Science, 325(5936), 61-64.

Capaccioni, F., Coradini, A., Filacchione, G., Erard, S., Arnold, G., Drossart, P., Leyrat, C. (2015). The organic-rich surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by VIRTIS/Rosetta. Science, 347(6220), aaa0628.

Carr, M. H. (2007). The surface of Mars (Vol. 6). Cambridge University Press.

Carrasco, N., Schmitz-Afonso, I., Bonnet, J. Y., Quirico, E., Thissen, R., Dutuit, O., Adandé, G. (2009). Chemical Characterization of Titan's Tholins: Solubility, Morphology and Molecular Structure Revisited†. The Journal of Physical Chemistry A, 113(42), 11195-11203.

Carter, J., Poulet, F., Bibring, J. P., Murchie, S. (2010). Detection of hydrated silicates in crustal outcrops in the northern plains of Mars. Science, 328(5986), 1682-1686.

Chivian, D., Brodie, E. L., Alm, E. J., Culley, D. E., Dehal, P. S., DeSantis, T. Z., ... & Moser, D. P. (2008). Environmental genomics reveals a single-species ecosystem deep within Earth. Science, 322(5899), 275-278.

Ciarletti, V., Corbel, C., Plettemeier, D., Cais, P., Clifford, S. M., & Hamran, S. E. (2011). WISDOM GPR designed for shallow and high-resolution sounding of the Martian subsurface. Proceedings of the IEEE, 99(5), 824-836.

Clifford, S. M. (1993). A model for hydrologic and climatic behaviour of water on Mars. Journal of Geophysical Research, 98(E6) :10973–11016.

Clifford, S. M., and T. J. Parker (2001). The evolution of the Martian hydrosphere: Implications for the fate of a primordial ocean and the current state of the northern plains, Icarus, 154, 40–79, doi: 10.1006/icar.2001.667

Cottin, H., Coll, P., Coscia, D., Fray, N., Guan, Y. Y., Macari, F, Chaput, D. (2008). Heterogeneous solid/gas chemistry of organic compounds related to comets, meteorites, Titan, and Mars: laboratory and in lower Earth orbit experiments. Advances in Space Research, 42(12), 2019-2035.

De Angelis, S., De Sanctis, M. C., Ammannito, E., Di Iorio, T., Carli, C., Frigeri, A. Giardino, M. (2014). VNIR spectroscopy of Mars Analogues with the ExoMars-Ma Miss instrument. Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi, 26, 121.

Déprez, G., Montmessin, F., Witasse, O., Lapauw, L., Vivat, F., Abbaki, S., D'Almeida, É. (2014, May). Micro-ARES, an electric-field sensor for ExoMars 2016: Electric fields modelling, sensitivity evaluations and end-to-end tests. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 16, p. 16613).

Despois, D., Cottin, H. (2005). Comets: potential sources of prebiotic molecules for the early Earth. In Lectures in Astrobiology (pp. 289-352). Springer Berlin Heidelberg.

Di Achille, G., Hynek, B. M. (2010). Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys. Nature Geoscience, 3(7), 459-463.

Dietrich, W.E., Perron, J.T. (2006). The search for a topographic signature of life. Nature, 439(7075), 411-418.

Diniega, S., Hansen, C. J., McElwaine, J. N., Hugenholtz, C. H., Dundas, C. M., McEwen, A. S., Bourke, M. C. (2013). A new dry hypothesis for the formation of martian linear gullies. Icarus, 225(1), 526-537.

Edwards, H. G., Hutchinson, I., Ingley, R. (2012). The ExoMars Raman spectrometer and the identification of biogeological spectroscopic signatures using a flight-like prototype. Analytical and bioanalytical chemistry, 404(6-7), 1723-1731.

Ehlmann, B. L., Berger, G., Mangold, N., Michalski, J. R., Catling, D. C., Ruff, S. W., Poulet, F. (2013). Geochemical consequences of widespread clay mineral formation in Mars' ancient crust. Space Science Reviews, 174(1-4), 329-364.

Fastook, J. L., Head, J. W., Marchant, D. R., Forget, F., Madeleine, J. B. (2012). Early Mars climate near the Noachian–Hesperian boundary: Independent evidence for cold conditions from basal melting of the south polar ice sheet (Dorsa Argentea Formation) and implications for valley network formation. Icarus, 219(1), 25-40.

Fishbaugh, K. E., Poulet, F., Chevrier, V., Langevin, Y., & Bibring, J. P. (2007). On the origin of gypsum in the Mars north polar region. Journal of Geophysical Research: Planets, 112(E7).

Formisano, V., Atreya, S., Encrenaz, T., Ignatiev, N., Giuranna, M. (2004). Detection of methane in the atmosphere of Mars. Science, 306 (5702), 1758-1761.

Gautier, T., Carrasco, N., Buch, A., Szopa, C., Sciamma-O'Brien, E., Cernogora, G. (2011). Nitrile gas chemistry in Titan's atmosphere. Icarus, 213(2), 625-635.

Golombek, M. P., Cook, R. A., Economou, T., Folkner, W. M., Haldemann, A. F. C., Kallemeyn, P. H., Rieder, R. (1997). Overview of the Mars Pathfinder mission and assessment of landing site predictions. Science, 278(5344), 1743-1748.

Griffiths, A. D., Coates, A. J., Jaumann, R., Michaelis, H., Paar, G., Barnes, D., Josset, J. L. (2006). Context for the ESA ExoMars rover: the Panoramic Camera (PanCam) instrument. International Journal of Astrobiology, 5(03), 269-275.

Grotzinger, J. P., Crisp, J., Vasavada, A. R., Anderson, R. C., Baker, C. J., Barry, R., Gellert, R. (2012). Mars Science Laboratory mission and science investigation. Space science reviews, 170(1-4), 5-56.

Hsu, H. W., Postberg, F., Sekine, Y., Shibuya, T., Kempf, S., Horányi, M., Kuwatani, T. (2015). Ongoing hydrothermal activities within Enceladus. Nature, 519(7542), 207-210.

Jakosky, B. M. (2008). The Mars atmosphere and volatile evolution (MAVEN) Mars Scout Mission. LPI Contributions, 1447, 9036.

Jaumann, R., Neukum, G., Behnke, T., Duxbury, T. C., Eichentopf, K., Flohrer, J., Hoffmann, H. (2007). The high-resolution stereo camera (HRSC) experiment on Mars Express: Instrument aspects and experiment conduct from interplanetary cruise through the nominal mission. Planetary and Space Science, 55(7), 928-952.

Josset, J. L., Westall, F., Hofmann, B. A., Spray, J. G., Cockell, C., Kempe, S., Pullan, D. (2012, April). CLUPI, a high-performance imaging system on the ESA-NASA rover of the 2018 ExoMars mission to discover biofabrics on Mars. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 14, p. 13616).

Konhauser, K.O., Jones, B., Reysenbach, A.L., Renaut, R.W. (2003). Hot spring sinters: keys to understanding Earth's earliest life forms. Canadian Journal of Earth Sciences, 40(11), 1713-1724.

Korablev, O. and Mantsevich, S. (2014). An Infrared Spectrometer at the Mast of ExoMars Rover. In 40th COSPAR Scientific Assembly. Held 2-10 August 2014, in Moscow, Russia, Abstract B0. 2-36-14. (Vol. 40, p. 1578).

Lefevre, F., and Forget, F. (2009). Observed variations of methane on Mars unexplained by known atmospheric chemistry and physics. Nature, 460(7256), 720-723.

Leroi, V., Bibring, J. P., Berthe, M. (2009). Micromega/IR: design and status of a near-infrared spectral microscope for in situ analysis of Mars samples. Planetary and Space Science, 57(8), 1068-1075.

Listowski, C., Modeling carbon dioxide (CO2) ice clouds on Mars: application to mesospheric clouds, Earth and Planetary Astrophysics. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2013. French. PhD thesis.

Mahaffy, P. R., Webster, C. R., Atreya, S. K., Franz, H., Wong, M., Conrad, P. G., Owen, T. (2013). Abundance and isotopic composition of gases in the martian atmosphere from the Curiosity rover. Science, 341(6143), 263-266.

Malakhov, A., Mitrofanov, I., Sanin, A., Litvak, M., Kozyrev, A., Tretiyakov, V., Nikiforov, S. (2013, April). Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FREND) onboard ExoMars Trace Gas Orbiter. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 15, p. 9055).

Malin, M. C., Edgett, K. S. (2000). Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars. Science, 288(5475), 2330-2335.

Malin, M. C., Edgett, K. S. (2003). Evidence for persistent flow and aqueous sedimentation on early Mars. Science, 302(5652), 1931-1934.

Mandt, K.E., deSilva, S.L., Zimbelman, J.R., Crown, D.A., 2008. Origin of the medusae fossae formation, Mars: insights from a synoptic approach. J. Geophys. Res. (Planets) 113, 12011. http://dx.doi.org/10.1029/2008JE003076.

Martin, H. et al., 2006. Building of a habitable planet. In: Claeys, P., López-García, P., Martin, H., Montmerle, T., Pascal, R., Reisse, J. (Eds.). (2006). From suns to life: a chronological approach to the history of life on Earth (pp. 1-4). Springer.

McCord, T. B., Hansen, G. B., Hibbitts, C. A. (2001). Hydrated salt minerals on Ganymede's surface: evidence of an ocean below. Science, 292(5521), 1523-1525.

McEwen, A. S., Eliason, E. M., Bergstrom, J. W., Bridges, N. T., Hansen, C. J., Delamere, W. A., Kirk, R. L. (2007). Mars reconnaissance orbiter's high resolution imaging science experiment (HiRISE). Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012), 112(E5).

McKay, D. S., Gibson, E. K., Thomas-Keprta, K. L., Vali, H., Romanek, C. S., Clemett, S. J., Zare, R. N. (1996). Search for past life on Mars: possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. Science, 273 (5277), 924-930.

Meyer, M., Vasavada, A. (2015, November). Mars Science Laboratory's rover, Curiosity: Ongoing investigations into the habitability of Mars. In AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts (Vol. 47).

Milkovich, S.M., Plaut, J.J., Safaeinili, A., Picardi, G., Seu, R., Phillips, R.J., 2009. Stratigraphy of Promethei Lingula, south polar layered deposits, Mars, in radar and imaging data sets. J. Geophys. Res. (Planets) 114, 3002. http://dx.doi.org/ 10.1029/2008JE003162

Miller, S. L. (1953). A production of amino acids under possible primitive earth conditions. Science, 117(3046), 528-529.

Mojzsis, S.J., Harrison, M.T. and Pidgeon, R.T. (2001). Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4,300 Myr ago. Nature, 409: 178-181.

Montmessin, F. (2015). SPICAM on Mars Express: a 10 year in-depth survey of the Martian atmosphere. In EGU General Assembly 2015 (pp. EGU2015-6376).

Mumma, M.J., Villanueva, G.L., Novak, R.E., Hewagama, T., Bonev, B.P., DiSanti, M.A. Smith, M.D. (2009). Strong release of methane on Mars in northern summer 2003. Science, 323(5917), 1041-1045.

Mustard, J. F., Murchie, S. L., Pelkey, S. M., Ehlmann, B. L., Milliken, R. E., Grant, J. A., Roach, L. (2008). Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM instrument. Nature, 454(7202), 305-309.

Navarro-González, R., Vargas, E., de La Rosa, J., Raga, A. C., McKay, C. P. (2010). Reanalysis of the Viking results suggests perchlorate and organics at midlatitudes on Mars. Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012), 115(E12).

Nikiforov, S., Mitrofanov, I., Kozyrev, A., Fedosov, F., Litvak, M., Mokrousov, M., Konovalov, A. (2013, April). Neutron detector ADRON-RM for ExoMars 2018. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 15, p. 9506).

Nimmo, F., S.D. Hart, S.D., Korycansky, D.G. Agnor, C.B. (2008). Implications of an impact origin for the martian hemispheric dichotomy. In Nature, 453, pp. 1220–1223.

Ojha, L., Wilhelm, M. B., Murchie, S. L., McEwen, A. S., Wray, J. J., Hanley, J., Chojnacki, M. (2015). Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on Mars. Nature Geoscience, 8(11), 829-832.

Panning, M. P., Beucler, É., Drilleau, M., Mocquet, A., Lognonné, P., Banerdt, W. B. (2015). Verifying single-station seismic approaches using Earth-based data: Preparation for data return from the InSight mission to Mars. Icarus, 248, 230-242.

Picardi, G., Biccari, D., Seu, R., Plaut, J., Johnson, W. T. K., Jordan, R. L., Bombaci, O. (2004, August). MARSIS: Mars advanced radar for subsurface and ionosphere sounding. In Mars Express: the scientific payload (Vol. 1240, pp. 51-69).

Raulin, F. (2008). Astrobiology and habitability of Titan. In Strategies of Life Detection (pp. 37-48). Springer US.

Seetha, S., Satheesh, S. K. (2015). Mars Orbiter Mission. Current Science, 109(6), 1047.

Smith, D. E., Zuber, M. T., Solomon, S. C., Phillips, R. J., Head, J. W., Garvin, J. B., Lemoine, F. G. (1999). The global topography of Mars and implications for surface evolution. Science, 284(5419), 1495-1503.

Sotin, C., Head, J. W., Tobie, G. (2002). Europa: Tidal heating of upwelling thermal plumes and the origin of lenticulae and chaos melting. Geophysical Research Letters, 29(8), 74-1.

Spencer, J. R., Nimmo, F. (2013). Enceladus: An active ice world in the Saturn system. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 41(1), 693.

Thomas, N., Cremonese, G., Banaszkiewicz, M., Bridges, J., Byrne, S., da Deppo, V., Ivanov, A. (2014, April). The Colour and stereo surface imaging system (CaSSIS) for ESA's Trace Gas Orbiter. In European Planetary Science Congress 2014, EPSC Abstracts, Vol. 9, id. EPSC2014-100 (Vol. 9, p. 100).

Trainer, M. G., Pavlov, A. A., DeWitt, H. L., Jimenez, J. L., McKay, C. P., Toon, O. B., Tolbert, M. A. (2006). Organic haze on Titan and the early Earth. Proceedings of the National Academy of Sciences, 103(48), 18035-18042.

Trokhimovskiy, A., Korablev, O., Grigoriev, A., Fedorova, A., Shakun, A., Ignatiev, N., Anufreychik, K. (2014, January). Atmospheric Chemistry Suite (ACS): a set of Infrared Spectrometers for Atmospheric Measurements on Board ExoMars Trace Gas Orbiter. In Mars Atmosphere: Modelling and Observation, 5th International Workshop (Vol. 1, p. 4402).

Vandaele, A. C., Daerden, F., Drummond, R., Neefs, E., Lopez-Moreno, J. J., Gomez, J. R., Millour, E. (2011). NOMAD, a spectrometer suite for nadir and solar occultation observations on the ExoMars Trace Gas Orbiter. Mars Atmosphere: Modelling and observation, F. Forget, ed, 484-487.

Villanueva, G.L., Mumma, M.J., Novak, R E., Käufl, H.U., Hartogh, P., Encrenaz, T., Smith, M.D. (2015). Strong water isotopic anomalies in the martian atmosphere: Probing current and ancient reservoirs. Science, 348(6231), 218-221.

Weiss, B.P., Vali, H., Baudenbacher, F. J., Kirschvink, J. L., Stewart, S. T., Shuster, D. L. (2002). Records of an ancient Martian magnetic field in ALH84001. Earth and Planetary Science Letters, 201(3), 449-463.

Westall, F., Loizeau, D., Foucher, F., Bost, N., Betrand, M., Vago, J., Kminek, G. (2013). Habitability on Mars from a microbial point of view. Astrobiology, 13(9), 887-897.

Yung, Y. L., Chen, P. (2015). Methane on Mars. Astrobiol Outreach, 3(125), 2332-2519.

Zimmer, C., Khurana, K. K., Kivelson, M. G. (2000). Subsurface oceans on Europa and Callisto: Constraints from Galileo magnetometer observations. Icarus, 147(2), 329-347.

Chapitre 2 : Le sondage des sous-sols par la méthode radar, application à Mars

Sommaire :

Introduction

2.1 Les caractéristiques électromagnétiques des matériaux et la propagation des ondes dans les milieux 38
2.1.1 Quelques éléments de vocabulaire 38
2.1.2 Les paramètres constitutifs du milieu 39
2.1.2.1 La permittivité électrique 39
2.1.2.2 La conductivité électrique 41
2.1.2.3 La permittivité effective relative 41
2.1.2.4 La perméabilité magnétique 42
2.1.3 Caractéristiques de quelques matériaux 43
2.1.3.1 Le cas particulier de l'eau 43
2.1.3.2 Les roches et les sols 45
2.1.4 Conditions attendues sur Mars 46
2.2 La propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux homogènes 49
2.2.1 Les équations de Maxwell 49
2.2.2 Les relations constitutives du milieu 50
2.2.3 Cas idéal de l'onde plane harmonique en milieu homogène 52
2.3 Introduction à la technique GPR 54
2.3.1 Généralités 54
2.3.1.1 Bref historique 54
2.3.1.2 Principe général 56
2.3.2 Le dimensionnement des radars 57
2.3.2.1 La profondeur de détection 58
2.3.2.2 La dynamique de l'instrument : 59
2.3.2.3 La résolution en profondeur de l'instrument 60
2.4 Les radars pour le sondage du sous-sol de Mars 60
2.4.1 L'apport des sondeurs MARSIS et SHARAD sur la connaissance de Mars 60
2.4.1.1 MARSIS (Mars Express) 61
2.4.1.2 SHARAD (MRO) 64
2.4.2 Le radar GPR WISDOM conçu pour la mission ExoMars 2018 66

Conclusion

Références

Introduction

Comme nous venons de le voir, la connaissance du sous-sol martien et de l'intérieur des corps du Système solaire devient un enjeu capital pour dévoiler leur habitabilité potentielle, présente ou passée. Le radar à pénétration de sol, ou Ground Penetrating Radar (GPR) est une technique active et non destructive de sondage des sous-sols, basée sur l'interaction des ondes électromagnétiques avec la matière. L'interaction entre une onde électromagnétique et le milieu est décrite par les équations de Maxwell et les relations constitutives du milieu en question. La première partie de ce chapitre est consacrée à la description des caractéristiques électromagnétiques des matériaux. Nous aborderons également, à partir des équations de Maxwell et des relations constitutives, la façon dont les ondes électromagnétiques se propagent dans les milieux simples. Nous verrons ensuite en quoi la technique radar est pertinente pour le sondage des sous-sols planétaires, notamment à travers les cas des instruments MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding) et SHARAD (Mars SHAllow RADar sounder), tous deux en orbite autour de Mars, qui seront rejoint par leur frère « miniature » qui atterrira sur la surface en 2018 : le GPR WISDOM.

2.1 Les caractéristiques électromagnétiques des matériaux et la propagation des ondes dans les milieux

Lorsqu'un milieu est soumis à un champ électromagnétique, il subit des redistributions de charge (phénomènes de polarisation) ainsi que des courants de charges libres (phénomènes de transport), qui dépendent directement des propriétés électromagnétiques de ce milieu, que sont la permittivité (ε), la conductivité électrique (σ) et la perméabilité magnétique (μ). Ces grandeurs constituent les propriétés intrinsèques des matériaux et gouvernent le comportement des ondes électromagnétiques lors de leur propagation.

2.1.1 Quelques éléments de vocabulaire

Les milieux naturels sont généralement complexes en termes de structures (inclusions, processus de dépôts, taille des grains qui composent les roches,..) et composition (minéralogie, géochimie,…) et sont de ce fait difficiles à décrire. Avant de discuter des paramètres qui gouvernent le comportement des matériaux en présence d'un champ, autorisons-nous la mise en place de quelques éléments de vocabulaire pour caractériser les milieux géologiques.

- ✓ La linéarité : un matériau est qualifié de linéaire si les phénomènes de polarisation induits par la présence d'un champ varient linéairement avec l'amplitude de ce champ. Dans la plupart des cas, lorsque les champs ne sont pas trop intenses, les relations entre les vecteurs champs sont linéaires Tout au long de ce manuscrit, nous considèrerons donc le milieu comme tel.

- ✓ L'homogénéité : un milieu est dit homogène si ses propriétés électromagnétiques (permittivité, conductivité, perméabilité) sont les mêmes en tout point. Un milieu

inhomogène sera donc décrit par des paramètres qui dépendent des coordonnées de l'espace (notées $\vec{r}$ dans la suite)

- ✓ Les milieux continus : l'hypothèse des milieux continus consiste à considérer des milieux dont les propriétés caractéristiques sont continues. Ceci permet entre autre d'utiliser les principes de base des mathématiques reposant sur les fonctions continues et/ou dérivables. En électromagnétisme, ceci permet de s'affranchir du caractère granulaire de la matière à l'échelle microscopique.

- ✓ L'isotropie : un matériau est isotrope lorsque ses propriétés électromagnétiques (permittivité, conductivité, perméabilité) sont indépendantes de l'orientation du champ électrique ou magnétique considérée. Lorsque le milieu est anisotrope, ces grandeurs prennent alors la forme de tenseurs.

- ✓ Les milieux dispersifs : un milieu est considéré comme dispersif en fréquence si ses propriétés électromagnétiques dépendent de la fréquence de l'onde électromagnétique. De façon générale, dans un milieu matériel, la réaction du milieu à un champ électromagnétique n'est pas instantanée. Les molécules constituant le matériau réagissent avec un certain temps de retard qui dépend de fréquence, ce qui contribue à donner un caractère dispersif au milieu. On peut toutefois considérer que sur une bande suffisamment réduite, l'effet est négligeable et que le milieu a un comportement non dispersif en fréquence.

- ✓ La transparence : un milieu homogène est dit transparent aux ondes électromagnétiques s'il transmet intégralement le rayonnement reçu (aucune perte d'énergie n'a lieu), autrement dit si aucun phénomène d'absorption n'est présent. En pratique, aucun milieu n'est parfaitement transparent sur tout le spectre électromagnétique, excepté le vide. L'eau salée en est un bon exemple : elle est relativement transparente sur la partie visible du spectre, mais extrêmement opaque dans le domaine des ondes radio.

- ✓ La stationnarité : un milieu peut-être stationnaire en temps ou/et en espace. Dans le premier cas, le milieu a pour caractéristique d'être invariant dans le temps, autrement dit la réponse du milieu à un champ électromagnétique est indépendante de l'origine des temps. Dans le cas d'une stationnarité spatiale, la réponse du milieu est indépendante de l'origine du repère spatial.

- ✓ La localité : le milieu est dit local lorsque sa réponse en un point donné ne dépend que du champ au point considéré.

2.1.2 Les paramètres constitutifs du milieu

2.1.2.1 La permittivité électrique

Lorsqu'un champ électromagnétique est appliqué à un milieu, les particules constituant le matériau tendent à changer de position d'équilibre afin de compenser son effet. La permittivité électrique ε caractérise cette redistribution locale des charges liées en présence d'un champ. L'unité de la permittivité est le Farad.m^{-1} (F.m^{-1}). On parle de potentiel de polarisation (ou polarisabilité) des molécules du milieu. En réalité, plusieurs types de polarisation (électronique, atomique, dipolaire, interfaciale), chacune agissant sur une gamme de fréquences différentes, vont contribuer à une accumulation d'énergie au sein du matériau (Vassalo, 1980). Ces réactions se produisent avec des

constantes de temps bien définies, dites temps de relaxation. Dans le cas où le champ varie trop rapidement, les particules n'ont pas le temps de se mettre en mouvement, ce qui explique la dispersivité en fréquence observée.

Lorsque l'on travaille en régime harmonique (domaine fréquentiel), on utilise la transformée de Fourier de la permittivité qui est une quantité complexe. Pour ne pas alourdir les notations, nous utiliserons la notation ε(f) pour cette quantité.

$$\varepsilon(f) = \varepsilon'(f) + j\varepsilon''(f)$$

La partie réelle de la permittivité ε', appelée aussi terme de dispersion, correspond à la mesure de la quantité d'énergie accumulée lors de la polarisation. Comme nous le verrons plus loin, c'est elle qui contrôle la vitesse de propagation des ondes dans le milieu lorsque ε'' est négligeable. Plus la partie réelle de la permittivité du milieu est grande, plus la vitesse des ondes qui se propagent dans ce milieu diminue. La partie imaginaire (Powers, 1997) est appelée terme d'absorption, elle caractérise la capacité du matériau à dissiper l'énergie sous forme de chaleur.

On introduit également la notion de permittivité relative, sans dimension, prise par rapport à la valeur correspondant au vide : $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ avec $\varepsilon_0 = 8.854\ 10^{-12}\ F.m^{-1}$.
Les différents types de polarisation en fonction de la fréquence et leur influence sur la valeur de la permittivité sont illustrés Figure 2.1-1 pour un matériau typique. Pour les fréquences les plus faibles, tous les phénomènes de polarisation s'ajoutent, alors qu'à plus hautes fréquences, les variations du champ deviennent trop rapides pour permettre une réaction des particules liées et leur mise en mouvement. Pour la plupart des matériaux, les fréquences du GPR (typiquement entre 99 MHz et 99 GHz) sont dominées par la polarisation dipolaire : les dipôles présents dans le matériau voient leur axe d'orientation s'aligner avec le champ électrique. Plusieurs modèles analytiques décrivent le comportement de relaxation diélectrique des matériaux en fonction de la fréquence, parmi lesquels les modèles semi-empiriques de Debye et Cole-Cole[1], les plus utilisés. Des lois de mélange existent, qui permettent de modéliser le comportement de milieux correspondant à des mélanges de matériaux dont on connait les caractéristiques (milieu poreux (matériau+air), milieux humides (matériau+eau)…). Enfin, précisons que la polarisabilité d'un milieu est également fonction de sa température.

[1] Le modèle de Cole-Cole décrit le comportement diélectrique de matériaux entre une valeur maximale ε_s mesurée en statique et une valeur minimale ε idéalement observée à une fréquence infinie :
$\varepsilon_r' = \varepsilon_\infty' + \frac{\varepsilon_s' - \varepsilon_\infty'}{1+(j2\pi f\tau)^{1-\alpha}}$, où τ caractérise la constante de temps du phénomène de relaxation considéré et α est un réel entre 0 et 1, qui permet de décrire différentes formes spectrales.

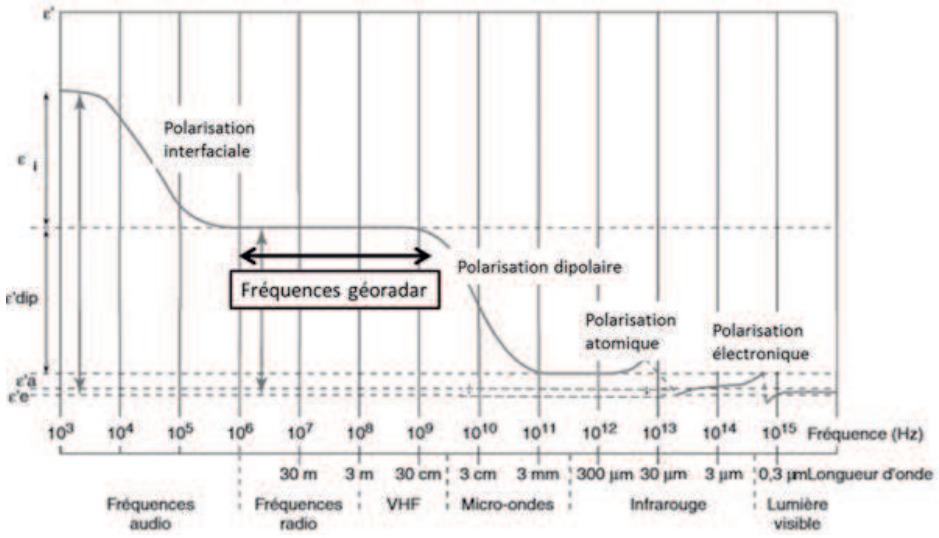


Figure 2.1-1 : Les différents types de polarisations et leur effet sur l'évolution de la partie réelle de la permittivité sur l'ensemble du spectre électromagnétique (modifié d'après Guéguen and Palciauskas, 1992).

2.1.2.2 La conductivité électrique

La conductivité électrique σ est l'aptitude d'un matériau ou d'une solution à laisser les charges électriques se déplacer librement, donc à permettre le passage d'un courant électrique. Son unité est le $S.m^{-1}$, il s'agit de l'inverse de la résistivité ρ qui s'exprime en $Ohms.m^{-1}$. Dans un matériau conducteur, le déplacement des charges décrit par la partie réelle de la conductivité provoque une accumulation d'énergie, qui induit à son tour un phénomène de polarisation qui s'ajoute à l'effet de la partie imaginaire de la permittivité. En pratique, la conductivité dans les milieux naturels est dominée par la concentration en ions présents dans le liquide interstitiel (solution entre les grains) ou adsorbés à la surface des grains. De la même manière que pour permittivité, la conductivité dans le domaine fréquentiel est complexe et s'exprime de la façon suivante :

$$\sigma(f) = \sigma'(f) + j\sigma''(f)$$

La partie réelle de la conductivité est sans nul doute le paramètre électromagnétique qui varie le plus selon le type de milieu rencontré. Elle peut être quasi nulle (10^{-20} $S.m^{-1}$) pour les bons isolants (polystyrène, verre), elle est d'environ 5.10^{-6} $S.m^{-1}$ dans l'eau distillée, augmente fortement dans l'eau de mer (présence d'ions), et grimpe à plus de 10^{12} $S.m^{-1}$ dans les métaux. De la même manière que pour la permittivité, la partie imaginaire de la conductivité électrique est souvent très faible devant sa partie réelle.

2.1.2.3 La permittivité effective relative

De par les définitions de la permittivité et de la conductivité d'un milieu, on comprend bien que, même si ces phénomènes sont bien distincts, leurs effets sur le comportement du milieu en présence d'un champ sont similaires : la partie réelle de la permittivité et la partie imaginaire de la conductivité illustrent le stockage de l'énergie, alors que les parties imaginaire de la permittivité et réelle de la

conductivité caractérisent les phénomènes de transport. Nous verrons un peu plus loin (2.2.3) que cette expression découle naturellement des équations de propagation des ondes dans les milieux homogènes.

Il est en fait impossible de distinguer les contributions dues à la permittivité et à la conductivité dans le bilan énergétique. On définit alors la permittivité complexe effective comme étant la combinaison de ces deux contributions et qui, en régime harmonique de fréquence f, prend la forme suivante :

$$\varepsilon_c(f) = \left(\varepsilon'(f) + \frac{\sigma''(f)}{\omega(f)}\right) + j\left(\varepsilon''(f) + \frac{\sigma'(f)}{\omega(f)}\right) = \varepsilon_c'(f) + j\varepsilon_c''(f)$$

On redéfinit également la permittivité relative, de la même manière que précédemment :

$$\varepsilon_{cr}(f) = \frac{\varepsilon_c(f)}{\varepsilon_0}$$

En pratique, le terme lié aux pertes (partie imaginaire de la permittivité) est souvent faible en comparaison de la partie réelle. On utilise une grandeur δ que l'on nomme l'angle de perte et qui s'exprime par le biais de sa tangente, on parle alors de tangente de perte :

$$tan(\delta(f)) = \frac{\varepsilon_c{}''(f)}{\varepsilon_c{}'(f)} = \frac{\varepsilon_{cr}{}''(f)}{\varepsilon_{cr}{}'(f)}$$

$\tan(\delta)$, varie généralement entre 10^{-6} et 10^{-1} pour des matériaux géologiques typiques aux fréquences géoradar. Plus cette quantité sera faible, plus les ondes électromagnétiques pénètreront dans le sous-sol.

Dans la suite de ce manuscrit, pour des raisons de facilité de lecture, nous appellerons permittivité et noterons $\varepsilon(f)$ cette dernière grandeur $\varepsilon_{cr}(f)$ (permittivité effective relative) qui réunit les effets de polarisation et de conduction. La constante diélectrique représente la partie réelle de cette nouvelle définition de la permittivité (ε'), et la conductivité sa partie imaginaire (σ').

2.1.2.4 La perméabilité magnétique

Elle correspond à l'énergie stockée ou perdue dans le matériau suite aux phénomènes d'induction magnétique, à l'instar de ce qu'était la permittivité vis à vis du déplacement de charge. Elle caractérise donc la capacité du matériau à modifier les lignes de flux magnétique en présence d'une excitation. Son unité est le Henry.m^{-1}, et, tout comme les autres grandeurs caractérisant le milieu, elle est de forme complexe pour la prise en compte du stockage de l'énergie d'une part, et des pertes par dissipation d'autre part. Elle peut également dépendre de la fréquence dans les milieux dispersifs. Son écriture est de la forme :

$$\mu(f) = \mu'(f) + j\mu''(f)$$

De la même manière que pour la permittivité, on définit la perméabilité relative par rapport à celle du vide comme : $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$, avec $\mu_0 = 4\pi\ 10^{-7} H.m^{-1}$.

On distingue essentiellement trois classes de matériaux magnétiques : les matériaux diamagnétiques (argent, cuivre, eau, or, plomb, zinc...), paramagnétiques (air, aluminium, magnésium, platine...) et ferromagnétiques (cobalt, fer, nickel...). La valeur de la perméabilité traduit l'appartenance d'un

matériau à l'une (ou plusieurs) de ces classes. Les matériaux diamagnétiques et paramagnétiques présentent des valeurs de perméabilité relative proches de 1, donc des valeurs de perméabilité pratiquement égale à celle du vide. Les milieux diamagnétiques vérifient la condition $\mu_r \leq 1$ et les matériaux paramagnétiques la relation $\mu_r \geq 1$ Les matériaux ferromagnétiques sont les plus sensibles à l'excitation magnétique, ils vérifient la condition $\mu_r \gg 1$.

En pratique, la grande majorité des matériaux géologiques (autres que les métaux) ne réagissent que très faiblement à une excitation magnétique et présentent de faibles contrastes, ce qui n'est pas le cas pour leurs propriétés électriques (permittivité, conductivité). Ainsi la perméabilité relative μ_r sera prise égale à 1 pour la plupart des matériaux géologiques.

2.1.3 Caractéristiques de quelques matériaux

2.1.3.1 Le cas particulier de l'eau

Les caractéristiques électromagnétiques de l'eau varient avec la température, la fréquence (elles sont cependant constantes sur la gamme de fréquences du radar), ainsi qu'avec le taux d'ions présents (son taux de salinité notamment). L'eau possède, en outre, des propriétés très différentes selon son état physique. La constante diélectrique de la glace pure pour les fréquences radar est constante, égale à 3.2 (Petrenko and Whitworth, 1999), tandis que pour l'eau liquide, elle se situe aux alentours de 80, ce qui fait d'une interface air/eau liquide un excellent réflecteur. La glace d'eau est transparente pour les fréquences du géoradar ($\sigma' \cong 0$ S.m^{-1}) (King and Smith, 1981), ce qui en fait une cible de sondage populaire ; les très faibles atténuations conduisent en effet à une grande profondeur de pénétration des ondes. Cependant, sous sa forme liquide, l'eau peut engendrer des pertes importantes (Figure 2.1-2) : σ' peut prendre des valeurs variables comprises entre 10^{-5} S.m^{-1} et 10^{2} S.m^{-1} en fonction de l'état de pureté de l'eau (la salinité jouant alors un rôle essentiel sur la conductivité). Ces paramètres sont encore différents pour la neige, où l'on trouve dans la littérature des valeurs pour ε' comprises entre 1.7 et 3.2, dépendant du taux de compaction ou d'humidité (Figure 2.1-2), et des conductivités variant de 0 S.m^{-1} à 0.3 S.m^{-1} (Stogryn, 1971 ; Bradford et al., 2009).

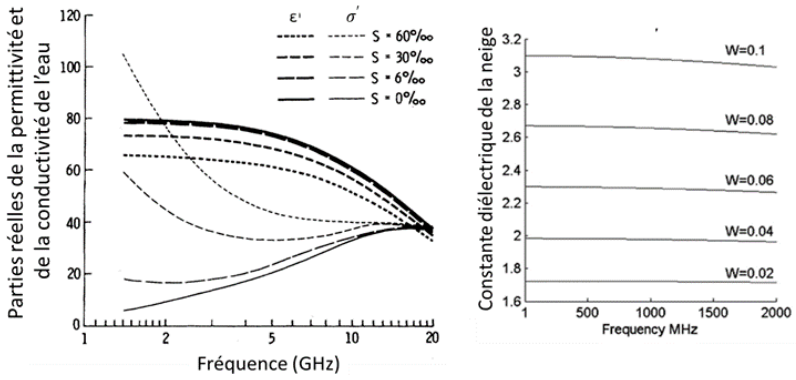


Figure 2.1-2 : Gauche : parties réelles de la permittivité et de la conductivité de l'eau à 20°C en fonction de la fréquence pour différents taux de salinité S (Source : Stogryn, 1971) ; Droite : partie réelle de la permittivité de la neige pour différent taux d'humidité W (Source : Bradford et al., 2009)

La Figure 2.1-3 regroupe les valeurs de permittivité (constante diélectrique et partie imaginaire) pour l'eau liquide et la glace en fonction de la fréquence d'après le modèle de Debye. Les gammes de fréquences des radars dédiés à l'exploration de Mars sont également indiquées. SHARAD, MARSIS et WISDOM ont été conçus pour étudier le sous-sol sur une grande gamme de fréquences (du MHz au GHz) et sont de ce fait complémentaires, même si confinés au sein de la bande de fréquences des radars : comme l'illustre la figure ci-dessous, la glace aura par exemple exactement les mêmes propriétés qu'elle soit vue par MARSIS ou par WISDOM, à savoir une permittivité relative réelle de 3.2, et une partie imaginaire quasi nulle. Si les radars ne peuvent généralement pas, via l'estimation de paramètres électromagnétiques, permettre d'identifier sans ambiguïté un matériau, ils peuvent venir compléter ou confirmer une information obtenue par un autre instrument, comme le fera ADRON (Nikiforov et al., 2013) dans le cadre de la mission ExoMars 2018 en mesurant la quantité d'hydrogène présente dans le premier mètre du sous-sol.

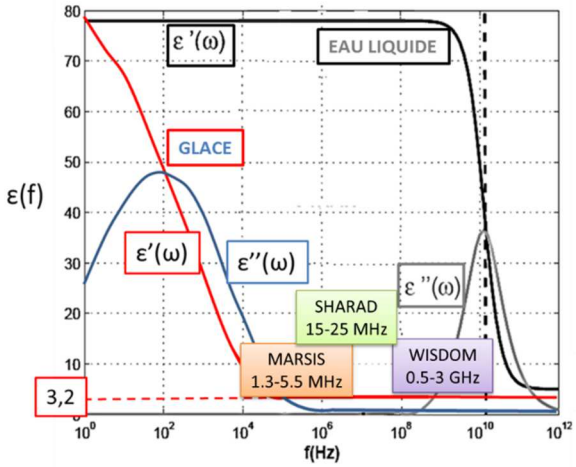


Figure 2.1-3 : Modèle de Debye[2] (Debye, 1929) pour les parties réelle et imaginaire de la permittivité relative pour l'eau liquide pure à 25°C et la glace à -15°C, en fonction de la fréquence. Les fréquences géoradar couvrent la gamme de quelques MHz à quelques GHz.

La valeur de la constante diélectrique augmente avec le taux d'impureté dans la glace, mais diminue dans le cas de l'eau liquide : on assiste à un mélange entre les impuretés, qui sont généralement des poussières issues de l'érosion de roches volcaniques ou sédimentaires, et le matériau principal. On a alors pour la glace un assemblage avec un composé de constante diélectrique plus élevée, ce qui a pour effet d'augmenter la valeur moyenne du matériau final, tandis que pour l'eau liquide, le mélange se fait avec un composé de plus faible permittivité. On obtient alors une moyenne inférieure à celle de l'eau liquide pure. En ce qui concerne la glace, sa constante diélectrique est d'abord influencée par la présence

[2] Le modèle de Debye est un cas particulier du modèle de Cole-Cole, en prenant $\alpha = 0$: $\varepsilon_r' = \varepsilon_\infty' + \frac{\varepsilon_s' - \varepsilon_\infty'}{1 + j\omega\tau}$.

de bulles d'air ou d'eau liquide. On retrouve ici la notion de loi de mélange, qui tente de prédire les caractéristiques des matériaux à partir des propriétés de chacun des constituants.

2.1.3.2 Les roches et les sols

Dans les milieux naturels, les valeurs de la constante diélectrique varient entre 1 pour l'air, et environ 80 pour l'eau pure comme nous venons de le voir. Cette grandeur est de ce fait très sensible au taux d'humidité dans le milieu, ainsi qu'à la porosité (ou la densité) des matériaux, comme illustré sur la Figure 2.1-4. On fait alors appel à des modèles semi-empiriques basés sur des lois de mélange qui permettent d'évaluer de façon très approchée la permittivité d'un milieu constitué de différentes phases. La conductivité, quant à elle, est essentiellement gouvernée par la teneur en sels et en argile du milieu (l'argile est en effet moins favorable à la propagation des ondes radars que des matériaux de type granit ou basalte).

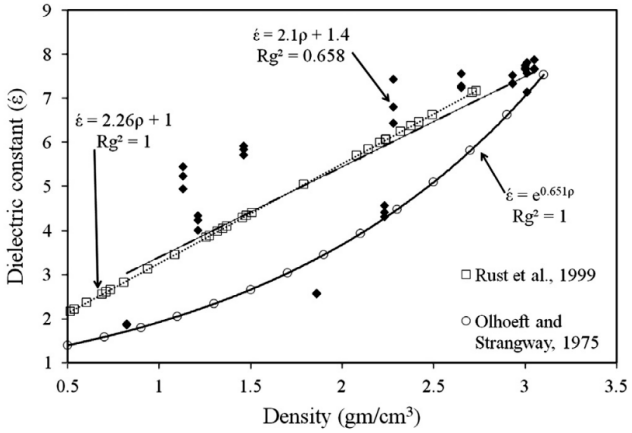


Figure 2.1-4 : Constante diélectrique d'échantillons de roches volcaniques en fonction du coefficient de dureté (tiré de ElShafie and Heggy, 2012, adapté de Rust et al., 1999 et Olhoeft and Strangway, 1975).

Quelques valeurs de constantes diélectriques sont regroupées dans le Tableau 2.1-1 pour une fréquence centrale de 100 MHz.

Tableau 2.1-1 : Caractéristiques de quelques matériaux géologiques typiques à 100 MHz (tiré de Le Gall, 2007)

Matériaux	ε'	σ' (S/m)
Air	1	0
Eau pure	80	10^{-5}
Eau de mer	80	30
Sable sec	$3-5$	10^{-5}
Sable saturé en eau	$20-30$	$10^{-4}-10^{-2}$
Calcaire	$4-8$	$5\,10^{-4}-2\,10^{-3}$
Schistes	$5-15$	$10^{-3}-10^{-1}$
Limons	$5-30$	$10^{-3}-10^{-1}$
Argiles sèche	$2-6$	$10^{-3}-10^{-1}$
Argiles humide	$15-40$	$10^{-1}-1$
Granit sec	5	$10^{-8}-10^{-6}$
Granit humide	7	$10^{-3}-10^{-2}$
Sel sec	$5-6$	$10^{-5}-10^{-2}$
Glace	$3-4$	10^{-5}
Permafrost	$4-8$	$10^{-5}-10^{-2}$

2.1.4 Conditions attendues sur Mars

En surface

Les performances des instruments dont le principe est basé sur l'interaction des ondes électromagnétiques avec la matière pour sonder les sous-sols sont liées aux paramètres constitutifs des différentes couches traversées par les ondes. Comme nous venons de le voir, le sous-sol de Mars a été très peu exploré jusqu'à présent. Nous dédions d'ailleurs une partie de ce Chapitre (2.4.1) aux seuls instruments actuellement en vol capables de sonder son sous-sol, à savoir les radars MARSIS et SHARAD. La minéralogie est cependant bien connue en surface, notamment grâce au spectromètre OMEGA. Globalement, la couleur orangée de Mars témoigne de la présence d'oxydes de fer (hématite, maghémite..), plus ou moins hydratés, qui recouvrent la totalité de la planète sous la forme d'une couche de poussières de quelques centimètres à quelques mètres d'épaisseur. Les terrains les plus vieux situés au Sud ont été identifiés comme étant de nature basaltique, alors que les plaines du Nord seraient principalement composées d'andésite, ce qui témoigne de deux types de volcanisme ayant eu lieu à des époques différentes (Bandfield et al., 2000 ; Christensen et al., 2000 ; Alberti et al., 2012). En ce qui concerne les pôles, des dépôts de glace d'eau et de glace de CO_2 sont présents en quantité, comme nous allons le voir à travers les résultats de MARSIS et SHARAD. Les occurrences de minéraux non hydratés dominent, cependant la cartographie globale des minéraux hydratés (différents types d'argile, de l'hématite, des minéraux ferromagnétiques) réalisée par Poulet et al. (2007) a mis en évidence des dizaines de sites ayant subi une altération aqueuse, dont 4 régions très étendues, information confirmée ensuite par de nombreuses études (Valles Marineris (Roach et al., 2010), Meridiani Planum (Poulet et al., 2008), Mawrth Vallis (Loizeau et al., 2007) et Nili Fossae (Mangold et al., 2007)). L'altération de ces minéraux aurait eu lieu principalement durant la première partie du Noachien. La présence de ces matériaux argileux, de sels, carbonates ou de roches magnétiques peuvent être à l'origine de fortes atténuations pour les fréquences radar. Les valeurs mesurées grâce aux instruments MARSIS et SHARAD donnent des constantes diélectriques en surface comprises entre 2.5 et 10 (Figure 2.1-5), et des tangentes de pertes relativement élevées, de l'ordre de 0.1 (Campbell et al., 2008, Stillman and Grimm, 2011).

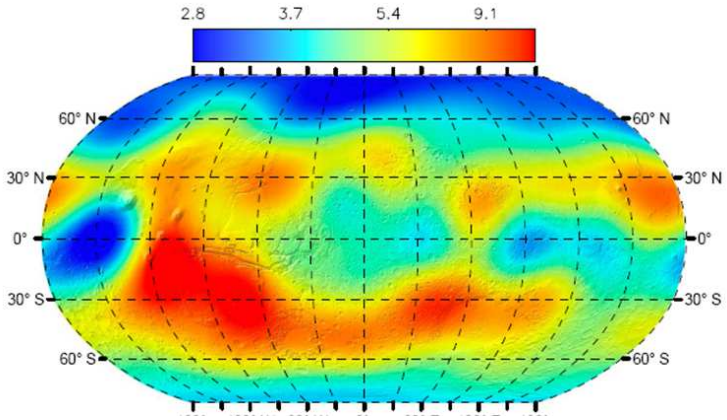


Figure 2.1-5 : Carte de la permittivité réelle à la surface de Mars, obtenue à partir des données MARSIS. Source : Mouginot et al., 2010.

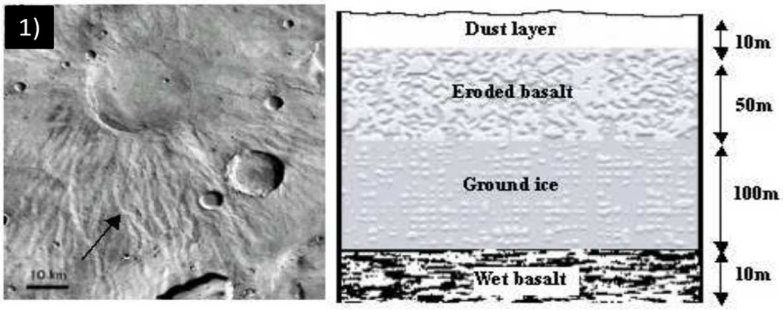
Sur certains terrains volcaniques présentant de forts taux d'oxyde de fer, les prédictions à 200 MHz donnent des valeurs proches de 10 dB/m (Heggy et al., 2006). Enfin, la perméabilité des roches étant en grande partie gouvernée par la présence de matériaux ferromagnétiques (Olhoeft and Capron, 1994), on ne peut pas toujours considérer que la couche de poussières a une valeur de perméabilité réelle égale à 1, comme c'est le cas pour de nombreux matériaux. Des mesures sur des analogues martiens prédisent des valeurs entre 1 et 1.6 pour μ'_r et entre 1.10^{-2} et 5.10^{-2} pour μ''_r (Stillman and Olhoeft, 2008).
Il est en effet possible d'effectuer des mesures en laboratoire sur des échantillons terrestres analogues à ceux présents sur la surface martienne pour déterminer leurs propriétés géoélectriques probables (Heggy et al., 2001 ; Stillman and Olhoeft, 2008 ; Petinelli et al., 2007 ; Leuschen, 1999). En effet, les seuls échantillons d'origine martienne disponibles sont des fragments de météorites qui ont subi de nombreuses altérations au cours de leur transport. Pour obtenir des échantillons représentatifs, il faudra attendre la mission prévue par la NASA pour la collecte puis le retour de fragments de roches. La confrontation des résultats issus de l'analyse des données géoradar avec ces mesures effectuées en laboratoire peut venir en appui à l'interprétation pour la caractérisation électromagnétique des milieux géologiques, et de nombreux échantillons de roches diverses et variées ont d'ores et déjà été caractérisés pour différentes gammes de fréquences (Bost et al., 2013).
Dans tous les cas, les mesures de paramètres diélectriques en laboratoire doivent être maniées avec précautions, les échantillons doivent en effet très souvent être réduits en poudre pour leur caractérisation, ce qui a forcément une influence importante sur leurs propriétés électromagnétiques (comme nous l'avons vu, la densité des matériaux influence très fortement la valeur de la constante diélectrique). Ainsi, la comparaison entre les résultats issus de méthodes non destructives comme le GPR et les mesures en laboratoire doit au maximum rester indicative.

Dans le sous-sol

La composition du sous-sol, quant à elle, ne peut être prédite que par des modèles, et ceux existants s'intéressent à des échelles spatiales importantes, ne faisant que peu de cas du régolithe (les premiers mètres de profondeur sont souvent assimilés à une couche homogène de poussières (Clifford, 1993; Heggy et al., 2003). On peut cependant étudier certaines figures morphologiques à la surface et analyser la stratigraphie exposée le long des parois des cratères (Quantin et al., 2012 ; Ciarletti et al., 2015) , ce qui permet de contraindre la composition et la géométrie du proche sous-sol (Figure 2.1-6).

Figure 2.1-6 : Image HIRISE révélant la stratigraphie le long des bords d'un cratère. Source : NASA/JPL

Un exemple de modèle géoélectrique du sous-sol martien proposé par Heggy et al. (2003) est présenté Figure 2.1-7, avec les propriétés électromagnétiques des différentes couches pour les fréquences centrales de MARSIS et SHARAD. Le modèle élaboré tente de reconstituer un terrain à fort flux géothermique, et trois autres modèles reproduisant une vallée de débâcle, un terrain caractéristique des plaines du Nord et un environnement évaporitique (sédiments formés par dessiccation au cours de l'assèchement d'une mer ou d'un lac) ont été mis au point. Les paramètres électromagnétiques ont été déduits de l'analyse électrique d'un grand nombre d'analogues terrestres. Les caractéristiques de la première couche en particulier, constituée de sédiments secs, ont été estimées à partir de mesures réalisées sur des échantillons lunaires (Olhoeft et al., 1974) et de lois de mélange reliant la permittivité à la densité (Olhoeft, 1992). Les couches sont supposées homogènes et parallèles en accord avec la stratigraphie observée le long des parois des cratères de Valles Marineris (Mc Ewen et al., 1999). La première couche de poussières s'étend sur quelques mètres de profondeur et est composée de poudre de basalte sec mélangée à de l'hématite et de la magnétite. Un tel mélange devrait avoir une constante diélectrique importante, mais la porosité très élevée de cette première couche (50%) induit une diminution de sa valeur. Ces modèles indiquent que les valeurs probables de constante diélectrique se situent entre 2.7 pour les matériaux secs et poreux et plus de 30 pour les milieux humides et denses. Les valeurs de conductivité, perméabilité et partie imaginaire de la permittivité sont relativement élevées, impliquant de fortes atténuations lors de la propagation des ondes électromagnétiques. Dans tous ces modèles, la première couche est considérée homogène sur une dizaine de mètres de profondeur, ce qui n'indique pas grand-chose au niveau des profondeurs de sondage visées par WISDOM, qui sont plus faibles (3 m à 5 m). L'interprétation n'en sera que d'autant plus délicate étant donné qu'aucun *a priori* n'est disponible pour cette gamme de profondeurs. L'instrument WISDOM représente ainsi la première opportunité pour l'observation plus précise du contexte géologique en proche sous-sol.



	ε'		ε''		σ 10⁻⁴ [S/m]		μ	
	2 MHz	20 MHz	2 MHz	20 MHz	2 MHz	20 MHz	2 MHz	20 MHz
Dust layer	3	2.7	0.25	0.22	28	240	1.5	1.1
Eroded basalt	8	7.2	0.5	0.45	56	500	1	1
Ground ice	7	6.3	0.1	0.0 7	5	12	1	1
Wet basalt	36	32	12	10.5	1344	11724	1	1

Figure 2.1-7 : Exemple de modèle géoélectrique d'un sous-sol martien (Heggy et al., 2003)

2.2 La propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux homogènes

La propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu ainsi que les pertes d'énergie associées peuvent être décrites à l'aide du formalisme mathématique développé par Maxwell (Maxwell, 1864) et les relations constitutives du milieu, qui caractérisent l'interaction du champ électromagnétique avec la matière. La propagation des ondes électromagnétiques dans un matériau, outre les effets purement géométriques que nous décrirons un peu plus bas, est gouvernée par les 3 paramètres constitutifs décrits précédemment.

Nous faisons l'hypothèse des milieux continus, nécessaire pour l'utilisation de la théorie des champs : bien que la matière soit constituée d'un ensemble discontinu d'atomes et de charges, on s'intéresse aux interactions électromagnétiques d'un point de vue macroscopique, on considère donc que les propriétés au sein d'un matériau évoluent de manière continue.

2.2.1 Les équations de Maxwell

Les équations de Maxwell constituent la base de la formalisation de l'électromagnétisme. Elles relient les paramètres électriques et magnétiques à leur source. Deux champs vectoriels sont définis, le champ électrique $\vec{E}$ et le champ magnétique $\vec{B}$. Ce sont eux qui sont à l'origine des mouvements des charges dans le milieu comme l'atteste l'expression de la force de Lorenz qui s'applique à une charge q en mouvement à la vitesse $\vec{v}$.

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}\right) \tag{2.1}$$

L'interaction de ces champs avec la matière est traduite à l'aide des deux vecteurs d'induction : l'induction électrique $\vec{D}$ (exprimée en $C.m^{-2}$), qui caractérise le déplacement électrique, et l'induction magnétique $\vec{H}$ (exprimée en $A.m^{-1}$), qui sont elles-mêmes dépendantes des caractéristiques du milieu considéré. Toutes ces grandeurs dépendent à la fois des variables d'espace $\vec{r}$ et de temps t (ou de

fréquence f en régime harmonique). Pour simplifier la lecture des équations, nous éviterons cependant de le préciser dans leur formulation.

L'équation de Maxwell-Faraday : $$\overrightarrow{rot}\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

La loi de Gauss électrique : $$div\,\vec{D} = \rho_s \quad (2.3)$$

L'équation de Maxwell-Ampère : $$\overrightarrow{rot}\,\vec{H} = \overrightarrow{J_s} + \overrightarrow{J_c} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

La loi de Gauss magnétique : $$div\,\vec{B} = 0 \quad (2.5)$$

Avec :

$\vec{E}$ le champ électrique (V.m^{-1}), $\vec{D}$ l'induction électrique (C.m^{-2}), $\overrightarrow{H}$ l'induction magnétique (A.m^{-1}), $\vec{B}$ le champ magnétique (T), ρ_s la densité volumique de charge, $\overrightarrow{J_s}$ la densité de courant superficielle et $\overrightarrow{J_c}$ la densité de courant de conduction (qui décrit le mouvement des charges libres) (A.m^{-2}).

Ces équations traduisent le fait que la variation temporelle d'un champ magnétique génère un champ électrique. Inversement, les sources de champ magnétique sont les courants électriques et la variation d'un champ électrique, comme l'illustre l'équation de Maxwell-Ampère. Enfin, la loi de Gauss magnétique exprime l'idée qu'une source ponctuelle ne peut être à l'origine d'un champ magnétique, autrement dit qu'il n'existe pas de monopôle magnétique.

Les termes ρ_s et $\overrightarrow{J_s}$ constituent les sources des champs électrique et magnétique et ne sont pas considérés lorsque l'on s'intéresse à un problème dit de propagation dans un milieu.

2.2.2 Les relations constitutives du milieu

Les relations constitutives décrivent l'interaction entre le champ électromagnétique et le milieu continu, en faisant intervenir les trois paramètres constitutifs que sont la permittivité électrique ε, la conductivité σ et la perméabilité magnétique μ. On se place dans le cadre d'un milieu continu et linéaire (2.1.1). Lorsqu'un matériau donné est soumis à un champ électromagnétique, l'induction électrique résultante peut être reliée au champ électrique grâce à la permittivité. De la même façon, on peut relier l'induction magnétique au champ magnétique appliqué à l'aide de la perméabilité. Les phénomènes physiques liés au transport des perturbations font qu'en toute généralité, ces relations constitutives lorsqu'elles ne sont ni locales, ni instantanées prennent la forme suivante :

$$\vec{D}(\vec{r},t) = \iiint_{r'} \int_{t'} \varepsilon(\vec{r},\vec{r}',t,t')\,\vec{E}(\vec{r}',t')\,d\vec{r}'dt' \quad (2.6)$$

$$\vec{H}(\vec{r},t) = \iiint_{r'} \int_{t'} 1/\mu(\vec{r},\vec{r}',t,t')\,\vec{B}(\vec{r}',t')\,d\vec{r}'dt' \quad (2.7)$$

Lorsqu'on se place dans un milieu local, le vecteur induction $\vec{D}$ au point $\vec{r}$ ne dépend que du champ $\vec{E}$ au même point $\vec{r}$. Si l'on ajoute la condition d'invariance dans le temps, les champs ne dépendent alors plus de l'origine des temps et les expressions ci-dessous deviennent alors des produits de convolution :

$$\vec{D}(\vec{r},t) = \int_{t'} \varepsilon(\vec{r},t-t')\,\vec{E}(\vec{r},t')\,dt' \tag{2.8}$$

$$\vec{H}(\vec{r},t) = \int_{t'} 1/\mu(\vec{r},t-t')\,\vec{B}(\vec{r},t')\,dt' \tag{2.9}$$

Si l'on tient compte de la causalité[3], on sait que la valeur de $\vec{D}$ à l'instant t ne peut dépendre que des valeurs de $\vec{E}$ à des instants t' antérieurs à t, il en est de même pour $\vec{H}$ et $\vec{B}$, soit

$$\vec{D}(\vec{r},t) = \int_{t'\leq t} \varepsilon(\vec{r},t-t')\,\vec{E}(\vec{r},t')\,dt' \tag{2.10}$$

$$\vec{H}(\vec{r},t) = \int_{t'\leq t} 1/\mu(\vec{r},t-t')\,\vec{B}(\vec{r},t')\,dt' \tag{2.11}$$

On ajoute à ces deux équations la loi d'Ohm, qui, dans la plupart des milieux, se simplifie pour donner une simple relation de proportionnalité entre la densité de courant de conduction $\overrightarrow{J_c}(\vec{r},t)$ et le champ électrique $\vec{E}(\vec{r},t)$:

$$\overrightarrow{J_c}(\vec{r},t) = \int_{t'\leq t} \sigma(\vec{r},t-t')\,\vec{E}(\vec{r},t')\,dt' \tag{2.12}$$

Dans le domaine fréquentiel, le produit de convolution devient un produit simple, et les relations se simplifient pour donner :

$$\underline{\vec{D}}(\vec{r},f) = \underline{\varepsilon(\vec{r},f)}\,\underline{\vec{E}}(\vec{r},f) \tag{2.13}$$

$$\underline{\vec{B}}(\vec{r},f) = \underline{\mu(\vec{r},f)}\,\underline{\vec{H}}(\vec{r},f) \tag{2.14}$$

$$\underline{\overrightarrow{J_c}}(\vec{r},f) = \underline{\sigma(\vec{r},f)}\,\underline{\vec{E}}(\vec{r},f) \tag{2.15}$$

Les quantités vectorielles soulignées correspondent aux transformées de Fourier des champs vectoriels temporels et sont *a priori* des vecteurs complexes.

Dans le cas particulier d'un milieu homogène, sans termes de source, la combinaison des équations de Maxwell et des relations constitutives dans le domaine fréquentiel permet d'aboutir à l'équation des ondes :

$$\nabla^2\underline{\vec{E}} + \mu(f)\omega^2\left(\varepsilon(f) - j\,{}^{\sigma(f)}/_{\omega}\right)\underline{\vec{E}} = \vec{0} \tag{2.16}$$

[3] Le principe de causalité peut se résumer par « *l'effet ne peut précéder la cause* ».

La même équation vectorielle est valable pour le champ $\vec{H}$, en le substituant au champ $\vec{E}$.

En réintroduisant la notion de permittivité effective relative (2.1.2.3) qui découle de l'expression des parties réelles et imaginaires des paramètres constitutifs dans l'équation de propagation en régime harmonique, l'équation (2.16) devient :

$$\nabla^2 \vec{E} + \mu(f)\omega^2 \varepsilon_c(f) \vec{E} = \vec{0} \tag{2.17}$$

2.2.3 Cas idéal de l'onde plane harmonique en milieu homogène

Parmi l'infinité de solutions de l'équation de propagation possibles, la solution onde plane harmonique est intéressante car elle permet par combinaisons linéaires de modéliser une onde de n'importe quelle structure spatiale ou temporelle. Nous négligerons les ondes évanescentes (qui s'atténuent exponentiellement dans la direction orthogonale à la direction de propagation de l'onde) pour nous concentrer sur les ondes propagatives.

Pour illustrer les phénomènes mis en jeu lors de la propagation des ondes dans un milieu, nous nous intéressons par exemple à une onde plane harmonique propagative de vecteur de propagation $\vec{k}$. En notation complexe, cette onde s'écrit

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \overrightarrow{E_m} e^{j(\omega t - \vec{k}\vec{r})} \tag{2.18}$$

où ω est la pulsation $\omega = 2\pi f$.

Dans le cas d'une onde plane et harmonique, $\overrightarrow{E_m}$ contient les informations de phases et amplitude des composantes du champ électrique et notamment l'information de polarisation de l'onde.

Cette solution injectée dans l'équation des ondes permet de montrer que le vecteur $\vec{k}$ est complexe, soit $\vec{k} = \overrightarrow{k'} + j\overrightarrow{k''}$ et de relier les modules des parties réelle et imaginaire à la pulsation et aux paramètres caractéristiques du milieu. Lorsque le milieu est à perte ($\varepsilon_c{}''(f) \neq 0$), $\overrightarrow{k'}$ et $\overrightarrow{k''}$ ne sont pas orthogonaux. Comme précisé plus haut, nous étudions le cas où $\overrightarrow{k'}$ et $\overrightarrow{k''}$ sont colinéaires. Dans ce cas,

$$k' = \frac{\omega}{c}\sqrt{\mu_r \varepsilon'}\left(\frac{\sqrt{1+\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2}+1}{2}\right)^{1/2}; \qquad k'' = \frac{\omega}{c}\sqrt{\mu_r \varepsilon'}\left(\frac{\sqrt{1+\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2}-1}{2}\right)^{1/2} \tag{2.19}$$

L'expression du vecteur champ électrique devient alors :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \overrightarrow{E_m} e^{j(\omega t - \overrightarrow{k'}\vec{r})} e^{-\overrightarrow{k''}\vec{r}} \tag{2.20}$$

On voit que le terme de propagation est déterminé par $\overrightarrow{k'}$ alors que $\overrightarrow{k''}$ est responsable d'une décroissance exponentielle de l'amplitude de l'onde.

On peut définir la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu, donnée par la relation :

$$v = \frac{\omega}{k} \tag{2.21}$$

Si la partie imaginaire de la permittivité électrique effective (liée aux phénomènes d'absorption) est faible devant sa partie réelle (ε"<< ε '), ce qui est très généralement le cas hormis pour les matériaux très conducteurs, on peut alors simplifier les formulations précédentes :

$$k' \cong \frac{\omega}{c}\sqrt{\mu_r \varepsilon'} \text{ et } k" \cong \frac{\omega}{2c}\frac{\varepsilon"}{\sqrt{\varepsilon'}} \cong 0 \tag{2.22}$$

Ceci donne finalement une formulation simple pour la vitesse de propagation de l'onde directement dépendante de ε' (lorsque $\varepsilon" \ll \varepsilon'$) :

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon'}} \tag{2.23}$$

En considérant un milieu non magnétique avec $\mu_r = 1$, on obtient :

$$v \cong \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}} = \frac{c}{n} \tag{2.24}$$

où n est l'indice de réfraction du milieu et ε' la partie réelle de la permittivité effective relative du milieu (notre fameuse constante diélectrique) : $n^2 = \varepsilon'$.

L'impact de la tangente de perte sur l'atténuation d'une onde se propageant dans un milieu naturel homogène est illustré

Figure 2.2-1, pour 3 fréquences de 10 MHz à 1 GHz. On considère que l'atténuation augmente linéairement avec la fréquence (Grimm et al., 2008).

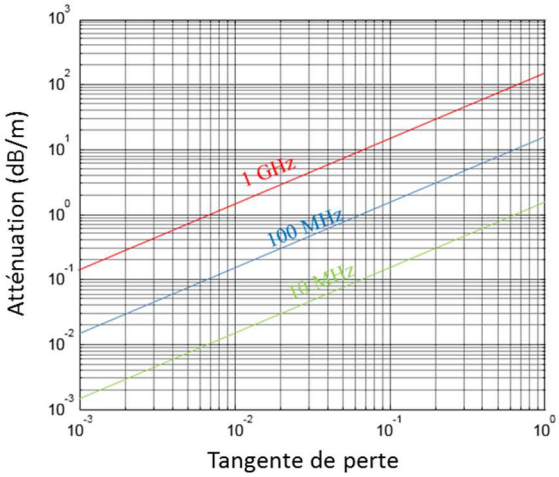


Figure 2.2-1 : Atténuation d'une onde se propageant dans un milieu homogène en fonction de sa tangente de perte pour 3 fréquences centrales (1 GHz, 100 MHz, 10 MHz)

Dans le cas d'une onde se propageant à partir d'un point source, comme pour le radar, on observe de surcroît la divergence géométrique du faisceau à partir du point source, qui conduit en champ lointain à une atténuation de l'onde inversement proportionnelle à la distance à la source.

Les milieux naturels sont en général plus complexes que le cas idéal homogène que nous venons de décrire. Au cours de son trajet dans un milieu réel non homogène, outre les phénomènes d'atténuation et de divergence du faisceau qui sont présents même dans un milieu homogène, la propagation de l'onde va être modifiée par des phénomènes physiques liés au fait que le milieu est hétérogène. Le principe de base du fonctionnement du radar repose sur l'exploitation de ces interactions onde/milieu non homogène. Les effets macroscopiques de terrain, tant au niveau topographique (rugosité) qu'au niveau des propriétés électriques des matériaux (hétérogénéités), sont directement dépendants de la longueur d'onde du rayon incident : lorsque les hétérogénéités sont très petites devant la longueur d'onde, le milieu peut être considéré comme homogène. Lorsqu'elles sont au contraire très grandes devant la longueur d'onde, le trajet de l'onde suit les lois de la réflexion. On observe alors des phénomènes de réflexion et de réfraction au passage des dioptres[4]. Enfin, si les hétérogénéités du milieu sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, on observe des phénomènes de diffusion volumique qui engendrent des pertes.

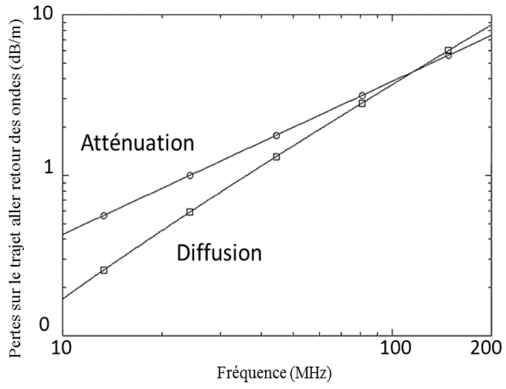


Figure 2.2-2 : Pertes estimées (par atténuation et diffusion) en fonction de la fréquence de sondage pour des terrains volcaniques martiens à partir de mesures effectuées sur des analogues terrestres (Heggy et al., 2006). On voit que selon la fréquence, la diffusion peut avoir un impact prépondérant sur les pertes au sein du milieu.

Tous ces effets s'accompagnent potentiellement de changements de polarisation du vecteur champ électrique. Nous illustrerons certains de ces phénomènes par modélisation dans le Chapitre 4 de ce manuscrit, mais maintenant que nous avons décrit les tenants et les aboutissants de la propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux naturels, intéressons-nous à cette fameuse technique GPR.

2.3 Introduction à la technique GPR

2.3.1 Généralités

2.3.1.1 Bref historique

Le radar à pénétration de sol, ou GPR, est un outil de prospection géophysique conçu pour sonder le sous-sol en utilisant des impulsions électromagnétiques dans des longueurs d'ondes d'ordres métrique

[4] En radar et en géophysique en général, on parlera d'interface pour qualifier la surface séparant deux milieux d'indices de réfraction (ou de valeurs de permittivité réelle) différents

à décamétrique, soit la gamme de fréquence de quelques MHz à quelques GHz. Le GPR utilise la propagation des ondes électromagnétiques à travers les milieux géologiques et la réflexion partielle de ces ondes pour détecter, localiser et cartographier les changements des propriétés électriques et magnétiques du sous-sol. Cette technique géophysique est semblable à la méthode sismique active (ondes électromagnétiques pour le GPR contre ondes mécaniques pour la sismique), mais elle présente une résolution supérieure à cette dernière, qui elle, est adaptée au sondage de la structure interne des corps planétaire à grande échelle, à l'instar de la mission Insight à destination de Mars. Le radar présente de nombreux avantages pour la prospection des sols : il est non destructif, adaptable aux environnements que l'on souhaite sonder (la conception des instruments se fait en accord avec les objectifs de résolution et de profondeur à atteindre) et sa mise en œuvre est relativement simple, ce qui lui a conféré un rang de choix dans de nombreuses applications, comme le génie civil (Grandjean et al., 2000), le sondage des glaciers (Descloitres et al., 1999), l'hydrogéologie, ou encore l'archéologie (Dabas et al., 1999). Il a connu depuis une quarantaine d'années une évolution considérable. Avec le développement de la technique et de l'informatique, l'utilisation des radars est devenue courante dans les années 70. On voit ainsi leurs applications se diversifier, et, en 1972, les premiers géoradars dédiés à l'exploration du sous-sol lunaire, SEP (Surface Electrical Properties Experiment) et ASLE (Apollo 17 Lunar and Sounder Experiment) opérant respectivement aux fréquences 5-150 MHz et 1-32 MHz, décollent à bord de la mission Apollo 17. Ces instruments permettent de sonder le premier kilomètre du sous-sol lunaire et de déterminer les caractéristiques électromagnétiques de son régolithe (Simmons, 1972 ; Olhoeft and Strangway, 1975). Depuis, plusieurs radars ont été dédiés à l'exploration planétaire, parmi lesquels SHARAD et MARSIS pour l'étude du sous-sol de Mars et le radar de la sonde Cassini dédié au sondage des satellites de Saturne.

Les radars ont la capacité de détecter et d'identifier des figures de dépôts caractéristiques des évènements géologiques ayant eu lieu dans le passé. Ils permettent par exemple de reconnaître des dépôts éoliens (structure en sillons sur de grandes échelles spatiales, figures de transgressions), des figures de delta (superposition de couches fines et élargissement de la structure vers le déversoir), des dépôts volcaniques, voire des structures biogéniques comme les stromatolithes, à la géométrie reconnaissable (Figure 2.3-1).

Figure 2.3-1 : Stromatolithes en contexte de mer chaude peu profonde. Bien que l'on puisse en trouver sous des formes variées, cette géométrie en forme de champignon est souvent rencontrée.

2.3.1.2 Principe général

Il existe une grande variété de GPRs, cependant ils suivent tous le même principe de fonctionnement et possèdent les mêmes éléments fondamentaux : un émetteur génère un signal qui alimente une antenne d'émission, laquelle va générer l'onde émise en direction du sol. Cette onde interagit avec les contrastes diélectriques du milieu étudié via des phénomènes de propagation, de diffusion, de réflexion, de réfraction et d'atténuation. L'onde captée en retour par l'antenne de réception est transformée en signal par la chaine de réception (échantillonné, éventuellement additionné de façon cohérente, traité) puis enregistré. C'est ce signal qui constitue une trace (ou sondage ou encore A-scan).

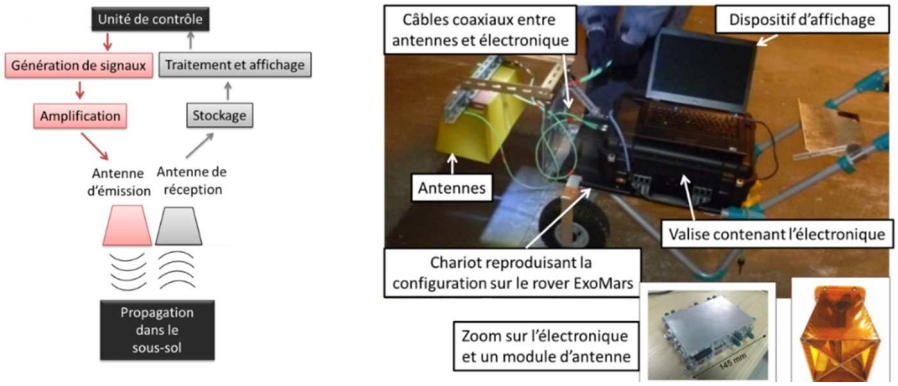


Figure 2.3-2 : A gauche : principe général du GPR ; A droite : le prototype de WISDOM.

Le type d'acquisition prévu pour le radar WISDOM est le mode de réflexions à offset constant (Common Offset Mode), qui consiste à déplacer les antennes par pas spatial le long du profil à sonder, et de récolter une trace à chaque position. Une fois le profil effectué, il est nécessaire de traiter les données avant de les interpréter, notamment en passant par l'affichage des traces successives récoltées en fonction de leur position horizontale, ce qui produit ce que l'on nomme des radargrammes (ou B-scans). Ces « images » représentent, en deux dimensions, les contrastes de propriétés électromagnétiques présents dans le sous-sol en fonction de la position horizontale des antennes et du temps d'arrivée de l'onde. La production de coupes verticales dans le sous-sol nécessite une étape supplémentaire de traitement des données, où

les retards sont convertis en distances et éventuellement en profondeurs lorsque les informations sont suffisantes. L'analyse quantitative des signaux récoltés offre une information concernant la géométrie et la nature du sous-sol.

La Figure 2.3-3 représente un radargramme expérimental acquis avec le prototype de WISDOM, ainsi qu'un exemple de trace associée. L'onde directe émise en direction de l'antenne de réception est visible à travers le premier écho observé sur le radargramme, qui correspond au couplage entre les antennes, suivi de près par l'écho de surface. Généralement, dans le cadre de l'utilisation traditionnelle des GPRs, ces deux premiers échos sont confondus, les antennes étant posées directement au contact de la surface. Nous verrons que pour le cas de WISDOM, la configuration des antennes diffère légèrement du cas classique.

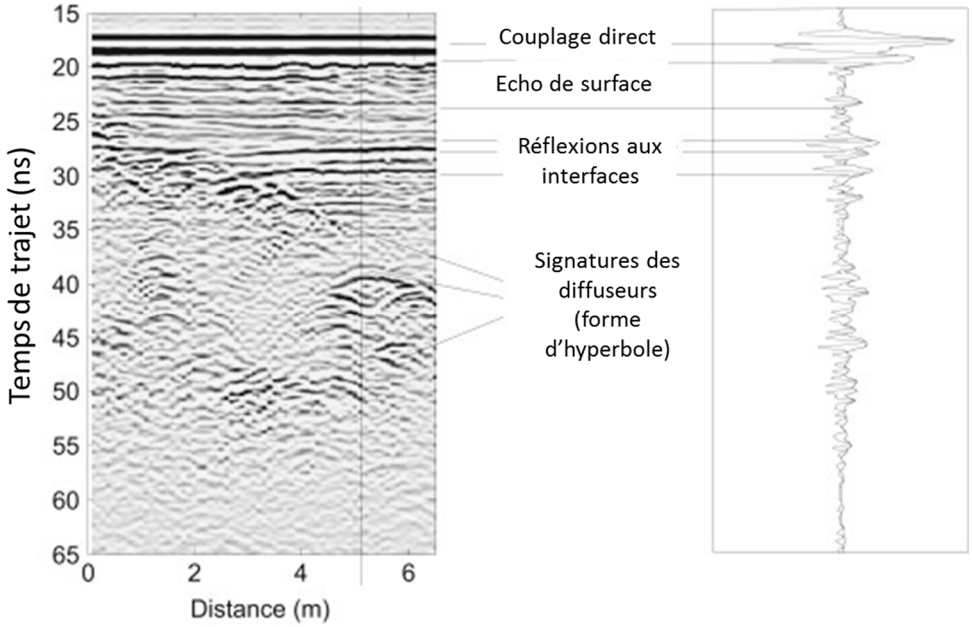


Figure 2.3-3 : Radargramme traité et exemple de trace associée. L'enveloppe du signal est également représentée. Les données ont été acquises avec le radar WISDOM lors d'une campagne de mesures dans la région de Dachstein en Autriche. Les échos successifs témoignent des contrastes diélectriques au sein du matériau

2.3.2 Le dimensionnement des radars

Le dimensionnement d'un instrument passe par une définition claire de ses objectifs, en fonction desquels sont choisis les paramètres instrumentaux. Ainsi, les objectifs de résolution spatiale et de profondeur de sondage définiront la largeur de bande de l'instrument et la fréquence centrale. Ceci implique, outre une conception de l'émetteur et du récepteur adaptée, un choix approprié des antennes, qui doivent émettre et recevoir, sans déformation, les ondes électromagnétiques dans la gamme de fréquence retenue. La qualité des données récoltées doit être la meilleure possible, et pour ce faire, le récepteur doit disposer d'une bonne dynamique et d'un facteur de bruit le plus faible possible, ce qui permettra de faire des mesures avec un bon rapport signal sur bruit.

Certains des paramètres susnommés sont influencés par les conditions de terrain, et ont une incidence directe sur l'interprétation qu'il sera possible de faire à partir des mesures récoltées.

2.3.2.1 La profondeur de détection

La profondeur de détection (appelée plus couramment profondeur de pénétration) correspond à la profondeur maximale à laquelle un radar géologique est capable de détecter un écho significatif (hors du plancher de bruit). Cette profondeur dépend de la puissance reçue utile P_R mais aussi de la puissance du bruit P_B.

P_R est fonction de la chaine d'émission et de réception du radar (antennes comprises) et du milieu de propagation. Pour une longueur d'onde donnée, la puissance reçue est égale à :

$$P_R = P_F e_{TX} G_{TX}\, e_{RX} G_{RX} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{(4\pi d_{RX-C})^2} \frac{1}{(4\pi d_{C-TX})^2} A_{milieu} S_C \qquad (2.25)$$

Emission	λ	Longueur d'onde		
	P_F	Puissance fournie à l'émetteur	$P_F e_{TX} G_{TX}$	Puissance rayonnée dans la direction de la cible
	e_{TX}	Efficacité à l'émission		
	G_{TX}	Gain de l'antenne de transmission		
Réceptio	e_{RX}	Efficacité en réception		
	G_{RX}	Gain de l'antenne de réception	$G_{RX} \frac{\lambda^2}{4\pi}$	Aire effective de l'antenne de réception
Distance	d_{C-TX}	Distance entre l'antenne d'émission et la cible	$\frac{1}{(4\pi d_{C-TX})^2}$	Divergence du faisceau incident
	d_{RX-C}	Distance entre l'antenne de réception et la cible	$\frac{1}{(4\pi d_{RX-C})^2}$	Divergence du faisceau réfléchi
Milieu	A_{milieu}	Pertes dans le milieu (absorption, diffusion) (Voir chapitre 4)		$A_{milieu} = 1$ si le milieu est homogène et sans perte $A_{milieu} = \exp(-k"(d_{C-TX} + d_{RX-C}))$
	S_C	Section efficace de la cible		Pour une interface lisse $S_C = R^2\pi d^2$ avec d la distance à la cible Pour une cible sphérique $S_C = R^2\pi a^2$ avec a le rayon de la cible Pour une interface rugueuse $S_C \sim R^2\pi\lambda d/2$ (Annan, 2003) *avec* R : module du coeff de Fresnel

Dans le cas d'une interface rugueuse, l'estimation de la section efficace de la cible nécessite de recourir à des modèles électromagnétiques analytiques approchés (Small perturbation, Kirchhoff, IEM,..) dont les domaines de validité dépendent de la rugosité de l'interface en question ou à de la modélisation numérique. La formule utilisée ici est largement qualitative, elle repose sur le fait que l'on peut considérer que seule la zone de la surface qui intersecte le premier ellipsoïde de Fresnel contribue de façon significative au signal rétrodiffusé par la surface rugueuse.

Dans le cas d'un radar monostatique (antennes de réception et émission confondues), la formule pour une interface lisse et plane devient :

$$P_R = P_F e_{TX} G_{TX}\, e_{RX} G_{RX} \frac{\lambda^2}{(4\pi 2d)^2} R^2 A_{milieu}$$

Toute chose égale par ailleurs, la puissance reçue est d'autant plus élevée que la longueur d'onde est grande. Si on cherche à atteindre des profondeurs importantes, il faut choisir une fréquence basse. Les radargrammes obtenus par les instruments MARSIS et SHARAD (2.4.1) illustrent ce point.

Pour estimer la profondeur de détection, il faut tenir compte de la puissance de bruit P_B qui dépend essentiellement de la largeur de bande utilisée pour faire la mesure. Le rapport Signal sur Bruit (SNR) à la longueur d'onde λ est donné par $\frac{P_R}{P_B}$. Plus il est élevé, meilleure sera la précision sur la mesure du signal utile.

2.3.2.2 La dynamique de l'instrument :

Pour que la mesure soit effectivement faite avec un rapport Signal sur Bruit $\frac{P_R}{P_b}$ satisfaisant, il faut que la sensibilité et la dynamique de l'instrument soient suffisantes. La dynamique effective du radar désigne le rapport en dB[5] entre la puissance du signal le plus fort qui peut être mesuré par l'instrument sans saturation et la puissance du signal significatif le plus faible accessible. En l'absence de moyens permettant d'atténuer de façon sélective et parfaitement connue les signaux les plus forts, sa valeur maximale est limitée par le nombre de bits sur lequel les signaux sont échantillonnés. Si un convertisseur analogique-numérique (ou CAN) de n bits offre une dynamique théorique de $20\log(2^n)$, dans la pratique, cette limite n'est jamais atteinte et la dynamique effective est inférieure à cette valeur. WISDOM utilise un CAN 16 bits, qui correspond à une dynamique effective de 84 dB (soit environ 14 bits effectifs). Pour un radar de type impulsionnel, la figure qui suit permet de visualiser ces notions :

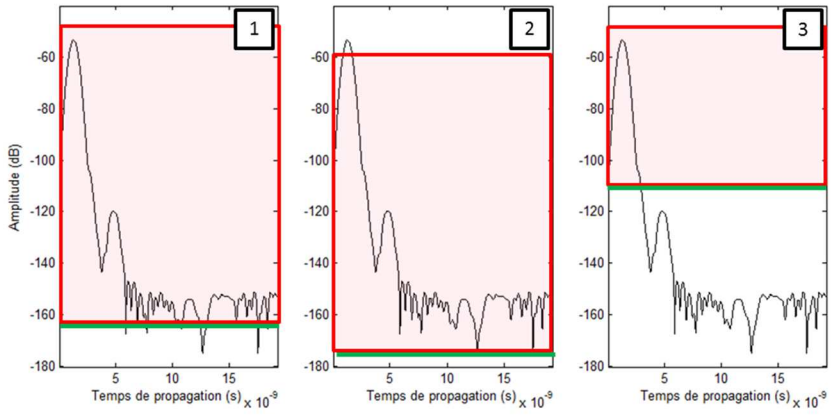


Figure 2.3-4 : Illustration de la dynamique de l'instrument (rouge) pour la mesure d'un signal constitué de deux pics. Dans les deux premiers cas, la dynamique est de 120 dB, contre 60 dB pour le troisième cas. La limite verte représente la sensibilité de l'instrument

[5] Le rapport de puissance en dB est donné par la relation $P_{dB} = 10\ log_{10}\left(\frac{P_1}{P_0}\right)$.

Le signal reçu de l'exemple comprend deux pics (à -57 et -120 dB) et un niveau de bruit à environ -157 dB. Le SNR est d'environ 100 dB. Dans le cas n°1, la dynamique de l'instrument permet de capturer à la fois les deux pics et d'évaluer le plancher de bruit. Le deuxième cas est celui d'une saturation du récepteur au-delà de 60 dB : l'amplitude du premier pic n'est pas mesurée correctement. On peut utiliser un atténuateur pour faire une mesure correcte de l'ensemble du signal. Dans le cas d'une dynamique de 60 dB (cas n°3), l'instrument ne permet pas de détecter simultanément les deux pics, encore moins d'évaluer le plancher de bruit.

Pour estimer la profondeur de détection d'un instrument dans un milieu donné pour une cible donnée, il faut considérer que l'instrument est capable de mesurer des signaux légèrement supérieurs au niveau de bruit (typiquement 1 dB pour une simple détection et jusque 3 dB pour une estimation correcte de l'amplitude). Ce calcul demande à la fois une prise en compte des paramètres instrumentaux mais une connaissance a priori du milieu sondé et de la cible visée.

2.3.2.3 La résolution en profondeur de l'instrument

La résolution caractérise la capacité de l'instrument à discriminer deux échos successifs proches en termes de temps de trajet. Elle est ainsi directement dépendante de la durée de l'impulsion (donc de la largeur de bande B) et de la vitesse de propagation $\mathcal{V}$ de l'onde dans le milieu. Pour deux échos de même amplitude, la résolution s'exprime de la manière suivante :

$$r = \frac{v}{2B} \tag{2.26}$$

Si on recherche une bonne résolution, B doit être la plus large possible. Or le choix de B a des conséquences sur la valeur de la fréquence centrale (qui sera obligatoirement de l'ordre grandeur de B) et donc sur la profondeur de détection.

Maintenant que nous connaissons les grands principes du sondage des sous-sols par la technique radar, autorisons nous à nouveau un détour sur la planète Mars pour illustrer les performances de cette méthode à travers les exemples de MARSIS et SHARAD.

2.4 Les radars pour le sondage du sous-sol de Mars

2.4.1 L'apport des sondeurs MARSIS et SHARAD sur la connaissance de Mars

L'analyse quantitative des données radar permet d'obtenir des informations sur la nature et la géométrie du sous-sol. Le radar à pénétration de sol (ou GPR pour Ground Penetrating Radar) WISDOM ayant pour objectif le sondage de la planète Mars, rappelons les résultats principaux de ses deux grands frères (au sens propre comme au figuré), SHARAD (à bord de Mars Reconnaissance Orbiter) et MARSIS (embarqué sur Mars Express). Ces sondeurs ont révélé le mouvement des calottes polaires en spirales au cours des saisons ainsi que leur structure (Orosei et al., 2015; Phillips et al., 2008). Jusqu'à présent,

aucun réservoir d'eau liquide n'a pu être détecté dans le sous-sol, cependant les sondeurs ont permis d'estimer le volume d'eau important contenu dans les calottes polaires, signe qu'une grande quantité était présente tout au long de l'histoire de la planète. De récents résultats basés sur la quantité d'eau perdue par échappement atmosphérique suggèrent d'ailleurs que le volume présent durant l'ère primitive de Mars était équivalent à l'intégralité de sa surface couverte sur une hauteur d'environ 140 mètres (Villanueva et al., 2015).

2.4.1.1 MARSIS (Mars Express)

MARSIS est le premier radar sondeur mis en orbite depuis le précurseur ALSE dédié au sondage du régolithe lunaire, envoyé en 1972. Il a été embarqué à bord de la sonde Mars Express, située entre 250 et 900 kilomètres de la surface. Il s'agit d'un radar impulsionnel qui fonctionne sur 4 fréquences centrales de 1.3 à 5.5 MHz, lui permettant de sonder le sous-sol sur des profondeurs de plusieurs kilomètres, avec une résolution de l'ordre de la centaine de mètres. Il est également utilisé dans le but de sonder l'ionosphère, cependant nous ne nous intéresserons ici qu'à ses capacités de sondage du sous-sol. MARSIS a déployé ses larges antennes de 20 mètres chacune en orbite autour de la planète Mars en Juin 2005, avec pour objectif principal de sonder le sous-sol à la recherche de glace d'eau et de réservoirs d'eau liquide. Les premières observations ont eu lieu au-dessus du site Planum Boreanum, qui couvre une large partie (~1000 km) de la région Nord de Mars, composée principalement de glace d'eau avec un faible pourcentage de poussières. Planum Boreanum est constitué de différentes unités géologiques, la calotte polaire résiduelle, également appelée NRIC pour Northern Residual Ice Cap, les dépôts stratifiés ou NPLD pour North Polar Layered Deposits et le socle ou l'unité basale (Basal Unit, BU). La NRIC repose sur les dépôts stratifiés et enrichit ces derniers au cours du temps. Les NPLD sont composés de couches contenant plus ou moins de poussières, de plus de deux kilomètres d'épaisseur et témoigneraient du climat de la planète au cours de ses milliards d'années d'existence (Byrne, 2009). Le socle repose sous les NPLD et les NRIC et semble avoir été formé dans des conditions climatiques très différentes des deux autres unités (Byrne and Murray, 2002).

Orosei et al. (2015) proposent une revue des résultats principaux de MARSIS au cours des neuf dernières années. Nous nous limiterons à reprendre ici quelques-uns de ces résultats. MARSIS a permis de confirmer la nature des dépôts stratifiés et de révéler la présence de la BU en mesurant les temps d'arrivée successifs jusqu'au socle et leurs amplitudes, correspondant aux valeurs de la permittivité et du facteur de pertes de la glace pure. En outre, l'épaisseur des NPLD a pu être estimée à un volume total de glace d'environ 8.10^5 km^3 dans les dépôts stratifiés et de $4{,}5.10^5$ km^3 dans le socle.

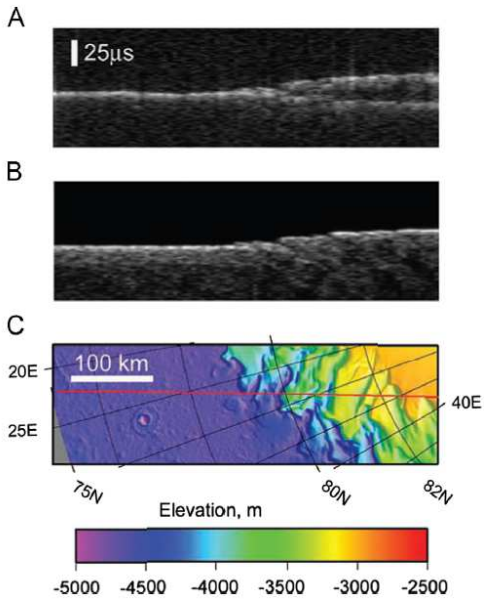


Figure 2.4-1 : Orosei et al., 2015. A) radargramme obtenu par MARSIS sur la région de Planum Boreanum. B) Simulation des données dans le cas de la seule contribution de la surface au signal retour. C) Profil effectué localisé sur une carte MOLA.

En 2011, l'accumulation des données de MARSIS a mené à une couverture de la région sans précédent, la cartographiant dans son ensemble, avec une très bonne couverture spatiale. Les données, récoltées principalement côté nuit, présentent un rapport signal sur bruit exceptionnel, dû à l'absence de perturbations ionosphériques. Ainsi, MARSIS a mis en évidence deux sous-structures dans l'unité basale (Frigeri et al., 2012) de la zone polaire, qui serait en fait composée de deux couches légèrement différentes. Nous avons parlé de l'importance de la dynamique de l'instrument ainsi que du rapport signal sur bruit précédemment : en voici un exemple concret. La constante diélectrique de la partie inférieure de cette unité basale a été estimée à 4, menant à considérer un mélange de glace et de poussières à un taux pouvant aller jusqu'à 50% (Plaut, 2012).

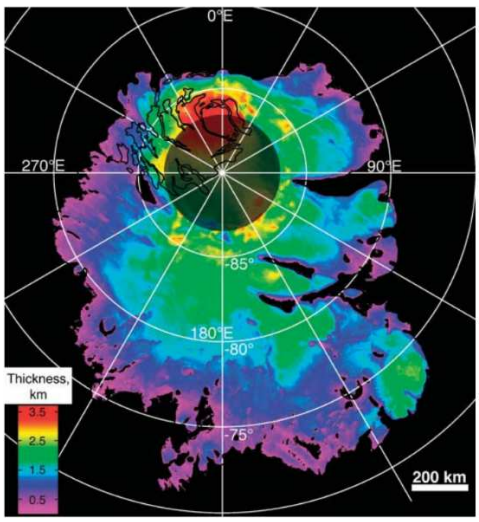


Figure 2.4-2 : Carte MOLA de la calotte sud, avec l'épaisseur des SPLD. On note une forte dyssimétrie de l'épaisseur des dépôts, fine dans la direction 180°E mais atteignant 3,5 km près du pôle. Source : Plaut et al., 2007

La partie australe n'est pas en reste en ce qui concerne les résultats d'intérêt. Celle-ci présente la même structure que la zone boréale, cependant la première couche, appelée SRIC, est composée de strates de glace de CO_2 de quelques mètres d'épaisseur (Byrne, 2009). Les SPLD présentent la même structure que les NPLD. Toute la région est entourée par une zone nommée Dorsa Argentea Formation (DAF), présentant de vastes plaines traversées par des stries, et qui correspondrait à une ancienne calotte polaire datant de l'Hespérien (Byrne, 2009). Les résultats récoltés sur cette zone ont permis de dresser une carte de la répartition et de l'épaisseur des dépôts stratifiés (Plaut et al., 2007). SHARAD, possédant une résolution plus fine que MARSIS, a aidé à confirmer la nature stratifiée des SPLD en distinguant 6 à 7 couches différentes, et à estimer leur épaisseur, notamment sur le site de Promethei Lingula. Il apparait que les différentes couches s'affinent au bord de la formation (Milkovich et al., 2009), comme le montre la carte Figure 2.4-2.

L'unité basale est relativement lisse mais présente des discontinuités qui n'ont pas encore été expliquées, notamment de forts échos d'amplitudes supérieures à l'écho de surface. Une possibilité serait la présence d'une couche de glace de CO_2 à la base de cette unité (Orosei et al., 2015). L'absence de réflexions témoignant de la présence d'eau liquide au Nord comme au Sud, ainsi que la faible déformation de l'unité basale suggèrent un gradient thermique plutôt faible, et une lithosphère épaisse, d'un peu plus de 150 km d'épaisseur. À titre de comparaison, la lithosphère terrestre atteint 100 km d'épaisseur dans de rares endroits. La SRIC a quant à elle été étudiée de près par Mouginot et al. (2009). Il apparait que celle-ci présente une très faible réflectivité qui varie spatialement. Une explication possible serait un changement des propriétés électromagnétiques selon la localisation, ou une augmentation de l'épaisseur de la couche sous-jacente. Si l'on considère le milieu comme de la glace pure de CO_2, celle-ci pourrait former une couche d'environ 10 m d'épaisseur, la quantité de CO_2 contenu dans cette calotte résiduelle représenterait alors 5% de celle dans l'atmosphère. MARSIS a également sondé d'autres régions, notamment celle de Medusae Fossae, composée principalement de dépôts volcaniques (Tanaka, 2000 ; Mandt et al., 2008), située au niveau de la dichotomie Nord/Sud. L'instrument a été utilisé afin d'estimer la permittivité moyenne du sous-sol, d'en étudier le contenu en glace et la porosité, ainsi que l'épaisseur des couches le composant. Les données ont révélé une augmentation de l'épaisseur des dépôts dans la partie la plus basse de la région, due à une accumulation gravitaire. Les constantes diélectriques estimées sur cette zone varient de 2.9 à 3.3, valeurs inférieures à celles communément trouvées sur Terre dans le cas de dépôts volcaniques (Watters et al., 2007). Ceci suggère soit un matériau peu consolidé, très poreux sur de grandes profondeurs (au moins 2.5 km) et de ce fait instable, ou un milieu essentiellement composé de glace avec un faible taux de poussières. Les données de SHARAD viendront ensuite confirmer les premières interprétations faites à partir de MARSIS. La région Nord de Vastitas Borealis, en marge des NPLD, présente également de faibles valeurs de permittivité, indiquant la présence de glace sur plusieurs dizaines de mètres (Mouginot et al., 2012). En outre, elle possède l'une des surfaces les plus lisses de toute la planète (Krevslasky and Head, 2002). Ceci a conduit à émettre l'hypothèse du

gel de grandes étendues d'eau dans le passé, probablement via des vallées de débâcle déversant eau et sédiments en grandes quantités, renforçant l'idée de l'existence d'un ancien océan recouvrant la moitié Nord de la planète (Clifford and Parker, 2001). Enfin, le sondage de la région d'Athabasca a révélé des valeurs de tangentes de perte importantes (Boisson et al., 2009), suggérant la présence de matériaux conducteurs dans la proche surface. L'estimation de la conductivité du sous-sol serait en accord avec un milieu de nature basaltique, de nature volcanique et non sédimentaire comme ceci avait été considéré en premier lieu (Orosei et al., 2015).

Outre ces résultats, MARSIS a permis la mise au point d'une carte de la constante diélectrique de la région Nord (Figure 2.4-3).

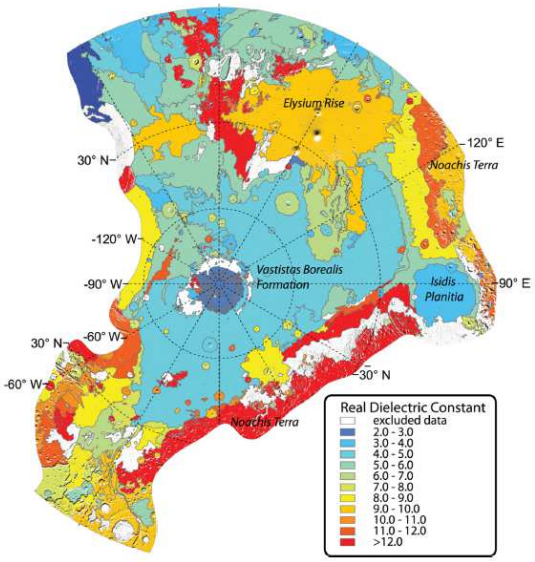


Figure 2.4-3 : Carte stéréographique de la distribution de la permittivité sur la région polaire Nord (Orosei et al., 2015), à partir de (Tanaka et al., 2005) et (Mouginot et al., 2012)

2.4.1.2 SHARAD (MRO)

Passons maintenant à l'instrument SHARAD, le petit frère de MARSIS. Cet instrument embarqué à bord de la sonde MRO a pour objectif de compléter les connaissances déjà récoltées grâce à MARSIS. Il possède une meilleure résolution que son prédécesseur, d'environ 15 mètres, mais pénètre moins profondément, atteignant quelques centaines de mètres de profondeur.

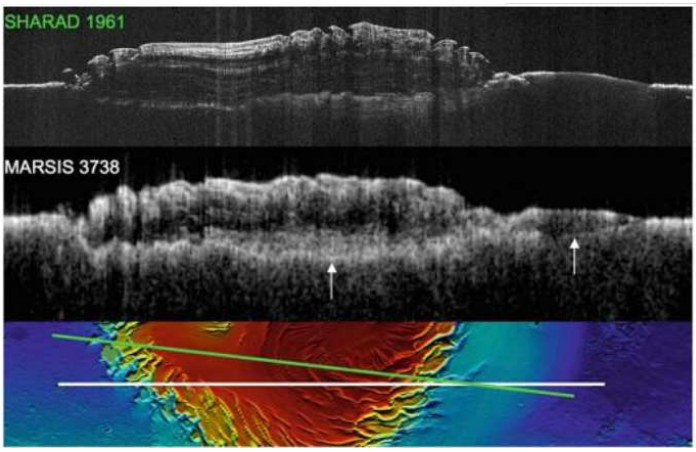


Figure 2.4-4 : Illustration de la différence de résolution et de profondeur de pénétration des instruments SHARAD (en haut) et MARSIS (au milieu). Les profils sont indiqués pour chacun des radargrammes sur une carte MOLA de la région polaire Nord. Source : NASA/JPL

Les antennes de SHARAD sont « petites », comparées à celles de MARSIS. Elles ne font en effet que 10 mètres de largeur chacune. La fréquence centrale de SHARAD est de 20 MHz, avec une largeur de bande de 10 MHz. Ses antennes furent développées en Septembre 2006, environ un an après l'arrivée de MARSIS. Outre les résultats ayant contribué à confirmer les hypothèses émises à partir des données de MARSIS, les résultats les plus impressionnants ont été récoltés, une fois n'est pas coutume, au niveau des régions polaires boréale et australe. Les dépôts successifs des NPLD et des SPLD ont été révélés avec une finesse sans précédent et les épaisseurs des calottes de CO_2 au Sud ont pu être estimées (Figure 2.4-5). Les mesures ont en outre conforté les hypothèses précédemment émises sur la dureté et l'épaisseur de la lithosphère, cette dernière faisant parfois de plus de 300 km (Phillips et al., 2008).

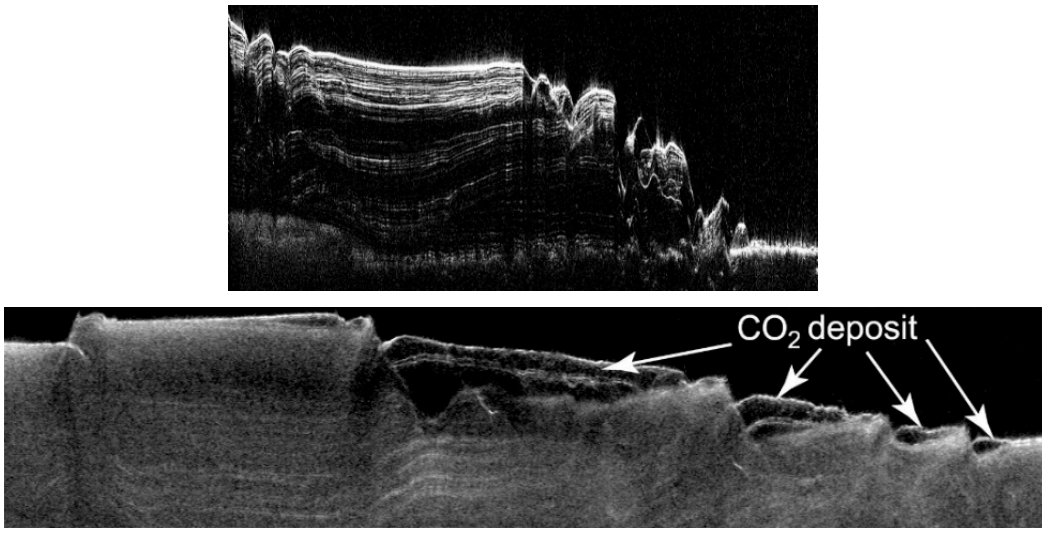


Figure 2.4-5 : En haut : radargramme des dépôts stratifiés dans la région polaire Nord. En bas : radargramme de la région polaire Sud, révélant les dépôts de glace de CO2 surmontant les dépôts stratifiés, qui sont quant à eux composés d'eau et de poussières. Source : NASA/JPL.

SHARAD, tout comme MARSIS, a sondé la région de Vastitas Borealis, en s'intéressant à la plaine Amazonis. Campbell et al. (2008) proposent, en regard des valeurs de permittivité et de tangentes de

pertes estimées, un terrain composé de deux unités avec d'une part des dépôts volcaniques denses et rugueux, et d'autre part des dépôts sédimentaires plus poreux (Figure 2.4-6), formant une couche d'une épaisseur de 100 à 170 mètres jusqu'au socle.

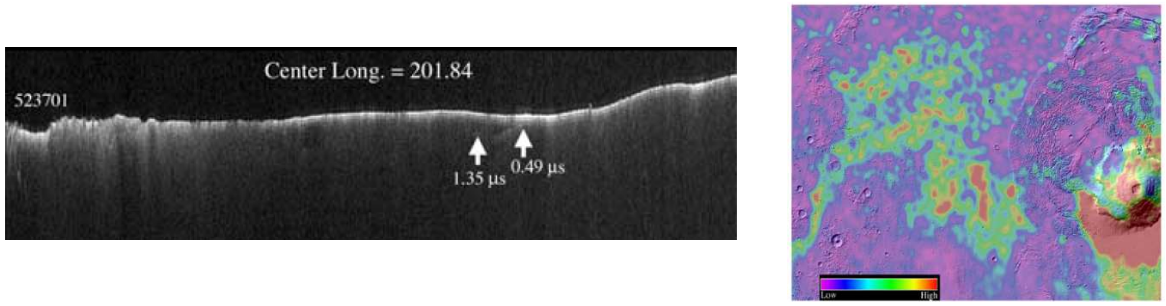


Figure 2.4-6 : A guache : radargramme le long de la plaine Amazonis. On remarque les variations d'amplitude du signal rétrodiffusé le long du profil, liées à des changements de matériau. A droite : réflectivité de la surface sur la zone de Vastitas Borealis (Amazonis planum). On distingue très nettement les écoulements de lave se déversant autour d'Olympus Mons (à droite) et dans la plaine Amazonis. Source : Campbell et al., 2008.

L'investigation de cratères s'est également révélée payante pour SHARAD, puisqu'il a aidé à caractériser leur nature et leurs dimensions. L'instrument a ainsi détecté une centaine de cratères dits piédestaux (Nunes et al., 2011, Schon et al., 2012), plus résistants à l'érosion que les matériaux en surface, révélant des sortes de plateformes. Pour les plus larges d'entre eux (les plus petits provoquant des phénomènes de réflexions multiples et de diffusion, compliqués à interpréter), le socle a pu être identifié, et la valeur de permittivité dérivée a été estimée à 4. Ceci est cohérent avec un milieu formé d'un mélange d'eau et de silicates ou d'un matériau silicaté très poreux, comme la cendre.

A partir des résultats de ces deux radars mais aussi des différents instruments dédiés à l'étude de la surface martienne, il est donc possible de prédire, dans une certaine mesure, les propriétés électromagnétiques attendues sur Mars. Une fois WISDOM en opération, il sera alors possible de confronter nos résultats à ces prédictions

2.4.2 Le radar GPR WISDOM conçu pour la mission ExoMars 2018

Le radar GPR WISDOM (Ciarletti et al., 2011) a été sélectionné pour faire partie de la charge utile Pasteur de la mission ExoMars 2018. Cet instrument sera chargé d'obtenir des informations sur les caractéristiques du proche sous-sol le long du trajet du rover avant forage. Développé au LATMOS en collaboration avec le Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux (LAB) et l'Université Technologique de Dresden en Allemagne (TUD), WISDOM a été conçu pour explorer les 3 premiers mètres du sous-sol et est actuellement en phase de tests. Le principal objectif scientifique de ce GPR est la caractérisation du proche sous-sol de Mars, et la localisation des lieux susceptibles d'abriter des traces de vie passée ou présente, pour guider le forage (nous rappelons qu'une foreuse capable de récolter des échantillons jusqu'à environ 2 m de profondeur sera embarquée sur le rover) et la collecte d'échantillons. Le radar a été conçu en accord avec ces objectifs, sondant à 2 ou 3 mètres (ou plus selon le milieu) de profondeur avec une résolution verticale de quelques centimètres. Bien que l'analyse des données radar ne permette pas d'identifier les matériaux de manière non ambigüe, la confrontation des mesures de

constantes diélectriques des sols avec les autres mesures *in situ* permettra de mieux contraindre la nature des constituants du sous-sol. WISDOM viendra ainsi s'ajouter aux nombreux instruments qui étudient déjà la planète, et fonctionnera de manière complémentaire avec eux (voir Tableau 2.4-1).

Tableau 2.4-1 : les instruments dédiés au sondage de la planète Mars

Longueur d'onde dans l'air	Instrument	Résolution horizontale	Résolution verticale	Profondeur de sondage
Rayons X Capteur de neutrons	GRS (Spectromètre Gamma)	300 km^2	~20-30 cm	<50 cm
0.4-50 µm	HiRISE, MOC, HRSC,CRISM,TES, THEMIS	0.5–200 m	quelques µm	<0.5 cm
3.6 & 12.6 cm (8.3 & 2.4 GHz)	Radars situés sur Terre (VLA, Observatoire d'Arecibo)	~60–80 km	quelques µm	Jusqu'à 1m
0.1 - 1 m (3–0.3 GHz)	GPR WISDOM	~10 cm	~3 cm (proche sous-sol) ~30 cm à 5 m de profondeur	Jusqu'à 10 m
12–20 m (25–15 MHz)	SHARAD	~2 km	~10 m	Quelques centaines de m
54–231 m (5.5–1.3 MHz)	MARSIS	5–10 km	~50-100 m	~5 km dans la glace ~200-300 m dans la roche

WISDOM, monté sur le rover ExoMars, effectuera des acquisitions le long de profils, avec un pas spatial de quelques centimètres (usuellement 10 cm), donnant des indications sur la structure géologique en 3 dimensions du sous-sol. Il permettra donc de localiser et d'identifier, à partir des figures de dépôts et des propriétés diélectriques du proche sous-sol, les lieux les plus prometteurs d'un point de vue exobiologique où les molécules organiques ont le plus de probabilités de se trouver. Les dépôts de nature sédimentaire, lacustres ou fluviatiles seront particulièrement recherchés. De plus, l'identification des volumes ou des blocs enfouis en termes de forme, taille et composition sera possible grâce aux différents modes de polarisation employés. Ce GPR fournira également un aperçu de la répartition et de l'état de l'eau ou de la glace dans le proche sous-sol. On pourra donc, à partir des données récoltées, comprendre l'histoire géologique de la région explorée, en étudiant les dépôts, les structures d'érosion ou encore les déformations associées à des mouvements tectoniques, ainsi que le rôle et la distribution de l'eau dans son évolution. Il aura enfin un rôle particulièrement important concernant le guidage de la foreuse montée sur le rover vers des sites à la fois sécurisés et possédant un intérêt exobiologique Cependant, au-delà de l'exploration de la subsurface martienne, WISDOM est un puissant instrument, pouvant être utilisé dans de nombreux domaines d'application potentiels sur Terre, comme l'archéologie, la glaciologie, la géologie, ou encore l'hydrologie. Les responsables du projet ont été sollicités pour exposer les possibilités de WISDOM, notamment pour des missions d'exploration de la Lune ou d'astéroïdes (Herique and Ciarletti, 2015).

Les défis majeurs lors de la conception de l'instrument ont été (et sont toujours) de respecter les contraintes liées à la spatialisation de la charge utile en termes de coût d'énergie, de masse, de volume de données ou de l'instrument, ainsi qu'aux normes anticontamination. Un prototype de WISDOM, très proche du modèle final est actuellement testé au LATMOS et dans divers environnements (voir Figure 2.4-7).

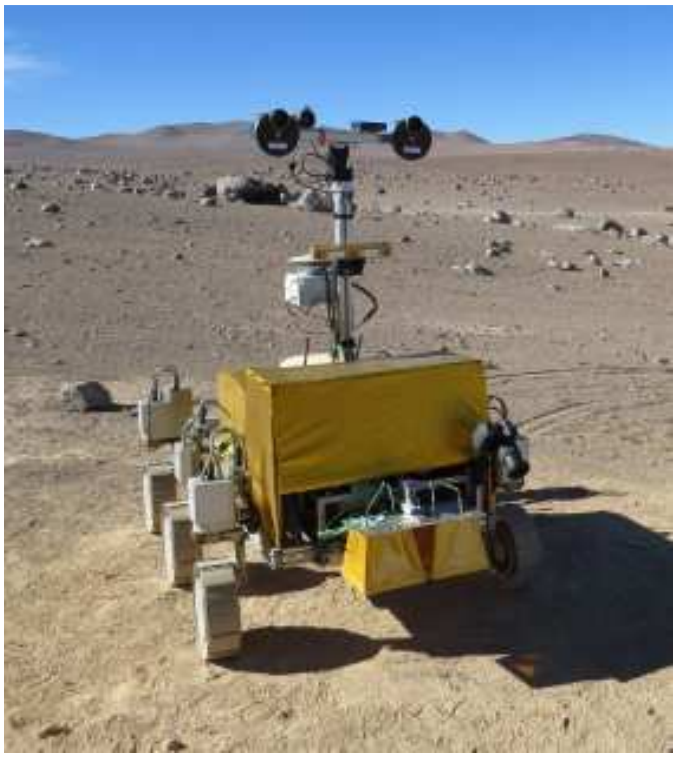


Figure 2.4-7 : Prototype de WISDOM monté sur un rover lors d'une campagne de mesures dans le désert d'Atacama au Chili. Les antennes sont remarquables à l'avant du rover. Source : LATMOS.

Conclusion

La connaissance du sous-sol de Mars est devenue essentielle pour permettre une réelle approche exobiologique de la planète. Au cours de leur propagation dans les milieux naturels, les ondes électromagnétiques subissent divers phénomènes de réfraction, réflexion, et de diffusion dus aux hétérogénéités diélectriques présentes au sein du matériau. Les équations de Maxwell et les relations constitutives du milieu permettent de relier les caractéristiques électromagnétiques des matériaux à la façon dont les ondes se propagent, notamment la permittivité, qui définit leur vitesse dans les milieux. C'est sur ce principe que s'appuie la technique radar, qui a démontré sa pertinence sur Terre, mais également pour le sondage des sous-sols dans le Système solaire, notamment sur Mars où les instruments MARSIS et SHARAD nous ont permis d'en apprendre plus sur les propriétés électromagnétiques de la surface martienne et les figures de dépôts présentes en sous-sol, avec des résultats remarquables concernant la caractérisation des calottes polaires. Lors de la conception d'un radar, il convient de définir les paramètres instrumentaux en fonction des objectifs de profondeur et de résolution à atteindre et en tenant compte des *a priori* disponibles sur les propriétés du milieu à sonder. Le radar WISDOM de la mission ExoMars 2018, conçu pour sonder le sous-sol sur quelques mètres de profondeur avec une résolution verticale de quelques centimètres, viendra ainsi compléter la famille des radars martiens pour définir le contexte géologique du site d'Oxia Planum, sélectionné pour être le site d'atterrissage du volet 2018 de la mission ExoMars, et pour guider la foreuse vers des sites d'intérêt. Nous allons à présent nous intéresser au principe de dimensionnement du radar WISDOM ainsi qu'à ses caractéristiques principales.

Références

Alberti, G., L. Castaldo, R. Orosei, A. Frigeri, and G. Cirillo. (2012). Permittivity estimation over Mars by using SHARAD data: The Cerberus Palus area, J. Geophys. Res., 117, E09008, doi: 10.1029/2012JE004047

Annan, A. P. (2003). Ground Penetrating Radar Principles, Procedures, and Applications, 286 pp., Sensors and Software. Inc., Mississauga, Ontario, Canada.

Bandfield, J. L., V. E. Hamilton, and P. R. Christensen. (2000). A Global view of Martian surface compositions from MGS-TES, Science, 287, p. 1626-1630.

Boisson, J., Heggy, E., Clifford, S.M., Frigeri, A., Plaut, J.J., Farrell, W.M., Putzig, N.E., Picardi, G., Orosei, R., Lognonné, P., Gurnett, D.A.(2009). Sounding the subsurface of Athabasca Valles using MARSIS radar data: exploring the volcanic and fluvial hypotheses for the origin of the rafted plate terrain. J. Geophys. Res. (Planets) 114, 8003. http://dx.doi.org/10.1029/2008JE003299.

Bost, N., Westall, F., Ramboz, C., Foucher, F., Pullan, D., Meunier, A., Vago, J. L. (2013). Missions to Mars: characterisation of Mars analogue rocks for the International Space Analogue Rockstore (ISAR). Planetary and Space Science, 82, 113-127.

Bradford, J. H., Harper, J. T., & Brown, J. (2009). Complex dielectric permittivity measurements from ground-penetrating radar data to estimate snow liquid water content in the pendular regime. Water resources research, 45 (8).

Byrne, S., Murray, B. C. (2002). North polar stratigraphy and the paleo-erg of Mars. Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012), 107(E6), 11-1.

Byrne, S. (2009). The polar deposits of Mars. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 37, 535-560.

Campbell, B., Carter, L., Phillips, R., Plaut, J., Putzig, N., Safaeinili, A., Orosei, R. (2008). SHARAD radar sounding of the Vastitas Borealis Formation in Amazonis Planitia. Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012), 113 (E12).

Christensen, P.R., Bandfield, J.L., M.D. Smith, V.E. Hamilton and R.N. Clark. (2000). Identification of a basaltic component on the Martian surface from the Thermal Emission Spectrometer data. , 105(E4), p. 9609-9621.

Ciarletti, V., Corbel, C., Plettemeier, D., Cais, P., Clifford, S. M., & Hamran, S. E. (2011). WISDOM GPR designed for shallow and high-resolution sounding of the Martian subsurface. Proceedings of the IEEE, 99(5), 824-836.

Ciarletti, V., Hervé, Y., Dorizon, S., Le Gall, A., Quantin, C., Broyer, J., Grindrod, P. (2015, September). Modelling the performances of the WISDOM radar on the Oxia Planum potential landing site for ExoMars. In European Planetary Science Congress 2015 (Vol. 10, pp. EPSC2015-574).

Clifford, S. M. (1993). A model for hydrologic and climatic behaviour of water on Mars. Journal of Geophysical Research, 98 (E6): 10973–11016.
http://dx.doi.org/10.1029/2008JE003076.

Clifford, S. M., & Parker, T. J. (2001). The evolution of the Martian hydrosphere: Implications for the fate of a primordial ocean and the current state of the northern plains. Icarus, 154(1), 40-79.

Dabas, M., Camerlynck, C., Bossuet, T.G., Petrequin, P., Bailly, M. (1999). Détection par méthode radar de niveaux anthropiques du Néolithique final sous le niveau actuel du lac de Chalain (France), C.R. Acad. Sci. Paris,Sciences de la terre et des planètes , 199, 328, pp. 509-514.

Debye, P. J. W. (1929). Polar molecules. Chemical Catalog Company, Incorporated.

Descloitres, M., Guerin, R., Ramirez, E., Gallair, E.R., Ribstein, P., Valla, F. (1999). Détermination de l'épaisseur des glaciers de Sarenne (Alpes) et de Chacaltaya (Bolivie) par prospection radar au sol à 50 MHz, La Houille Blanche, 5, pp. 29-33.

ElShafie, A., Heggy, E. (2012). Dielectric and hardness measurements of planetary analog rocks in support of in-situ subsurface sampling. Planetary and Space Science, 86, 150-154.

Frigeri, A., Orosei, R., Cartacci, M., Cicchetti, A., Mitri, G., Giuppi, S., Noschese, R., Picardi, G., Plaut, J.J., 2012. Three dimensional structure and possible lateral inhomogeneities of the Mars North Polar Basal Unit. In: Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, vol. 43, p. 2922.

Grandjean, G., Gourry, J.C., Bitri, A. (2000). Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications study on a test site, Journal of Applied Geophysics, vol. 45.

Grimm, R. E., and D. E. Stillman, 2008. On the origin of widespread subsurface radar attenuation at Mars. In Lunar and Planetary Science Conference, vol. 39, p. 2251.

Guéguen, Y. and Palciauskas, V. (1992). Introduction à la physique des roches. Herman-Editeur des Sciences et des Arts.

Heggy, E., Paillou, P., Ruffié, G., Malezieux, J. M., Costard, F., Grandjean, G. (2001). On water detection in the Martian subsurface using sounding radar. Icarus, 154(2), 244-257.

Heggy, E., Paillou, P., Costard, F., Mangold, N., Ruffie, G., Demontoux, F., Malézieux, J.M., (2003). Local geoelectrical models of the martian subsurface for shallow groundwater detection using sounding radars. Journal of Geophysical Research 108 (E4), 8030.

Heggy, E., Clifford, S.M., Grimm, R.E., Dinwiddie, C.L., Wyrick, D.Y., Hill, B.E. (2006). Ground-penetrating radar sounding in mafic lava flows: assessing attenuation and scattering losses in Mars-analog volcanic terrains. Journal of Geophysical Research: Planets (1991-2012), 111 (E06S04), 16.

Herique, A., Ciarletti, V. (2015, September). Two radars for AIM mission: A direct observation of the asteroid's structure from deep interior to regolith. In European Planetary Science Congress 2015 (Vol. 10, pp. EPSC2015-505).

King, R.W.P. and G.S. Smith (1981) Antennas in Matter. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Kreslavsky, M.A., Head, J.W., 2002. Fate of outflow channel effluents in the northern lowlands of Mars: the Vastitas Borealis Formation as a sublimation residue from frozen ponded bodies of water. J. Geophys. Res. (Planets) 107, 5121. http://dx.doi. org/10.1029/2001JE001831.

Le Gall, A. (2007). Sondage des sous-sols planétaires par radar à pénétration de sol: étude et modélisation des performances de l'instrument TAPIR (Doctoral dissertation, Paris 6).

Leuschen, C. (1999). Analysis of the complex permittivity and permeability of a Martian soil simulant from 10 MHz to 1 GHz. In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS'99 Proceedings. IEEE 1999 International (Vol. 4, pp. 2264-2266). IEEE.

Loizeau, D., Mangold, N., Poulet, F., Bibring, J. P., Gendrin, A., Ansan, V., Neukum, G. (2007). Phyllosilicates in the Mawrth Vallis region of Mars. Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012), 112(E8).

Mandt, K.E., deSilva, S.L., Zimbelman, J.R., Crown, D.A., 2008. Origin of the medusae fossae formation, Mars: insights from a synoptic approach. J. Geophys. Res. (Planets) 113, 12011.

Mangold, N., Poulet, F., Mustard, J. F., Bibring, J. P., Gondet, B., Langevin, Y., Neukum, G. (2007). Mineralogy of the Nili Fossae region with OMEGA/Mars Express data: 2. Aqueous alteration of the crust. Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012), 112 (E8).

Maxwell, J. C. (1864). A dynamical theory of the electromagnetic field. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 155: 459–512.

McEwen, A. S., Malin, M. C., Carr, M. H., & Hartmann, W. K. (1999). Voluminous volcanism on early Mars revealed in Valles Marineris. Nature, 397(6720), 584-586.

Milkovich, S.M., Plaut, J.J., Safaeinili, A., Picardi, G., Seu, R., Phillips, R.J., 2009. Stratigraphy of Promethei Lingula, south polar layered deposits, Mars, in radar and imaging data sets. J. Geophys. Res. (Planets) 114, 3002. http://dx.doi.org/ 10.1029/2008JE003162

Mouginot, J., Kofman, W., Safaeinili, A., Grima, C., Herique, A., Plaut, J.J. (2009). MARSIS surface reflectivity of the south residual cap of Mars. Icarus 201, 454–459. http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2009.01.009.

Mouginot, J., Pommerol, A., Kofman, W., Beck, P., Schmitt, B. (2010). The 3-5 MHz global reflectivity map of Mars by MARSIS/Mars Express: implications for the current inventory of subsurface HO. Icarus, Elsevier, 2010, 210 (2), pp.612.

Mouginot, J., Pommerol, A., Beck, P., Kofman, W., Clifford, S.M., 2012. Dielectric map of the Martian northern hemisphere and the nature of plain filling materials. Geophys. Res. Lett. 39, 2202. http://dx.doi.org/10.1029/2011GL050286.

Nikiforov, S., Mitrofanov, I., Kozyrev, A., Fedosov, F., Litvak, M., Mokrousov, M., Konovalov, A. (2013, April). Neutron detector ADRON-RM for ExoMars 2018. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 15, p. 9506).

Nunes, D. C., Smrekar, S. E., Fisher, B., Plaut, J. J., Holt, J. W., Head, J. W., Phillips, R. J. (2011). Shallow Radar (SHARAD), pedestal craters, and the lost Martian layers: Initial assessments. Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012), 116(E4).

Olhoeft, G. R., Frisillo, A. L., Strangway, D.W. (1974). Electrical properties of lunar soil sample. Journal of Geophysical Research, 79 :1599–1604.

Olhoeft, G.R., Strangway, D.W. (1975). Dielectric properties of the first 100m of the Moon. Earth and Planetary Science Letters 24, 394–404.

Olhoeft, G. R. (1992). Electrical properties of rocks, in Physical Properties of Rocks and Minerals. New York, McGraw-Hill eds.

Olhoeft, G. R., & Capron, D. E. (1994, June). Petrophysical causes of electromagnetic dispersion. In Fifth International Conferention on Ground Penetrating Radar.

Orosei, R., Jordan, R. L., Morgan, D. D., Cartacci, M., Cicchetti, A., Duru, F., Picardi, G. (2015). Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding (MARSIS) after nine years of operation: A summary. Planetary and Space Science.

Pettinelli, E., Burghignoli, P., Pisani, A. R., Ticconi, F., Galli, A., Vannaroni, G., & Bella, F. (2007). Electromagnetic propagation of GPR signals in Martian subsurface scenarios including material losses and scattering. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 45(5), 1271-1281.

Petrenko, V.F. and Whitworth, R.W. (1999). Physics of ice. Oxford University Press, Oxford.

Phillips, R. J., Zuber, M. T., Smrekar, S. E., Mellon, M. T., Head, J. W., Tanaka, K. L., Marinangeli, L. (2008). Mars north polar deposits: Stratigraphy, age, and geodynamical response. Science, 320(5880), 1182-1185.

Plaut, J.J., Picardi, G., Safaeinili, A., Ivanov, A. B., Milkovich, S. M., Cicchetti, A., Edenhofer, P. (2007). Subsurface radar sounding of the south polar layered deposits of Mars. Science, 316(5821), 92-95.

Plaut, J.J., 2012. Three dimensional structure and possible lateral inhomogeneities of the Mars North Polar Basal Unit. In: Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, vol. 43, p. 2922.

Poulet, F., Gomez, C., Bibring, J. P., Langevin, Y., Gondet, B., Pinet, P., Mustard, J. (2007). Martian surface mineralogy from Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité on board the Mars Express spacecraft (OMEGA/MEx): Global mineral maps. Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012), 112(E8).

Poulet, F., Arvidson, R. E., Gomez, C., Morris, R. V., Bibring, J. P., Langevin, Y., Griffes, J. (2008). Mineralogy of Terra Meridiani and western Arabia Terra from OMEGA/MEx and implications for their formation. Icarus, 195(1), 106-130.

Powers, M. H. (1997). Modeling frequency-dependent GPR. The Leading Edge, 16(11), 1657-1662.

Quantin, C., Flahaut, J., Clenet, H., Allemand, P., & Thomas, P. (2012). Composition and structures of the subsurface in the vicinity of Valles Marineris as revealed by central uplifts of impact craters. Icarus, 221(1), 436-452.

Roach, L. H., Mustard, J. F., Swayze, G., Milliken, R. E., Bishop, J. L., Murchie, S. L., & Lichtenberg, K. (2010). Hydrated mineral stratigraphy of Ius Chasma, Valles Marineris. Icarus, 206(1), 253-268.

Rust, A.C., Russell, J.K., Knight, R.J. (1999). Dielectric constant as a predictor of porosity in dry volcanic rocks. Journal of Volcanology and Geothermal Research 91, 79–96.

Schon, S. C., Head, J. W. (2012). Decameter-scale pedestal craters in the tropics of Mars: Evidence for the recent presence of very young regional ice deposits in Tharsis. Earth and Planetary Science Letters, 317, 68-75.

Simmons, G. (1972). On the Moon with Appolo 17-A Guidebock to Taurus-Littrow. NASA Document EP-101.

Stillman, D. E., Grimm, R. E. (2011). Radar penetrates only the youngest geological units on Mars. Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012), 116 (E3).

Stillman, D., Olhoeft, G. (2008). Frequency and temperature dependence in electromagnetic properties of Martian analog minerals. Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012), 113(E9).

Stogryn, A. (1971). Equations for calculating the dielectric constant of saline water (correspondence). IEEE transactions on microwave theory and Techniques, vol. MTT-19, 733-736.

Tanaka, K.L., 2000. Dust and ice deposition in the martian geologic record. Icarus 144, 254–266. http://dx.doi.org/10.1006/icar.1999.6297.

Tanaka, K.L., Kolb, E.J., 2005. Geologic Mapping of the Polar Regions of Mars: Preliminary Results and Climate Implications. Open File Report 2005-1271 U.S. Geological Survey

Vassalo, C. (1980). Electromagnétisme classique dans la matière, éditions Dunod, Paris 1980.

Villanueva, G.L., Mumma, M.J., Novak, R E., Käufl, H.U., Hartogh, P., Encrenaz, T., Smith, M.D. (2015). Strong water isotopic anomalies in the martian atmosphere: Probing current and ancient reservoirs. Science, 348(6231), 218-221.

Watters, T. R., Campbell, B., Carter, L., Leuschen, C. J., Plaut, J. J., Picardi, G., Stofan, E. R. (2007). Radar sounding of the Medusae Fossae Formation Mars: Equatorial ice or dry, low-density deposits?. Science,318(5853), 1125-1128.

Chapitre 3 : L'instrument WISDOM

Sommaire :

Introduction

3.1 La conception de l'instrument WISDOM 76

3.1.1 Objectifs 76

3.1.2 Un radar à sauts de fréquence 77

3.1.3 Le module électronique de WISDOM 79

3.1.4 Le système d'antennes de WISDOM 80

3.2 Performances de l'instrument 83

3.2.1 Efficacité des additions cohérentes 83

3.2.2 Choix du nombre $\boldsymbol{Nfreq}$ de fréquences utilisées 83

3.2.3 Bilan de liaison de WISDOM 85

3.2.4 Gating 88

3.2.5 Traitement des données de l'instrument WISDOM 89

3.3 Etude comportementale de l'instrument WISDOM 92

3.3.1 Mesure incomplète 92

3.3.2 Approximation en champ lointain 95

3.3.2.1 Notion de champ lointain 95

3.3.2.2 Mesure en réflexion sur une plaque conductrice 96

3.4 Les données acquises avec les prototypes de WISDOM 99

3.4.1 Démarche 99

3.4.2 Dachstein Mars Simulation 2012 100

3.4.3 SAFER 102

Conclusion

Références

Introduction

L'instrument WISDOM, comme nous l'avons vu, a été sélectionné pour définir le contexte géologique du site d'atterrissage d'ExoMars, Oxia Planum. L'instrument a été développé et conçu au LATMOS, en partenariat avec l'Institut Technologique de Dresden (TU Dresden) et le Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux (LAB). Actuellement, plusieurs versions de l'instrument, proches du modèle de vol final, sont en phase de test. Nous présentons dans ce chapitre les principales fonctionnalités et caractéristiques du GPR WISDOM. Dans la mesure du possible, l'illustration des concepts sera faite par des données expérimentales acquises avec le prototype final de l'instrument, ou par des données simulées représentatives du fonctionnement de WISDOM (les codes de simulations utilisés seront décrits dans le Chapitre 4). Nous finirons par présenter les divers tests et campagnes de mesures effectués dans le but de tester et d'améliorer les performances de l'instrument, avec deux campagnes en particulier, la Mars Simulation 2012 et la mission SAFER (SAmple Field acquisition Experiment with a Rover).

3.1 La conception de l'instrument WISDOM

3.1.1 Objectifs

Lors de la conception d'un géoradar, il est capital de prendre en compte les objectifs de profondeur et de résolution à atteindre pour définir la gamme de fréquences à exploiter en accord avec les propriétés électromagnétiques attendues dans le milieu. Dans le cas de WISDOM, les objectifs sont de détecter les unités géologiques dans le sous-sol peu profond (quelques mètres de profondeur), d'estimer précisément leur profondeur et, si possible, leur constante diélectrique. Les objectifs scientifiques et techniques de WISDOM ainsi que leur impact sur le choix des paramètres instrumentaux sont regroupés dans le Tableau 3.1-1.

.

Tableau 3.1-1 : Les objectifs de WISDOM et les paramètres instrumentaux permettant d'y répondre

Objectifs	Performances/capacités visées Contraintes	Implications sur la conception de l'instrument et les opérations
Détection et caractérisation géomorphologique des unités géologiques dans le proche sous-sol (<3m)	Profondeur de pénétration >3m Pas de « zone aveugle[1] »	Contrainte sur la fréquence centrale f_0 Radar à saut de fréquences
Aide au forage	Résolution verticale de qq cms à 1.5 m Précision verticale ~10 cm Précision horizontale ~10 cm	Bande de fréquence B (conséquence sur f_0) Précision Δ sur la position (x,y,z) de chaque sondage
Détermination des propriétés diélectriques des unités géologiques	Précision radiométrique ~1 dB Précision sur la mesure des retards de ~0.2 ns (4 cm dans l'air)	Calibration Exploitation de la configuration géométrique imposée (30 cm au-dessus de la surface)
Détection et localisation des structures de petite taille	Pas spatial dx<10 cm entre les sondages	Synchronisation avec le rover d'ExoMars
Caractérisation fine des structures enfouies (orientation et rugosité)	Mesures polarimétriques	Antennes polarimétriques
Imagerie 2D voire 3D de la structure du sous-sol	Localisation (x,y,z) de chaque sondage selon une grille d'acquisition	Trajectoire du Rover
Embarquement sur le rover	Ressources limitées en puissance Antennes pouvant fonctionner à une certaine distance de la surface Contraintes environnementales (thermique, vide, vibrations) Contraintes de protection planétaire	Acquisitions dans le domaine fréquentiel Conception des antennes

La contrainte sur la résolution verticale a conditionné le choix de la largeur de bande *B* et par conséquent la fréquence centrale f_0. La valeur *B* =2,5 GHz a été retenue comme étant la limite supérieure de ce qui était envisageable compte tenu des contraintes de la mission (masse, volume). La résolution en profondeur correspondant est d'environ 6 cm dans l'air, de 2.7 cm dans un milieu lithique de permittivité relative égale à 5 et de 3,3 cm dans de la glace d'eau. La fréquence centrale de WISDOM a, en conséquence, été fixée à 1,75 GHz.

3.1.2 Un radar à sauts de fréquence

Parmi les principaux radars d'investigation, on distingue :

[1] La zone aveugle traduit la présence d'une distance minimale de détection et d'une résolution radiale toutes deux liées à la largeur de l'impulsion d'émission de l'instrument

- Les radars impulsionnels ou AMCW (Amplitude Modulated Continuous Wave) qui fonctionnent en domaine temporel, les signaux émis sont des impulsions de durée très courte dont la forme est généralement celle d'une fonction sino-gaussienne. Ce sont les instruments les plus utilisés dans le domaine GPR, pour leur simplicité et leur rapidité d'exécution. Ce type de radar est cependant sensible au bruit. De plus, dans un contexte de mission spatiale, où toute économie d'énergie est en général bonne à prendre, il présente des limites importantes. En outre, la portée d'un radar dépend de la durée impulsionnelle : dans le cas de ces GPRs, on est donc contraint de définir des impulsions relativemnet longues, ce qui limite la résolution atteinte.
- Les radars qui fonctionnent dans le domaine fréquentiel, comme les radars FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave » ou les radars à saut de fréquence (Step Frequency). Pour ces radars, une opération est nécessaire pour obtenir à partir des données la réponse impulsionnelle dans le domaine temporel. WISDOM est un radar à saut de fréquence (SF) qui génère une succession d'ondes à bande étroite de façon à parcourir la bande B de fréquences totale du radar. Pour chaque fréquence, une onde quasi harmonique est émise pendant une durée Δt, et la réponse provenant du milieu extérieur à cette fréquence est reçue à travers l'antenne de réception. Au bout de la durée Δt, la fréquence du signal de sortie s'incrémente d'une valeur Δf. Ainsi, la fréquence de sondage explore pas à pas la bande de fréquence de largeur $B = N_{freq}\Delta f$. Les N_{freq} réponses en fréquence constituent un sondage.

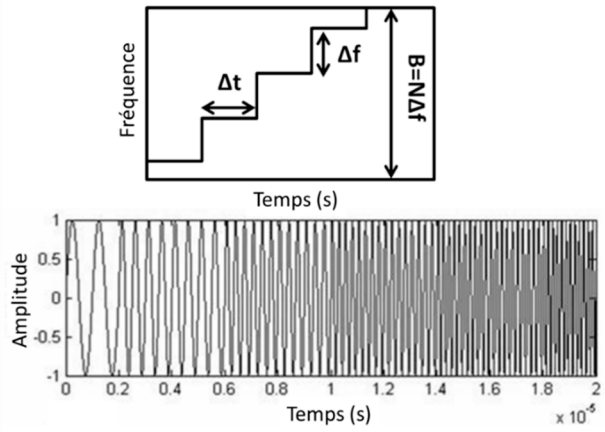


Figure 3.1-1 : Principe de fonctionnement du radar à sauts de fréquence

L'intérêt de cette méthode vient du fait que toute la puissance disponible est utilisée, à chaque étape de mesure, sur une fréquence. On a donc, pour une amplitude instantanée maximale disponible, une énergie N_{freq} fois plus élevée par sondage que pour un radar impulsionnel (Ardekani and Lambot, 2013). Il s'agit également d'un système fiable et stable pour l'estimation des paramètres électromagnétiques du sous-sol (Lambot et al., 2003, Lambot et al., 2004). En outre, cette technique permet d'avoir au niveau du récepteur une bande de fréquence très étroite autour de la fréquence d'émission (onde quasi harmonique), ce qui réduit la sensibilité au bruit. Un autre avantage du radar à sauts de fréquence est de pouvoir pondérer les mesures pour chaque fréquence de manière à corriger les distorsions en amplitude ou phase pour chaque fréquence. Le radar émet et reçoit simultanément, ce qui fait qu'il n'y a pas de

zone aveugle, cependant le couplage inévitable entre antennes engendre une limitation de la dynamique disponible pour des signaux plus faibles.

L'acquisition de l'instrument WISDOM est donc réalisée dans le domaine fréquentiel. On mesure la partie réelle du signal retour (nous évoquerons l'impact de la partie imaginaire manquante sur la qualité du signal récupéré plus loin dans la partie 3.3.1) et une transformée de Fourier inverse calculée sur les N_{freq} points mesurés en fréquence fournit la réponse dans le domaine temporel. Le gain de compression sur le SNR lié à cette transformée de Fourier est égal à $10\log10(N_{freq}/2)$ dB. Dans le cas de WISDOM, $N_{freq} = 1001$ points et le gain est de 27 dB.

3.1.3 Le module électronique de WISDOM

Le schéma de principe de l'instrument WISDOM est représenté Figure 3.1-2.

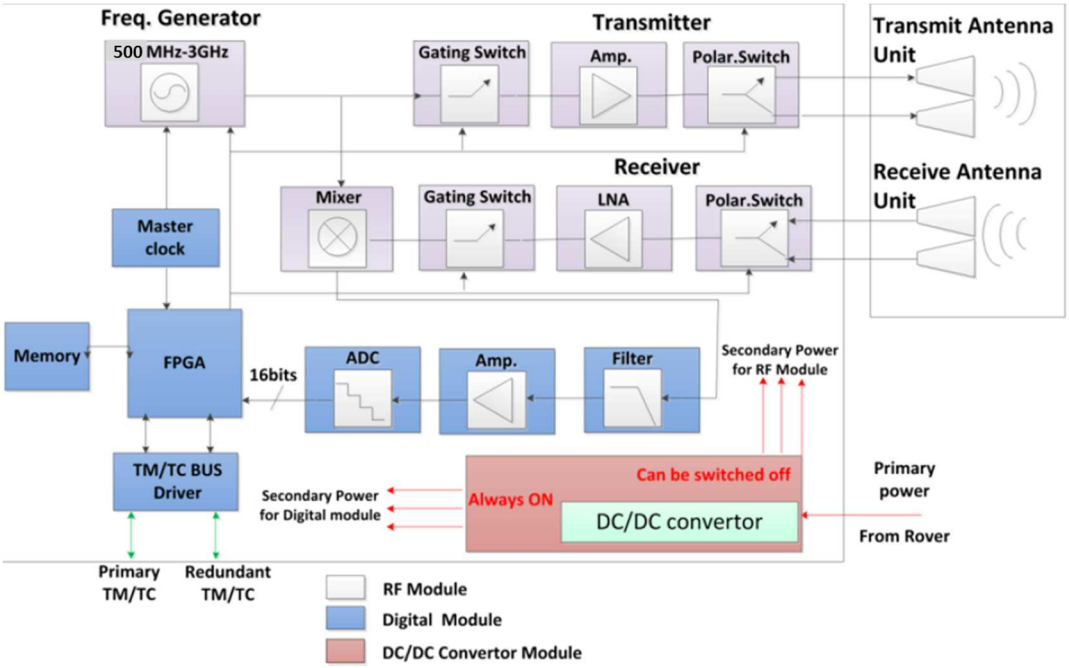


Figure 3.1-2 : Schéma des différents composants de l'instrument WISDOM

-Le module RF (Radio Fréquences), en photo sur la Figure 3.1-3 comprend le générateur de fréquences, qui produit les N_{freq} fréquences par pas de 2,5 MHz de 0,5 GHz à 3 GHz. Un transmetteur effectue ensuite une amplification du signal pour alimenter l'antenne d'émission. Il est également équipé de la commande du switch pour le gating en transmission (voir 3.2.4), ainsi que de la sélection de la polarisation pour l'antenne d'émission. Le récepteur amplifie le signal provenant des réflecteurs du sous-sol reçu via l'antenne de réception grâce à un amplificateur de faible bruit (LNA pour Low Noise Amplifier), et, de la même manière que pour la chaîne de transmission, inclut la sélection de la polarisation et du gating pour la chaîne de réception. En plus de ces éléments, le récepteur est équipé d'un mixeur qui multiplie les signaux d'entrée et de sortie, dont la sortie va être injectée ensuite dans le module digital.

-Le module digital (Figure 3.1-3), qui reçoit la réponse provenant du mixeur, est équipé d'un amplificateur et d'un filtre passe-bas. Il contient également le Convertisseur Analogique Numérique (CAN ou ADC en anglais) et le FPGA (Field Programmable Gate Array), véritable cerveau de l'instrument qui agit à la fois comme contrôleur, processeur et stockeur de données avant de les transmettre à la mémoire embarquée du rover ExoMars. Le module digital contient également l'horloge du radar ainsi que les pilotes de Télécommande et Télémétrie (TM/TC).

-Le module convertisseur DC/DC qui convertit la puissance délivrée par le rover (28V dans le cas de WISDOM) en voltages adaptés à l'électronique du radar.

Le système de contrôle permet ainsi de générer les différents signaux utilisés selon plusieurs modes d'acquisition, disponibles via l'interface avec l'utilisateur. Un moniteur surveille les paramètres importants lors de l'acquisition, comme la température interne de l'instrument ou les tensions d'entrées (un exemple de fichier de données est présenté en Annexe A).

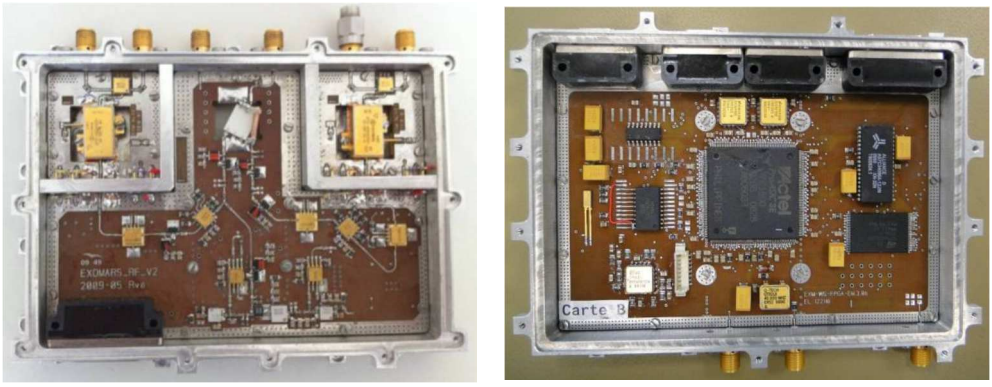


Figure 3.1-3 : Principaux composants de l'instrument WISDOM. Gauche : Module RF ; Droite : Module digital

3.1.4 Le système d'antennes de WISDOM

La taille d'une antenne est de l'ordre de grandeur de la plus grande longueur d'onde utilisée ; en conséquence, puisque WISDOM doit être installé sur un rover en déplacement, il était impératif de travailler à des fréquences suffisamment élevées pour limiter la taille des antennes. À titre de comparaison, MARSIS, qui opère à 20 MHz avec une longueur d'onde de l'ordre de 150 m comme expliqué dans le chapitre 2, possède un dipôle de 40 mètres de large, tandis que les antennes de WISDOM ont des dimensions de 20x20x18 cm^3.

Plusieurs comparaisons d'architecture et des simulations ont aidé à définir le type d'antenne optimal pour remplir les objectifs de WISDOM. Le choix s'est finalement porté sur la conception d'un système d'antennes basé sur une structure de type Vivaldi (Plettemeier et al., 2009). Pour ce type d'antenne, la largeur de l'élément rayonnant augmente de façon exponentielle, autorisant une grande gamme de fréquences émises dans le domaine des GHz.

La Figure 3.1-4 représente les diagrammes de rayonnement de WISDOM mesuré et modélisé en 3D pour un élément rayonnant. Pour les basses fréquences, la tâche au sol est plutôt large ; elle se resserre

quand la fréquence augmente. Sur la plus haute gamme de fréquences, de 2 à 3 GHz, on note l'apparition de lobes secondaires, dont il faut tenir compte dans l'interprétation des données : des échos peuvent en effet provenir de la surface.

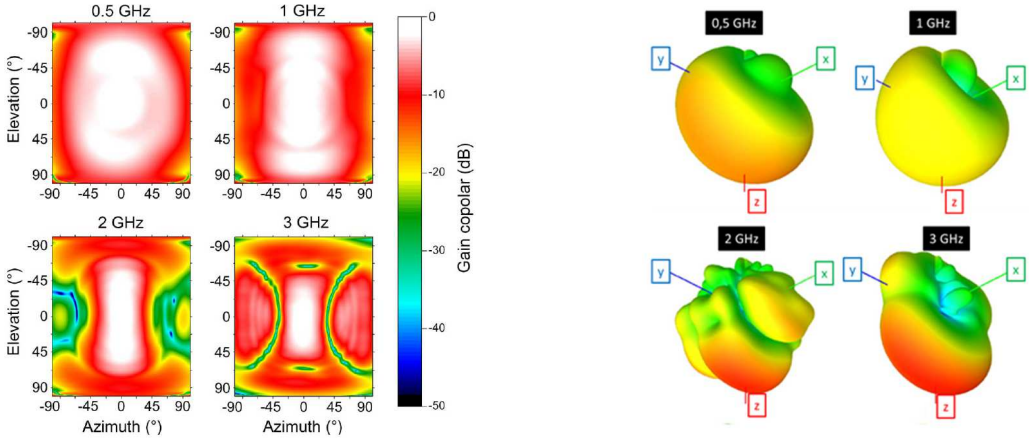


Figure 3.1-4 : Diagrammes de rayonnement de WISDOM à différentes fréquences centrales. À gauche : mesure en champ lointain en chambre anéchoïque[2]. À droite : modélisation en 3D

Une autre particularité de WISDOM réside dans sa capacité polarimétrique. Chaque antenne est constituée de deux éléments rayonnants perpendiculaires (Figure 3.1-5). Quatre combinaisons de polarisations de transmission/réception sont donc possibles en fonction des éléments rayonnants sélectionnés en réception et transmission. Contrairement à l'habitude d'utiliser les notations H (pour horizontale) et V (pour verticale) qui n'ont pas de sens dans le cas de WISDOM, on parlera dans ce manuscrit de «copolarisation» (0/0 ou 1/1) lorsque les polarisations de transmission/réception sont parallèles et «crosspolarisation» (0/1 ou 1/0) lorsque les polarisations de transmission/réception sont orthogonales. La géométrie des polarisations 1 et 0 est illustrée sur la Figure 3.1-6.

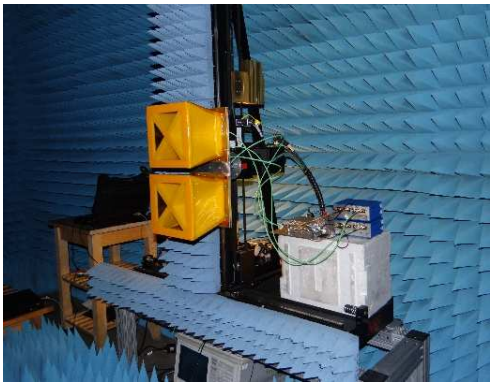


Figure 3.1-5 : Les modules d'antenne de WISDOM en chambre anéchoïque à Dresden (Allemagne). On note la structure avec deux éléments rayonnants en croix qui offre la possibilité de mesurer les co et cross polarisations.

[2] Une chambre anéchoïque est une salle d'expérimentation dont les parois absorbent les ondes électromagnétiques en reproduisant des conditions de champ libre, et ne provoque donc pas d'écho pouvant perturber les mesures.

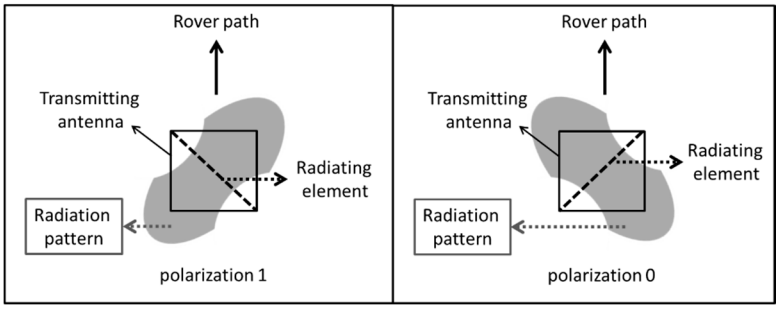


Figure 3.1-6 : Configuration d'une antenne le long d'un profil pour les polarisations 1 (à gauche) et 0 (à droite)

L'intérêt d'une double polarisation réside dans le fait que, en fonction de leur géométrie, les signatures radar des réflecteurs du sous-sol diffèrent d'une polarisation à l'autre. On a donc accès, en exploitant ces modes, à l'effet dépolarisant des réflecteurs du sous-sol, qui est directement dépendant de leur position, de leur forme et de leur orientation par rapport au profil d'acquisition. Selon les caractéristiques des réflecteurs, l'onde incidente sera plus ou moins dépolarisée lors de sa réflexion : un objet de forme sphérique par exemple a une très faible capacité à dépolariser le rayonnement, contrairement à un coin de cube. Une interface oblique modifiera également la direction du champ réfléchi, tout comme une interface très rugueuse. Comme on peut également le remarquer, le diagramme de rayonnement d'un élément d'antenne n'est pas omnidirectionnel. En conséquence, la zone éclairée par le radar diffère d'une polarisation à l'autre. Ceci peut présenter une difficulté d'interprétation des données polarimétriques. Il est néanmoins possible de tirer parti de cette configuration en copolarisation : prenons l'exemple d'un écho apparaissant selon un mode de co-polarisation (1/1) mais pas l'autre (0/0). Ceci suggère que l'objet réfléchissant se situe dans la zone éclairée par la configuration 1/1, mais pas dans la zone éclairée par le mode 0/0. Ainsi, on peut ainsi contraindre la position du réflecteur en question.

La Figure 3.1-7 montre le gain des deux éléments rayonnants d'une antenne mesuré sur toute la bande de fréquence de WISDOM ainsi que le couplage direct mesuré pour les quatre configurations de polarisation. Le gain augmente avec la fréquence jusqu'à environ 2 GHz, où l'on voit apparaître des lobes secondaires, puis diminue doucement jusqu'à 3 GHz. Le couplage direct entre les antennes en copolarisation est de -15 dB à 500 MHz et diminue avec la fréquence jusqu'à atteindre -40 dB. Le comportement du couplage en crosspolarisation est similaire mais d'amplitude plus faible, il démarre à 500 MHz à environ -20 dB pour atteindre autour de la fréquence centrale (1.75 GHz) une valeur minimale de -50 dB.

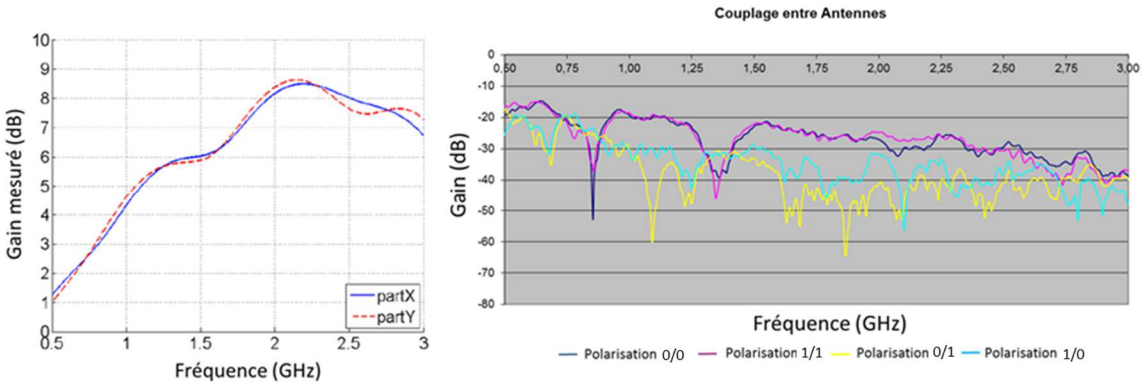


Figure 3.1-7 : Gauche : Gain des antennes mesuré pour les deux polarisations sur la bande de fréquence utile; Droite : Couplage entre antennes mesuré en domaine fréquentiel pour les quatre configurations de polarisation.

3.2 Performances de l'instrument

3.2.1 Efficacité des additions cohérentes

Des additions cohérentes effectuées dans le récepteur sont utilisées pour améliorer le rapport signal sur bruit. N_{add} additions cohérentes permettent d'améliorer en théorie le rapport signal sur bruit de $10\log10(N_{add})$ dB, ceci est effectif à condition que le bruit soit centré et décorrélé. L'effet des additions cohérentes sur la réduction du bruit dans le cas de WISDOM est illustré Figure 3.2-1. On note que ces additions sont efficaces jusqu'à $N_{add} = 100$ mais qu'au-delà le niveau de bruit ne décroit plus comme prévu par la théorie, ce qui montre que ce bruit résiduel n'est pas décorrélé. Pour des raisons de temps de mesures compatibles avec un rover en déplacement, la valeur nominale est $N_{add} = 10$ et le gain correspondant est de 10 dB.

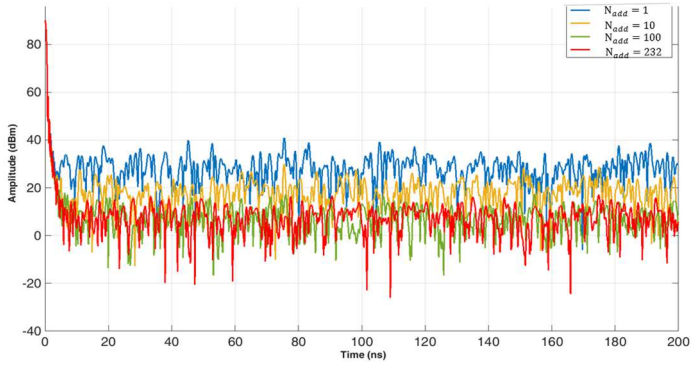


Figure 3.2-1 : Traces (domaine temporel) acquises avec le prototype WISDOM pour 4 paramètres de sommation différents. On voit le plancher de bruit diminuer avec l'augmentation du nombre d'échantillons utilisés pour la sommation.

3.2.2 Choix du nombre N_{freq} de fréquences utilisées

L'échantillonnage d'un signal dans le domaine fréquentiel avec un pas Δf revient à périodiser ce signal dans le domaine temporel avec une période $T = \frac{1}{2\Delta f}$.

Pour échantillonner correctement sans repliement dans le domaine temporel (aliasing) un signal de durée t_{max}, il faut que T > t_{max} . On a $t_{max} = t_{propag+}t_{sig}$, où t_{sig} est la durée du signal synthétisé dans le domaine temporel (pour WISDOM, $t_{sig} \sim \frac{1}{B} \sim 0{,}5\ ns$) et t_{propag} est le temps de propagation aller-retour jusqu'à la profondeur de détection (en pratique, $t_{propag} \gg t_{sig}$). On considère ainsi que t_{max} correspond à la limite à partir de laquelle le signal reçu devient négligeable.

On doit donc vérifier $t_{max} < \frac{1}{2\Delta f}$ et dans le cas de WISDOM (Figure 3.1-1), $\Delta f = \frac{B}{N_{freq}}$, donc $N_{freq} > B\ t_{max}$. Si un écho qui correspond à une réflexion sur une structure profonde est reçu avec un retard supérieur à t_{max} (pour WISDOM, la valeur nominale de t_{max} est de 200 ns, ce qui correspond à 30 m de distance dans le vide et à 15 m de distance dans un milieu de constante diélectrique égale à 4), il apparaitra sur le radargramme comme un signal correspondant à une réflexion sur une cible beaucoup plus proche du fait du repliement. Ce phénomène peut induire des interprétations erronées, il faut donc choisir soigneusement la valeur de N_{freq} et donc de Δf pour que la profondeur de détection corresponde à un retard inférieur à t_{max}.

Cet effet de repliement temporel sur les données WISDOM est illustré sur la Figure 3.2-2. Nous avons choisi d'exploiter les données issues d'une expérience conduite en laboratoire, avec des cibles suspendues dans l'air, dont on reconnait la signature hyperbolique et où l'on distingue de forts échos lointains sur les murs et le plafond. Ce cas est idéal pour illustrer les effets tels que l'aliasing. En milieu naturel, les échos les plus lointains sont en effet généralement très faibles en amplitude comparés aux premiers et le phénomène de repliement est moins pénalisant. Le t_{max} sur ces données correspond à 150 ns (on distingue un écho jusqu'à ce temps de trajet). Le radargramme à gauche correspond à $N_{freq} = 1001$, on a donc $\Delta f = 2{,}5\ MHz$ et $T = 200\ ns$, la condition T > t_{max} est donc remplie. Les radargrammes de droite ont quant à eux été construits en dégradant progressivement le nombre de fréquences utilisées tout en conservant la bande de fréquence totale $B = 2{,}5$ GHz. Ainsi, on ne respecte plus la condition requise pour éviter le repliement. La deuxième figure (générée en prenant une fréquence sur deux) est très semblable à la première, cependant on voit apparaître de très faibles signaux qui perturbent légèrement la netteté des données. Sur le troisième radargramme (1 fréquence sur 3), par contre, on voit apparaître les échos lointains (visibles sur les données complètes) dès les premiers temps sur les radargrammes tronqués, qui se superposent au fur et à mesure que le nombre de fréquences utilisées diminue.

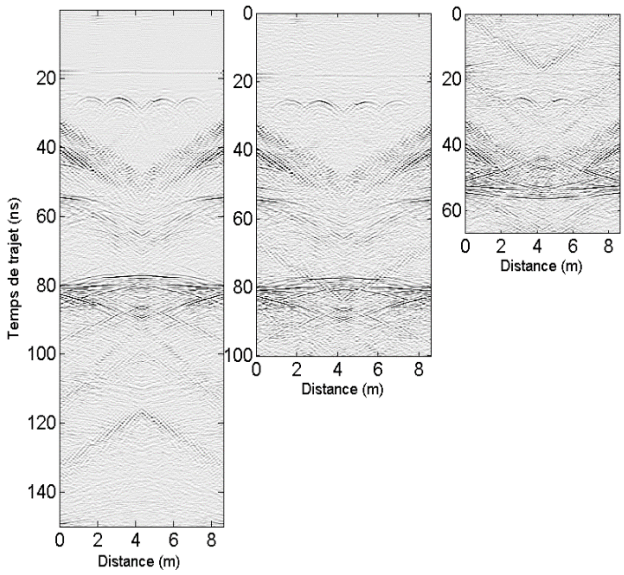


Figure 3.2-2 : Effet du repliement sur les données WISDOM sur une bande de fréquence B =2.5 GHz, $t_{max} = 150\ ns$. a) radargramme complet ($N_{freq} = 1001; T = 200\ ns$) ; b) ($N_{freq} = 501; T = 100\ ns$) ; c) $N_{freq} = 334; T = 67\ ns$)

3.2.3 Bilan de liaison de WISDOM

Tableau 3.2-1 : Principales caractéristiques instrumentales de WISDOM		
		Valeurs nominales
Fréquence centrale	f_0	1.75 GHz
Largeur de bande	B	2.5 GHz
Nombre de fréquences	N_{freq}	1001
Pas en fréquence	Δf	2.5 MHz
Pas d'acquisition	Δt	200 µs
Durée du sondage	T_{sond}	0,2s
Puissance fournie	P_F	1 mW
Facteur de Bruit[3]	NF	8dB
Gain de la chaine récepteur	g_R	25dB
Largeur du filtre récepteur	B_{RX}	1 kHz
Gain des antennes	$G_{TX} = G_{RX}$	1 à 8 dB en fonction de la fréquence (voir Figure 3.1-7)
Nombre de bits du CAN	N_{CAN}	16
Nombre d'additions	N_{add}	10
TOS[4] transmetteur/récepteur	$e_{TX} = e_{RX}$	0.1

[3] Le facteur de bruit quantifie la dégradation relative du rapport signal sur bruit entre sa sortie et son entrée

[4] Le TOS pour Taux d'Ondes Stationnaire représente le rapport Tension Réfléchie / Tension Transmise x 100 : ce facteur permet de vérifier la compatibilité entre l'antenne et l'électronique par rapport à la fréquence émise, sous peine de détériorer la transmission et la réception.

Dans cette section, nous nous proposons de reprendre les éléments introduits dans le Chapitre 2 concernant le dimensionnement des radars, appliqué à WISDOM.

Dans le domaine fréquentiel, le rapport Signal sur Bruit (ou SNR) est :

$$\frac{P_R}{P_b} = \frac{P_F}{P_b} e_{TX} G_{TX}\, e_{RX} G_{RX} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{(4\pi d_{RX-C})^2} \frac{1}{(4\pi d_{C-TX})^2} A_{milieu} S_C$$

Avec P_R la puissance reçue utile, P_B la puissance du bruit, P_F la puissance fournie à l'émetteur, λ la longueur d'onde, d_{RX-C} la distance entre l'antenne de réception et la cible d_{C-TX} la distance entre l'antenne d'émission et la cible, A_{milieu} les pertes par absorption ou diffusion, et S_C la section efficace de la cible.

Le gain de la chaine de réception est ajustable grâce à un atténuateur variable entre 25 dB et -7dB. Le gain des antennes augmente de 1 à 8 dB (voir Figure 3.1-7) avec la fréquence ce qui permet de contrebalancer en partie les pertes de propagation qui augmentent avec la fréquence.

Le facteur de bruit mesuré de la chaine de réception est de 8dB pour un gain total mesuré de 25 dB. Les figures qui suivent donnent une estimation du rapport Signal sur Bruit obtenu pour deux types de milieux (l'un à fortes pertes et l'autre à faibles pertes) et pour deux interfaces (l'une lisse et l'autre rugueuse).

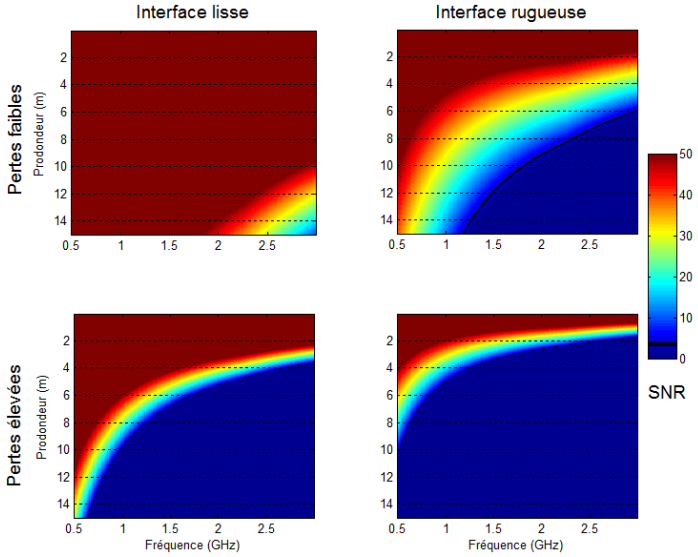


Figure 3.2-3 : Estimation du SNR en fonction de l'environnement et de l'interface ciblée. La limite à 3dB, qui autorise la bonne détection d'un écho, est indiquée en noir.

La Figure 3.2-3 représente le SNR obtenu pour 4 types de milieux, en fonction de la fréquence et de la profondeur de l'interface à détecter. On note déjà que pour un même milieu, les basses fréquences permettent d'atteindre des profondeurs plus importantes que les hautes fréquences : prenons l'exemple du cas 4, la profondeur de détection atteinte à 0,5 GHz est de 10 m, contre 2 m pour une fréquence de 2,5 GHz. Pour la détection d'interfaces lisses, les milieux transparents aux fréquences radar (pertes faibles, cas 1) permettent d'atteindre des profondeurs de détection de plusieurs dizaines de mètres pour les basses fréquences et jusqu'à 16 m pour les hautes fréquences. Lorsque l'atténuation des ondes est importante (pertes élevées, cas 3), le SNR diminue rapidement et ces valeurs sont dégradées

respectivement à 16 m et 4 m. On note également une différence importante entre les profondeurs de détection atteintes selon le type d'interface : pour la fréquence centrale de WISDOM (1.75 GHz), la profondeur de détection pour l'interface rugueuse diminue de 50% par rapport à celle d'une interface lisse, que ce soit dans le cas de pertes faibles ou non.

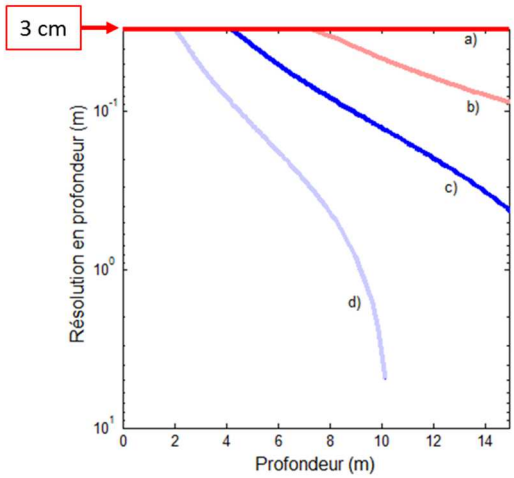


Figure 3.2-4 : Performances de résolution attendues pour WISDOM dans le cas de la détection d'une interface rugueuse ou lisse dans un milieu à pertes importantes ou faibles

La Figure 3.2-4 représente, pour les 4 types d'environnements étudiés sur la figure précédente, la résolution attendue en considérant qu'une fréquence contribue à la résolution de l'instrument si elle donne un SNR > 3dB pour le rapport signal sur bruit, qui autorise une bonne détection d'une interface rugueuse. Une résolution verticale d'environ 3 centimètres est obtenue lorsque toutes les fréquences contribuent au signal reçu. C'est le cas pour l'écho correspondant à l'interaction avec la surface. A des profondeurs plus importantes, seules les basses fréquences peuvent encore contribuer au signal, dégradant progressivement la résolution atteinte. Pour le « pire » cas d) (fortes pertes + interface rugueuse), la résolution à 10 m de profondeur n'est plus que de 4 m.

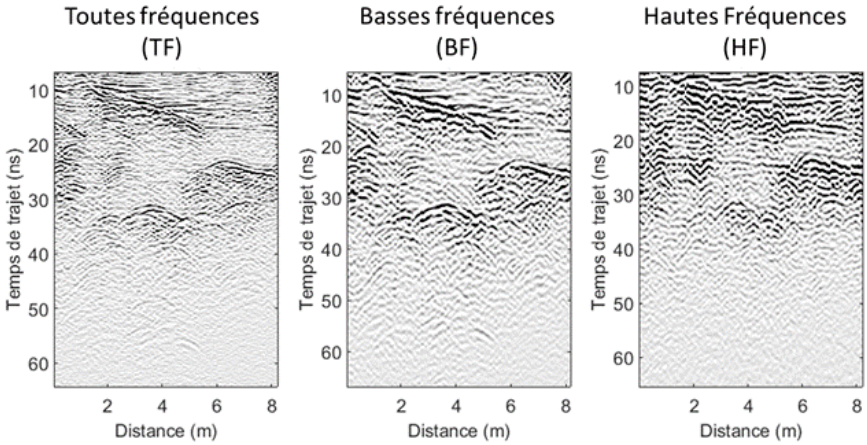


Figure 3.2-5 : Radargrammes acquis dans des grottes glacées à Dachstein en Autriche. Comparaison entre l'utilisation de toute la bande de fréquence de 0.5 à 3 GHz (gauche), les basses fréquences de 0.5 à 1.5 GHz (milieu) et les hautes fréquences de 2 à 3 GHz (droite).

La Figure 3.2-5 illustre sur des données expérimentales l'effet de la fréquence sur la pénétration et de la largeur de bande sur la résolution. Elle représente des radargrammes issus d'une campagne de mesures dans des grottes glacées à Dachstein, acquises avec l'instrument WISDOM. Elle illustre très bien l'impact de la fréquence sur la profondeur de pénétration. On voit en effet que le radargramme « Basses Fréquences (BF) » permet l'accès à des échos plus lointains, et donc à des interfaces ou des objets plus distants que pour la gamme des hautes fréquences (HF) qui ne détecte pas d'écho au-delà de 40 ns. Quand on observe le radargramme qui regroupe toutes les fréquences enregistrées par l'instrument, on remarque en outre que celui-ci présente une bien meilleure résolution verticale : une séquence noir-blanc-noir sur le premier dure 1.2 ns, ce qui correspond dans la glace à une distance de 2 cm. Dans les cas HF et BF, un écho correspond à une durée de 2.2 ns, et donc à une distance de 3.6 cm. Ceci signifie que dans le cas de l'utilisation de toute la bande de fréquence, WISDOM est au moins capable de détecter deux échos successifs espacés de 4 cm, contre 7 cm pour les sous-bandes de fréquences. Notons également que la résolution effective atteinte par le radar peut être améliorée grâce au mode d'acquisition selon des profils. Le fait de pouvoir suivre une interface sur une distance horizontale de quelques mètres peut en effet significativement améliorer celle-ci. Si la glace présente des impuretés (poussières, eau liquide), les ondes seront plus rapidement atténuées et pénètreront moins profondément. Cependant, l'augmentation de la permittivité aura pour effet de diminuer la vitesse de propagation des ondes, et donc d'augmenter la résolution verticale. Inversement, si la glace est poreuse et contient des bulles d'air, la résolution s'en trouvera diminuée. En radar, tout est donc affaire de compromis entre profondeur de détection et résolution atteintes. Quoiqu'il en soit, les performances de WISDOM dans des environnements réalistes sont conformes à celles attendues, à savoir une résolution de quelques centimètres dans les trois premiers mètres du sous-sol. Lorsque les conditions sont « optimales » avec peu d'atténuation, ces performances sont encore améliorées.

3.2.4 Gating

On s'attend à ce que les échos tels que le couplage entre les antennes ou la réflexion sur la surface soient sensiblement plus puissants que les échos qui proviennent du sous-sol. Ces échos peuvent en conséquence diminuer la dynamique effective de l'instrument ou être cause de saturation. La technique du hard-gating permet d'atténuer de façon maîtrisée et connue ces premiers échos de grande amplitude, permettant ainsi d'augmenter la dynamique effective de l'instrument. Le principe est simple : les chaines de transmission et réception sont équipées de switches qui permettent de régler indépendamment la plage temporelle d'émission et celle de réception des signaux. Les paramètres à considérer pour cette technique sont le délai entre la transmission et la réception (τ_g), l'intervalle de répétition du délai (GRI pour Gate Repetition Interval), ainsi que la durée du délai pour la transmission (Tgw pour Transmitter gate width) et la réception (Rgw pour Receiver gate width), comme illustré sur la Figure 3.2-6. On peut choisir la plage d'écoute de la chaine de réception pour n'écouter que les échos intéressants.

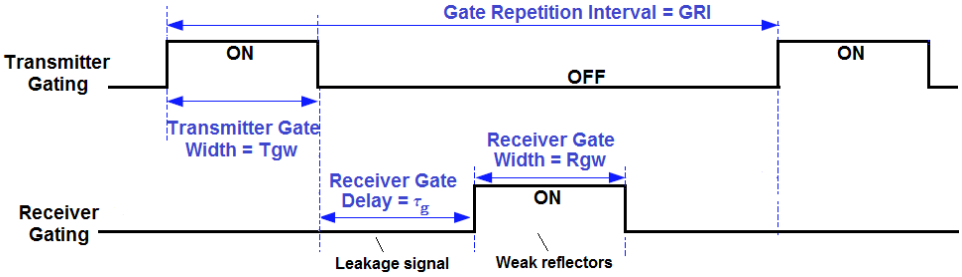


Figure 3.2-6 : principe du gating et paramètres associés.

Le signal mesuré à une fréquence donnée avec gating est modulé en amplitude par une fonction triangulaire qui correspond à la convolution des fenêtres de gating en transmission et réception. Dans le cas de WISDOM, les durées nominales de gating pour les chaines de transmission et de réception sont égales (T_{gw}=R_{gw}). La Figure 3.2-7 illustre l'effet du gating sur un signal composé de deux échos de même amplitude séparé de 15 ns. Le principe du gating fonctionne correctement (on s'affranchit bien du premier écho le plus puissant à partir d'un délai de 3 ns), cependant l'amplitude de l'écho enregistré est sous-estimée (110 dB contre 130 dB pour la mesure sans gating) et le plancher de bruit augmente mécaniquement avec sa mise en place. Un délai de gating important a pour effet d'annuler les deux premiers échos (courbe verte). Dans le cas où les premiers échos sont proches en temps, comme c'est le cas pour le couplage entre les antennes et l'écho de sol (~2 ns dans l'air), la technique du gating ne permet pas d'annuler le premier sans « tronquer » le deuxième (la durée d'une impulsion couvre environ 1,2 ns dans l'air). Il serait en fait nécessaire d'effectuer une première mesure sans gating puis avec, en annulant les deux premiers échos pour mieux visualiser les échos plus lointains. Cette technique est donc adaptée à des cibles lointaines.

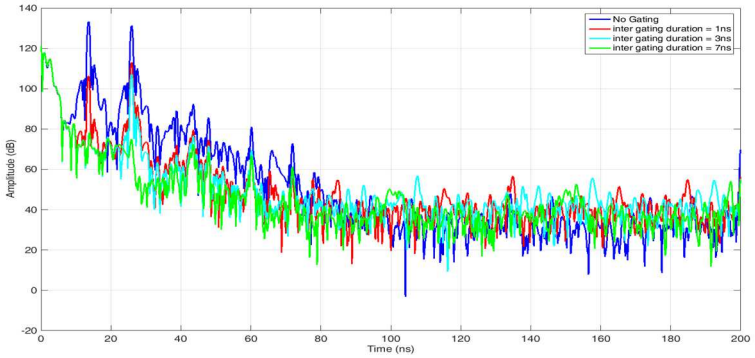


Figure 3.2-7 : Comparaison des signaux sans et avec gating pour différents délais entre la transmission et la réception.

3.2.5 Traitement des données de l'instrument WISDOM

Différents traitements classiques sont effectués sur les données de façon à faciliter l'interprétation des radargrammes. Les opérations présentées dans cette section sont toutes effectuées après acquisition, et non pas au sein de l'électronique (comme par exemple pour les additions cohérentes).

Fenêtrage pour la transformée de Fourier inverse

L'instrument WISDOM collecte les signaux en domaine fréquentiel. Il est donc nécessaire de passer par une transformée de Fourier inverse pour reconstruire la trace enregistrée en domaine temporel. Pour se rapprocher d'une fonction de Dirac, il faut que le lobe principal d'un écho soit le plus étroit possible, tandis que les lobes secondaires doivent être réduits au maximum. Avant la TF inverse, on applique un fenêtrage du signal fréquentiel qui va permettre de réduire le rapport signal sur bruit et les lobes secondaires. Cependant, cette opération a pour effet d'élargir le lobe principal : plus le lobe principal d'une fenêtre aura tendance à être étroit, plus ses lobes secondaires seront importants. Il y a donc un compromis à faire entre largeur du lobe principal et importance des lobes secondaires. Parmi les opérateurs usuels, on trouve les fenêtres rectangulaire et triangulaire, les fenêtres de Hann ou de Hamming ou encore de Blackman et Harris (Solomon, 1994).

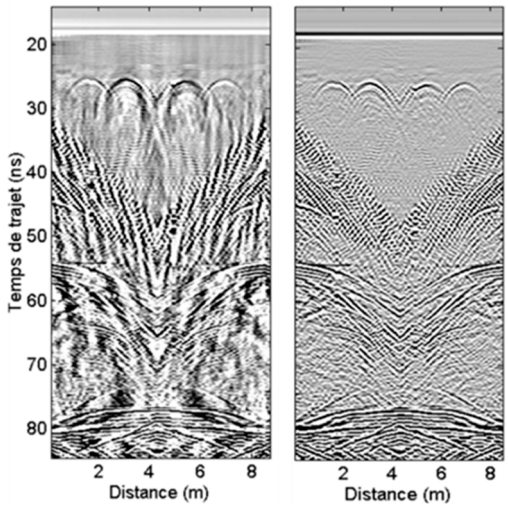


Figure 3.2-8 : Exemple de radargrammes obtenus sans (gauche) et avec fenêtrage (droite)

Soustraction de la valeur médiane calculée *a posteriori*

Les artefacts instrumentaux ont la particularité d'être constants pour une même configuration électronique du radar. Ainsi, lorsqu'on effectue des profils, ces derniers apparaissent sur un radargramme comme des « lignes » horizontales. Une simple soustraction de la valeur médiane calculée à posteriori (à partir de la surface pour ne pas perdre l'écho lui correspondant) permet de s'en affranchir.

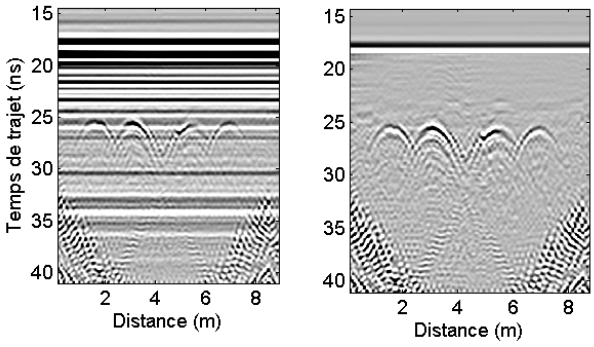


Figure 3.2-9 : Illustration de l'effet de l'opérateur sur la médiane qui permet de retirer les signaux constants. Seul le couplage direct entre antennes a été conservé.

Utilisation d'un gain *a posteriori*

Dans les milieux à fortes pertes, les ondes sont rapidement atténuées et les échos les plus faibles deviennent invisibles sur les radargrammes, même si ils se trouvent au-dessus du plancher de bruit. Pour pallier ce problème, il est possible de mettre en place un gain qui augmente avec la profondeur (ou le temps de propagation) afin de rehausser ces échos. La forme du gain que nous utilisons régulièrement dans le cas de campagnes de mesures en milieu atténuant est la suivante :

$$Gain(t) = (t - t_{deb})\, e^{C_{gain} \frac{(t-t_0)}{\max(t-t_0)}} \tag{4.4}$$

Avec t le temps de propagation, t_{deb} le temps pris à partir du point source, C_{gain} un entier qui représente la caractéristique exponentielle du gain, et t_0 le temps d'arrivée jusqu'à la surface.

Le premier terme annule l'effet de la divergence du faisceau (en $\frac{1}{d}$, d correspondant à la distance entre la source et la cible), et les facteurs dans l'exponentielle permettent de tenir compte d'une part de l'atténuation liée à la partie imaginaire de la permittivité (terme en $\frac{1}{\max(t-t_0)}$), et d'autre part d'appliquer le gain uniquement à partir de la surface pour préserver l'écho qui lui est associé $(t - t_0)$.

Migration des données

La migration des données en deux dimensions permet de convertir les radargrammes $B(x,t)$ en images migrées $M(x,z)$, z étant la profondeur. Il s'agit de focaliser la puissance reçue par le radar au niveau des points source dans le milieu de façon à localiser les diffuseurs et estimer leur taille. Cette opération, communément utilisée en sismique, repose sur une estimation de la vitesse de propagation des ondes dans le milieu (ou dans les différentes unités géologique du milieu, si le milieu n'est pas homogène). Il existe plusieurs méthodes de migration, dont la sommation hyperbolique, la migration de Kirchhoff, la migration par phase-shift et la migration f-k (Stolt).

Pour la méthode de sommation hyperbolique, on attribue à chaque point du plan vertical (x,z) la somme de l'énergie diffusée par ce point selon l'hyperbole que l'on s'attend à trouver compte tenu de la vitesse de propagation supposée dans le milieu. La plupart des autres méthodes reposent sur le modèle des sources explosives (exploding sources) qui considère que les diffuseurs émettent les ondes reçues qui se propagent dans le milieu à une vitesse fictive qui est la moitié de la vitesse réelle *c/n*. Les méthodes de migration permettent alors de rétro-propager l'onde reçue jusqu'au diffuseur en utilisant l'équation des ondes dans le milieu pour la vitesse fictive. La méthode f-k se base sur l'équation des ondes dans le domaine fréquentiel.

Ainsi, à partir d'une analyse directe et visuelle des radargrammes $B(x,t)$, il est possible d'obtenir un modèle initial de sous-sol (estimation grossière du nombre de couches présentes dans le sous-sol et des vitesses de propagation). L'étape de migration en 2D permet d'utiliser ces informations pour convertir les retards mesurés en distance, de localiser les diffuseurs dans un plan vertical (nous verrons par la suite que pour des diffuseurs qui ne sont pas situés à la verticale du radar, cette localisation est erronée) et de vérifier la cohérence des valeurs de constante diélectrique considérée).

Ces reconstitutions restent indicatives car plus les milieux sont complexes, plus les signatures des diffuseurs, qui sont le résultat de la somme de plusieurs contributions, sont complexes à inverser.
Nous avons choisi d'utiliser le logiciel commercial matGPR (Tzanis, 2006) pour produire des radargrammes migrés par la méthode *f-k*, notamment dans le cadre d'une campagne de mesures dans des grottes glacées à Dachstein (Figure 3.2-10).

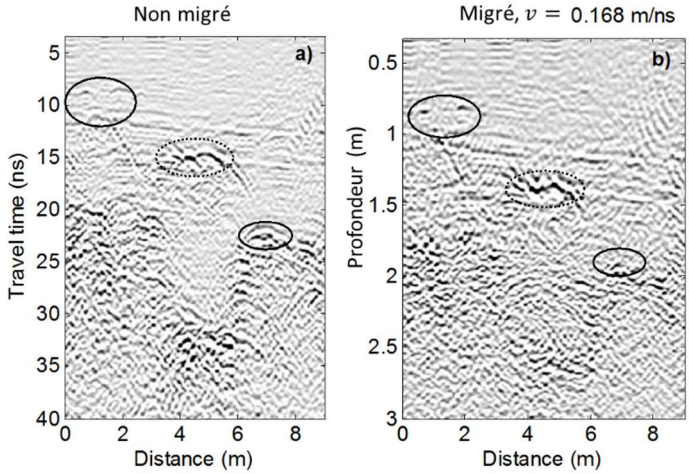


Figure 3.2-10 : Comparaison entre radargramme non migré (gauche) et migré (droite) pour un milieu à deux couches (air et glace). Les données ont été acquises lors de la campagne de mesures à Dachstein sur une surface glacée. La vitesse qui permet de « rassembler » le plus correctement les hyperboles est estimée à 0.168 m.ns^{-1}, ce qui revient à une constante diélectrique de 3.2, typique de la glace. Les cercles noirs mettent en exergue le rassemblement des hyperboles en leur sommet. Extrait de Dorizon et al., 2015.

3.3 Etude comportementale de l'instrument WISDOM

Comme nous l'avons déjà évoqué, le dimensionnement de l'instrument WISDOM a été fortement conditionné par les contraintes liées au spatial : les missions embarquées fonctionnent sur la base de ressources allouées pour chacun des instruments en termes de volume, de masse, de puissance générée, de volume de données et de bande de fréquences utilisable. Le développement instrumental de WISDOM a donc consisté à rechercher le meilleur compromis entre respect de ces contraintes « spatiales » et performances de l'instrument.

3.3.1 Mesure incomplète

Au départ, le fait de mesurer uniquement la partie réelle du signal rétrodiffusé résultait d'un de ces compromis : WISDOM était alors programmé pour fonctionner sur une plus large bande, de 0,3 GHz à 3 GHz, et l'erreur globale commise sur l'amplitude des échos restait raisonnable. Afin de limiter le volume des données et l'encombrement de l'instrument, le choix a donc été fait de laisser la partie imaginaire de côté. La bande de fréquences utilisable par WISDOM a ensuite été limitée à 0,5 GHz - 3 GHz, du fait des contraintes de la mission en termes de brouillage électromagnétique (interférences).

Le radar dans sa version actuelle ne mesure donc pas la réponse en fréquence complète (voies I et Q) du signal reçu mais uniquement sa partie réelle (voie I).

En théorie, si la partie réelle $R(f)$ de la transformée de Fourier $S(f)$ d'un signal réel et causal est connue pour toute fréquence f, il est possible d'obtenir rigoureusement la partie imaginaire $I(f)$ de cette transformée de Fourier par transformée de Hilbert.

On montre en effet que $I(f) = Hilbert\{R(f)\} = -\frac{1}{\pi} VP \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{R(f-f')}{f'} df'$ où VP correspond à la valeur principale de Cauchy de l'intégrale. De cette façon il est possible d'estimer la partie imaginaire manquante de $S(f)$.

Cependant, la mesure de WISDOM ne donne accès aux valeurs prises par $R(f)$ que sur une bande limitée en fréquence (entre 0.5 et 3 GHz). Or, même si cette bande de fréquence est large, la restitution de $I(f)$ n'est pas exacte. Des simulations ont été faites pour quantifier l'erreur commise de ce fait (Figure-3.3-1).

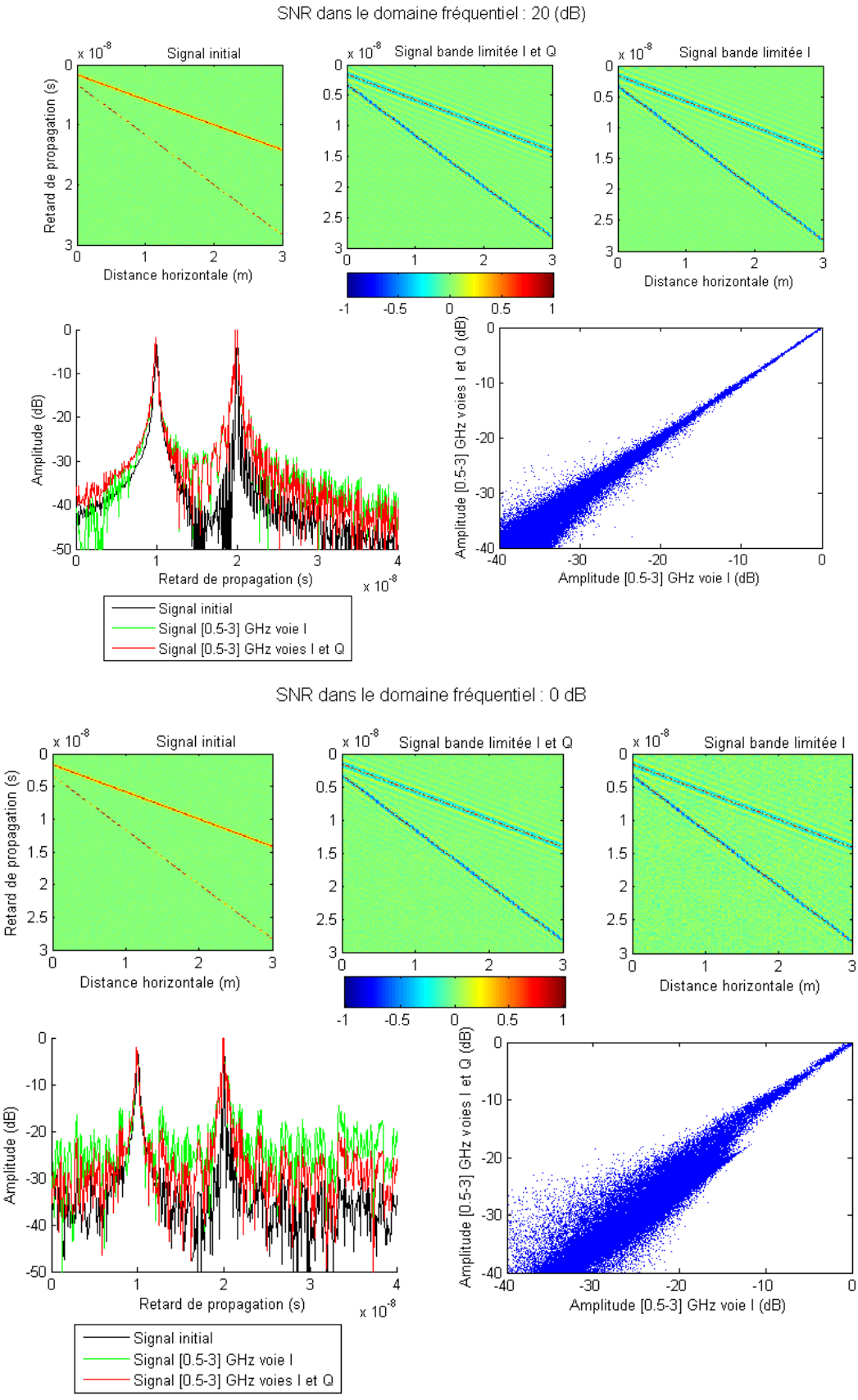


Figure-3.3-1 : Comparaison des signaux récoltés dans le cas : d'un signal à large spectre (signal initial); d'un signal entre 0.5 et 3 GHz avec les voies I et Q; un signal à bande limitée (0.5-3 GHz) avec la mesure de la partie réelle uniquement

Premièrement, on ne remarque aucune erreur sur les retards mesurés entre le cas du signal initial et les cas « bande limitée ». Les temps de trajets des ondes sont donc restitués correctement.

D'une manière générale, la comparaison des signaux large bande et en bande limitée montre que l'erreur est plus importante pour de faibles amplitudes. Dans le premier cas (SNR de 20 dB dans le domaine fréquentiel), on obtient une erreur moyenne de 3 dB à -20 dB d'amplitude sur une mesure avec les voies I et Q, contre plus de 8 dB d'erreur à -40 dB. Le bruit dégrade rapidement la précision : pour un SNR de 0 dB dans le domaine fréquentiel, on atteint une erreur de 10 dB pour -20 dB d'amplitude.

Pour le premier cas, l'erreur commise sur l'amplitude mesurée à 20 dB due au fait que la partie imaginaire est manquante (comparaison entre les signaux rouge et vert) est de l'ordre de 1dB, contre ~8 dB dans le cas d'un SNR de 0 dB dans le domaine fréquentiel. La précision perdue causée par la mesure de la partie réelle uniquement est donc moins importante que l'erreur induite par la limitation de la bande de fréquences utile de l'instrument. Le signal mesuré dans le cas d'une mesure unique sur la voie I a également pour effet d'augmenter le plancher de bruit d'environ 10 dB dans le cas d'un SNR de 0 dB en domaine fréquentiel. Néanmoins, c'est sur ce premier défaut qu'il nous est possible de jouer.

Etant donné que la partie imaginaire du signal permet de reconstruire le signal en domaine temporel avec moins d'erreur et de déconvoluer, dans le domaine fréquentiel, la fonction de transfert de l'instrument et celle du milieu, des essais sont actuellement en cours pour modifier l'électronique de l'instrument et avoir accès à la phase : des tests sur plusieurs prototypes sont conduits en chambre anéchoïque au TUD (Dresden), au LATMOS et au LAB de Bordeaux pour étudier le comportement instrumental dans le cadre de ces modifications.

3.3.2 Approximation en champ lointain

3.3.2.1 Notion de champ lointain

La zone de champ lointain, ou zone de Fraunhoffer correspond à une distance au-delà de laquelle l'énergie rayonnée par une source est confinée dans un faisceau conique et où les ondes sont sphériques (elles peuvent aussi être considérées comme localement planes lorsque le rayon de courbure est très faible). L'amplitude du champ décroît alors de façon inversement proportionnelle à la distance à la source. La limite du champ lointain la plus connue est donnée par la formule :

$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda} \tag{4.5}$$

Avec r la distance entre l'antenne et le début de la zone de Fraunhoffer, D la taille caractéristique de l'antenne, et λ la longueur d'onde.

Dans le cas de WISDOM, qui fonctionne sur une largeur de bande importante, cette limite n'est pas si simple : il existe en effet deux autres formules qu'il convient d'utiliser en fonction de ce que l'on nomme

la taille caractéristique électrique de l'antenne (Bansal, 1999), inversement proportionnelle à la longueur d'onde (Tableau 3.3-1).

Tableau 3.3-1 : Distance jusqu'au champ lointain en fonction de la taille caractéristique électrique des antennes	
Taille caractéristique électrique	Distance jusqu'au champ lointain
$\frac{D}{\lambda} \leq 0{,}33$	$r > 1{,}6\,\lambda$
$0{,}33 \leq \frac{D}{\lambda} \leq 2{,}5$	$r > 5D$
$\frac{D}{\lambda} \geq 2{,}5$	$r > \frac{2D^2}{\lambda}$

D représente le diamètre de l'élément rayonnant utilisé pour produire le signal. Dans le cas de WISDOM, on peut choisir de ne prendre que l'élément excité ($D \sim 28\ cm$) ou bien la taille totale de l'antenne, étant donné qu'elle est entièrement parcourue par le courant ($D \sim 45\ cm$). Les deux cas sont illustrés sur la Figure 3.2-2. La limite basse du champ lointain est de 1,5 m pour les basses fréquences avec une taille de 0,28 m, contre 2,25 m lorsqu'on prend en compte la structure entière de l'antenne. En toute logique, le champ lointain devrait être atteint plus rapidement une fois que la surface est atteinte, étant donné que la longueur d'onde se trouve raccourcie dans les milieux de permittivité supérieure à 1.

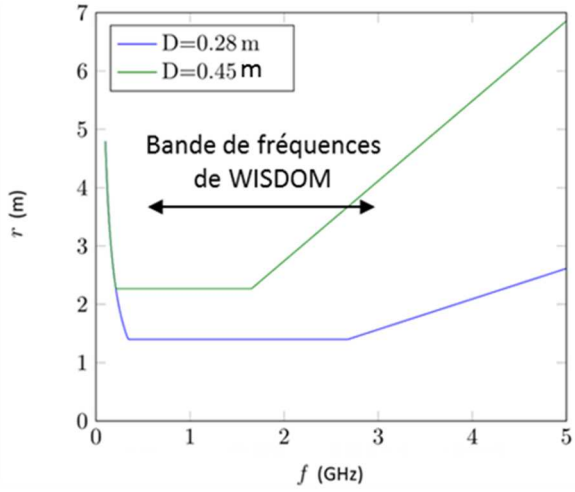


Figure 3.3-2 : Limite du champ lointain pour le cas de WISDOM pour deux tailles caractéristiques d'antennes différentes

3.3.2.2 Mesure en réflexion sur une plaque conductrice

On comprend bien d'après la Figure 3.3-2 que le champ lointain dans le cas de WISDOM n'est pas encore atteint au niveau de la surface, puisque le GPR, une fois installé sur le rover ExoMars, se situera à environ 35 cm de distance de la surface. Ceci peut poser problème notamment dans le cadre des méthodes de restitution des paramètres du sous-sol que nous avons mises au point, valables justement en champ lointain. Afin de vérifier si le comportement du radar s'en trouve modifié, nous avons conduit un test simple : les antennes sont disposées à une distance $d_0 = 35\ cm$ d'un mur que l'on a recouvert

d'aluminium. On s'éloigne progressivement du mur par pas de 2 cm, et pour chaque position, on effectue un sondage. Les amplitudes correspondant à l'écho sur le mur sont affichées en sous-bandes de fréquences sur la Figure 3.3-3, avec les fonctions qui correspondent à une décroissance inversement proportionnelle à la distance au mur. On observe de petites oscillations dues aux variations de la phase (mesure incomplète que nous venons d'évoquer), dont la période diminue avec la fréquence centrale. La forme du signal obtenue est cependant bien proportionnelle à l'inverse de la distance au mur. Le comportement du radar en champ proche (à des distances comprises entre 35 cm et 1,5 m) peut donc être approximé à un comportement en champ lointain.

D'autres tests en laboratoire ou en chambre anéchoïque que nous ne décrirons pas ici ont été conduits pour vérifier le comportement nominal de l'instrument, notamment pour comparer plusieurs versions du prototype (il existe actuellement 3 versions de l'électronique et deux versions d'antennes de même structure mais de compositions différentes[5]), pour tester le bon fonctionnement des atténuateurs sur les deux chaines de transmission et réception, ou encore pour améliorer le rapport Signal sur Bruit par l'ajout de filtres fréquentiels. Des subtilités existent en termes de réponse instrumentales entre les prototypes, cependant nous n'allons pas les considérer dans ce manuscrit, préférant nous focaliser sur l'interprétation des données.

[5] Une paire d'antennes est en epoxy, l'autre en kapton.

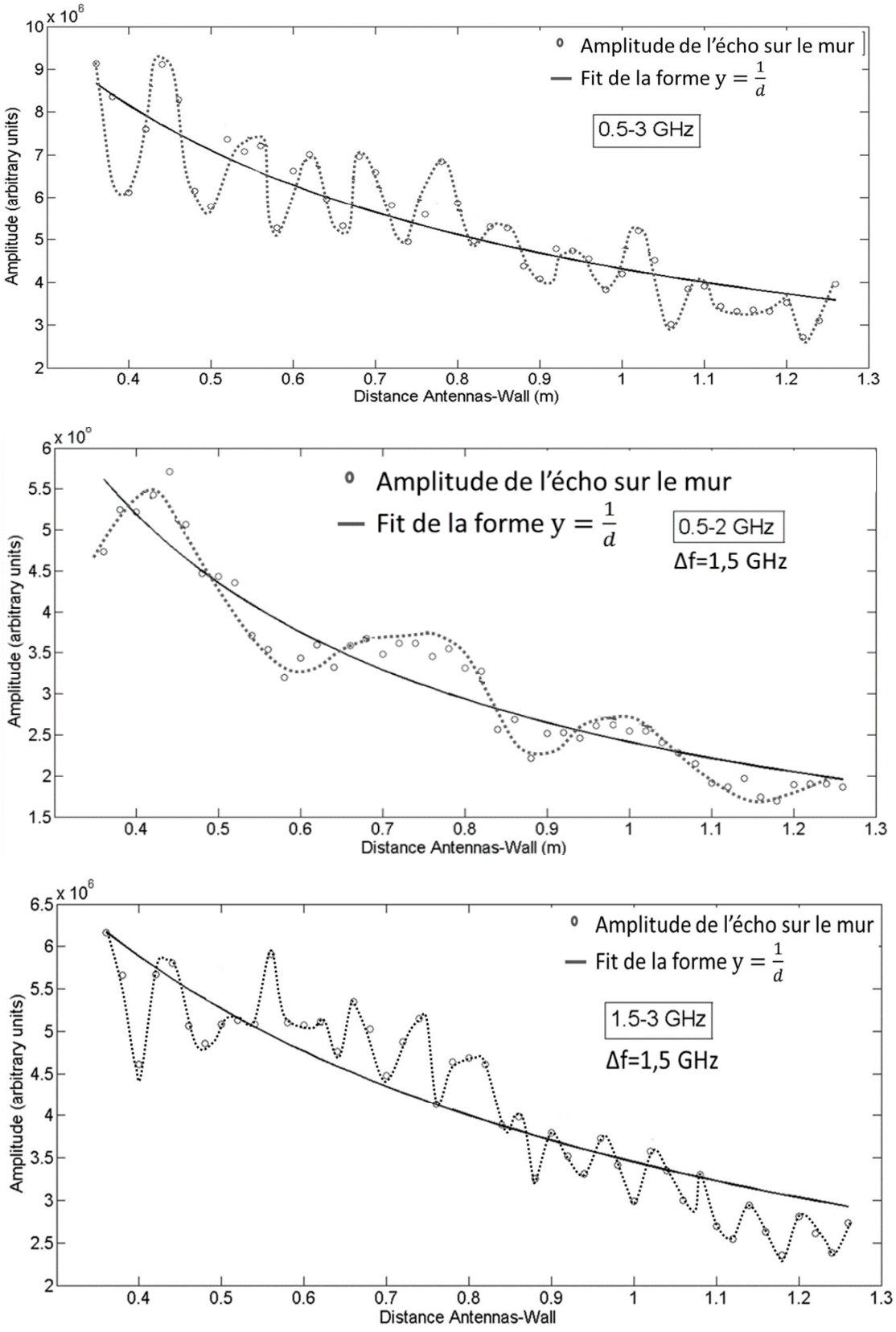


Figure 3.3-3 : Amplitudes mesurées correspondant à l'écho sur le mur d'aluminium pour 3 bandes de fréquences (de haut en bas, All freqs, BF, HF).

3.4 Les données acquises avec les prototypes de WISDOM

3.4.1 Démarche

Le développement d'un instrument passe bien évidemment par des tests divers pour étudier son comportement en présence d'environnements variés ou selon différentes configurations. On peut ainsi tenter d'améliorer le prototype progressivement en identifiant les potentiels artefacts instrumentaux qui auraient une incidence non négligeable sur la qualité des données. L'intérêt de tester l'instrument n'est pas uniquement celui-ci : afin de préparer l'interprétation et mettre au point la chaîne de traitement, l'idée est de créer une base de données que l'on pourra à terme comparer aux données martiennes. Nous avons ainsi effectué plusieurs campagnes de mesures dans des environnements divers ainsi que des tests en environnements contrôlés (Tableau 3.4-1) qui nous ont permis de tester les performances de WISDOM ainsi que les méthodes de restitution des paramètres du sous-sol que nous avons développés. Le travail de préparation des outils qui permettront d'interpréter les données passe donc également par la définition et la préparation de ces tests et campagnes de mesures.

Tableau 3.4-1 : Mesures conduites avec les prototypes de l'instrument WISDOM. Les campagnes de mesures sont indiquées en bleu, les tests en environnements contrôlés en vert

Lieu	Objectif / Type d'environnement	Années
Etna, Sicile, Italie	Milieu volcanique, dépôts pyroclastiques	2010
Chamonix, France	Glacier, neige	2011
Dachstein, Autiche	Participation à Dachstein Mars Simulation 2012, mesures dans des réseaux de caves gelées, sur glace	2012
Désert d'Atacama, Chili	Participation à SAFER, mesures sur analogue martien, milieu aride	2013
LATMOS, Guyancourt, France	Conception et tests sur l'électronique en laboratoire, tests divers en intérieur et extérieur	2005 2015
LAB, Bordeaux, France	Conception et tests sur l'électronique en laboratoire, tests divers en intérieur et extérieur	2005 2015
TUD Dresden, Allemagne	Conception des antennes, tests en chambre anéchoïque	2005 2015
Fontainebleau, France	Sable, tests de rugosité, objets enfouis	2009 2010
Cernay, France	Sable, tests avec objets enfouis et humidification	2010 2013
GEOPS, Orsay, France	Mesures en chambre froide sur sols variés, mesures sur surface de sable rugueuses	2012 2015

Nous reviendrons sur les résultats des tests conduits en environnements contrôlés et lors des campagnes de mesure lorsque nous aborderons les méthodes de restitution des paramètres du sous-sol développés durant cette thèse. Pour l'instant, intéressons-nous à deux d'entre elles : les campagnes de mesures de Dachstein et SAFER.

3.4.2 Dachstein Mars Simulation 2012

Du 27 avril au 1er mai 2012, l'équipe WISDOM a eu l'opportunité de participer à une campagne de mesures qui a rassemblé une douzaine d'équipes scientifiques et techniques de dix pays différents au cœur des Alpes autrichiennes, dans le réseau de grottes gelées de Dachstein. Cette campagne a été organisée et coordonnée par l'Austrian Space Forum (Groemer et al., 2012). Ses objectifs étaient de tester des expériences en relation avec la question de la vie sur Mars (Tableau 3.4-2).

Figure 3.4-1 : L'étage inférieur des grottes, avec les tests de prélèvements d'échantillons en combinaison spatiale. Source : Groemer et al., 2012.

Figure 3.4-2 : L'équipe WISDOM pratiquant des tests dans les grottes gelées à Dachstein.

Tableau 3.4-2 : Expériences conduites pendant la campagne Mars Simulation 2012 (Groemer et al., 2012).

Experiment / Hardware	Organisation	Description
Aouda.X spacesuit	Austrian Space Forum	Suit-subsystems check-out, field test of telemetry receiving station – subsystem commissioning & voice recognition.
A.X MAT/EP	Medical Univ. of Innsbruck	Medical monitoring tool – continuation of the Rio Tinto 2011 medical survey protocol
PRoVisG Cave 3D Reconstruction	Joanneum Research, Austria	3d TOF-camera for surveying parts of the cave with a high-resolution SLR camera
EXOMARS/WISDOM	LATMOS/IPSL, France	Ground validation for the ESA EXOMARS georadar under varying terrains
Asset planning	Univ. of Innsbruck, Austria	Field testing of a planning algorithm for traverse, consumables and hardware planning
CRV / Cliffbot	Association Planète Mars	Concept rover for studying steep terrain and cliffs
Terbium luminescence assay	NASA/Jet Propulsion Lab	Studying contamination vectors and germination rates of water/soil samples within the cave.
Asimov Jr. R3	Part Time Scientists (Google Lunar X-Prize)	Chassis and drive-train tests for the GLXP lunar rover prototype.
MAGMA 2	Polish Mars Society	Operational tests and demonstration of the winning rover of the University Rover Challenge
ILEWG EuroMoonMars Dachstein	Vrije Universiteit Amsterdam	Support to human factor studies, following protocol tested during ILEWG EuroMoonMars campaign in Utah as well as sterile collection of samples for PCR and phylogenetic analysis
Antipodes	Kiwispace	Simulation of a two-landing teams on Mars scenario – command handover for a remote science experiment.
ERAS C3 Simulator	Mars Society Italy	A Mars-analog Command, Control and Communication (C3) infrastructure providing processing and communications capabilities

L'existence de grottes gelées sur Mars a été suggérée par Williams et al. (2010), ce qui a motivé le choix des grottes de Dachstein pour conduire ces tests. Ces grottes sont supposées relativement stables en température et offriraient des conditions environnementales propices à la préservation de traces de vie (au premier rang desquelles l'isolement de la surface qui empêche les radiations). Pour l'équipe WISDOM, cette expérience fût l'opportunité d'évaluer les performances de l'instrument en environnement gelé et de tester sa flexibilité en termes d'adaptation sur différentes plateformes, notamment sur le rover « Magma-White » de l'équipe polonaise d'ABM Space Education, décrit dans Meszyński et al. (2013). Bien entendu, le but était également d'enrichir nos connaissances sur ces grottes, en termes de structure et de quantité de glace présente. Ces grottes sont en effet étudiées avec attention puisqu'elles permettent la conservation des traces de notre climat passé (May et al., 2011), et des GPRs ont déjà été utilisés pour sonder ces environnements (Behm and Haussmann, 2008; Behm et al., 2009). Ainsi, cinq sites ont été sélectionnés pour effectuer des sondages avec l'instrument WISDOM,

monté sur trois plateformes différentes. Les sites ont été sélectionnés en fonction de leur praticabilité et de leur intérêt glaciologique. Cette campagne de mesures et les résultats associés ont fait l'objet d'une publication dans Planetary and Space Science en 2015 (Dorizon et al., 2015), dont nous reprendrons les résultats dans les Chapitres 5 et 6. Des exemples de radargrammes acquis dans ces grottes sont présentés Figure 3.2-5 et Figure 3.2-10.

3.4.3 SAFER

SAFER (Sample Acquisition Field Experiment with a Rover) est une campagne de tests sur terrain qui s'est déroulée du 7 au 13 octobre 2013 dans le désert d'Atacama au Chili, à proximité de l'Observatoire de Paranal de l'ESO (European Southern Observatory), avec des activités parallèles à Harwell, dans le comté d'Oxford (UK) au Satellite Applications Catapult Center. Même si ces essais ne faisaient pas directement partie de la mission ExoMars 2018, ils constituaient une excellente opportunité de mises en condition pour une mission spatiale réelle. SAFER avait ainsi pour objectif d'évaluer l'efficacité des scénarios scientifiques d'ExoMars 2018, de démontrer l'utilisation d'une plate-forme rover commandée à distance et d'élaborer la stratégie et les procédures à mettre en œuvre pour la recherche et la récupération d'échantillons de sable et de rochers. Le projet avait aussi pour but de fournir aux équipes scientifiques une première expérience de commande-contrôle à distance d'un rover, avec l'acquisition de données de 3 instruments lors d'un essai sur le terrain dans les conditions de mission spatiale. Nous avons ainsi pu prendre une part active à ce projet. Le rover a été fourni par les équipes d'Astrium en Angleterre et est surnommé « Bridget ». Bridget était équipée de trois instruments d'ExoMars : WISDOM (Ciarletti et al., 2011), PANCAM (Griffiths et al., 2006) et CLUPI (Josset et al., 2012). Les commandes étaient gérées comme une véritable mission pour l'équipe scientifique et le centre de contrôle-commande. Dans ce cadre, l'équipe WISDOM s'est partagée en 2: une équipe pour assurer l'intégration de WISDOM sur le Rover sur le terrain au Chili (Figure 3.4-3) et une équipe pour assurer les commandes et les traitements des données récoltées sur le terrain, à Harwell. Ces derniers étaient installés devant un mur vidéo, sur lequel étaient combinées des données provenant des instruments du Rover et avec une carte aérienne fournie au début de la mission (Figure 3.4-3). Les équipes ont ainsi discuté et collaboré pour passer en revue les données provenant du rover et pour sélectionner de nouvelles cibles ou trajectoires à investiguer pendant les six jours martiens simulés. Les trajets sûrs pour la navigation étaient également définis à distance. Une fois qu'un plan était préparé, il était envoyé à l'équipe au Chili qui le faisait suivre au rover, tout en faisant en sorte de demeurer aussi 'invisibles' que possible pour les opérateurs distants. Le rover ExoMars était utilisé comme 'mission de référence' pour cet essai afin de maximiser son niveau de réalisme. Le rover n'était pas équipé de foreuse, ainsi, lorsque l'équipe de supervision ordonnait un forage, c'est l'équipe locale qui intervenait pour creuser sur le site à la main. Ceci a permis d'obtenir des échantillons en 'réalité de terrain', à la fois pour vérifier l'exactitude de l'analyse des données de WISDOM et effectuer des mesures en laboratoire (Dorizon et al., 2014).

L'essai sur le terrain SAFER était supervisé par la direction technique et gestion de la qualité de l'ESA, et son équipe industrielle internationale était dirigée par RAL Space, une entité du conseil pour les installations pour la science et la technologie britannique (UK Science and Technology Facilities Council). L'activité est financée par le programme de base de recherche technologique de l'ESA, avec un cofinancement supplémentaire de l'Agence spatiale britannique.

Figure 3.4-3 : A gauche : le rover Bridget en opération dans le désert d'Atacama, équipé des 3 instruments d'ExoMars, WISDOM, CLUPI et PANCAM. Source : RAL Space. A droite : le centre de contrôle à Harwell, UK. Source : SCISYS.

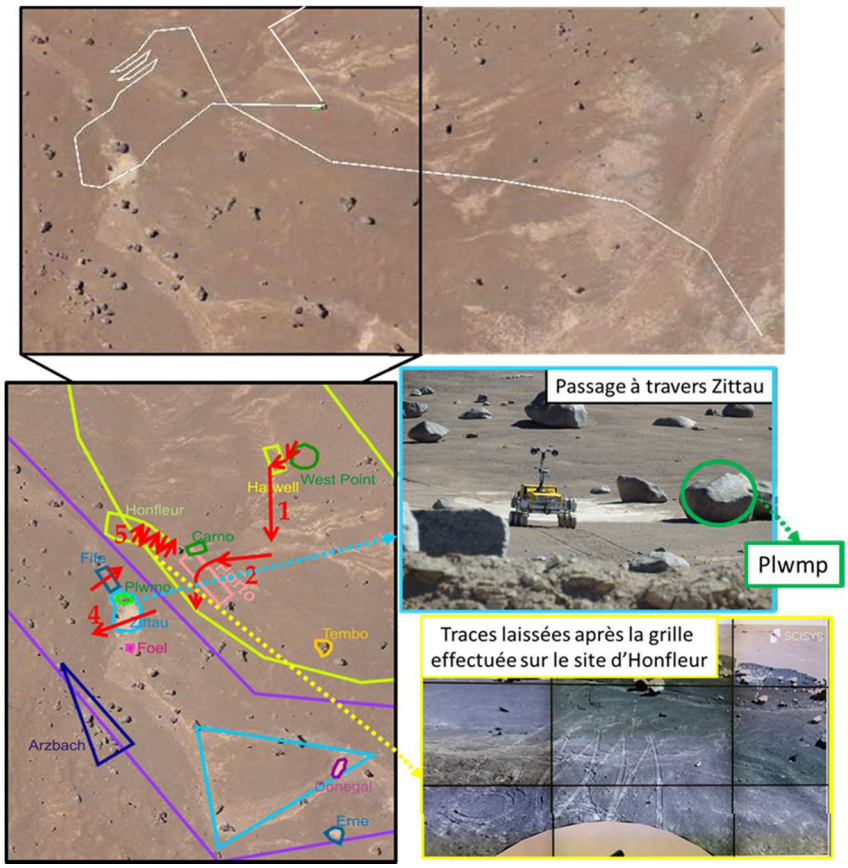


Figure 3.4-4 : En haut : le trajet complet du rover Bridget effectué durant les cinq jours de mesures, tracé sur la carte fournie à l'équipe du centre de contrôle au début des tests. En bas : zoom sur la partie ouest, les zones d'intérêt définies et baptisées par les équipes scientifiques sont indiquées en couleur et les flèches rouges représentent les sondages effectués avec WISDOM.

Le trajet complet du rover durant ces 4 jours est représenté Figure 3.4-4. A partir de la carte aérienne et du modèle altimétrique numérique (MAN) fournis en début de mission, l'équipe de contrôle a défini et baptisé des zones d'intérêt, en se basant sur des indices visuels uniquement. On distingue en effet des zones aux teintes variées, les zones les plus claires définissant parfois des figures de chenaux. Ainsi, 14 zones d'intérêt ont été sélectionnées et, pour chaque plan (qui correspond à une journée martienne), les équipes scientifiques indiquaient la trajectoire du rover voulue et les mesures souhaitées le long du trajet, avec au choix des sondages WISDOM, des prises d'images CLUPI, des mesures avec PANCAM ou des prélèvements d'échantillons par forage. Globalement, la campagne SAFER a été un véritable succès et a ouvert la voie vers une exploration planétaire sure et optimisée pour la mission ExoMars 2018. Les opérations à distance se sont déroulées comme prévu, avec la mise au point de deux plans par jours correspondant à deux sols martiens et la récolte de nombreuses données. Des forages d'environ 1 mètre de profondeur ont pu être effectués pour récolter des échantillons dont nous avons pu comparer les caractéristiques avec les résultats issus de WISDOM. De plus, les problèmes rencontrés par les deux équipes (opérations et contrôle) ont été identifiés et transmis aux équipes en charge des explorations planétaire à l'ESA pour prévenir des difficultés potentielles qui seront rencontres sur Mars. Les enjeux les plus importants sont notamment la définition précise l'interfaçage entre les instruments scientifiques et le rover, l'importance de la collaboration entre les équipes scientifiques pour la préparation de plans pertinents, et la quantité d'opérations pouvant être effectuée au cours d'un sol martien (Gunes-Lasnet et al., 2014).

En tout, plus de 3500 fichiers de données WISDOM ont été récoltés sur cinq zones différentes. La région nommée Honfleur a donné lieu à une investigation approfondie, puisque le rover a effectué une grille de sondages selon des profils parallèles espacés d'un mètre.

Nous reviendrons sur les résultats de cette mission dans les deux derniers chapitres de ce manuscrit.

D'autres campagnes de mesures viendront alimenter notre base de données prochainement. L'équipe WISDOM a initié une collaboration avec les scientifiques de l'équipe Adron (Nikiforov et al., 2013) afin d'étudier le potentiel de synergie instrumentale entre les deux instruments. Une campagne de mesures en Sibérie est prévue au printemps 2016 ou 2017. Une première série de tests dits environnementaux liés à la spatialisation de l'instrument (résistance aux vibrations, au cyclage thermique à pression faible…) ont été effectués sur les prototypes assemblés et une série supplémentaire est programmée pour le modèle de vol final (livraison fin 2016/début 2017).

Conclusion

Le radar WISDOM de la mission ExoMars 2018 a été conçu à partir des objectifs définis pour cette mission, qui nécessitent, outre les difficultés liées à la spatialisation de l'instrument, le sondage du sous-sol martien avec une résolution verticale de quelques centimètres sur quelques mètres de profondeur. Les simulations conduites dans des conditions réalistes (interfaces rugueuses, milieux à pertes) et les données issues des campagnes de mesure montrent que les paramètres de fréquence centrale et de largeur de bande choisis pour WISDOM permettent d'atteindre ces objectifs. Au-delà de quelques mètres de profondeur, seules les basses fréquences contribuent au signal et la résolution verticale diminue. Le choix pour les antennes s'est porté sur une structure de type Vivaldi, dont une particularité importante réside dans la capacité à effectuer des mesures selon quatre modes de polarisation différents, ce qui constitue une aide précieuse pour une interprétation fine des données. Le rapport Signal sur Bruit, la dynamique et la sensibilité de l'instrument conditionnent sa capacité à détecter des échos différant de plusieurs ordres de grandeur en amplitude et à distinguer les échos utiles les plus faibles du plancher de bruit. On peut améliorer les performances instrumentales en effectuant des additions cohérentes ou en appliquant la technique du gating, mais aussi grâce à des opérations de post-traitement des données en domaines fréquentiel et temporel qui permettent une meilleure visualisation des radargrammes. WISDOM présente cependant une limite : il ne mesure que la partie réelle du signal, laissant l'information liée à la phase manquante. Ceci a pour conséquence d'induire une erreur sur la mesure de l'amplitude qui n'est pas négligeable.

Enfin, on vérifie que le comportement du radar, même si on se trouve en champ proche, est en adéquation avec les hypothèses de champ lointain. Afin de valider l'instrument et de produire une base de données dans des environnements divers, il est capital de mettre au point des tests en laboratoire, en environnements contrôlés et de participer à des campagnes de mesures variées, qui nous permettent à la fois de créer une base de comparaison avec les futures données martiennes et, comme nous le verrons, de valider nos méthodes de restitution des paramètres du sous-sol. Les campagnes de Dachstein et SAFER en particulier nous ont permis de nous immerger au cœur de projets directement liés à l'exploration exobiologique martienne dans des conditions très proches de celles d'une mission spatiale réelle. Riches en enseignements, ces campagnes ont été l'occasion de collaborer avec des équipes scientifiques internationales, d'évaluer les performances de WISDOM et les possibilités de synergies instrumentales ou encore de parfaire nos méthodes de traitement et d'interprétation des données.

Références :

Ardekani, M. R. M., & Lambot, S. (2014). Full-wave calibration of time-and frequency-domain ground-penetrating radar in far-field conditions. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 52(1), 664-678.

Bansal, R. 1999). The far-field: How far is far enough?, Applied Microwave & Wireless, vol. 11, no. 11, pp. 59–60, 1999.

Behm, M. and Hausmann, H. (2008). Determination of ice thicknesses in Alpine caves using géoradar. Proceedings of the 3rd International Workshop on Ice.

Behm, M., Dittes, V., Greilinger, R., Hartmann, H., Plan, L., and Sulzbacher, D. (2009). Decline of cave ice – a case study from the Austrian Alps (Europe) based on 416 years of observation. Proc. 15th Intern. Congr Speleol., Kerrville, Texas, 19–26 July, 3, 1413–1416.

Ciarletti V., Corbel, C., Plettemeier, D., Caïs, P., Clifford, S.M. and Hamran, S.E. (2011). WISDOM GPR Designed for Shallow and High-Resolution Sounding of the Martian Subsurface. Proceedingsof the IEEE, Vol. 99, No. 5, May 2011.

Dorizon, S., Ciarletti, V., Plettemeier, D., Vieau, A. J., Benedix, W. S., Mütze, M., Hassen-Kodja, R, Humeau, O. (2014, April). WISDOM GPR investigations in a Mars-analog environment during the SAFER rover operation simulation. In European Planetary Science Congress 2014, EPSC Abstracts, Vol. 9, id. EPSC2014-559 (Vol. 9, p. 559).

Dorizon, S., Ciarletti, V., Plettemeier, D., Benedix, W. S. (2015). Performance validation of the ExoMars 2018 WISDOM GPR in ice caves, Austria. Planetary and Space Science.

Griffiths, A. D., Coates, A. J., Jaumann, R., Michaelis, H., Paar, G., Barnes, D., Josset, J. L. (2006). Context for the ESA ExoMars rover: the Panoramic Camera (PanCam) instrument. International Journal of Astrobiology, 5(03), 269-275.

Groemer, G., Luger, U., Sander, K., Plettemeier, D. (2012). Dachstein Mars Simulation 2012 Mission_Report.
https://www.researchgate.net/publication/235753475_Dachstein_Mars_Simulation_2012Mission_Report.

Gunes-Lasnet, S., Kisidi, A., van Winnendael, M., Josset, J. L., Ciarletti, V., Barnes, D., Allouis, E. (2014). SAFER: The promising results of the Mars mission simulation campaign in Atacama, Chile.

Josset, J. L., Westall, F., Hofmann, B. A., Spray, J. G., Cockell, C., Kempe, S., ... & Pullan, D. (2012, April). CLUPI, a high-performance imaging system on the ESA-NASA rover of the 2018 ExoMars mission to discover biofabrics on Mars. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 14, p. 13616).

Lambot, S., Slob, E. C., Van den Bosch, I., Stockbroeckx, B., Scheers, B., & Vanclooster, M. (2003, May). GPR design and modeling for identifying the shallow subsurface dielectric properties. In Advanced Ground Penetrating Radar, 2003. Proceedings of the 2nd International Workshop on (pp. 130-135). IEEE.

Lambot, S., Slob, E. C., Van den Bosch, I., Stockbroeckx, B., & Vanclooster, M. (2004). Modeling of ground-penetrating radar for accurate characterization of subsurface electric properties. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 42(11), 2555-2568.

May, B., Spotl, C., Wagenbach, D., Dublyansky, Y. and Liebl, J. (2011). First investigations of an ice core from Eisriesenwelt cave (Austria). The Cryosphere, 5, 81–93, 2011. doi:10.5194/tc-5-81-2011.

Meszyński, S., & Józefowicz, M. (2015). Analog Mars Rover Service as a Robotic Hardware and Team Building Platform. In Aerospace Robotics II (pp. 145-161). Springer International Publishing.

Nikiforov, S., Mitrofanov, I., Kozyrev, A., Fedosov, F., Litvak, M., Mokrousov, M., Konovalov, A. (2013, April). Neutron detector ADRON-RM for ExoMars 2018. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 15, p. 9506).

Plettemeier D., Ciarletti V., Hamran S.-E., Corbel C., Cais P., Benedix W.-S., Wolf K., Linke S., Roeddecke S. (2009). Full Polarimetric GPR Antenna System Aboard the ExoMars Rover. 2009 IEEE Radar Conference, Pasadena, USA. http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00439012/fr/.

Solomon Jr, O.M. (1994). The use of DFT windows in signal-to-noise ratio and harmonic distortion computations. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 43(2), 194-199.

Tzanis, A. (2006). Matgpr: A freeware matlab package for the analysis of common-offset GPR data. In Geophysical Research Abstracts (Vol. 8, No. 09448).

Williams, K. E., McKay, C. P., Toon, O. B., & Head, J. W. (2010). Do ice caves exist on Mars?. Icarus, 209(2), 358-368.

Chapitre 4 : La modélisation du radar WISDOM en interaction avec les milieux naturels

Sommaire :

Introduction

4.1 Méthodes de modélisation 109

4.1.1 Simulation simplifiée par lancer de rayons 110

4.1.1.1 Théorie et description 110

4.1.1.2 Quelques exemples 114

4.1.1.3 Limites 115

4.1.2 La méthode FDTD et le logiciel TEMSI-FD 116

4.1.2.1 Théorie et description 116

4.1.2.2 Modélisation du radar WISDOM sous TEMSI-FD 117

4.2 Interactions avec un milieu non homogène 119

4.2.1 Comportement au passage d'interfaces 120

4.2.1.1 Interfaces lisses 120

4.2.1.2 Interfaces inclinées 121

4.2.1.3 Interfaces rugueuses 124

4.2.2 L'hétérogénéité diélectrique des matériaux 130

4.3 Modélisation pour l'aide à l'interprétation des données et la prédiction de performances 133

4.3.1 Expérience en milieu froid 133

4.3.2 Simulation d'une structure biogénique 135

4.3.3 Prédiction du comportement de WISDOM sur le site d'Oxia Planum 136

Conclusion

Références

Introduction

La modélisation de l'instrument en interaction avec le milieu à caractériser est une étape importante pour étudier l'impact de différents paramètres (du radar ou de l'environnement) sur le type et la qualité des résultats attendus. Elle est nécessaire pour dimensionner correctement un instrument et pour produire des données simulées, qui permettent, d'une part, de valider les méthodes de restitution des paramètres du sous-sol dans le cas des GPRs et d'autre part, une interprétation fine des résultats expérimentaux.

Dans ce chapitre, nous présentons les deux modélisations électromagnétiques utilisées au cours de cette thèse : la méthode du lancer de rayons, qui a été développée pour la configuration spécifique de WISDOM et qui fournit rapidement des résultats pour une aide qualitative à l'interprétation des données, et la méthode des différences finies dans le domaine temporel ou FDTD (Finite Differences in Time Domain). C'est sur elle que s'appuie le code TEMSI-FD (Time ElectroMagnetic SImulator-Finite Difference in time domain) développé par l'XLIM que nous avons utilisé pour étudier le comportement de WISDOM en interaction avec des environnements complexes. Nous nous positionnerons ensuite dans la configuration du radar WISDOM pour étudier par simulation l'interaction des ondes avec une interface (lisse, rugueuse ou inclinée) puis avec un milieu non homogène. Enfin, nous illustrerons la pertinence des méthodes de modélisation que nous avons choisies pour simuler les performances du radar WISDOM dans des contextes d'exploration spatiale à caractère exobiologique ou pour fournir une aide précieuse pour l'interprétation des données.

4.1 Méthodes de modélisation

La modélisation est une étape incontournable pour l'aide au dimensionnement instrumental, à l'interprétation des données et pour prédire le comportement d'un instrument dans des conditions variées. Grâce notamment au développement des ressources informatiques et à la naissance des processeurs de plus en plus puissants, il est possible de modéliser les radars en interaction avec divers environnements et de simuler les phénomènes de réflexions, réfractions ou diffusion dans des sous-sols de plus en plus complexes. Plusieurs techniques de modélisation existent, qui permettent de calculer le champ rétrodiffusé par un milieu en fonction des paramètres instrumentaux. Comme il a déjà été mentionné précédemment, à l'exception de rares cas canoniques sans intérêt réel lorsque l'on s'intéresse à la propagation dans un milieu naturel, les équations de Maxwell ne s'intègrent pas analytiquement. Dans ce cadre, on distingue classiquement les formalismes approchés qui peuvent aboutir à des solutions analytiques moyennant des hypothèses simplificatrices et les formalismes exacts qui imposent à un moment ou à un autre de transformer le problème physique continu en un problème numérique par nature discret.

Les méthodes dites rigoureuses ou exactes s'appuient sur une résolution rigoureuse des équations de Maxwell à partir des conditions aux limites imposées. Elles sont cependant gourmandes en ressources informatiques. Les méthodes rigoureuses les plus courantes sont les méthodes modales (représentation du champ sur des modes propres comme la méthode des coordonnées curvilignes (Dusséaux et al., 2008), les méthodes d'approximation d'opérateur (différences finies en régime temporel ou fréquentiel) et les méthodes d'approximation de solutions (méthodes des moments et éléments finis).

Les méthodes approchées ou asymptotiques reposent sur des approximations physiques limitant de fait leurs domaines d'application. On peut évoquer la méthode des petites perturbations (Soto-Crespo et al., 1990, Afifi et al., 2011) ou le tracé de rayons (Bruce, 1997). Elles sont efficaces dans le cadre d'une aide qualitative à l'interprétation des données ou d'une analyse de sensibilité, et établissent clairement le lien entre la géométrie de l'environnement et la rétrodiffusion du signal.

4.1.1 Simulation simplifiée par lancer de rayons

4.1.1.1 Théorie et description

Nous nous proposons ici de décrire le code de simulation développé au cours de cette thèse, basé sur la méthode du lancer de rayons et adapté à la configuration et aux caractéristiques spécifiques de l'instrument WISDOM. Développé sous Matlab, le code de lancer de rayons permet de calculer pour chaque rayon réfléchi par le milieu, un retard de propagation et d'estimer une amplitude associée de façon à construire un radargramme. Le radargramme produit est une image $A(x,t)$ qui donne le signal reçu en fonction de la position *x* du radar le long de son déplacement horizontal et du temps de propagation *t*. Le code permet de modéliser différentes configurations, en faisant varier les paramètres électromagnétiques du milieu ainsi que les caractéristiques instrumentales. La propagation des ondes dans le milieu est modélisée de façon approchée et se base sur les lois de l'optique géométrique.

Modélisation des ondes émises par le radar

On considère un radar se déplaçant horizontalement le long d'un trajet avec un certain pas spatial dx entre chaque mesure. Les antennes de ce radar sont situées à une certaine hauteur H au-dessus de la surface et ont un lobe principal caractérisé par une fonction $L(\theta)$ définie par une ouverture angulaire entre $-\theta_0$ et θ_0 (voir Figure 4.1-1). La résolution angulaire à l'intérieur de ce lobe est paramétrable. Bien sûr plus la résolution est fine, plus le temps d'exécution du programme sera long.

WISDOM est un radar à saut de fréquence. La largeur de bande de fréquence utilisée par l'instrument B ainsi que le nombre N_{freq} de pas en fréquence à l'intérieur de cette bande sont ajustables. Parmi les N_{freq} ondes harmoniques et sphériques émises, chacune est caractérisée par sa fréquence f_j, son coefficient d'amplitude a_j et sa phase à l'origine φ_j.

$$\frac{a_j}{d}\cos(2\pi f_j\left(t - {}^{d}/_{nc}\right) + \varphi_j) \qquad (4.1\text{-}1)$$

À la réception, on considère que l'antenne capte toutes les ondes à l'intérieur de son lobe principal. L'ensemble de ces signaux harmoniques permet de synthétiser une réponse du milieu dans le domaine temporel.

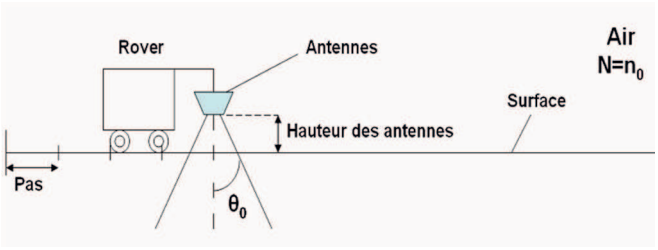


Figure 4.1-1 : Configuration du radar

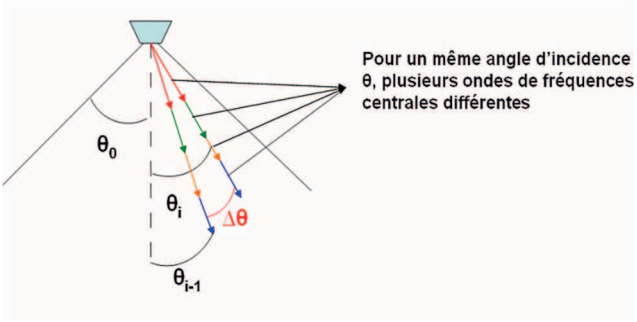


Figure 4.1-2 : Illustration du fonctionnement du radar

Modélisation du milieu

On définit ensuite un environnement constitué de plusieurs couches homogènes (voir Figure 4.1-3). Comme expliqué précédemment, WISDOM sera monté sur le rover ExoMars, et est actuellement utilisé avec un chariot. Ainsi, les antennes ne sont pas en contact avec le sol mais à une hauteur *H* d'environ 30 cm de la surface. On commence donc par définir une couche d'air d'épaisseur *H* et de permittivité égale à 1.

Le programme permet ensuite de choisir des configurations simples avec un maximum de 2 interfaces enfouies, obliques ou non, et donc 4 couches de permittivités différentes, en incluant la couche d'air. On peut également définir une interface plus complexe composée de deux demi-droites sécantes de pentes différentes.

Une dernière possibilité est l'ajout de réflecteurs ponctuels dans le sous-sol, dont l'utilisateur choisit la position.

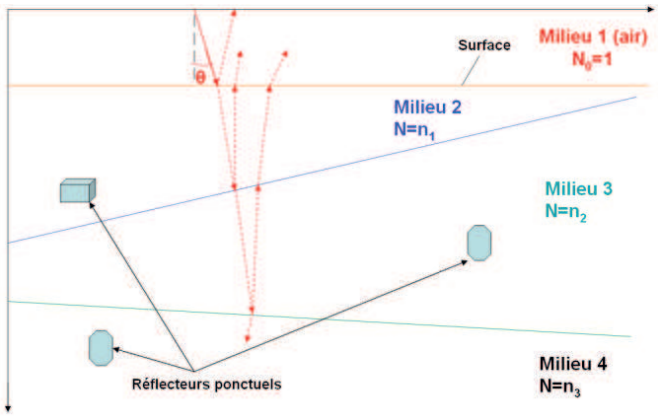


Figure 4.1-3 : Schéma récapitulatif de la configuration de l'environnement

Calcul du signal réfléchi par les interfaces

Le programme de simulation est basé sur la méthode du tracé de rayon en 2 dimensions. Les ondes prises en compte sont des ondes planes et harmoniques. Les relations de passage à travers chacune des interfaces sont modélisées par les lois de Snell-Descartes en réflexion (eq (4.1-2) et transmission (eq (4.1-3). La divergence sphérique du faisceau est prise en compte ultérieurement de façon indépendante. On note :

- n_1=1 l'indice de la couche supérieure, $\boldsymbol{n_i}$ l'indice de la i^{eme}couche qui vérifie $\boldsymbol{n_i} = \sqrt{\boldsymbol{\varepsilon_i}'}$
- $\theta_{inc,i}$ l'angle d'incidence du rayon sur l'interface entre la couche i et la couche i+1
- $\theta_{trans,i}$ l'angle du rayon transmis à travers l'interface entre la couche i et la couche i+1

$$\theta_{trans,i} = -\theta_{inc,i} \tag{4.1-2}$$

$$n_i \sin(\theta_{inc,i}) = n_{i+1} \sin(\theta_{trans,i}) \tag{4.1-3}$$

Pour chaque position du radar, on cherche pour chaque angle d'émission θ les positions horizontales et verticales des points d'intersection entre :

- ✓ le rayon émis et la surface
- ✓ le rayon qui se propage et les interfaces successives qu'il va traverser.

On est alors en mesure de calculer, pour le signal réfléchi par l'interface k, les distances d_i parcourues par le rayon dans les différentes couches intermédiaires et, connaissant leurs indices de réfraction n_i, le temps de propagation jusqu'à l'interface k. Le même raisonnement est tenu pour le trajet retour.

$$T_k(x,\theta) = \sum_{i=1}^{k} n_i \frac{d_{i\downarrow}}{c} + \sum_{i=k-1}^{0} n_i \frac{d_{i\uparrow}}{c} \tag{4.1-4}$$

Avec d_i la distance parcourue par le rayon dans la couche d'indice de réfraction n_i et c la vitesse de l'onde dans le vide.

Une fois ces distances et ces temps de trajet calculés pour chaque angle d'émission θ, on calcule le signal reçu par l'antenne réceptrice pour chaque composante de l'environnement défini.

On obtient donc en prenant pour la position x, la formulation du signal reçu après réflexion sur l'interface k considérée et pour l'angle d'émission θ:

$$A_k(x,t,\theta) = \sum_{j=1}^{N_{freq}} \left[a_j R_k(\theta,x) \frac{L(\theta)L(\theta')}{d_k(\theta,x)} \cos(2\pi f_j(t - T_k(\theta,x)) + \varphi_j) \right] \tag{4.1-5}$$

Où :

- ✓ x est la position horizontale du radar

- ✓ t est le temps de propagation qui permet de décrire le signal reçu par le radar en réponse au signal émis dans le milieu
- ✓ θ est l'angle à l'émission et θ' l'angle à la réception
- ✓ d_k est la distance parcourue aller et retour par l'onde émise avec un angle θ jusqu'à l'interface k considérée
- ✓ T_k est le temps de trajet aller-retour jusqu'à l'interface k considérée
- ✓ $R_k$est un coefficient qui tient compte du coefficient de transmission et du coefficient de réflexion sur l'interface k de réflexion. Ces coefficients dépendent de la position du radar, de l'angle θ et des indices de réfraction dans les différentes couches (eq (4.1-7)(4.1-6 ou (4.1-8) selon le cas considéré).

- ✓ L est le facteur de lobe d'antenne, modélisé sous la forme suivante :

$L(\theta) = cos^2(\frac{\pi}{2} \times \frac{\theta}{\theta_0})$, avec θ l'angle à l'émission de l'onde considérée et θ_0 un angle qui considère un tilt éventuel dans le plan vertical. Dans la configuration d'ExoMars, les antennes seront orientées avec un tilt de 3°.

Les lois de Snell-Descartes (eqs (4.1-2) et (4.1-3)) permettent de déterminer la direction des ondes réfléchies et transmises. Elles ne donnent en revanche aucune information sur les amplitudes respectives de ces ondes, qui vont dépendre de la polarisation de l'onde incidente. Il faut pour cela expliciter les relations de passage aux interfaces. Les coefficients de réflexion r et transmission t donnent les relations de proportionnalité entre les composantes du champ :

$$r = \frac{E_r}{E_i} \text{ et } t = \frac{E_t}{E_i} \tag{4.1-6}$$

où E_i, E_r et E_t sont les amplitudes associées respectivement au champ électrique incident, réfléchi et transmis. On obtient alors les coefficients de Fresnel, qui nous donnent en fonction du mode de polarisation les expressions des coefficients de transmission et de réflexion aux interfaces. Pour chaque interface k, on a donc :

Dans le cas TE,

$$r_{k\perp} = \frac{n_{i-1}\cos(\theta_{inc,i}) - n_i\cos(\theta_{trans,i})}{n_{i-1}\cos(\theta_{inc,i}) + n_i(cos\theta_{trans,i})} \text{ et } t_{k\perp} = \frac{2\, n_{i-1}cos(\theta_{inc,i})}{n_{i-1}cos(\theta_{inc,i}) + n_i cos(\theta_{trans,i})} \tag{4.1-7}$$

Dans le cas TM ,

$$r_{k\parallel} = \frac{n_i\cos(\theta_{inc,i}) - n_{i-1}\cos(\theta_{trans,i})}{n_i\cos(\theta_{inc,i}) + n_{i-1}\cos(\theta_{trans,i})} \text{ et } t_{k\parallel} = \frac{2\, n_{i-1}cos(\theta_{inc,i})}{n_i cos(\theta_{inc,i}) n_{i-1}cos(\theta_{trans,i})} \tag{4.1-8}$$

Dans le cas de l'incidence normale, les relations se simplifient en :

$$r_\perp = \frac{n_{i-1} - n_i}{n_{i-1} + n_i} \text{ et } t_{\perp =} \frac{2\, n_{i-1}}{n_{i-1} + n_i} \tag{4.1-9}$$

Pour chaque valeur de x, on somme ensuite les signaux calculés grâce à l'équation (4.3) pour toutes les interfaces du milieu et pour les différents angles du lobe d'antenne, et on obtient le signal reçu pour chaque position du radar et donc le radargramme simulé qui est la représentation de l'image $A(x,t)$.

$$A(x,t) = \sum_{k} \sum_{\theta=-\theta_0}^{+\theta_0} A_k(x,t,\theta) \tag{4.1-10}$$

Réflecteurs ponctuels

On montre analytiquement qu'un réflecteur ponctuel dans un milieu homogène se traduit sur un radargramme par une hyperbole exacte qui permet d'estimer la vitesse de propagation dans le milieu ainsi que la position du réflecteur en question. Cependant, lorsque les ondes traversent des couches d'indices de réfraction différents avant d'atteindre le réflecteur, il n'est plus possible de calculer aussi simplement sa signature. Le problème consiste à trouver le rayon unique qui pour une position du radar donnée x va atteindre le réflecteur. L'approche est donc différente de ce qui a été développé pour les interfaces.

Pour chaque position x du radar, on recherche donc l'angle d'émission θ pour lequel le rayon intercepte le réflecteur ponctuel. Cet angle d'émission est fonction de la position de la cible, mais aussi de sa situation par rapport aux différents milieux puisque les indices et les angles de réfraction sont différents selon le milieu dans lequel on se trouve. La recherche de l'angle se fait par minimisation : on définit un critère initial, et pour chaque position du radar et chaque angle d'émission, on calcule la différence angulaire entre l'onde incidente pour la couche considérée (dans laquelle se trouve le réflecteur) et l'angle nécessaire pour que le rayon tombe sur la cible. Si cette différence est inférieure au critère, ce dernier prend sa valeur. On a donc un critère qui diminue au fur et à mesure de la recherche et stoppe lorsqu'on atteint le minimum. Finalement, le rayon retenu correspond au plus proche de celui qui intercepte la cible.

On calcule ensuite la distance correspondant au trajet de ce rayon unique, puis le temps d'aller-retour de ce rayon entre les antennes et le réflecteur. Ces calculs sont les mêmes que pour les interfaces, à la différence près que les distances et les temps calculés dépendent uniquement de la position du radar, et non pas de l'angle d'émission. On utilise alors les mêmes hypothèses que précédemment pour la formulation du signal reçu pour la réflexion sur le réflecteur considéré. On somme ensuite ces signaux pour chacun des réflecteurs de l'environnement, et on obtient la contribution des réflecteurs au signal total. On ajoute alors ce signal à l'image $A(x,t)$.

4.1.1.2 Quelques exemples

Sur les Figure 4.1-4 et Figure 4.1-5, on peut voir deux exemples de simulation de radargrammes produits à partir du code décrit précédemment

- ✓ La Figure 4.1-4 simule un milieu à 4 couches, composé d'une couche d'air de 30 cm surmontant un sous-sol composé de 2 strates homogènes, la plus profonde se trouvant à la limite de la profondeur de sondage atteinte : le milieu au-dessus de la première interface a une permittivité réelle ε_1=2. Le milieu entre les deux interfaces a une permittivité ε_2=4, et l'indice sous la deuxième interface est de ε_3=10. L'environnement défini présente également un réflecteur ponctuel à 80 centimètres de profondeur.

- ✓ La Figure 4.1-5 simule le radargramme obtenu dans un environnement composé d'une couche d'air de 30 cm, surmontant un sous-sol dans lequel se trouve une interface avec rupture de pente. Le milieu au-dessus de l'interface a une permittivité de ε_1=2, et elle vaut ε_2=4 sous l'interface. L'environnement défini présente également deux réflecteurs ponctuels à 80 centimètres et 1.2 mètres de profondeur.

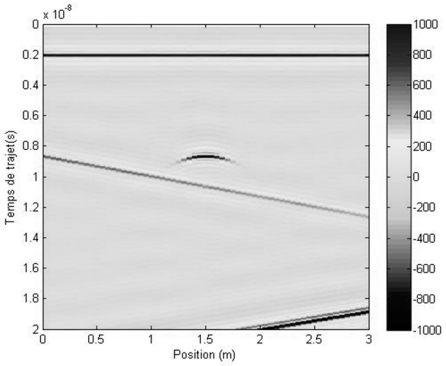


Figure 4.1-4 : Exemple de simulation pour un environnement à 4 couches (air, milieux ε_1=2, ε_2=4, ε_3=10), avec 2 interfaces obliques et un réflecteur ponctuel

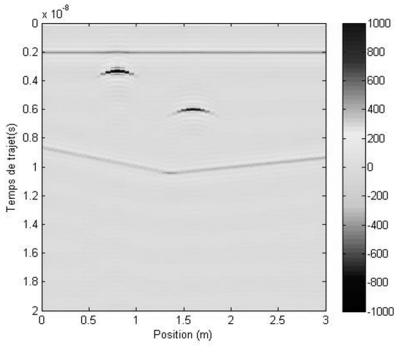


Figure 4.1-5 : Exemple de simulation pour un milieu à 3 couches (air, ε_1=2, ε_2=4), avec une interface composée de 2 demi-droites obliques et d'un réflecteur ponctuel

4.1.1.3 Limites

Ce programme a été élaboré dans le but de décrire des configurations simples et d'obtenir rapidement un aperçu du radargramme qui pourrait être obtenu dans les conditions similaires avec le GPR WISDOM. Il comporte cependant plusieurs simplifications qui en limitent la portée:

- ✓ Lancer de rayons : ce modèle de propagation est valable si les hétérogénéités dans le milieu sont très grandes (on a alors des interfaces) ou très petites (le milieu apparait homogène) devant la longueur d'onde, comme expliqué lors du Chapitre 3. La bande de fréquences utilisée pour WISDOM étant de 0.5 GHz à 3 GHz, les longueurs d'onde dans l'air sont de 10 à 60 centimètres, et dans un sol de type glace (ε_{glace}=3.2) de 3 à 20 centimètres. Cette hypothèse n'est donc pas toujours valable selon les types de sols étudiés.

- ✓ Diagramme de rayonnement des antennes : modélisation simplifiée.

- ✓ Réception de tous les rayons : on considère que l'antenne peut capter à l'intérieur de son lobe principal tous les rayons renvoyés par la surface (ce qui est généralement le cas).

- ✓ L'hypothèse de champ lointain : L'hypothèse a été faite que les rayons pouvaient être modélisés par des ondes sphériques issues d'un même point. On suppose que l'amplitude du signal reçu décroît avec l'éloignement de la cible, en 1/d, d étant la distance à la cible. Cette hypothèse de champ lointain n'est pas vérifiée partout dans le cas de WISDOM, cependant on a constaté au préalable que le comportement du radar est en adéquation avec cette hypothèse (cf Chapitre 3).

Les hypothèses concernant la forme d'onde et l'amplitude du signal reçu sont fortes, par conséquent, si d'un point de vue qualitatif les résultats sont satisfaisants, les valeurs d'amplitudes sont à considérer avec la plus grande retenue. Le temps d'exécution de ce code, effectué sous Matlab, est loin d'être prohibitif (de l'ordre de 2 minutes pour un déplacement de 3 m et une profondeur de 5 m avec un pas angulaire de 1° sur un processeur AMD 2.6 GHz avec 3 Go de RAM).

Néanmoins, ce code constitue un outil de modélisation d'une grande souplesse et d'une rapidité appréciable comparé à certaines autres méthodes comme celle des différences finies. Il permet d'avoir un bon aperçu de la forme du radargramme susceptible d'être obtenu par le GPR WISDOM en fonction de la configuration d'acquisition. Sa rapidité est essentielle car elle permet de produire rapidement un grand nombre de radargrammes simulés et de les confronter aux données expérimentales pour une interprétation quantitative des mesures.

4.1.2 La méthode FDTD et le logiciel TEMSI-FD

4.1.2.1 Théorie et description

La méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) est une méthode numérique de résolution des équations de Maxwell discrétisées dans l'espace et le temps (Volakis et al., 1998). Cet algorithme, basé sur le développement en série de Taylor, a été proposé par Yee en 1966 et repose sur le remplacement des opérations de dérivation par des différences finies. Le principe consiste à calculer les champs électriques et magnétiques pour chaque pas spatial et temporel au sein d'un maillage qui définit le milieu (Martinat, 2001 ; Ciarletti et al., 2003 ; Besse, 2004). La structure est ainsi constitué de parallélépipèdes de dimensions $(\Delta x,\Delta y,\Delta z)$, que l'on appelle cellules élémentaires ou cellules de Yee. A chaque itération, les champs électriques sont calculés sur leurs arêtes aux instants t et les champs magnétiques sur leurs faces aux instants $t_{+\frac{1}{2}}$ (Figure 4.1-6). Ainsi, les champs décalés en espace et en temps sont progressivement déduits les uns des autres grâce à la discrétisation des équations de Maxwell.

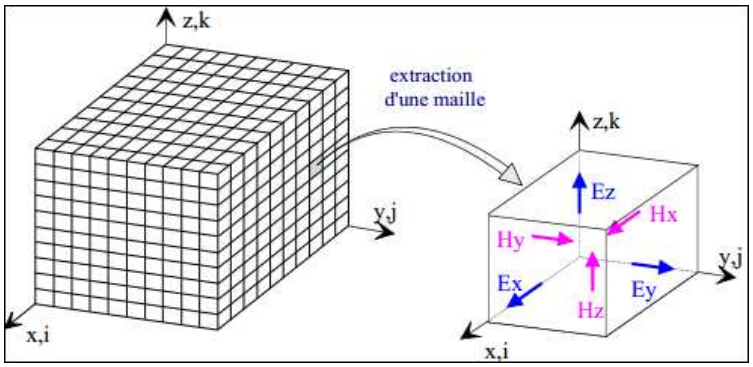


Figure 4.1-6 : Volume de calcul constitué de cellules de Yee, zoom sur le calcul des champs sur les faces et les arêtes pour une cellule.

Les avantages de la méthode FDTD sont multiples : elle est relativement simple à implémenter, précise, souple et autorise la modélisation de nombreuses configurations. Les phénomènes de dispersion

numérique[1] impliquent cependant des contraintes sur les dimensions des objets et les pas temporels choisis. Il est en effet conseillé de mailler le volume avec un pas spatial inférieur à $\frac{\lambda_{min}}{10}$, avec λ_{min} la plus petite longueur d'onde dans le milieu, et de définir un pas temporel inférieur au temps de propagation de l'onde à travers une seule cellule. Le pas temporel devient donc de plus en plus petit au fur et à mesure que le pas spatial diminue. Ces paramètres dépendent bien sûr des paramètres diélectriques et de leurs hétérogénéités spatiales au sein du milieu. Dans le cas de simulations aux fréquences de WISDOM, ces conditions reviennent à définir, pour un milieu de permittivité réelle égale à 4, une cellule élémentaire de dimensions inférieures à 5 mm, ainsi qu'un pas temporel inférieur à 6.10^{-11} ns. Ces valeurs diminuent encore lorsqu'on souhaite introduire des surfaces rugueuses correctes dans les milieux définis, comme illustré sur la Figure 4.1-7. Finalement, une structure trop complexe aboutit rapidement à une augmentation des ressources informatiques nécessaires, tant en terme d'espace mémoire que de temps CPU (Besse, 2004).

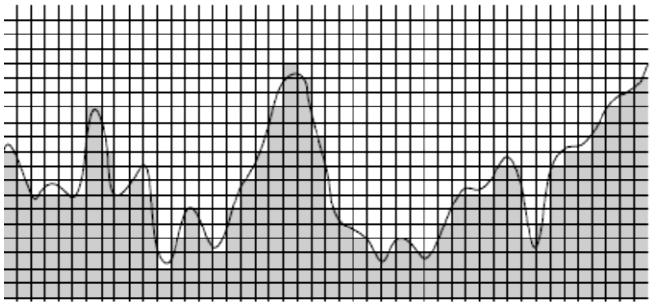


Figure 4.1-7 : Effet du maillage sur la rugosité numérique. La zone grisée représente la surface réellement prise en compte dans la simulation. Source : Besse, 2004.

Toute modélisation numérique sur une boite de calcul voit apparaître des phénomènes de réflexions sur ses bords. Afin de minimiser ces effets, on tente de reproduire des conditions d'espace libre en plaçant des absorbants sur les bords de cette boîte, appelés Convoluted Perfectly Matched Layers (CPML) (Roden and Gedney, 2000). C'est le même principe lorsqu'on réalise des tests en chambre anéchoïque.

4.1.2.2 Modélisation du radar WISDOM sous TEMSI-FD

Le logiciel libre TEMSI-FD (Time ElectroMagnetic SImulator-Finite Difference in time domain), développé au XLIM à Limoges, est un outil de simulation basé sur la méthode FDTD. Nous avons utilisé cette version pour modéliser les conditions expérimentales lors des sondages avec l'instrument WISDOM dans divers environnements, pour illustrer les phénomènes de diffusion en présence de rugosité ou d'inhomogénéités diélectriques dans les sols comme nous le verrons un peu plus loin. Le code TEMSI-FD offre en effet un grand nombre de possibilités pour simuler une variété de

[1] La dispersion numérique représente le décalage entre la vitesse de propagation numérique et la vitesse théorique des ondes dans le milieu

configurations. On peut ainsi modéliser des sols à géométrie complexe, avec des interfaces rugueuses, des milieux dispersifs ou non, homogènes ou inhomogènes, auquel cas l'utilisateur est invité à choisir les paramètres constitutifs et les caractéristiques de leurs inhomogénéités (tailles caractéristiques, amplitude des variations).

Différentes sources peuvent être définies parmi lesquelles les injecteurs d'ondes planes ou l'alimentation en tension ou en courant. À chaque source est ensuite associée une fonction temporelle décrivant la forme de l'excitation (gaussienne, sinusoïdale, sino-gaussienne…). Enfin, les résultats en sortie, sous la forme de fichiers ASCII, sont variés : on peut faire le souhait d'obtenir les champs temporels ou fréquentiels en un point ou sur une surface d'observation, les impédances, le courant et la tension sur les antennes, ou encore le diagramme de rayonnement de l'antenne sur une surface ou un volume (Figure 4.1-8).

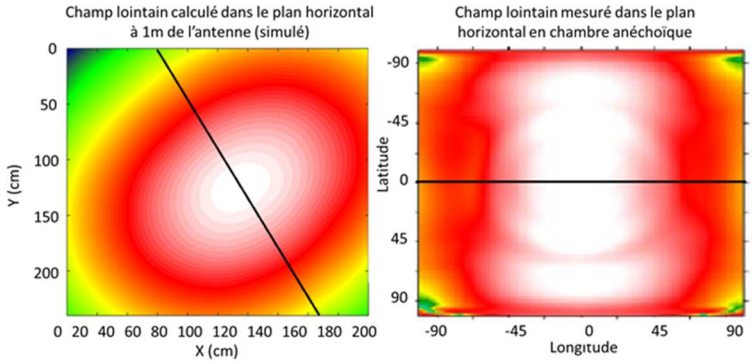


Figure 4.1-8 : Diagramme de rayonnement issu d'une simulation sous TEMSI-FD (gauche) et mesuré en chambre anéchoïque (droite) pour une fréquence centrale de 1 GHz (d'après Hervé, 2015). Le trait en noir représente le plan vertical de l'élément Vivaldi rayonnant.

WISDOM est équipé d'antennes de type Vivaldi qui ont été modélisés par des fils inclinés (Hamadi 2010; Hervé, 2015)

Un exemple très simple de simulation représentant un des deux éléments rayonnants d'une antenne de WISDOM au-dessus d'un milieu constitué de deux couches homogènes, une d'air et une de glace, est présenté Figure 4.1-9. Le radargramme à droite correspond à un cas où l'on a placé une surface rugueuse à l'interface entre les deux milieux.

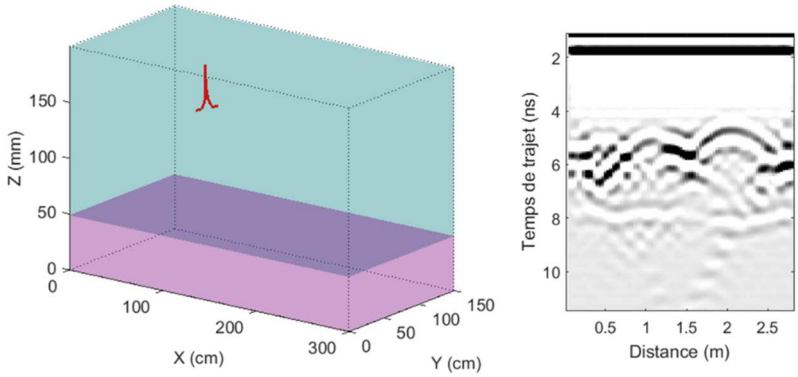


Figure 4.1-9 : Gauche : Exemple de boite de calcul simulée sous TEMSI-FD, avec le modèle d'antenne de WISDOM (rouge). Droite : radargramme obtenu en plaçant une surface rugueuse à l'interface entre les deux milieux

TEMSI-FD offre également la possibilité de placer divers objets au sein du volume de calcul, dont l'utilisateur est invité à rentrer les dimensions et les caractéristiques des paramètres constitutifs. Chaque cellule du milieu se voit alors attribuer les paramètres correspondants aux différentes structures définies et les calculs progressifs des champs et courants sont stockés selon le format souhaité tout au long de la simulation.

Maintenant que nous nous sommes familiarisés avec ces deux modèles, revenons sur les phénomènes que subissent les ondes émises par WISDOM lorsqu'elles se propagent dans les milieux hétérogènes

4.2 Interactions avec un milieu non homogène

Les milieux naturels sont en général plus complexes que le cas idéal homogène décrit précédemment. Au cours de sa propagation dans un milieu réel non homogène, outre les phénomènes d'atténuation et de divergence du faisceau qui sont présents même dans un milieu homogène, la propagation de l'onde va être modifiée par des phénomènes physiques liés au fait que le milieu est hétérogène. Le principe de base du fonctionnement du radar repose sur l'exploitation de ces interactions onde/milieu non homogène.

Les effets macroscopiques de terrain, tant au niveau topographique (rugosité) qu'au niveau des propriétés électriques des matériaux (hétérogénéités), sont directement dépendants de la longueur d'onde du rayon incident : lorsque les hétérogénéités sont très petites devant la longueur d'onde, le milieu peut être considéré comme homogène. Lorsqu'elles sont au contraire très grandes devant la longueur d'onde, le trajet de l'onde suit les lois de la réflexion. On observe alors des phénomènes de réflexion et de réfraction au passage des dioptres[2]. Enfin, si les hétérogénéités du milieu sont du même

[2] En radar et en géophysique en général, on parlera d'interface pour qualifier la surface séparant deux milieux d'indices de réfraction (ou de valeurs de permittivité) différents

ordre de grandeur que la longueur d'onde, on observe des phénomènes de diffusion. Tous ces effets s'accompagnent potentiellement de changements de polarisation du vecteur champ électrique.

4.2.1 Comportement au passage d'interfaces

4.2.1.1 Interfaces lisses

Lorsque les ondes rencontrent une interface lisse au cours de leur propagation, elles suivent les lois de la réflexion. Les coefficients de réflexion et de transmission en incidence normale sont affichés sur la Figure 4.2-1 en fonction du contraste de permittivité entre deux milieux. À droite se trouve un radargramme simulé par notre programme de lancer de rayons, avec un milieu composé de quatre couches homogènes sans pertes de valeurs de permittivités relatives respectives de 1, 3.2, 4 et 10. Le milieu étant sans pertes, on ne considère que l'atténuation due à la divergence géométrique du faisceau. On voit que la réflexion sur la dernière couche a une amplitude plus importante, due au fort contraste diélectrique entre la troisième et la quatrième interface. La transition entre les milieux 2 et 3 est au contraire de plus faible amplitude, étant donné que les milieux ont des valeurs de permittivité relativement proches.

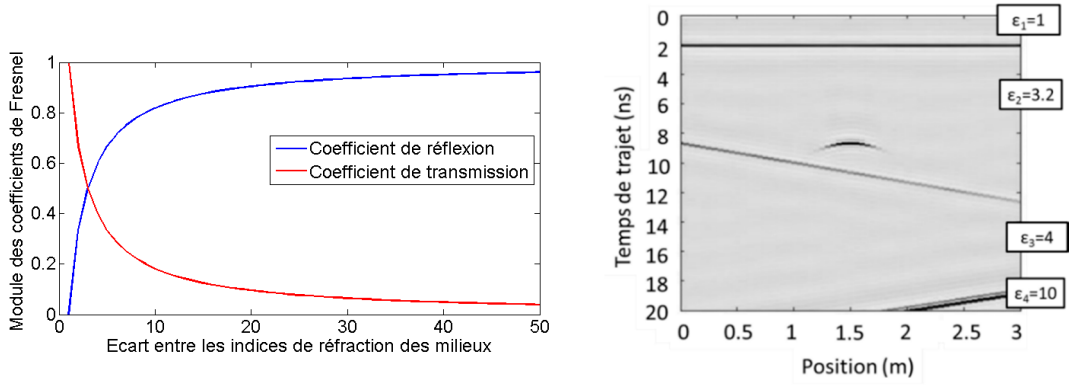


Figure 4.2-1 : A gauche : coefficients de réflexion et de transmission en incidence normale en fonction du contraste des indices de réfraction. Cette loi est prise en compte dans le modèle de lancer de rayons qui permet de simuler des radargrammes (droite). On constate bien que plus l'écart entre les indices est important, plus l'amplitude de l'écho augmente.

Lorsque les ondes passent d'un milieu à un autre, le signe de l'écho correspondant à l'interface dépend du contraste entre les deux milieux. Si l'on passe d'un milieu de faible permittivité réelle à un milieu plus réfringent (entre l'air et la glace par exemple), l'écho se présentera sous la forme d'une séquence blanc-noir-blanc sur le radargramme. A l'inverse, si on passe de la glace à l'air (la différence de permittivité réelle est alors négative), l'écho change de signe et la séquence devient noir-blanc-noir (Figure 4.2-2).

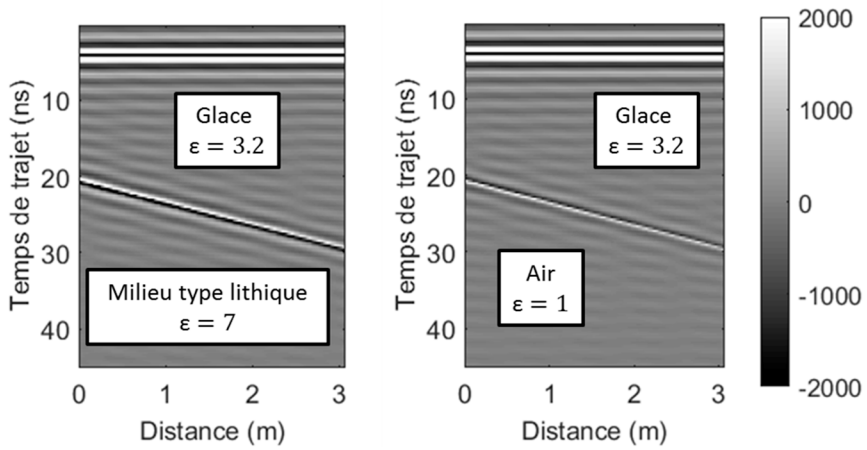


Figure 4.2-2 : Radargrammes simulés par lancer de rayons pour illustrer la différence entre l'écho de l'interface au passage entre un premier milieu et un milieu plus (gauche) ou moins (droite) réfringent. Les échelles en niveau de gris sont symétriques par rapport à 0.

4.2.1.2 Interfaces inclinées

On distingue en outre plusieurs effets macroscopiques de terrain, qui prennent toute leur importance dans le cas de l'utilisation des radars, comme le relief ou la pente des interfaces et son effet sur la direction du signal rétrodiffusé, comme illustré sur la Figure 4.2-3.

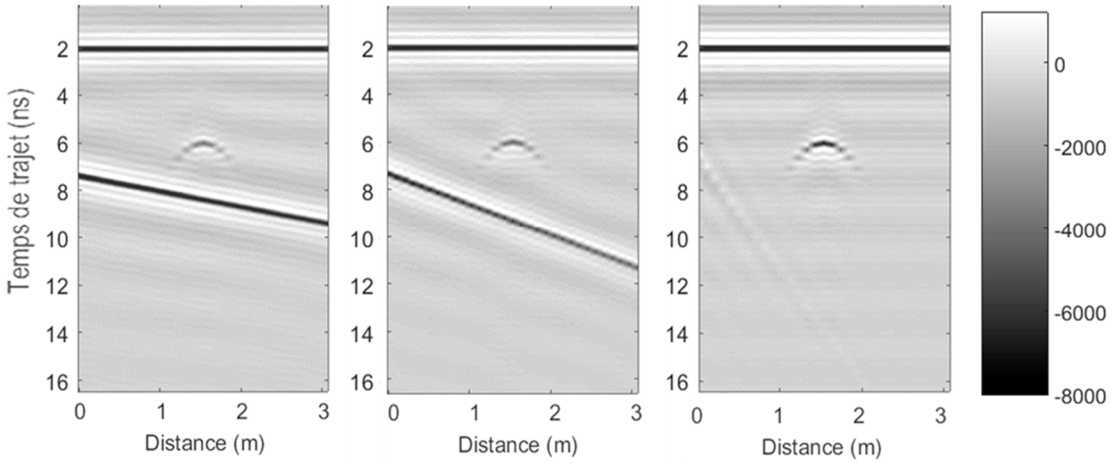


Figure 4.2-3 : Simulations par lancer de rayons illustrant l'effet de la pente d'une interface sur la rétrodiffusion : a) pente de 3°, le rayon incident est quasi-perpendiculaire à l'interface, la rétrodiffusion est importante ; b) pente de 6°, rétrodiffusion modérée ; c) pente de 23°, rétrodiffusion très faible

Si l'interface est trop inclinée par rapport au rayon incident, le signal sera réfléchi dans une direction éloignée de l'antenne de réception. On observe donc une amplitude associée à cette interface plus faible que dans le cas où le rayon incident s'approche de la normale à l'interface. Si l'interface est trop oblique, aucun signal ne parviendra jusqu'à l'antenne de réception, elle sera invisible sur le radargramme. L'amplitude du signal rétrodiffusé en fonction du degré de pente des interfaces est représentée Figure

4.2-4. Jusqu'à une pente de 30°, le signal perd une puissance d'environ 2.5 dB par degré, puis décroît de moins en moins vite jusqu'à devenir indétectable.

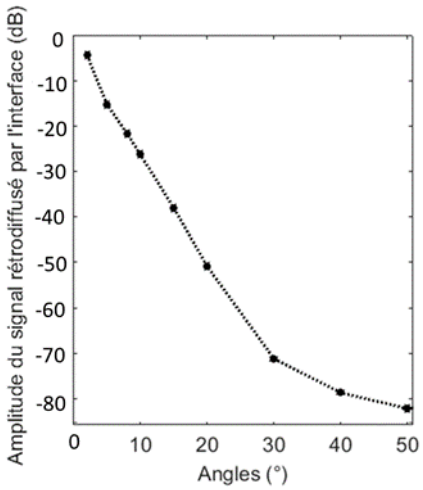


Figure 4.2-4 : Amplitude du signal provenant d'une interface oblique normalisée par l'amplitude correspondant à une interface horizontale en fonction de son inclinaison

On se rend bien compte dans le cas du radar que ces effets de pentes sont également relatifs à l'ouverture angulaire du lobe dans lequel les rayons sont émis puis récupérés après leur passage dans le milieu. Les radargrammes de la Figure 4.2-3 ont été simulés en prenant une demi-ouverture de lobe de 60°. Les mêmes simulations, en prenant cette fois un lobe de 10° d'ouverture, sont représentées sur la Figure 4.2-5 avec la même échelle de niveaux de gris. Le signal retour est clairement plus faible que précédemment, on note également que le diffuseur ponctuel est à peine visible, alors que la signature hyperbolique est nette dans le cas d'une grande ouverture de lobe.

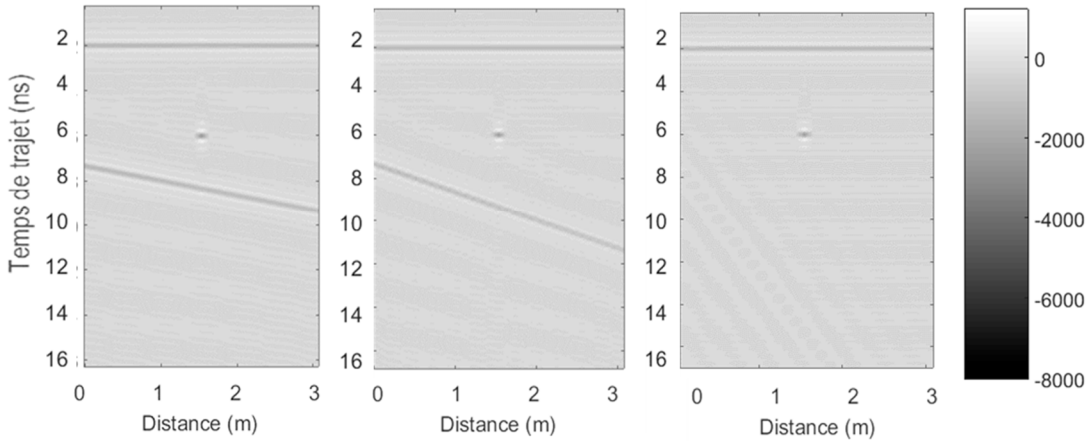


Figure 4.2-5 : Simulations par lancer de rayons. Les paramètres sont les mêmes que ceux de la Figure 4.2-3, seule l'ouverture du lobe d'antenne change et est fixée à 5°.

L'impact de l'ouverture du lobe d'antenne sur l'amplitude du signal enregistré est illustré Figure 4.2-6.

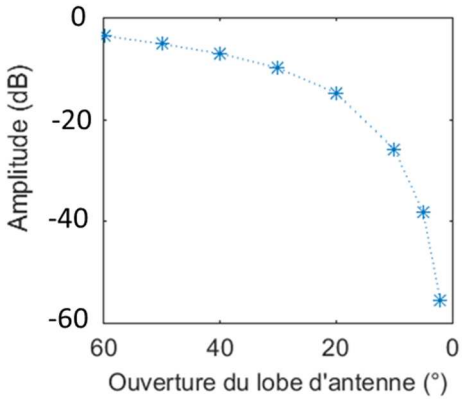


Figure 4.2-6 : Amplitude de l'écho provenant d'une interface inclinée (8° de pente) du signal enregistré en fonction de l'ouverture du lobe d'antenne, normalisée par l'amplitude récupérée pour une ouverture de 90° à partir de simulations par lancer de rayons.

Il convient également de prendre en compte l'effet du pas d'échantillonnage spatial (dx) dans le cas d'une interface inclinée. Plus la pente est importante, plus il est nécessaire d'effectuer des sondages rapprochés. Si on admet (Annan, 2003) qu'une détection satisfaisante d'une interface avec une pente θ nécessite un pas spatial de

$$dx_{min} = \lambda/(2\tan(\theta)) \tag{4.2-1}$$

alors on voit que les basses fréquences nécessitent un échantillonnage spatial moins dense que les hautes fréquences.

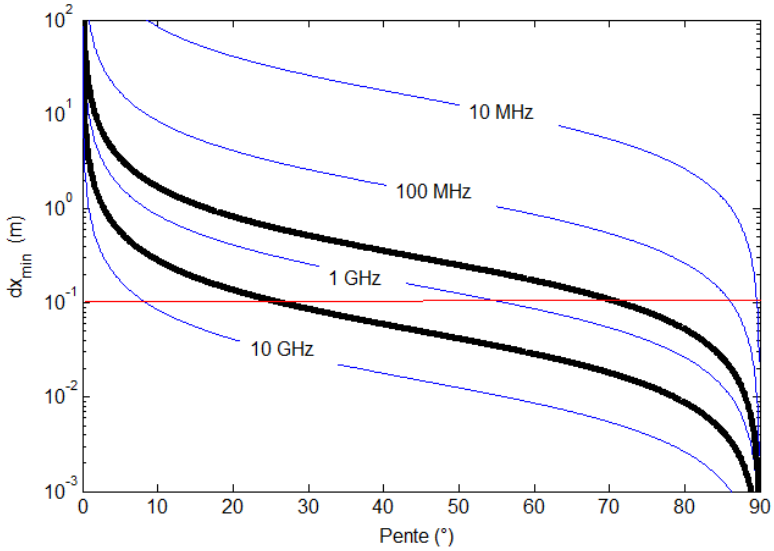


Figure 4.2-7 : Conditions de détection d'une interface inclinée en fonction du pas spatial de l'instrument et de la fréquence centrale. Les bandes noires représentent les fréquences limites de l'instrument WISDOM, la droite rouge marque le pas spatial retenu pour les sondages de WISDOM dans le cadre de la mission ExoMars.

Le pas spatial de WISDOM a été fixé à 10 cm, en fonction des objectifs de profondeur de détection et de résolution pour la mission ExoMars, mais aussi en tenant compte des difficultés opérationnelle avec le rover. La Figure 4.2-7 montre que ce pas de 10 centimètres dans le cas de WISDOM permet de détecter correctement des interfaces inclinées jusqu'à des pentes de 70° pour les fréquences les plus basses. Les hautes fréquences seules ne permettent pas une détection aussi efficace, seules les interfaces de pentes inférieures à 30° seront détectées. Si l'on augmentait le pas entre chaque sondage jusqu'à un mètre, la limite de détection des interfaces pentues se situerait autour de 20° d'inclinaison.

Finalement, les simulations conduites montrent que, grâce au pas spatial choisi et à son ouverture de lobe d'antenne de 45°, WISDOM permet la détection d'interfaces obliques jusqu'à des pentes de plus ou moins 25°. Bien évidemment, cette limite de détection évolue avec la nature même des interfaces, leur profondeur, leur étendue, les contrastes de permittivité entre les couches et les hétérogénéités présentes dans le milieu, qui induisent des pertes.

Enfin, les interfaces obliques, même lisses, ont la capacité de modifier la polarisation des ondes. Un simple schéma illustre ce phénomène sur la Figure 4.2-8. L'altitude de l'interface ne varie pas dans le sens du déplacement du radar (direction X), on observera donc un écho plutôt droit sur un radargramme (temps d'arrivée jusqu'à l'interface constant), cependant les amplitudes de cet écho de surface vont varier selon la polarisation. Un pendage vers la droite induit une composante préférentielle du signal rétrodiffusé vers les Y croissants, tandis qu'un pendage vers la gauche, comme sur la Figure 4.2-8, induit l'effet inverse.

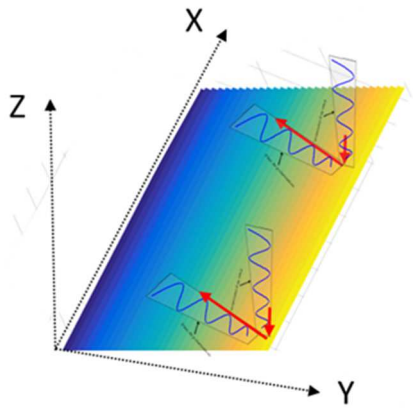


Figure 4.2-8 : Illustration de l'effet dépolarisant des interfaces présentant un pendage. Les flèches rouges représentent les plans de polarisation.

4.2.1.3 Interfaces rugueuses

La rugosité des interfaces entre les unités géologiques gouverne largement l'efficacité de la réflexion des ondes émises, ainsi que les phénomènes de dépolarisation.

Lorsque la rugosité de la surface est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde incidente, une diffusion importante apparait et diminue drastiquement l'amplitude de l'onde réfléchie dans la direction

spéculaire (retro réfléchie si l'incidence est normale). On assiste également à des phénomènes de dépolarisation dus aux pentes et aux arêtes des facettes réfléchissantes de la surface.

Afin de caractériser et de quantifier les différents types de rugosité, on utilise souvent le critère de Rayleigh. Ce critère est défini, pour une onde plane, en calculant la différence de marche entre deux rayons incidents parallèles arrivant sur une interface qui présente des variations de hauteur. Le déphasage entre les deux signaux, dans le cas d'une réflexion spéculaire, s'exprime de la façon suivante :

$$\Delta\varphi = k\,\Delta z\,(\cos\theta_d + \cos\theta_i) + k\,\Delta x\,(\sin\theta_d - \sin\theta_i) \quad (4.2\text{-}2)$$

Les paramètres géométriques sont précisés dans le plan d'incidence moyen (défini par le vecteur de propagation de l'onde d'incidence et la normale au plan moyen de la surface). k est le nombre d'onde. θ_i est l'angle d'incidence et θ_d l'angle d'observation. Δz est la différence de hauteur entre les deux points de réflexion et Δx est la différence de position horizontale dans le plan d'incidence.

En rétrodiffusion et incidence normale, la formule donne $\Delta\varphi = 2k\,\Delta z$ (4.2-3)

Les interférences entre ces rayons dépendent de cette différence de phase. Pour $\Delta\varphi \ll \pi$, les deux ondes sont en phase, produisent des interférences constructives et la surface se comporte comme si elle était lisse. Pour $\Delta\varphi \cong \pi$, les deux ondes sont en opposition de phase et produisent des interférences destructives dans la direction d'observation, la contribution d'énergie dans la direction spéculaire est minimale. Le critère de Rayleigh stipule que si $\Delta\varphi > \frac{\pi}{2}$, la surface peut être considérée comme rugueuse. Si $\Delta\varphi \ll \frac{\pi}{2}$, elle peut être définie comme très lisse. Pour caractériser dans son ensemble une interface, il est alors possible de substituer à Δh l'écart-type des hauteurs de la surface σ_h . Le critère de Rayleigh devient alors $R_a < \frac{\pi}{4}$, où R_a est le paramètre de Rayleigh qui s'écrit :

$$R_a = k\sigma_h \cos(\theta_1) \quad (4.2\text{-}4)$$

Les fréquences de fonctionnement de l'instrument WISDOM se situent entre 0,5 GHz et 3 GHz, résultant en des longueurs d'onde allant de 10 cm à 60 cm dans l'air. Dans la glace, de permittivité réelle 3.2, ceci revient à des longueurs d'onde situées entre 3 cm et 20 cm.

Les Figure 4.2-9 à Figure 4.2-11 contiennent des simulations de surfaces rugueuses selon deux polarisations différentes. Ils ont été générés à partir du logiciel TEMSI-FD, basé sur la méthode des différences finies, développé par le l'Institut XLIM de Limoges. Nous y consacrerons une partie dans le volet Modélisation de ce manuscrit. La géométrie d'acquisition et les paramètres instrumentaux sont conformes à ceux de WISDOM, et la scène est constituée d'une couche d'air surmontant une couche de glace. L'interface entre les deux milieux est rugueuse. Pour chaque interface, la longueur de corrélation et les informations sur les variations de hauteurs de la surface (écart-type et histogramme des hauteurs) sont indiqués. Précisons tout de même que dans le cas des surfaces présentant une grande longueur de

corrélation, ces paramètres ne sont pas représentatifs du profil réellement effectué (qui passe au milieu de la surface le long de l'axe X) elles ne sont pas statistiquement représentatives du profil effectué. Pour le premier exemple uniquement, on affichera les radargrammes pour les deux polarisations X et Y et les histogrammes des hauteurs pour les profils simulé et vu par WISDOM.

Commençons avec une surface que l'on peut qualifier de très rugueuse, avec des variations de hauteurs de l'ordre de quelques centimètres (Figure 4.2-9) et une grande longueur de corrélation (donc des variations plutôt douces de pente pour les facettes réfléchissantes). On se trouve ici dans un cas « rugueux » au sens de Rayleigh, pourtant le radar semble capable de détecter et de suivre la topographie de la surface. L'écho principal de la surface principal (qui se traduit par une séquence noir-blanc-noir sur le radargramme) s'étale sur 1-1.5 nanosecondes. Les composantes X et Y du champ qui représentent deux polarisations différentes sont similaires en terme de géométrie, mais n'ont pas la même amplitude le long de la surface. Ceci est dû à l'effet dépolarisant des facettes inclinées, qui renvoient plus ou moins de signal vers l'antenne de réception. On constate que les données radar simulées permettent bien de retrouver les bons paramètres de rugosité (écart-type des hauteurs et longueur de corrélation).

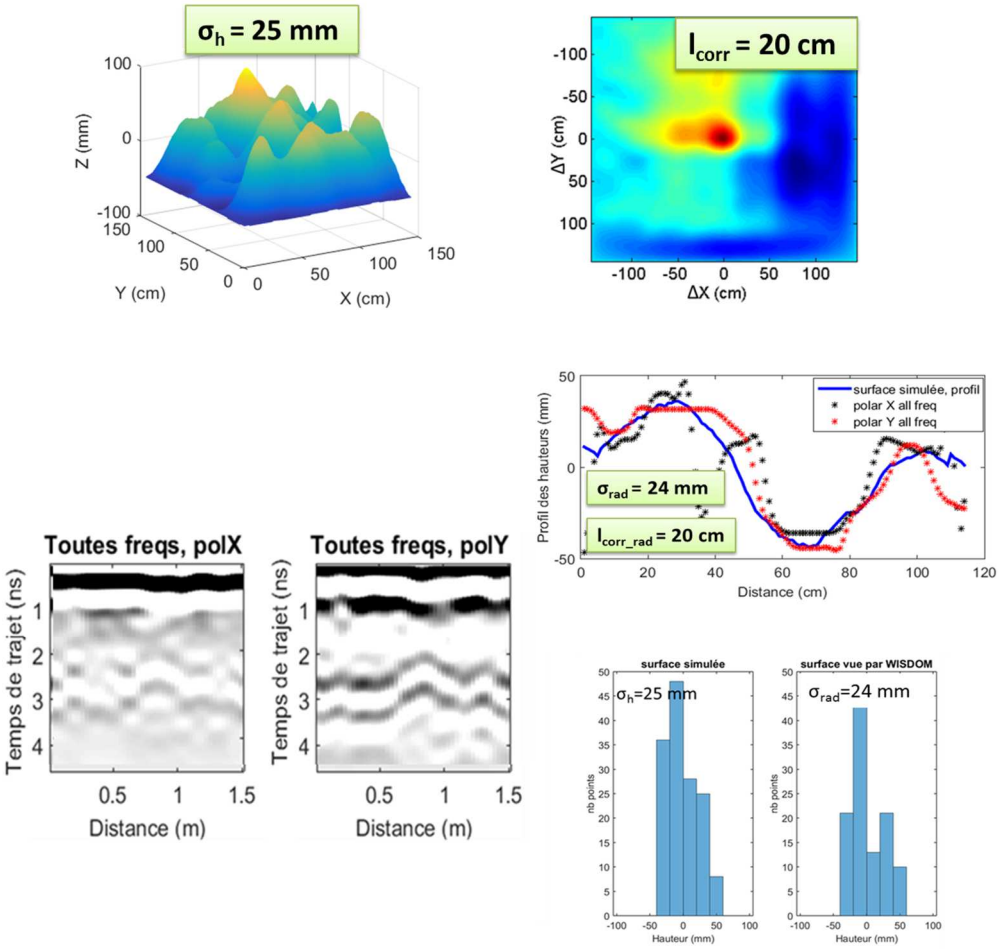


Figure 4.2-9 : En haut : surface rugueuse en entrée du modèle et son autocorrélation. Elle sépare une couche d'air d'une couche de glace homogène. Au milieu : radargrammes selon deux polarisations issus de la simulation d'un profil au-dessus de la surface rugueuse et profils des hauteurs de la surface simulée et vue par WISDOM. En bas : autocorrélations et histogrammes des hauteurs le long du profil simulé et vu par WISDOM.

Poursuivons avec une faible rugosité (Figure 4.2-10**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), on restera pour cet exemple avec des variations de hauteur comprises entre -5 mm et +5 mm et une grande longueur de corrélation. On se trouve dans la gamme des surfaces « lisses » selon le critère de Rayleigh. On remarque en effet que le radar est toujours capable de suivre la topographie de la surface. L'écho s'étale sur 1-1.5 nanosecondes.

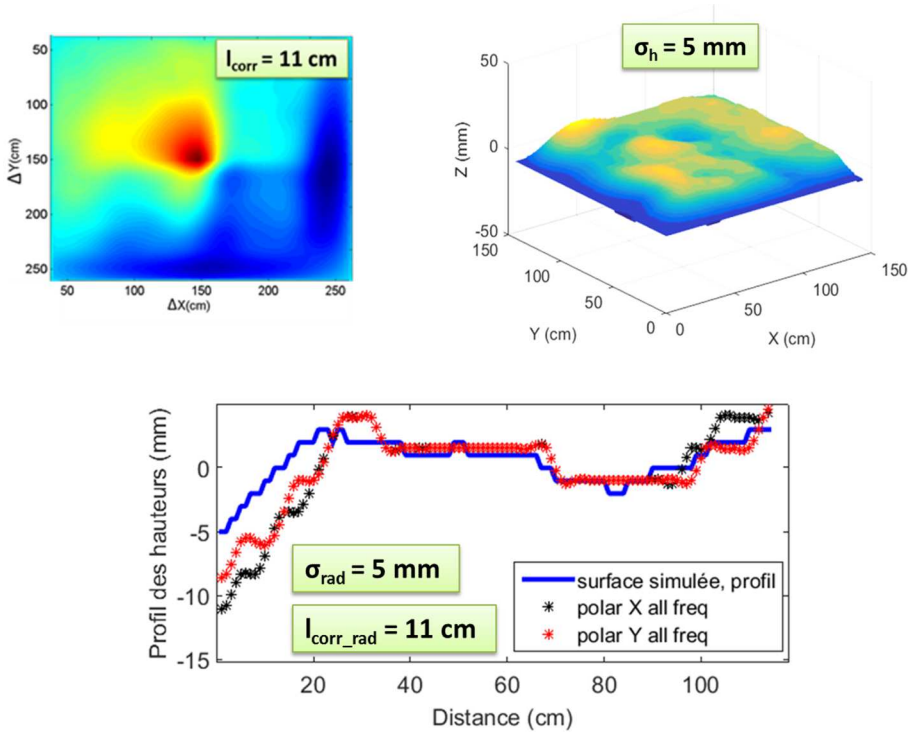


Figure 4.2-10 : En haut : Surface rugueuse en entrée du modèle et son autocorrélation. En bas : topographie le long du profil simulé et vu par WISDOM. Les longueurs de corrélation et les écarts-types des hauteurs pour la surface simulée d'une part et déduits des données d'autre part sont également précisés.

Venons-en à notre dernière surface

Figure 4.2-11) : une faible rugosité en termes de variations de hauteurs, mais cette fois avec une très petite longueur de corrélation. On se trouve toujours dans la gamme « lisse » selon le critère de Rayleigh. Cette fois, des phénomènes de diffusion apparaissent, avec un étalement en temps de la réponse de la surface, qui ne couvrait que 1 nanoseconde dans les deux premiers cas, et qui s'étale maintenant sur plus de 2.5 nanosecondes. La topographie de la surface n'est pas détectée et le traitement des données radar ne permet pas de retrouver la bonne valeur pour l'écart-type des hauteurs. On arrive cependant à retrouver une longueur de corrélation du même ordre de grandeur que la surface simulée.

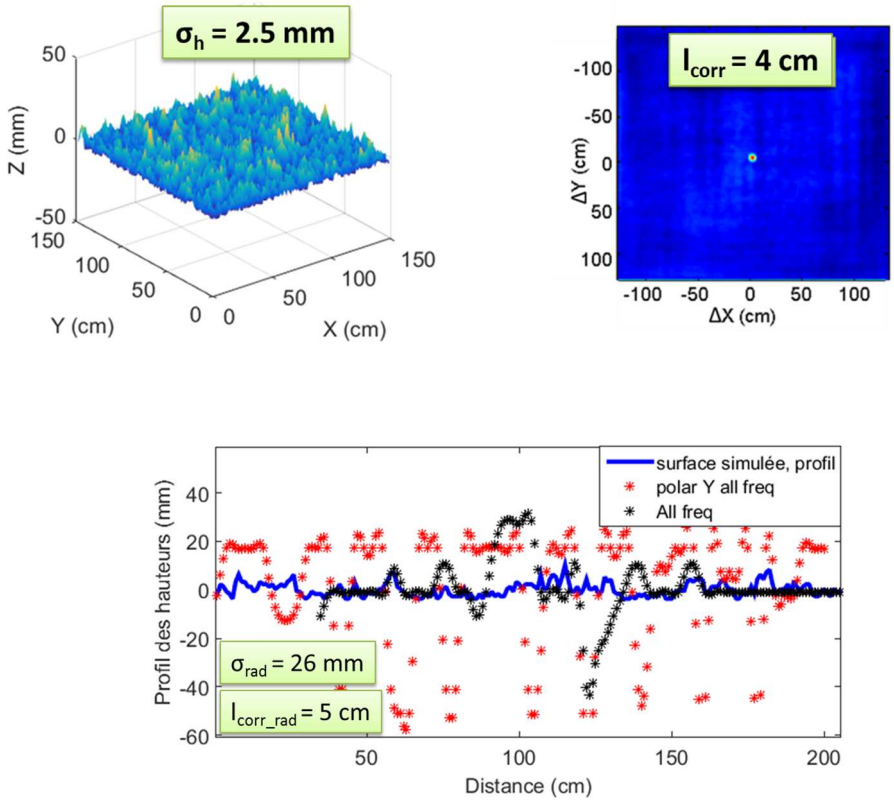


Figure 4.2-11 : En haut : surface rugueuse en entrée du modèle et son autocorrélation. En bas : profils des hauteurs de la surface simulée et vue par WISDOM. Les longueurs de corrélation et les écarts-types des hauteurs pour la surface simulée d'une part et déduits des données d'autre part sont également précisés

Ces simulations démontrent la limitation du critère de Rayleigh comme nous l'avons écrit, qui ne tient compte que des variations de hauteur de la surface, mais pas de « l'organisation spatiale » de ces variations. On constate en effet que la longueur de corrélation joue un rôle important sur le caractère diffusif des structures. Une estimation de l'écart-type de la phase induit par une surface rugueuse pour le cas de WISDOM en fonction de l'écart-type des hauteurs et de la longueur de corrélation est représenté Figure 4.2-12. Cette figure a été générée par simulations numériques de surfaces rugueuses dont les écarts-types des hauteurs varient entre 0 à 15 cm et les longueurs de corrélations entre 0 et 20 cm. Pour chaque point de chaque surface, le trajet entre l'antenne d'émission, le point et l'antenne de réception a été calculé Les écarts-types des déphasages induits par ces surfaces sont représentés en couleur pour une fréquence centrale de 1 GHz. Les limites entre les cas rugueux et lisse pour des critères de $\Delta\varphi=\pi/4$ et $\Delta\varphi=\pi/8$, pour WISDOM et au sens du critère de Rayleigh (qui ne tient compte que des écarts-types de hauteurs de la surface) sont également indiquées. La limite au sens de Rayleigh est plus restreinte qu'en réalité, puisque pour les mêmes variations de hauteurs, une longueur de corrélation importante permet de maintenir la surface dans la catégorie « lisse », alors que le critère de Rayleigh ne tient compte que du cas extrême où la longueur de corrélation est minimale.

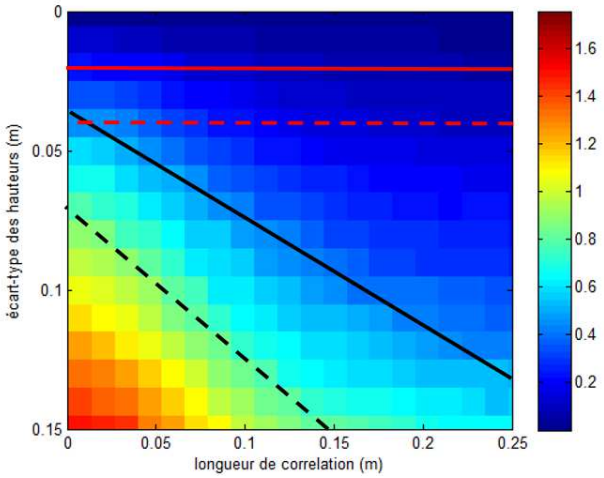


Figure 4.2-12 : Déphasage global induit par une surface rugueuse pour la configuration géométrique de WISDOM (noir) et selon le critère de Rayleigh (rouge) en fonction de l'écart-type des hauteurs et de la longueur de corrélation de la surface rugueuse en incidence normale, pour une fréquence centrale de 1GHz. Les traits pleins, (resp pointillés) représentent la limite à π/8 (resp π/4)

Observons maintenant la rugosité apparente vue par l'instrument WISDOM dans le cas de la détection de surfaces rugueuses. Nous avons conduit des simulations sous TEMSI-FD prenant en compte une couche d'air surmontant une couche de glace, séparées par une interface rugueuse. Les paramètres instrumentaux sont identiques à ceux de WISDOM. Les surfaces rugueuses simulées avec différents jeux de paramètres (σ_h, l_{corr}) sont présentées dans le Tableau 4.2-1.

Tableau 4.2-1 : Surfaces rugueuses simulées pour fournir une base d'aide à l'interprétation des données du GPR WISDOM.

	Type de rugosité simulée	**σ_h (cm)**	**l_{corr} (cm)**
Surface 1	Lisse	0	∞
Surface 2	Faible, variations lentes	1.6	14
Surface 3	Faible, variations moyennes	2.5	3.1
Surface 4	Faible, variations rapides	2.3	0.5
Surface 5	Moyenne, variations lentes	5	14
Surface 6	Moyenne, variations moyennes	8	11
Surface 7	Moyenne, variations rapides	5	5
Surface 8	Forte, variations lentes	14	19
Surface 9	Forte, variations moyennes	14	9
Surface 10	Forte, variations rapides	10	5

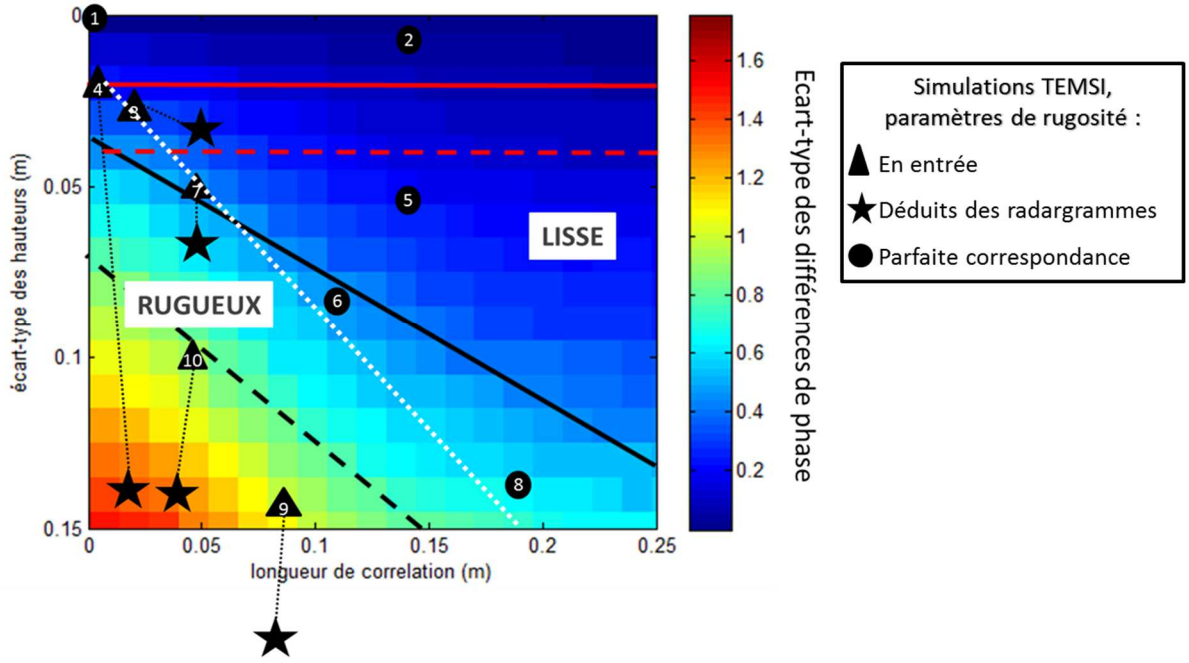


Figure 4.2-13 : Résultats des simulations conduites pour l'étude de la rugosité : comparaison entre les paramètres de rugosité en entrée des simulations et déduits des radargrammes produits sous TEMSI-FD. Les numéros correspondent aux différentes surfaces simulées listées dans le Tableau 4.2-1. La ligne blanche représente la limite entre les cas lisse et rugueux pour WISDOM.

Les paramètres de rugosité vus par le radar déduits des radargrammes produits par simulation sont représentés Figure 4.2-13. WISDOM est capable de retrouver la longueur de corrélation de la surface pour presque tous les cas simulés, avec une erreur moyenne de 2 cm. L'écart-type des hauteurs restitué par le radar a quant à lui permis de délimiter les zones lisse et rugueuse au sens de WISDOM : lorsque la diffusion est importante, l'étalement de l'écho de surface induit en effet une surestimation de σ_h, parfois très importante (de l'ordre de 12 cm). On remarque que la zone « lisse » couvre des gammes de rugosité plus importantes dans le cas de WISDOM que pour une limite de différence de phase inférieure à $\frac{\pi}{8}$ pour une fréquence de 1 GHz. Ceci est cohérent étant donné que la limite blanche a été déterminée avec la contribution de toutes les fréquences, de 0.5 GHz à 3 GHz. Ces simulations nous ont également permis d'estimer l'impact de la rugosité sur la méthode de restitution de la constante diélectrique que nous avons développée et que nous présenterons un peu plus loin dans ce manuscrit.

4.2.2 L'hétérogénéité diélectrique des matériaux

Les hétérogénéités de surface et du sous-sol ainsi que leur distribution spatiale ont également un impact sur le signal rétrodiffusé. Ce phénomène ne peut pas être simulé par tracé de rayons et c'est le code TEMSI-FD que nous avons utilisé, où la présence d'inhomogénéités sous la surface peut être prise en compte par l'inclusion de volumes de permittivités différentes. Plusieurs paramètres permettent de fixer les variations de la permittivité autour d'une valeur moyenne, de définir la taille caractéristique des

structures et donc la taille ainsi que l'amplitude des hétérogénéités au sein du volume total, offrant ainsi une approche réaliste pour la modélisation des sols naturels. L'hétérogénéité est alors traitée par un modèle fractal (Neyrat, 2009).

Pour toutes ces simulations, le milieu est composé d'une couche d'air surmontant une couche de glace (ε'=3.2) hétérogène, qui se situe elle-même au-dessus d'une couche de permittivité réelle de 10. C'est l'écho qui apparait autour de 20 nanosecondes de temps de trajet. Les radargrammes sont affichés à partir de l'écho de surface pour des soucis d'échelle.

Sur la Figure 4.2-14, la permittivité réelle du milieu présente un écart-type de 0.25 pour le milieu inhomogène. Le motif est du même ordre de grandeur que les longueurs d'onde de l'instrument WISDOM dans la glace. Un cas de milieu homogène est également représenté pour comparaison. Dans le cas inhomogène, on constate l'apparition de faibles échos au sein du milieu, témoignant des phénomènes de diffusion. On note par ailleurs la très faible déformation de l'écho de la surface sous-jacente, due aux temps de trajets qui varient légèrement avec la permittivité lors du passage des ondes à travers la couche de glace.

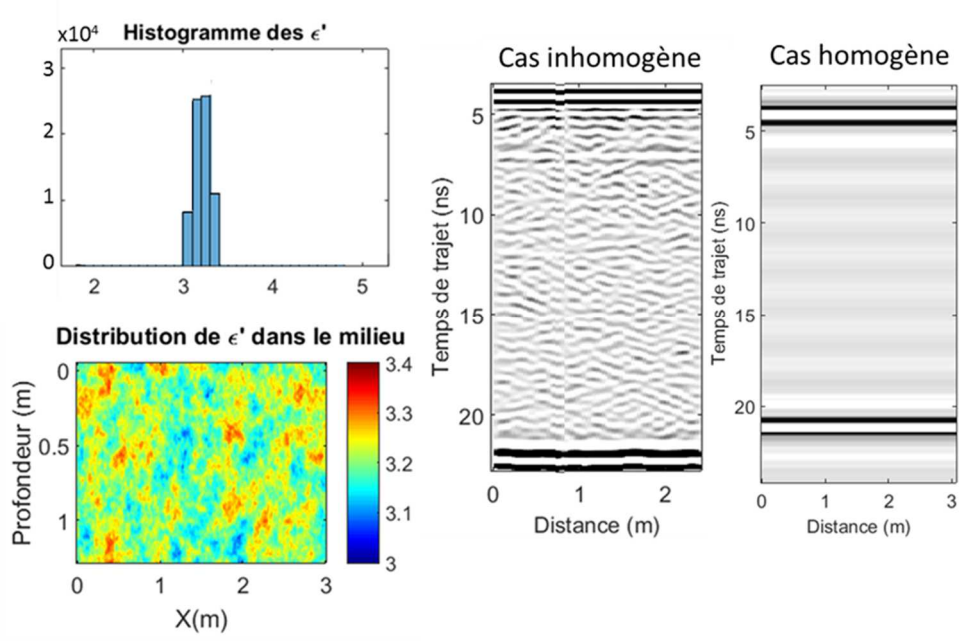


Figure 4.2-14 : Caractéristiques des hétérogénéités du milieu simulé (gauche) et radargramme associé. On se trouve dans le cas typique de phénomènes diffusifs. Le cas homogène est également représenté pour comparaison.

Sur la Figure 4.2-15 :, les variations de permittivité réelle sont du même ordre de grandeur que précédemment, mais les motifs sont plus étendus. Le radargramme présente quelques échos internes à la couche de glace, cependant il peut aisément s'assimiler à un milieu quasi homogène.

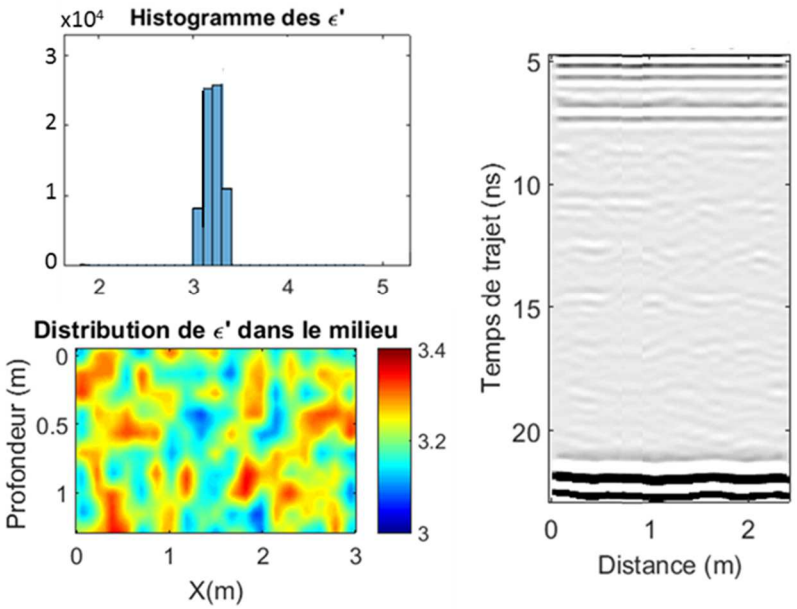


Figure 4.2-15 : Caractéristiques des hétérogénéités du milieu simulé et radargramme associé.

Dans le cas d'hétérogénéités plus importantes en termes de contrastes de permittivité (Figure 4.2-16), toujours avec de grands motifs, les échos gagnent en amplitude. On voit apparaître des figures hyperboliques caractéristiques de diffuseurs ponctuels, qui témoignent du fait que l'on s'approche d'un milieu où les hétérogénéités sont grandes devant la longueur d'onde, et où les lois de la réflexion commencent à dominer. On constate par ailleurs que plus les hétérogénéités sont grandes, plus les répercussions sur les échos lointains sont importantes. La surface qui sépare la couche de glace du socle est en effet physiquement lisse, alors qu'elle apparait sur le radargramme comme une surface très rugueuse. On note également que les modifications de la vitesse de propagation juste en dessous de la surface (variations horizontales de la permittivité le long du profil) impliquent l'étalement de l'écho de sol. Enfin, on note la différence entre les radargrammes pour les deux polarisations X et Y.

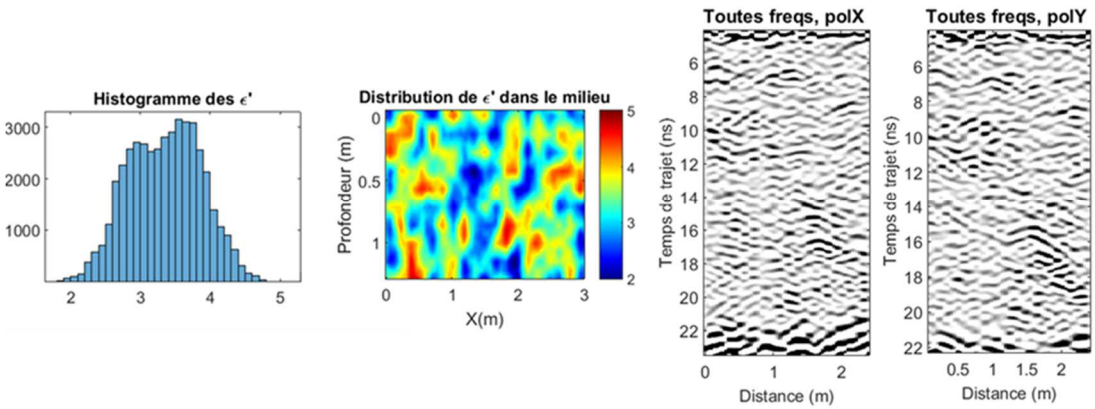


Figure 4.2-16 : Caractéristiques des hétérogénéités du milieu simulé et radargrammes associés selon deux polarisations différentes avec toute la bande de fréquences

Bien souvent, on assiste à une combinaison de tous ces effets de topographie, de rugosité ou d'hétérogénéités des propriétés diélectriques, les terrains naturels étant par définition des milieux hétérogènes, qui ont subi des transformations et des évolutions au gré des dépôts successifs, de l'érosion ou de l'activité tectonique. L'interprétation fine des données radar n'en est alors que plus délicate.

4.3 Modélisation pour l'aide à l'interprétation des données et la prédiction de performances

Nous nous proposons dans cette partie d'illustrer de façon concrète, avec des exemples simples, en quoi la modélisation peut d'une part aider à l'interprétation qualitative des données et d'autre part à la prédiction du comportement du GPR WISDOM dans des contextes géologique et exobiologique de mission spatiale.

4.3.1 Expérience en milieu froid

L'expérience conduite en chambre froide au laboratoire GEOPS concerne la détection potentielle de paléo-fentes de glace enfermées dans le pergélisol, potentiellement présentes sur Mars (Figure 4.3-1), grâce à l'instrument WISDOM. Pour reproduire ces conditions, le radar est placé en chambre froide dont la température varie de -7°C à -10°C et est déplacé au-dessus d'une cuve contenant du pergélisol selon la configuration décrite sur la Figure 4.3-2.

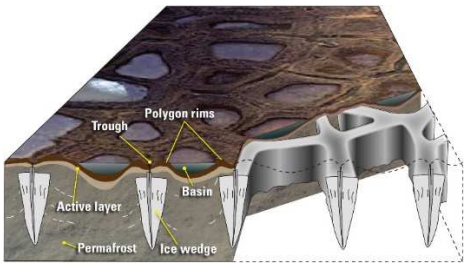


Figure 4.3-1 : Illustration des conditions de formation des fentes de glace. La surface de Mars pourrait avoir présenté des paysages similaires pendant une époque non négligeable de son histoire. Source : R. Mitchell/Inkworks for U.S. Fish and Wildlife Service

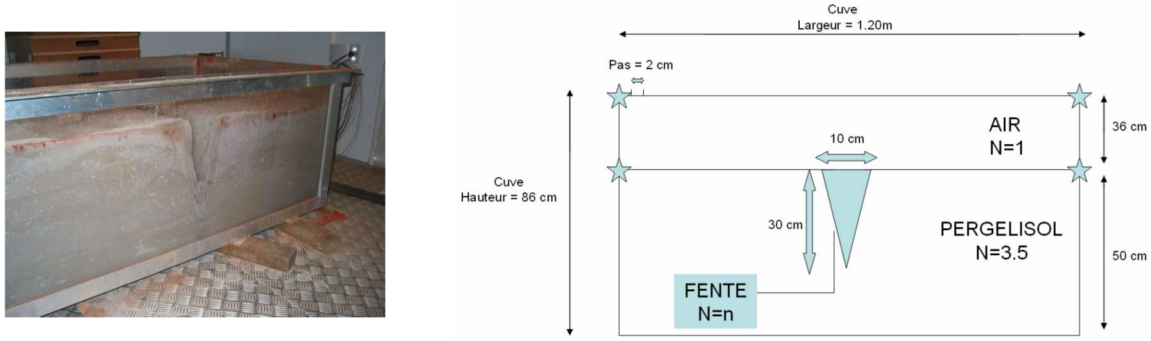


Figure 4.3-2 : Expérience conduite en chambre froide au laboratoire GEOPS avec une fente polygonale vide.

Un exemple de radargramme récolté et traité est représenté en copolarisation sur la Figure 4.3-3. Le premier écho correspond à la surface, dont le temps d'arrivée est défini comme temps initial. Le couplage, dont on connait la forme et le temps d'arrivée, a été retiré via un opérateur sur la médiane. On voit clairement sur chacun de ces radargrammes que la fente n'est pas détectée par le radar, du moins pas géométriquement, mais que l'amplitude de l'écho de surface décroît lorsque les antennes passent au-dessus d'elle, ce qui témoigne d'un changement de permittivité. En copolarisation, l'atténuation de l'écho est de 8 dB en moyenne au passage au-dessus de la fente vide. Le radar détecte en fait une moyenne entre la surface et la cavité. On remarque très nettement les stries diagonales qui traversent le radargramme de part et d'autre, mais leurs temps de trajet ne correspondent à aucun réflecteur à l'intérieur de la cuve. Afin de mieux comprendre la provenance de ces réflexions, des simulations ont été conduites avec le modèle de lancer de rayons décrit plus haut. La cuve a été modélisée selon les paramètres de la Figure 4.3-2, avec une très forte permittivité réelle ($\varepsilon' = 100$) pour les bords métalliques et en disposant des diffuseurs ponctuels pour simuler les coins (étoiles bleues sur le schéma). Les simulations montrent un très bon accord avec les données et nous ont permis de confirmer d'une part la non détection de la topographie de la fente polygonale par WISDOM et d'autre part l'hypothèse des coins de la cuve qui justifient ces stries en croix. On note que l'ouverture du lobe d'antenne est capitale pour ce genre de détection, puisqu'une ouverture de 3° autorise une très bonne reproduction de la fente vide, avec un temps d'arrivée à 2 ns sous l'écho de la surface, ce qui correspond bien à 30 cm de distance.

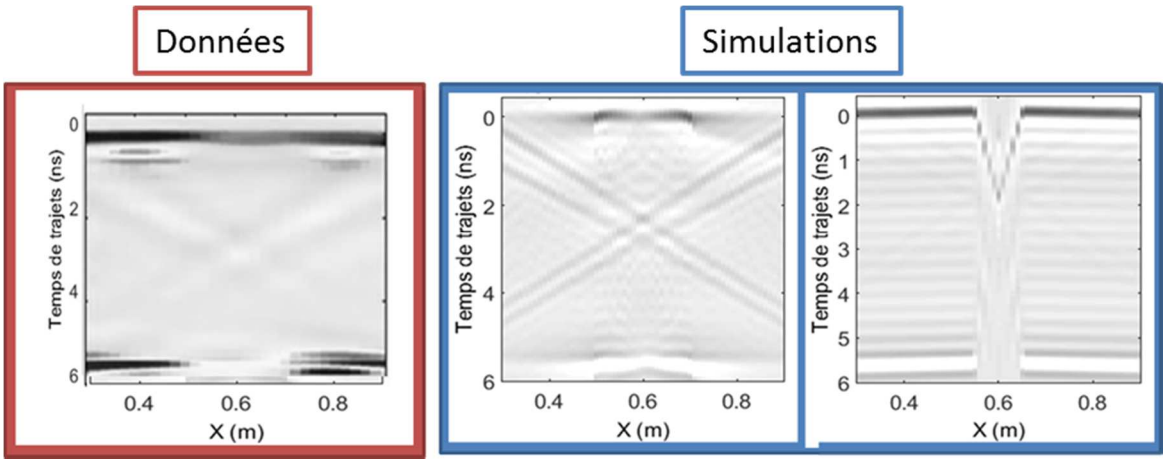


Figure 4.3-3: Comparaison entre les données et les simulations pour deux ouvertures de lobe d'antenne de 60° et 3°.

Observons maintenant les données plus précisément. La Figure 4.3-4 présente quatre radargrammes en copolarisation, mais pour différentes orientation des antennes. La configuration et les diagrammes de rayonnement sont schématisés pour chaque radargramme à titre indicatif. Les résultats réalisés en configuration « classique », c'est-à-dire avec les antennes droites et les éléments rayonnants diagonaux (sur la gauche de la Figure 4.3-4) sont similaires. Ceci n'a rien d'étonnant étant donné que la situation

est symétrique pour ces deux configurations. Si l'on observe la quatrième figure cependant, on constate qu'un deuxième écho de forte amplitude, proche de la surface apparaît. Ce signal constant représente cette fois les bords de la cuve que l'on détecte grâce à l'extension du diagramme de rayonnement dans la direction perpendiculaire au déplacement des antennes. Alors que les coins de la cuve dont nous avons déjà discuté s'approchent ou s'éloignent relativement de la position des antennes, les bords de la cuve apparaissent constants sur le radargramme étant donné qu'ils sont toujours à la même distance.

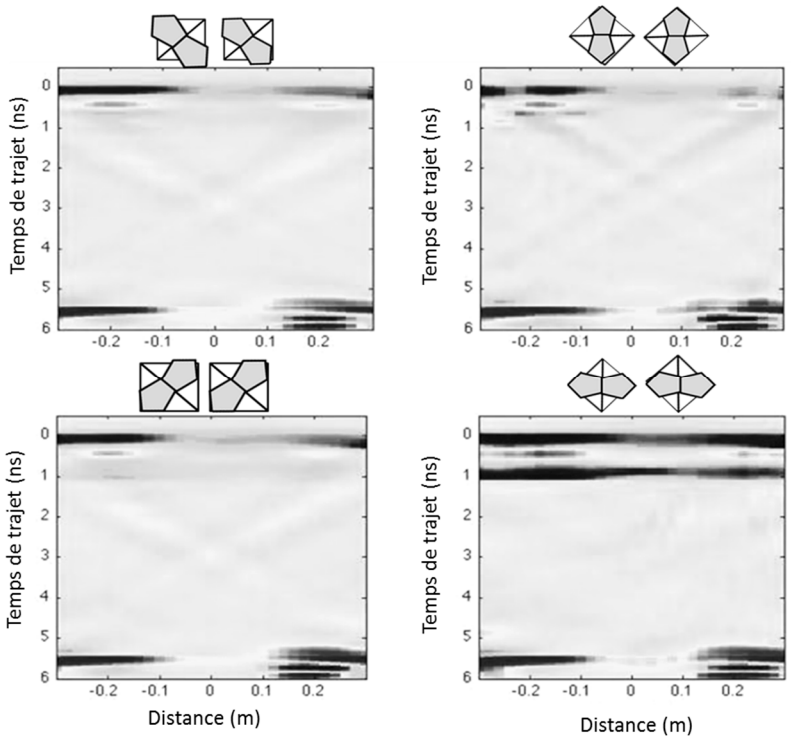


Figure 4.3-4 : Radargrammes générés à partir des données récoltées lors du sondage de la cuve de pergélisol présentant une fente au laboratoire GEOPS

Cette expérience en milieu froid démontre le fonctionnement nominal de l'instrument WISDOM dans des conditions extrêmes ainsi que sa capacité polarimétrique. Elle illustre bien la flexibilité et l'utilité du code de lancer de rayons développé pour l'aide à l'interprétation qualitative des données.

4.3.2 Simulation d'une structure biogénique

Southam et al. (2007) ont pointé l'intérêt des structures de type stromatolithes comme traceur potentiel de la vie. Même si leur origine biogénique est encore débattue, on peut être tenté d'étudier le potentiel de WISDOM dans un contexte de détection et d'identification de ces structures en tant que telles. C'est ce qui a motivé cette modélisation, dont les paramètres sont listés sur la Figure 4.3-5. Les valeurs de permittivité pour chaque couche ont été choisies en accord avec les valeurs trouvées dans la littérature déduites directement à partir de données martiennes ou sur des analogues, mais aussi compte-tenu de la

porosité supposée des matériaux présents dans ce contexte typiquement sédimentaire. La structure modélisant le stromatolithe a des dimensions de $(1m \times 1m \times 0.75\ cm)$.

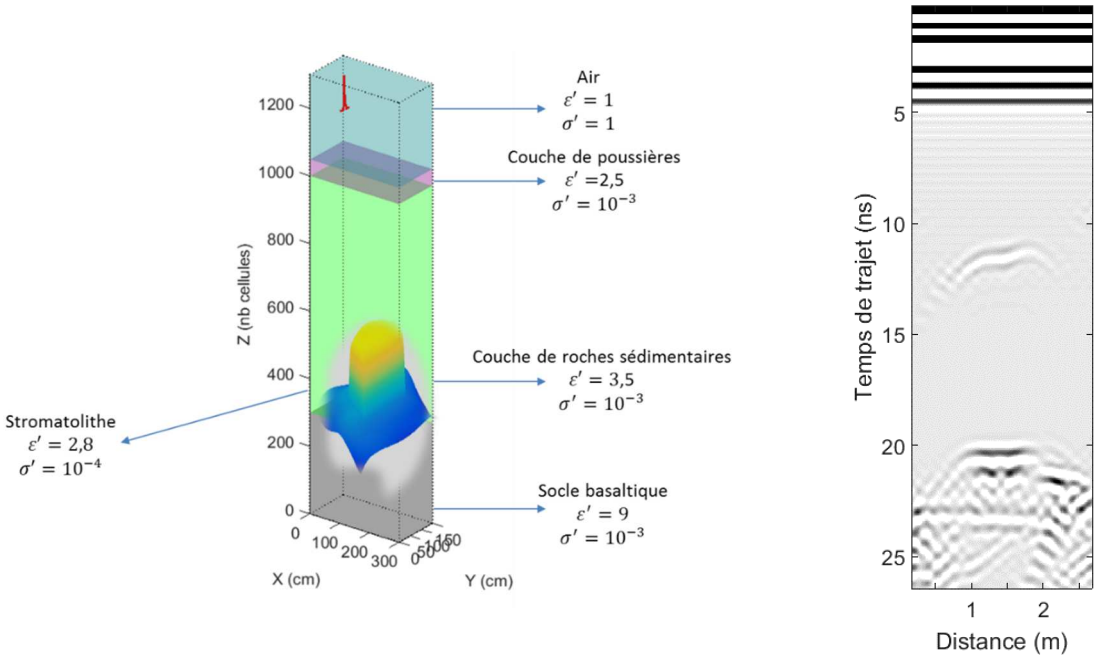


Figure 4.3-5 : Gauche : Simulation de WISDOM dans un contexte de sondage pour la détection de stromatolithes ; Droite : radargramme récolté

Les résultats de cette simulation produisent le radargramme présenté à droite de la Figure 4.3-5. Bien que nous ayons limité les pertes dans les différentes couches modélisées, WISDOM semble assez performant pour détecter les structures de type stromatolithe. Les temps de trajet jusqu'à cette unité sont en accord avec les paramètres diélectriques insérés dans le volume de calcul, à savoir une arrivée en haut de la structure à 11.7 ns, ce qui correspond bien à un trajet de 35 cm dans l'air, suivi de 10 cm dans le sable, et de 65 cm à travers les roches sédimentaires. Le socle du stromatolithe, qui repose sur la dernière couche, arrive autour de 20 ns, avec un écho puissant étant donné le fort contraste entre ces deux unités (et donc un coefficient de réflexion élevé). Notons également la forme apparente de cette interface : elle est lisse en réalité, mais la traversée du stromatolithe a pour effet d'augmenter la vitesse des ondes dans le milieu, ce qui n'est pas le cas au niveau des bords du volume, où les ondes traversent uniquement la couche de roches sédimentaires. Ceci a pour effet de « rehausser » le socle basaltique, résultant en un second écho de même forme que la signature du stromatolithe.

4.3.3 Prédiction du comportement de WISDOM sur le site d'Oxia Planum

Au cours de son stage, Yann (Hervé, 2015) a pu modéliser l'un des sites d'atterrissages sélectionnés pour la mission ExoMars 2018 à l'aide du logiciel TEMSI-FD. Il s'agit d'Oxia Planum, site proposé par

l'équipe de Cathy Quantin Nataf du Laboratoire de Géologie de Lyon, qui nous a fourni une coupe stratigraphique des dix premiers mètres du sous-sol effectuée grâce aux clichés de l'instrument HIRISE sur les bords de cratères dans cette région. Les propriétés des différentes couches en entrée du modèle ont été déduites des travaux sur des analogues martiens et en tenant compte de la loi proposée par Binder et Lange (1980) pour la Lune, qui considère que la porosité est le facteur déterminant dans la valeur de la permittivité. En conséquence, une augmentation de la constante diélectrique avec la profondeur (avec le degré de compaction) selon une exponentielle décroissante est prise en compte :

$$\varepsilon'(z) = \varepsilon_0 e^{az} \tag{5.4}$$

Où ε_0 est la permittivité en surface, a une constante positive et z la profondeur. Pour différentes valeurs de a, donc des contrastes de permittivité plus ou moins importants, des simulations sous TEMSI-FD ont été effectuées en considérant un milieu composé de 5 couches (homogènes dans un premier temps) à faibles pertes ($\sigma'=10^{-4}$), sur une profondeur totale de 5 m (Figure 4.3-6).

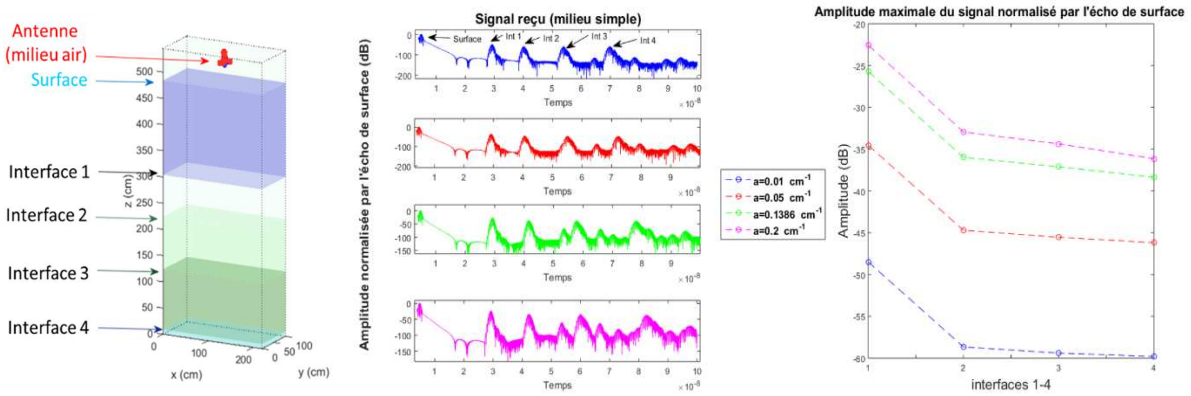


Figure 4.3-6 : Modélisation du site d'Oxia Planum et amplitude reçue pour chaque interface pour différentes valeurs de a (Hervé, 2015)

Comme attendu, plus les contrastes entre les différentes couches sont importants, plus les amplitudes des échos correspondant aux interfaces sont élevées. Dans le cas de faibles pertes, les amplitudes se situent entre -60 dB et -25 dB par rapport à l'écho de sol : ce type de milieu est donc tout à fait détectable par WISDOM, puisque sa dynamique de 80dB lui permet de discriminer ces différents échos du plancher de bruit. Lorsqu'on ajoute des hétérogénéités, de la rugosité ou des pertes importantes en revanche, les performances diminuent grandement : si l'on augmente la conductivité pour atteindre un ordre de $\sigma'=10^{-2}$, pour des valeurs de $a < 0.1$, seule la première interface est détectable par l'instrument. Une simulation d'Oxia Planum dans un cas réaliste (présentant tous ces effets de terrain) est présentée Figure 4.3-7, avec les paramètres en entrée de la boîte de calcul (Tableau 4.3-1). Ces travaux ont fait l'objet d'une communication orale lors de l'EPSC 2015 (Ciarletti et al., 2015).

Tableau 4.3-1 : Paramètres en entrée du volume de calcul pour Oxia Planum	
Contrastes de permittivité	a=0.2 m^{-1}
Hétérogénéités sur la permittivité	$\Delta\varepsilon$=20%
Pertes	$\sigma'= 10^{-3}$
Rugosité à chaque interface	σ_h= 2 cm l_{corr}= 9 cm

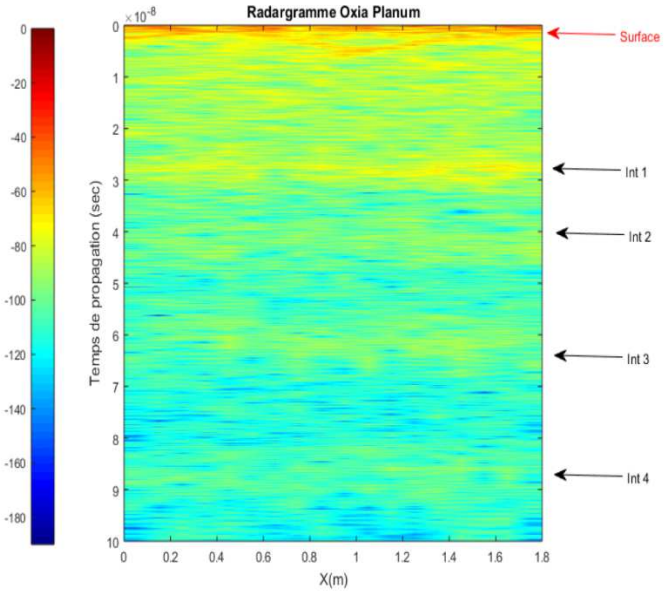


Figure 4.3-7 : Exemple de radargramme simulé pour le site d'Oxia Planum

Ces simulations démontrent la capacité de WISDOM à détecter des strates en conditions que l'on peut qualifier de défavorables à la bonne pénétration des ondes. Les valeurs d'atténuation prédites pour Mars sont cependant très variables et il est possible que le site d'Oxia se trouve dans une zone où les pertes sont importantes, notamment au niveau des signatures de minéraux hydratés qui ont pu y être détectées. Dans ce cas, la limite de détection de l'instrument en termes de profondeur s'en trouverait grandement diminuée.

Conclusion

Les deux méthodes de modélisation que nous avons sélectionnées sont complémentaires et offrent un grand nombre de possibilités, tant pour l'aide au dimensionnement de l'instrument WISDOM que pour la prédiction de ses performances en interaction avec des environnements divers. Elles offrent également une aide précieuse pour l'interprétation des données. Le premier code de simulation, basé sur la méthode du lancer de rayon a été entièrement développé dans le cadre de cette thèse. Il offre la possibilité d'obtenir rapidement des radargrammes simulés comparables aux données de WISDOM pour une aide qualitative à l'interprétation comme le démontre l'expérience conduite en chambre froide. Le deuxième modèle, TEMSI-FD, basé sur la méthode des différences finies, nous a été fourni par le XLIM. Il permet de simuler l'instrument en interaction avec des milieux plus complexes. Il est ainsi possible d'inclure des hétérogénéités diélectriques (granulosité ou gradient sur la permittivité, la conductivité) ou géométriques (rugosité des interfaces, objets enfouis) d'amplitudes et de tailles variables au sein de l'environnement. Nous avons notamment pu, grâce à ce modèle, estimer les performances de WISDOM dans un contexte de détection de structures biogéniques et sur le site d'Oxia Planum, puisque c'est ce dernier qui a finalement été sélectionné pour devenir le site d'atterrissage de la mission ExoMars 2018. Enfin, nous avons estimé la limite de restitution correcte de la rugosité par l'instrument en fonction de des paramètres de longueur de corrélation et d'écart-type des hauteurs de la surface rugueuse simulée. Les résultats de cette série de simulations montrent que WISDOM est capable de retrouver les bons paramètres sur une gamme de rugosités plus étendue que les prédictions faites via le critère de Rayleigh. Lorsque la diffusion est trop importante, l'étalement de l'écho de surface induit d'une part une erreur, parfois très importante sur les estimations des distributions de hauteur et d'autre part une diminution de l'amplitude moyenne de l'écho de sol. Ceci aura un impact non négligeable sur la viabilité de notre méthode d'estimation de la constante diélectrique en surface, que nous allons présenter dans le chapitre qui suit. Une perspective intéressante pour poursuivre ce travail serait de conduire des simulations de profils selon des grilles dans la configuration de WISDOM sur une gamme de surfaces rugueuses pour tenter de restituer une surface apparente en 3 dimensions.

Références

Afifi, S., Dusséaux, R. (2011). On the co-polarized phase difference of rough layered surfaces: Formulae derived from the small perturbation method. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 59(7), 2607-2618.

Annan, A. P., and Davis, J. L. (1976). Impulse radar sounding in permafrost, Radio Sci., 11(4), 383–394, doi:10.1029/RS011i004p00383.

Besse, S. (2004). Etude théorique de radars géologiques: analyses de sols, d'antennes et interprétation des signaux (Doctoral dissertation, Limoges).

Binder, A. B., Lange, M. A. (1980). On the thermal history, thermal state, and related tectonism of a moon of fission origin. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 85(B6), 3194-3208.

Bruce, N. C. (1997). Scattering of light from surfaces with one-dimensional structure calculated by the ray-tracing method. JOSA A, 14(8), 1850-1858.

Ciarletti, V., Martinat, B., Reineix, A., Berthelier, J. J., & Ney, R. (2003). Numerical simulation of the operation of the GPR experiment on NETLANDER. Journal of Geophysical Research: Planets, 108(E4).

Ciarletti, V., Hervé, Y., Dorizon, S., Le Gall, A., Quantin, C., Broyer, J., ... & Grindrod, P. (2015, September). Modelling the performances of the WISDOM radar on the Oxia Planum potential landing site for ExoMars. In European Planetary Science Congress 2015 (Vol. 10, pp. EPSC2015-574).

Dusséaux, R., Braham, K. A., Granet, G. (2008). Implementation and validation of the curvilinear coordinate method for the scattering of electromagnetic waves from two-dimensional dielectric random rough surfaces. Waves in Random and Complex Media, 18(4), 551-570.

Hamadi, A. (2010). Analyse et prédiction comportementales du radar GPR polarimétrique de la mission spatiale EXOMARS (Doctoral dissertation, Université de Limoges).

Hervé, Y. (2015). Evaluation des performances du radar à pénétration de sol WISDOM/ExoMars sur les différents sites d'atterrissage à l'étude (Rapport de stage M2, Université Pierre et Marie Curie).

Martinat, B. (2001). Etude électromagnétique du Ground Penetrating Radar de Netlander destiné au sondage du sous-sol martien (Doctoral dissertation, Limoges).

Neyrat, M., Guiffaut, C., Reineix, A., & Reynaud, F. (2009). Fast modeling using FDTD method and wave front inverse method for multisensor GPR simulations in the time domain. Microwave and Optical Technology Letters, 51(3), 796-802.

Roden, J. A., & Gedney, S. D. (2000). Convolutional PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media. Microwave and optical technology letters, 27(5), 334-338.

Soto-Crespo, J. M., Friberg, A. T., & Nieto-Vesperinas, M. (1990). Scattering from slightly rough random surfaces: a detailed study on the validity of the small perturbation method. JOSA A, 7(7), 1185-1201.

Southam, G., Rothschild, L.J., Westall, F., (2007). The Geology and Habitability of Terrestrial Planets: Fundamental Requirements for Life, Space Sci Rev (2007) 129: 7–34. DOI 10.1007/s11214-007-9148-8

Volakis, J.L., Chatterjee, A., Kemptel, L.C. (1998). Finite Element Method for Electromagnetics , IEEE Press.

Chapitre 5 : Les méthodes d'estimation des propriétés diélectriques du sous-sol

Sommaire :

Introduction

5.1 Les méthodes d'estimation des propriétés du sous-sol à partir des données de WISDOM 142

5.1.1 Accès à la constante diélectrique en surface 142

5.1.1.1 Principe 142

5.1.1.2 Validation 144

5.1.1.3 Résultats 145

5.1.2 L'impact de la rugosité sur la restitution de la constante diélectrique 146

5.1.2.1 La détection de surfaces rugueuses avec l'instrument WISDOM 146

5.1.2.2 Simulations conduites sous TEMSI-FD 150

5.1.2.3 Expérience en milieu (semi-) contrôlé 151

5.2 La signature des diffuseurs ponctuels : accès en profondeur 154

5.2.1 Principe 154

5.2.2 Méthode développée 156

5.2.3 Etude de sensibilité 157

5.3 Expérience d'humidification d'un sol 158

5.3.1 Motivations et protocole 158

5.3.2 Résultats 158

5.4 La campagne SAFER 160

5.4.1 Contexte 160

5.4.1.1 Le désert d'Atacama 160

5.4.1.2 Prérequis 162

5.4.2 Les variations spatiales de la constante diélectrique en surface 164

5.4.2.1 Cartographie de la constante diélectrique en surface 164

5.4.2.2 Discussion(s) 166

5.4.3 Le gradient de la constante diélectrique 169

Conclusion

Références

Introduction

La modélisation est un outil important pour comprendre et prédire les résultats le comportement de l'instrument WISDOM, comme nous venons de le voir. Une interprétation quantitative des données passe cependant aussi par le développement d'outils de traitement et de méthodes de restitution des paramètres géométriques et diélectriques du sous-sol, qui représente l'objectif principal de ce travail de thèse. Afin d'identifier et de positionner correctement les objets illuminés par le radar et ainsi reconstituer le sous-sol avec la meilleure précision possible, il est nécessaire d'estimer les paramètres électromagnétiques du milieu sondé à partir des données de WISDOM. La vitesse de propagation des ondes, et à fortiori la valeur de la constante diélectrique du milieu est le paramètre le plus important, étant donné qu'il permet de convertir les temps de trajet en distances sur les radargrammes. L'atténuation et la déformation de ces ondes caractérisent également le milieu traversé, puisqu'elles sont directement reliées à la permittivité diélectrique et la conductivité électrique du milieu sondé. Nous nous proposons de présenter ici deux méthodes indépendantes d'estimation de la constante diélectrique. La première donne accès à la constante diélectrique en surface, tandis que la deuxième s'appuie sur la signature des diffuseurs et fournit une estimation de la valeur moyenne de la constante diélectrique du milieu entre la surface et les objets présents dans le sous-sol, ainsi que leur distance par rapport aux antennes de l'instrument.

Nous nous attacherons donc dans ce chapitre à expliquer notre démarche pour quantifier les paramètres diélectriques en surface et tenterons à cette occasion de continuer le travail effectué par modélisation pour évaluer l'impact de la rugosité sur l'estimation de la constante diélectrique, à partir de données expérimentales cette fois. Nous passerons ensuite à notre deuxième méthode, qui autorise l'accès à la constante diélectrique en profondeur. Nous nous attacherons à présenter les expériences et modélisations qui nous ont permis de valider ces deux méthodes. Enfin, nous appliquerons les méthodes que nous avons développées sur des données acquises lors de campagnes de mesures, notamment à travers la mission SAFER, introduite à la fin du Chapitre 3.

5.1 Les méthodes d'estimation des propriétés du sous-sol à partir des données de WISDOM

5.1.1 Accès à la constante diélectrique en surface

5.1.1.1 Principe

La configuration particulière de WISDOM, dont les antennes seront situées à environ 35 cm du sol, peut constituer un avantage pour l'estimation de la constante diélectrique en surface, via la comparaison de deux signaux récupérés dans la même configuration, l'un contenant la réflexion d'un signal sur un sol

naturel, et l'autre sur un réflecteur parfait. Cette méthode a déjà été discutée par plusieurs auteurs et constitue un moyen robuste pour déterminer la partie réelle de la permittivité en surface le long du trajet des antennes (Slob et al., 2010, Chanzy et al., 1996).

Il est effectivement possible de conserver l'écho correspondant à l'arrivée sur la surface, en sélectionnant le bon intervalle de temps (pour une distance de 30 cm entre la surface et le sol, l'écho met environ 2 ns à arriver suite au couplage direct des antennes) pour en déduire le coefficient de réflexion et donc la constante diélectrique de la surface.

En champ lointain, la formule de Friis (Friis et al., 1957) permet d'exprimer la puissance de l'écho revenant d'une surface lisse en fonction des paramètres du radar, de la distance des antennes à la surface, et du coefficient de réflexion de la surface :

$$P_{surf} = (|R_{surf}|\sqrt{P_F\ e_{TX}G_{TX}e_{RX}\ G_{RX}}\frac{\lambda}{4\pi 2d_{surf}})^2 = K\ {R_{surf}}^2 \quad (5.1\text{-}1)$$

Avec P_{surf} la puissance de l'écho revenant de la surface, R_{surf} le coefficient de réflexion, P_F la puissance transmise à l'antenne d'émission, e_{TX} et e_{RX} les efficacités en émission et réception, G_{TX}et G_{RX} sont les gains respectifs des antennes d'émission et de réception, λ est la longueur d'onde et d_{surf} la distance entre les antennes et la surface.

Dans le cas d'une surface lisse, en incidence normale et pour une onde plane, le coefficient de réflexion dépend uniquement de la permittivité et est donné par :

$$R_{surf} = \frac{1-\sqrt{\varepsilon_r'}}{1+\sqrt{\varepsilon_r'}}\ . \quad (5.1\text{-}2)$$

Les autres paramètres contenus dans le facteur K sont liés aux paramètres du radar et à sa configuration. Ainsi, si l'on utilise un conducteur parfait, il est possible de mesurer expérimentalement ce facteur. Une plaque métallique de dimensions suffisantes placée à la même distance que la surface peut donc faire office de référence (Slob et al., 2010, Maser and Scullion, 1992), et possède un coefficient de réflexion $R_{ref} = -1$.

La puissance reçue est alors $$P_{ref} = K \quad (5.1\text{-}3)$$

Le rapport des puissances émise et reçue nous permet de supprimer le facteur K, on obtient :

$$\frac{P_{surf}}{P_{ref}} = {R_{surf}}^2 \quad (5.1\text{-}4)$$

Ce qui implique pour les amplitudes $$\frac{A_{surf}}{A_{ref}} = |R_{surf}| \quad (5.1\text{-}5)$$

Ainsi, $\sqrt{\varepsilon_r'} = \left|\frac{A_{ref}+A_{surf}}{A_{ref}-A_{surf}}\right|$ (5.1-6)

Il est donc possible, à partir de la mesure de A_{ref}, d'estimer $\sqrt{\varepsilon_r'}$

5.1.1.2 Validation

Il nous a semblé important de tester la méthode que nous venons de décrire en l'appliquant sur des données simulées sous TEMSI-FD. En effet, il est vital de quantifier l'impact des conditions expérimentales sur la validité de cette méthode. Celle-ci est en théorie valable dans la zone de champ lointain, qui se situe à environ 1,5 m de distance dans le vide dans le cas de WISDOM (comme nous l'avons vu dans le Chapitre 3). Les antennes sont à une distance d'environ 35 cm de la surface, nous n'entrons donc pas dans ce cadre. De plus, la méthode expérimentale que nous utilisons consiste à obtenir une réflexion sur une plaque métallique de dimensions limitées ($1m \times 50cm$), notamment pour des soucis de logistique dans des contextes de mesures terrain. Le code développé pour estimer la constante diélectrique à partir des mesures sur la surface et d'une mesure sur une plaque métallique (conducteur parfait) a donc été utilisé sur des données simulées. La méthode d'estimation de ε' en surface donne de très bons résultats dans le cas idéal d'une surface lisse et de milieux homogènes, comme l'indique la Figure 5.1-1.

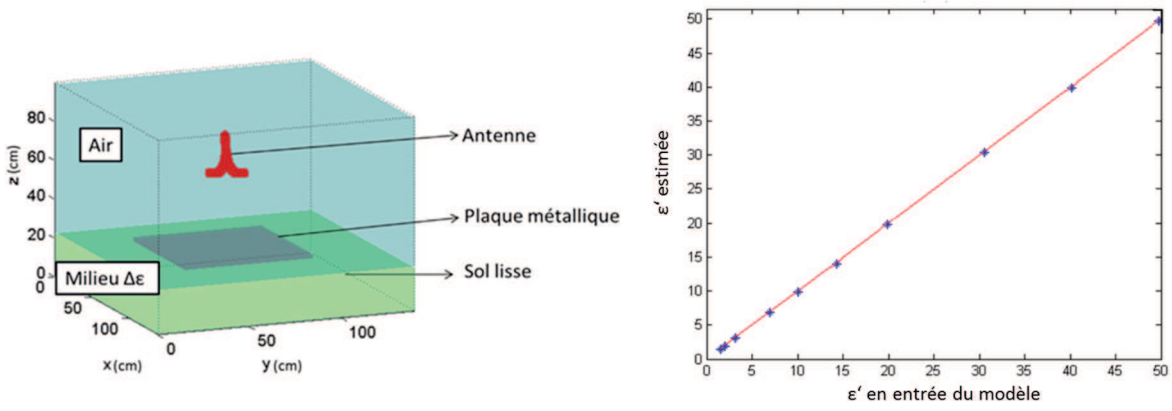


Figure 5.1-1 : Simulations TEMSI de la méthode basée sur l'exploitation de l'écho de sol avec la configuration de WISDOM. A gauche : illustration de la simulation pour la mesure sur plaque métallique. A droite : résultats pour l'estimation de la constante diélectrique.

L'impact de plusieurs paramètres peut cependant rendre l'estimation difficile, au premier rang desquels la rugosité de surface, qui a pour effet, lorsqu'elle est diffusante, d'étaler l'écho propre à la surface qui peut même se retrouver superposé au couplage direct entre les antennes ou à d'autres échos provenant de son voisinage. C'est ce que nous allons aborder et tenter de quantifier dans la partie (5.1.2).

5.1.1.3 Résultats

La méthode d'exploitation de l'écho de sol a été utilisée pour les différentes campagnes de mesures effectuées avec les prototypes de WISDOM. Les résultats principaux sont listés dans le Tableau 5.1-1. Dans le cas des tests en environnement contrôlé (Dechambre et al., 2012), ceux-ci ont été conduits en collaboration avec le laboratoire GEOsciences Paris Sud (GEOPS) dans une chambre froide où les équipes étudient les comportements des milieux froids, notamment dans des environnements analogues martiens (Costard et al., 1996,).

Tableau 5.1-1 : Estimation de la constante diélectrique en surface pour les différents lieux sondés avec WISDOM

Campagne de mesures	Type de terrain	ε'	Ecart-type	Références dans la littérature
Dachstein Mars simulation, Autriche	Glace	3.2	0.25	3.15 pour la glace pure (Petrenko and Whitworth, 1999)
SAFER, Chili	Sable sec, poussières, roche	3.4	0.30	2.6-4 (Williams and Greeley, 2004)
Etna,Sicile	Dépôts pyroclastiques	5.7	0.35	2-15 (Rust et al., 1999) en fonction de l'humidité et de la densité
Chamonix, Alpes	Neige	2.8	0.63	1.7-3 (Mätzler, 1996) en fonction de l'humidité et de la densité
GEOPS, Orsay	Pergélisol en chambre froide	3.35	0.22	2-8 (Martinez and Byrnes, 2001 ; Annan and Davis, 1976) en fonction de la quantité de bulles d'air, d'impuretés et de la densité
GEOPS, Orsay	Sable sec en chambre froide	2.73	0.27	2.7-2.8 (Mätzler, 1998)

Revenons un petit moment sur les mesures en environnement froid et contrôlé. L'expérience menée au laboratoire GEOPS avait pour objectifs d'une part de déterminer si WISDOM est bien capable d'identifier la stratification entre plusieurs milieux homogènes, et d'autre part de tester notre méthode basée sur l'écho de sol en environnement connu. L'expérience consiste à remplir une cuve disposée dans une chambre froide d'une couche de pergélisol surmontée par une couche de sable sec, de 10 cm d'épaisseur chacune. Le radargramme obtenu présente des échos en accord avec les temps d'arrivée théoriques des ondes aux différentes interfaces, ce qui témoigne de la capacité de l'instrument à distinguer de fines couches successives. En outre, la valeur de la constante diélectrique de la première couche peut être retrouvée de deux façons différentes :

- ✓ A partir des mesures des temps d'aller-retour des ondes et connaissant l'épaisseur des couches, on utilise la relation suivante : $n = \frac{ct}{2d} = \sqrt{\varepsilon'}$. Les résultats trouvés par cette méthode sont les suivants : $\varepsilon'_{sable_sec} = 2.71$; $\varepsilon'_{pergelisol} = 3.72$.

- ✓ A partir des mesures d'amplitude connaissant celle correspondant à la réflexion sur une plaque métallique (référence) : $\frac{A_{interface}}{A_{air}} = R = \frac{n-1}{n+1}$. Le résultat trouvé par cette méthode est le suivant : $\varepsilon'_{sable_sec} = 2.73$;

En résumé, WISDOM s'est avéré capable de détecter la transition entre le sable sec et le pergélisol, ce qui est capital étant donné que la configuration d'une couche de sable sec surmontant une couche de glace pourrait être rencontrée sur Mars. De plus, la valeur de la constante diélectrique peut être retrouvée grâce aux valeurs d'amplitude mesurées connaissant une référence, les deux méthodes d'estimation indépendantes produisant les mêmes résultats.

Notons à propos des résultats du Tableau 5.1-1 que, même si la permittivité peut aider à la caractérisation d'un milieu, elle ne peut pas le déterminer de façon univoque : la valeur de la partie réelle de la constante diélectrique estimée pour la glace est très proche de celle estimée pour un terrain de type désertique, alors qu'ils sont de natures très différentes. L'étude par sous-bandes de fréquences, l'analyse de la structure du sous-sol et des figures de dépôts, de la texture des radargrammes et l'estimation des pertes sont autant d'indices supplémentaires pour une caractérisation fine d'un milieu géologique. Néanmoins, ces estimations sont en accord avec les valeurs trouvées dans la littérature pour les fréquences de la gamme du GHz.

5.1.2 L'impact de la rugosité sur la restitution de la constante diélectrique

Nous avons déjà discuté de la rugosité lors du précédent chapitre et de son impact sur la diffusion des ondes GPR. Ici, nous nous proposons de présenter un cas expérimental de quantification de la rugosité par WISDOM et de confronter nos résultats aux simulations effectuées sous TEMSI-FD.

5.1.2.1 La détection de surfaces rugueuses avec l'instrument WISDOM

La capacité à développer des méthodes qui permettent de quantifier l'impact des effets de terrain sur les estimations de paramètres diélectriques à partir de la rugosité apparente (vue par l'instrument) est capitale pour restituer correctement propriétés du sous-sol dans le cadre de la mission ExoMars. La Figure 5.1-2 représente des données acquises dans des grottes glacées en Autriche le long d'une surface rugueuse. On remarque que la surface apparente varie en fonction de la bande de fréquences utilisée. Pour le cas « Toutes fréquences », on obtient un écart-type des hauteurs de $6.6 \cdot 10^{-3}$ m et une longueur de corrélation de 1 m, tandis que pour le cas « Hautes fréquences », on obtient respectivement $1.1 \cdot 10^{-2}$ m et 2 cm (Dorizon and Ciarletti, communication AGU 2013).

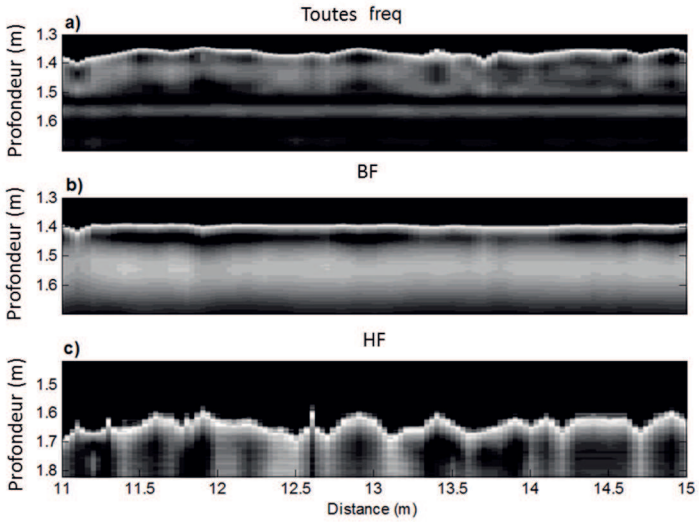


Figure 5.1-2 : Radargrammes des données acquises à Dachstein sur une surface rugueuse en sous-bandes de fréquences. Les figures sont centrées sur l'écho de sol et converties en profondeur en considérant une constante diélectrique de 1. Extrait de Dorizon et al., 2015).

On peut séparer deux impacts de la rugosité sur les données de WISDOM, comme nous l'ont prédit les simulations conduites sous TEMSI-FD (cf. Chapitre 4) : premièrement, on observe un étalement de l'écho de sol lorsque la surface est rugueuse. Dans l'exemple de la Figure 5.1-3, on observe l'enveloppe de l'écho de surface qui s'étale sur 0,5 ns dans le cas de la surface lisse, contre 0,8 ns pour le cas rugueux. Il en résulte également une diminution de l'amplitude maximale de l'écho qui passe d'une moyenne de 2.24 à 1.83, et en conséquence une sous-estimation de la constante diélectrique lorsqu'on utilise la méthode basée sur l'écho de sol décrite précédemment. Une modélisation électromagnétique précise est alors nécessaire pour quantifier l'impact de la rugosité sur la restitution de la constante diélectrique. Deuxièmement, WISDOM est capable de détecter la topographie de la surface le long d'un profil, ce qui ne veut pas nécessairement dire que la surface est « rugueuse » au sens de la diffusion. Dans ce dernier cas, la constante diélectrique estimée n'est pas impactée.

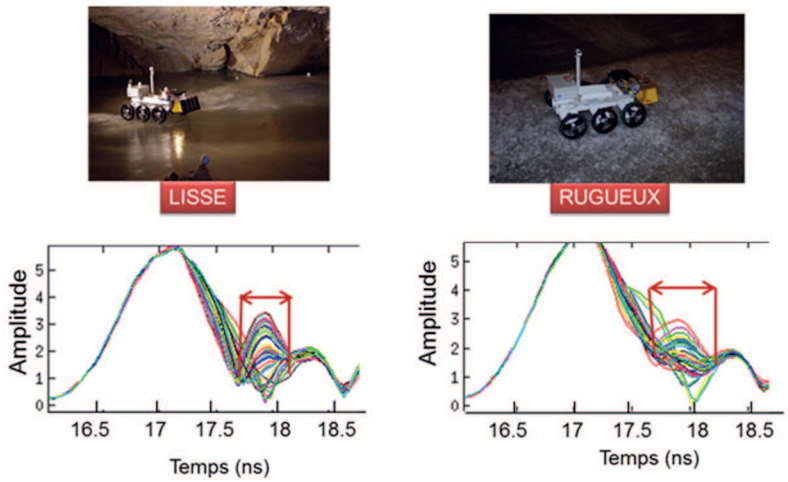


Figure 5.1-3 : Comparaison de la forme de l'enveloppe de l'écho de sol dans le cas d'une surface lisse (gauche) et rugueuse (droite) sur des données réelles. Extrait de : (Dorizon et al., communication AGU 2013). Les

Afin de quantifier les paramètres de rugosité de la surface, on analyse la forme de cet écho, qu'il faut donc pouvoir détecter et stocker. La technique développée consiste à localiser pour chaque sondage et pour une gamme de temps d'arrivée définie par l'utilisateur (correspondant à l'écho de sol), l'amplitude minimale ou maximale, ou encore le gradient le plus fort le long du trajet des antennes. Des exemples de détection de l'écho de sol avec ces 3 méthodes sont présentées Figure 5.1-4. On constate que dans le cas de surfaces faiblement rugueuses, les techniques de détection sont en très bon accord et permettent un suivi presque parfait de la topographie apparente. Cependant, dès que la rugosité augmente, les méthodes ne restituent plus les mêmes résultats. Pour l'instant, c'est à l'utilisateur de choisir, parmi ces trois techniques de détection, celle qui restitue de la meilleure manière la topographie de la surface. Dans le cas de la Figure 5.1-4 sur les données expérimentales, la technique de localisation du minimum semble la plus efficace. Une fois que la surface a été détectée, il est alors possible de convertir les temps d'arrivée en profondeur en utilisant la constante diélectrique de l'air, et ainsi de restituer l'écart-type des hauteurs et les longueurs de corrélation vues par le radar, soit sur toute la bande de fréquences, soit en séparant les fréquences en sous-bandes pour analyser la surface en hautes ou basses fréquences (Figure 5.1-2).

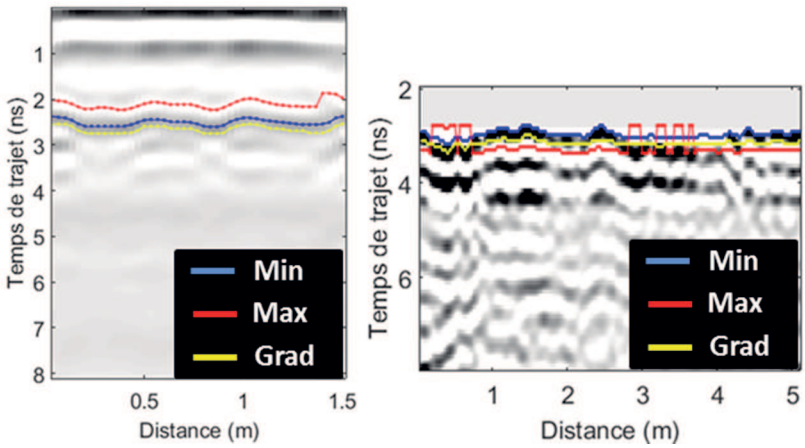


Figure 5.1-4 : Les trois critères de détection de la topographie vue par le radar. A gauche, radargramme simulé sous TEMSI-FD pour une surface faiblement rugueuse. A droite, données réelles acquises sur une surface rugueuse au cours d'une campagne de mesures dans des grottes glacées à Dachstein.

Les résultats d'estimation de la constante diélectrique via la méthode basée sur l'écho de sol pour la campagne de mesures à Dachstein sont présentés dans le Tableau 5.1-2 et sur la Figure 5.1-5. La technique de détection présentée juste au-dessus nous a permis d'estimer les paramètres de rugosité de la surface vue par le radar et de mesurer son impact sur la restitution de la constante diélectrique. Les conditions étaient propices cette à étude étant donné que nous avons rencontré plusieurs surfaces lisses et une surface rugueuse, et que l'environnement sondé était homogène sur des profondeurs relativement importantes, ainsi qu'au sein de la grotte (la glace était présente en surface sur tous les sites sondés). Ainsi, l'écart mesuré entre les sous-bandes de fréquences est attribuable uniquement à la rugosité, et non

pas à une variation potentielle de la constante diélectrique avec la profondeur ou le site de sondage. Ces résultats ont faits l'objet d'une publication dans la revue Planetary and Space Science (Dorizon et al., 2015) et nous reviendrons sur cette campagne dans le prochain Chapitre.

Tableau 5.1-2: Constante diélectrique et paramètres de rugosité estimés à partir des données WISDOM sur trois sites						
Site B glace lisse avec le cart WISDOM						
Nombre de sondages 1074						
0.5–3 GHz	σ_{hrad}	$5{\cdot}10^{-3}$ m	ε'_r	3.2	Std. dev	0.25
0.5–1.5 GHz	σ_{hrad}	$1{\cdot}10^{-3}$ m	ε'_r	3.4	Std. dev	0.25
2–3 GHz	σ_{hrad}	$8{\cdot}10^{-3}$ m	ε'_r	3.0	Std. dev	0.30
Site C glace lisse avec le cart WISDOM						
Nombre de sondages 142						
0.5-3 GHz	σ_{hrad}	$3{\cdot}10^{-3}$ m	ε'_r	3.2	Std. dev	0.20
0.5-1.5 GHz	σ_{hrad}	$3{\cdot}10^{-3}$ m	ε'_r	3.0	Std. dev	0.30
2-3 GHz	σ_{hrad}	$7{\cdot}10^{-3}$ m	ε'_r	3.0	Std. dev	0.50
Site D glace rugueuse avec le Rover Magma White						
Nombre de sondages 102						
0.5-3 GHz	σ_{hrad}	$6.6{\cdot}10^{-3}$ m	ε'_r	2.3	Std. dev	0.47
0.5-1.5 GHz	σ_{hrad}	$2{\cdot}10^{-3}$ m	ε'_r	3.3	Std. dev	0.30
2-3 GHz	σ_{hrad}	$1.1{\cdot}10^{-2}$ m	ε'_r	1.8	Std. dev	0.30

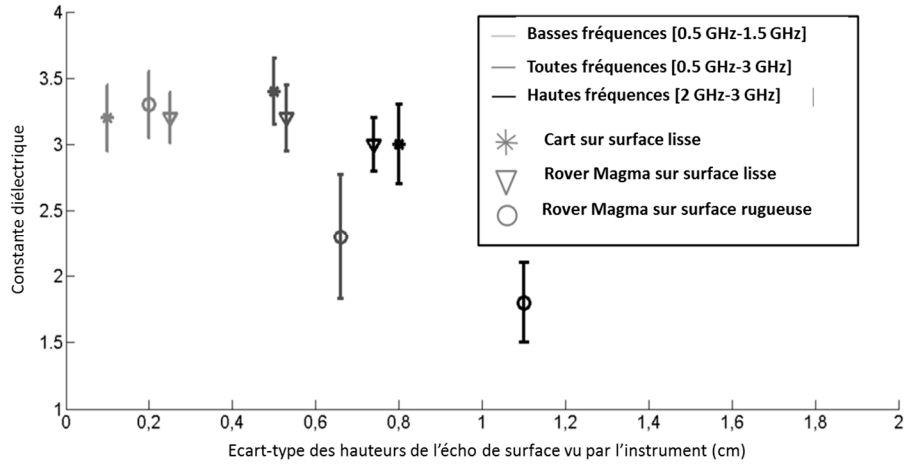


Figure 5.1-5 : Estimation de la constante diélectrique par méthode basée sur l'écho de sol pour 3 bandes de fréquences sur les différents terrains investigués pendant la campagne de Dachstein. On voit que dans le cas de la surface rugueuse, la constante diélectrique est sous-estimée. Extrait de (Dorizon et al., 2015).

L'erreur induite sur la constante diélectrique est négligeable pour les basses fréquences, d'environ 28% pour toute la bande, et de 44% pour les hautes fréquences si l'on considère une valeur typique de 3.2 pour la glace.

5.1.2.2 Simulations conduites sous TEMSI-FD

Rappelons-nous les simulations conduites sous TEMSI-FD que nous avons montrées dans le Chapitre précédent. Les radargrammes simulés pour 10 surfaces rugueuses ont permis de définir une limite de restitution des paramètres de rugosité pour WISDOM. Nous avons également pris soin de simuler une réflexion sur une plaque métallique afin de quantifier la constante diélectrique en surface pour chaque radargramme simulé par la méthode basée sur l'écho de sol. L'impact de la rugosité sur l'estimation de la constante diélectrique est illustré sur la Figure 5.1-6, pour les trois bandes de fréquences. On constate que globalement, les basses fréquences se trouvent beaucoup moins influencées par la rugosité que les hautes fréquences, qui peuvent induire une sous-estimation de la constante diélectrique de 60%, contre 30% maximum pour les basses fréquences.

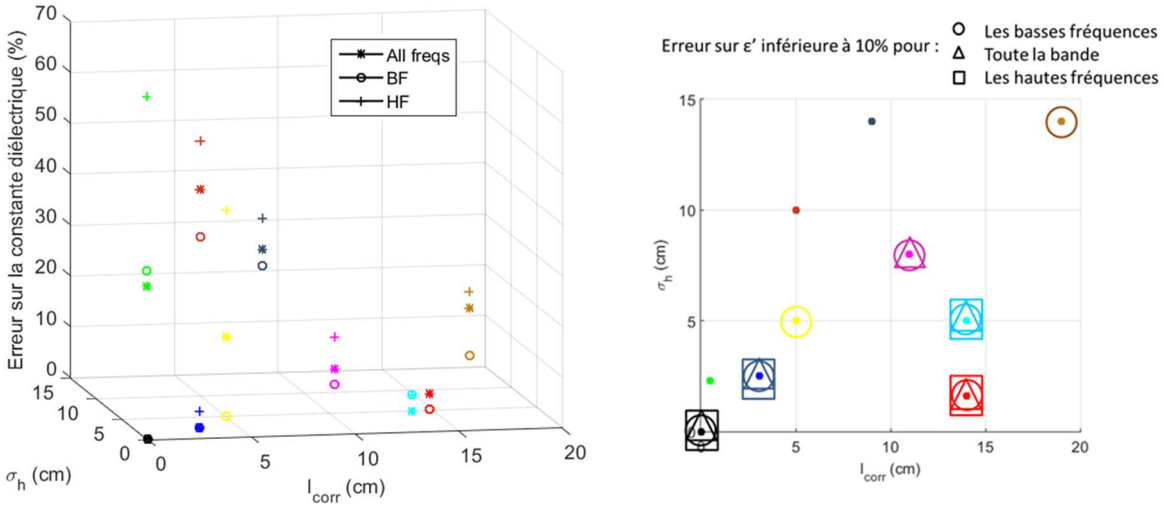


Figure 5.1-6 : Résultats des simulations : erreurs sur l'estimation de la constante diélectrique en fonction des paramètres de rugosité de la surface simulée pour 3 bandes de fréquences. La figure de droite représente une vue de dessus, où les limites à 10% d'erreur sur la constante diélectrique sont indiquées pour chaque bande de fréquences.

Même si d'autres simulations de surfaces rugueuses dans des milieux aux permittivités variées sont nécessaires pour déduire une loi qui permettrait de corriger l'estimation de la constante diélectrique à partir des données récoltées dans des cas de rugosité de surface, on peut déjà tenter, à partir des paramètres de rugosité vus par WISDOM ou de la topographie réelle de la surface, d'estimer l'erreur faite sur la constante diélectrique afin de la corriger. C'est ce que nous avons tenté de faire lors d'une expérience au laboratoire GEOPS, que nous décrivons dans la section suivante.

On note cependant que l'erreur sur la constante diélectrique dans le cas de la surface rugueuse à Dachstein est importante, alors que ce cas se trouve, selon les résultats issus des simulations, dans une gamme de rugosités de la zone « lisse ». Une piste pour expliquer ce phénomène pourrait être le fait que la plateforme utilisée pour l'investigation de la surface rugueuse à Dachstein se trouvait à 18 cm du sol, et non 35 cm comme dans le cadre de ces simulations. Il faut également garder en tête le fait que l'écart-

type des constantes diélectriques estimées est important pour cette surface, de 0.47, contre 0.25 en moyenne dans le cas de surfaces lisses (Tableau 5.1-2). Pour quantifier l'impact de la hauteur des antennes sur la rugosité apparente vue par WISDOM, il conviendrait de produire parallèlement des simulations en tenant compte de hauteurs variables entre les antennes et la surface rugueuse et des jeux de données acquis en environnement contrôlé avec une mesure de la topographie réelle de terrain pour chaque surface rugueuse sondée. C'est ce que nous avons initié en Mai 2015 au GEOPS, où nous avons réalisé des tests sur des surfaces rugueuses.

5.1.2.3 Expérience en milieu (semi-) contrôlé

Afin de mieux comprendre le comportement de WISDOM en interaction avec des surfaces rugueuses et en vue de corriger l'impact de la rugosité sur la restitution des paramètres diélectriques du sous-sol, il nous a semblé important de conduire des tests en environnement contrôlé. L'équipe de François Costard du laboratoire GEOPS nous a accueilli pour cette expérience, et nous a fourni une quantité importante de sable pour que nous puissions conduire ces tests dans de bonnes conditions. L'expérience conduite a consisté en une suite de mesures sur des profils rugueux, avec le prototype de WISDOM mais également avec un laser/scanner appartenant à GEOPS pour relever la topographie réelle des différentes surfaces. L'idée était de pouvoir comparer des mesures réelles avec les paramètres de rugosité vus par WISDOM, pour différentes fréquences. Les surfaces sont composées de sable. Malheureusement, les relevés topographiques par laser se sont avérés infructueux (l'instrument utilisé est adapté aux mesures en intérieur), la luminosité était en effet trop importante pour permettre un relevé des différentes surfaces. Nous pouvons néanmoins tirer quelques conclusions de cette expérience.

Les mesures ont été prises sur une journée, avec six surfaces (1 lisse + 5 rugueuses) modelées par nos soins dans le sable, d'environ 2 m x 1,5 m chacune (Figure 5.1-7). Pour chaque surface, un profil en full-polar a été effectué.

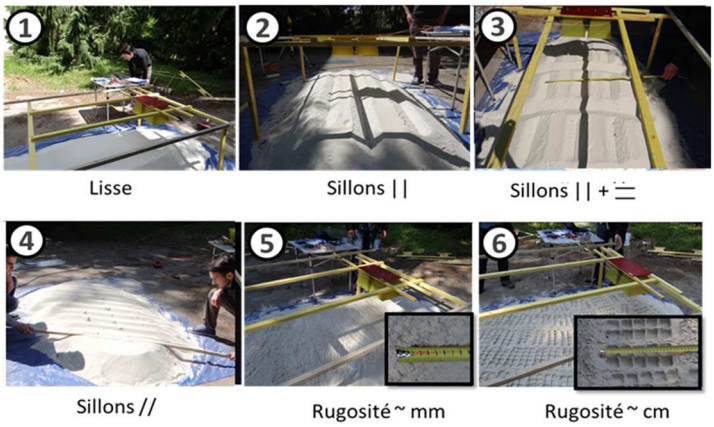


Figure 5.1-7 : Les six surfaces sondées par WISDOM pour l'étude de la rugosité. Les orientations des sillons sont données par rapport au déplacement des antennes (sachant que les éléments rayonnants sont diagonaux).

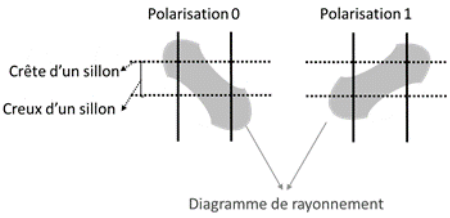


Figure 5.1-8 : Configuration pour les surfaces 2 et 3 dans les cas de sillons parallèles et perpendiculaires au déplacement des antennes

La seule surface dont la topographie est visible sur les radargrammes est la n°4. La comparaison entre les modes de polarisation prouve bien la capacité polarimétrique de l'instrument, qui voit une moyenne entre les creux et les bosses en mode 0/0 (éléments rayonnants parallèles aux sillons), tandis que le mode 1/1 (éléments rayonnants perpendiculaires aux sillons) parvient à suivre la topographie de la surface (Figure 5.1-9). Pour toutes les autres surfaces, la configuration du diagramme de rayonnement est telle que le radar, quel que soit le mode de polarisation, détecte en guise d'écho de sol une moyenne entre le haut et le bas des sillons.

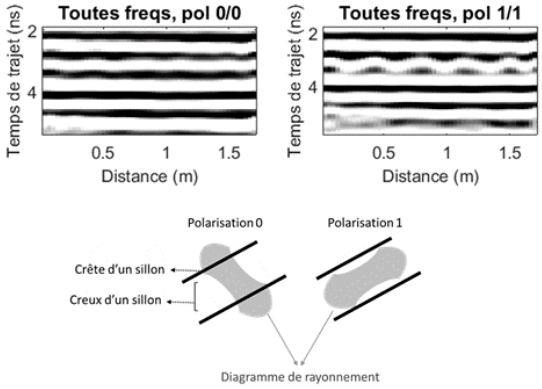


Figure 5.1-9 : Radargrammes acquis sur la surface n°4 et diagrammes de rayonnements associés : en polarisation 0/0, la surface vue par le radar est une moyenne des creux et des crêtes des sillons. En polarisation 1/1, l'orientation du diagramme de rayonnement permet au radar de distinguer les creux des bosses.

Les valeurs des constantes diélectriques pour les surfaces 1,4 et 6 sont présentées Figure 5.1-10.

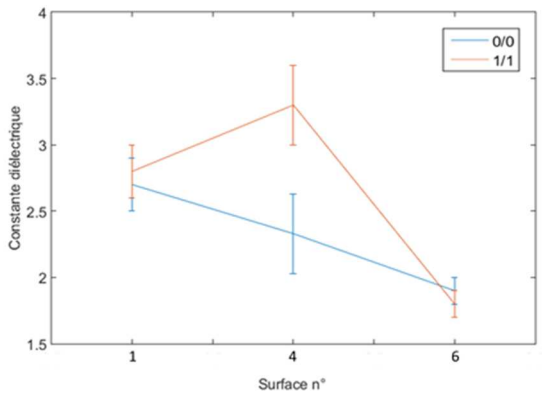


Figure 5.1-10 : Constante diélectrique estimée pour chaque surface

Tout d'abord, la constante diélectrique pour la surface lisse est estimée à 2.8 pour la polarisation 1/1, contre 2.7 en polarisation 0/0. Ceci nous permet déjà de vérifier que les polarisations sont en bon accord. Les résultats concernant la surface n°4 sont particulièrement intéressants : malgré le fait que la rugosité soit uniquement visible sur le radargramme en polarisation 1/1, c'est en traitant les données de la polarisation 0/0 que l'on observe une forte diminution de la constante diélectrique. Ceci s'explique assez facilement : en polarisation 1/1, chaque creux et chaque sillon sont finalement vus comme des portions de surface lisse par le radar (Figure 5.1-9), tandis qu'en 0/0, la mesure effectuée constitue une moyenne entre l'air au niveau des creux et les crêtes des sillons constituées de sable. Ce comportement différent selon les polarisations peut donc s'avérer extrêmement utile pour contraindre les paramètres de rugosité des surfaces, notamment dans des cas de structures aux orientations préférentielles (type dunes).

Enfin, on observe une forte diminution de la constante diélectrique pour la surface n°6, qui contient des structures d'ordre centimétrique, et ce pour les deux copolarisations : la surface sondée est en effet symétrique par rapport aux orientations des éléments rayonnants des antennes.

Nous nous arrêterons malheureusement à ces commentaires, il semble en effet difficile de tirer des conclusions suffisamment fiables pour cette expérience : la surface lisse donne une constante diélectrique inférieure aux deux suivantes, ce qui est déjà surprenant, et les écarts-types sur la constante diélectrique sont relativement importants. L'augmentation de la constante diélectrique entre les surfaces n°1 et n°4 est cependant cohérente, étant donné que l'on a décidé d'arroser la surface en cours de tests (après le sondage de la troisième surface), les résultats ne semblant pas suffisamment stables pour les premiers sondages. Cependant, la forte luminosité à très vite entrainé l'assèchement du sable ce qui a également eu l'effet de diminuer la valeur de ε' pour les surfaces n°6 et n°7. Il est alors impossible de séparer les contributions des variations d'humidité et de la rugosité de la surface. Lorsque l'on a conscience de tous ces éléments, il semble trop ambitieux d'émettre des hypothèses sur l'impact réel de la rugosité sur notre méthode restitution de la constante diélectrique en surface. Il conviendra de conduire d'autres tests en tentant cette fois de récupérer de concert les sondages WISDOM et les données laser, éventuellement sur des sols plus compacts, ce qui pourrait permettre de diminuer la variabilité de nos estimations de la constante diélectrique. Afin d'obtenir des résultats fiables, il est également conseillé de calibrer le radar entre chaque mesure (une mesure sur une plaque métallique) et de reproduire plusieurs fois les profils pour une même surface pour tester la reproductibilité de nos mesures. La surveillance des variations d'humidité en surface sera également capitale si l'environnement sondé se trouve sur un terrain naturel, à l'extérieur. Cette expérience nous aura donc au moins permis de prévoir les protocoles et les améliorations possibles pour une étude précise de l'impact de la rugosité sur notre méthode de restitution de la constante diélectrique en surface.

5.2 La signature des diffuseurs ponctuels : accès en profondeur

5.2.1 Principe

- Cas général

Intéressons-nous de plus près aux diffuseurs ponctuels et à leur signature sur un radargramme. Considérons la situation illustrée sur la Figure 5.2-1. Dans le cas de l'utilisation classique des GPRs avec les antennes en contact avec la surface, une méthode couramment utilisée pour déterminer la vitesse des ondes consiste à ajuster une fonction de forme hyperbolique repérée sur un radargramme brut (en temps de trajet). En présence d'un réflecteur ponctuel, la signature radar correspond alors à une hyperbole exacte.

Le réflecteur ponctuel est localisé en (x_0, z_0) et le radar se déplace selon x. Le temps d'arrivée de l'écho t(x) est de la forme : $v = \frac{2\sqrt{(x-x_0)^2+{z_0}^2}}{t(x)}$

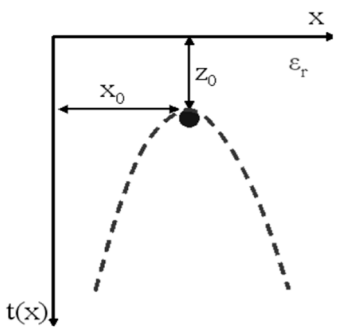


Figure 5.2-1 : Signature radar d'un réflecteur ponctuel

On peut ainsi paramétrer la courbe d'équation hyperbolique qui correspond à la forme de cette signature, permettant ainsi de retrouver la position horizontale du réflecteur ainsi que la vitesse de propagation des ondes dans le milieu. En reprenant l'expression de la vitesse des ondes électromagnétique dans les milieux homogènes, on en déduit la constante diélectrique moyenne de la couche située entre les antennes et le réflecteur, ainsi que la profondeur ce cet objet.

- Cas de WISDOM

Le cas de WISDOM est légèrement différent des GPRs traditionnels. En effet, sa mission implique une configuration telle que les antennes seront placées à environ 35 cm de la surface, montées à l'arrière du rover. La conséquence directe de cette géométrie est que la signature détectée au passage au-dessus d'un diffuseur ponctuel n'est plus une hyperbole mathématique exacte. Il existe un phénomène de réfraction entre l'interface air/sol, qui ne peut être négligé, notamment pour des objets peu profonds et des milieux à constantes diélectriques élevées, comme l'illustre la Figure 5.2-2. Ces estimations d'erreurs proviennent de la comparaison entre les paramètres d'entrée des simulations par lancer de rayons, prenant en compte la couche d'air dans le cas de WISDOM, et une inversion directe des données par une paramétrisation hyperbolique. Dans le cas de milieux homogènes, la valeur de ε' estimée via une inversion hyperbolique directe est fiable à 10% pour de faibles valeurs de constante diélectrique et des diffuseurs éloignés. L'incertitude sur la profondeur dans ce cas est d'environ 5 cm. Pour de plus fortes valeurs de ε' cependant, l'erreur peut augmenter jusqu'à 11 cm. Ceci est cohérent puisque plus les contrastes entre la couche d'air et le milieu seront importants en termes de constantes diélectriques, plus l'erreur sur la

restitution des paramètres augmentera. La couche d'air étant quasiment prépondérante dans le cas d'objets enfouis peu profondément (jusqu'à 30 cm), le milieu apparent qu'auront traversé ces ondes sera un milieu homogène de constante diélectrique beaucoup plus faible que la couche réellement simulée.

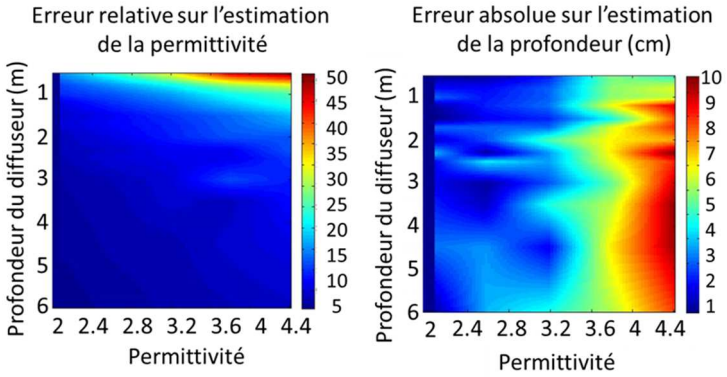


Figure 5.2-2 : Simulations par lancer de rayons : erreurs sur les estimations des paramètres du sous-sol en fonction de la constante diélectrique de la couche considérée et de la profondeur du diffuseur si l'on considère une hyperbole exacte lorsque WISDOM détecte un objet.

La prise en compte de la couche d'air entre les antennes et la surface devient alors nécessaire pour une estimation fiable des paramètres du sous-sol. Le code numérique basé sur le lancer de rayons, qui modélise bien les retards jusqu'aux différents réflecteurs, peut être utilisé pour générer des radargrammes en accord avec la configuration de WISDOM. La Figure 5.2-3 illustre l'impact de la valeur de la constante diélectrique sur la forme de la signature d'un diffuseur. Seule la valeur de ε' varie entre chaque figure, on constate que l'écho propre au diffuseur apparaît de plus en plus tard, ceci étant dû à la diminution de la vitesse des ondes dans le milieu. L'augmentation de la permittivité a également pour effet de resserrer les branches des « hyperboles ».

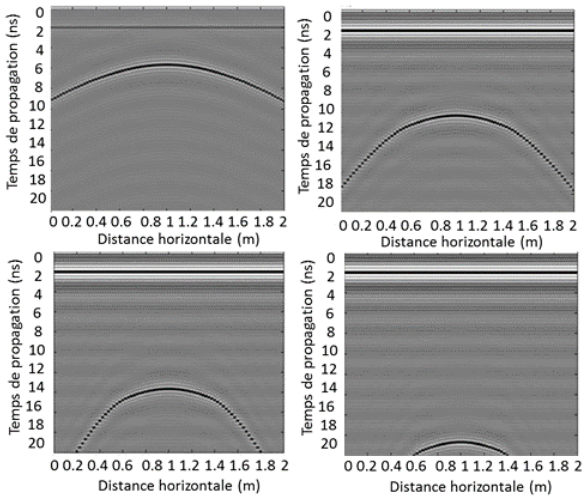


Figure 5.2-3 : Simulations par lancer de rayon dans la configuration de WISDOM, avec une couche de 30 cm d'air. Impact de l'augmentation de la permittivité sur la signature d'un diffuseur ponctuel situé à 30 cm de profondeur. a) n = 1.1 ; b) n = 2.5 ; c) n = 3.5 ; d) n = 5

5.2.2 Méthode développée

À partir de ce code de lancer de rayons, il est alors possible de retrouver les valeurs de la distance et de l'indice de réfraction moyen entre la surface et le diffuseur. Ainsi, lorsque plusieurs objets sont détectés, on peut quantifier la constante diélectrique moyenne pour différentes profondeurs, ce qui permet d'estimer les variations verticales de la constante diélectrique dans le milieu, nous autorisant à contraindre davantage sa nature et sa géométrie. Nous avons dans ce but mis au point une méthode d'inversion semi-automatique pour laquelle la détection des signatures des diffuseurs est faite par l'utilisateur. Initialement, pour chaque hyperbole détectée sur des données, une estimation rapide via une régression par une hyperbole exacte était pratiquée, pour ensuite simuler des configurations proches avec le code de lancer de rayons. Les radargrammes simulés étaient alors comparés aux données par la méthode des moindres carrés pour trouver le jeu de paramètres (z, ε) le plus fiable.

Cette méthode s'est cependant vite avérée trop coûteuse en temps, notamment au retour de certaines campagnes de mesures où les signatures de diffuseurs sur les radargrammes ont commencé à pulluler (Dorizon et al., 2015). Pour accélérer les choses, environ 1600 cas de figure ont pu être simulés pour créer une librairie de références sur la forme des signatures en fonction de l'indice de réfraction du milieu et de la profondeur du diffuseur. Pour des valeurs de ε' variant de 1 à 9 par pas de 0.1 et des diffuseurs enfouis de 10 centimètres à 2.5 mètres dans le sous-sol par pas de 10 centimètres, un radargramme par situation est simulé. Le temps de propagation et les largeurs des hyperboles à 1, 2, 3 et 4 nanosecondes sous leur sommet sont stockés pour être ensuite comparés aux paramètres correspondants sur des données réelles. Les abaques peuvent bien sûr être interpolés pour offrir une gamme encore plus fine de solutions, dans le cas de nettes signatures sur les données. Le choix de la solution repose sur la méthode des moindres carrés sur la somme de tous ces paramètres. Des poids ont cependant été attribués à chacun d'entre eux, avec une forte contribution des branches de l'hyperbole, d'importance croissante au fur et à mesure que l'on s'éloigne du sommet de l'hyperbole (largeurs de plus en plus significatives). À des fins de vérification, la simulation complète du radargramme correspondant à la meilleure solution peut être effectuée, et un critère sur la corrélation entre les deux images permet de valider la solution ou non (dans ce cas, on réitère le processus). Puisqu'une image vaut parfois bien mieux qu'un discours, le protocole est illustré sur la Figure 5.2-4. Cette méthode n'est valable que dans le cas d'un diffuseur présent sous la surface, dans la première couche du sous-sol. Pour des objets se trouvant sous une interface entre deux milieux (milieu à 3 couches en comptant l'air), il conviendrait de créer une autre bibliothèque, mais cette fois avec un paramètre en plus qui serait la permittivité de la deuxième couche. Notons tout de même que ceci multiplierait drastiquement le nombre de paramètres à comparer et que le temps d'exécution du code s'en trouverait automatiquement augmenté.

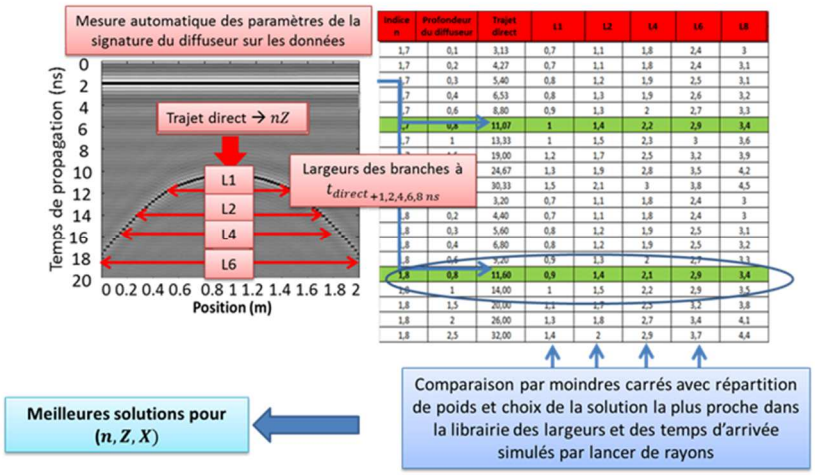


Figure 5.2-4 : Principe de la méthode des largeurs développée pour restituer les paramètres du sous-sol

5.2.3 Etude de sensibilité

Dans le cas de données réelles, il faut garder en tête la nature hétérogène de tout milieu naturel, qui peut avoir un impact non négligeable sur la bonne détection des signatures de diffuseurs par l'utilisateur. Ce dernier sélectionne lui-même la zone couverte par une « hyperbole » afin de l'isoler et de la placer en entrée du code d'inversion, ce qui peut engendrer des erreurs. Cette méthode semble cependant posséder une bonne reproductibilité : des séries de 10 détections de la même hyperbole ont été effectuées sur différents types de radargrammes plus ou moins bruités, aboutissant au même choix de la solution. De plus, la méthode ne semble pas être excessivement influencée par l'ajout de bruit blanc[1], mais semble plus sensible aux inhomogénéités diélectriques. Avec un écart-type de 10% autour de la valeur moyenne de la constante diélectrique, on atteint une dispersion statistique de 10^{-1}.

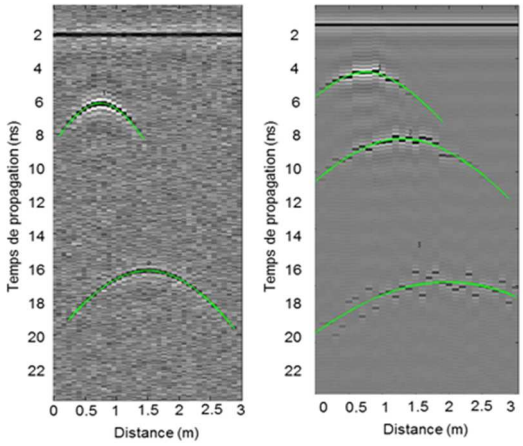


Figure 5.2-5 : Ajout de bruit blanc (gauche) et d'inhomogénéités (droite) dans les milieux simulés pour tester la sensibilité de la méthode d'inversion semi-automatique. Extrait de (Dorizon and Ciarletti, communication EGU 2013).

[1] Avec un rapport signal sur bruit de 10 dB, la dispersion statistique est négligeable, autour de 10^{-3}

5.3 Expérience d'humidification d'un sol

5.3.1 Motivations et protocole

Comme nous l'avons vu dans les premiers chapitres de ce manuscrit, sur Mars, il apparait possible que des réservoirs d'eau liquide contenant suffisamment de sels dissous se trouvent toujours en profondeur, la pression étant suffisante pour atteindre cet état. La faible inertie thermique de la surface martienne implique également que les 30 premiers centimètres du sous-sol subissent de fortes variations diurnes de température, avec des nuits extrêmement froides et des journées beaucoup plus chaudes. Il serait donc possible de détecter d'éventuels changements de l'état de l'eau dans la sous-surface. Le contraste diélectrique est en effet important entre un sol complètement gelé et un sol comportant de l'eau liquide, et même un faible pourcentage de contenu en eau pourrait être détecté par la méthode radar. Pour fixer les idées, une variation de la constante diélectrique de 0.2 indiquerait une augmentation de l'humidité d'un sol d'environ 5% (calcul effectué à partir de Chanzy et al., 1996) . Cependant, cette méthode étant relative, il serait beaucoup plus difficile de détecter la présence locale d'eau liquide dont le volume serait constant et qui perdurerait en surface.

Ceci a motivé une expérience en laboratoire pour étudier le comportement de WISDOM en présence d'eau liquide. Le protocole expérimental est le suivant : WISDOM est installé en position fixe, les antennes à 35 cm de la surface. Une sonde d'humidité (Theta Probe ML2) est disposée à côté, et on humidifie le sol par arrosages successifs. WISDOM prend une mesure toutes les 10 secondes, tandis que la sonde surveille l'évolution de l'humidité toutes les 5 secondes, en accumulant et moyennant les relevés.

5.3.2 Résultats

La Figure 5.3-1 présente le coefficient de réflexion de la surface vue par WISDOM (bleu) et le taux d'humidité dans le sol enregistré par la sonde (rouge). Nous avons normalisé les signaux pour permettre une comparaison. Les signaux récoltés sont en bonne corrélation, témoignant de la relation étroite entre taux d'humidité et constante diélectrique. On peut également noter que la sonde utilisée sature plus facilement que WISDOM. Cette petite expérience a été présentée à l'occasion d'une communication orale durant l'AGU 2013 (Dorizon and Ciarletti, communication AGU 2013).

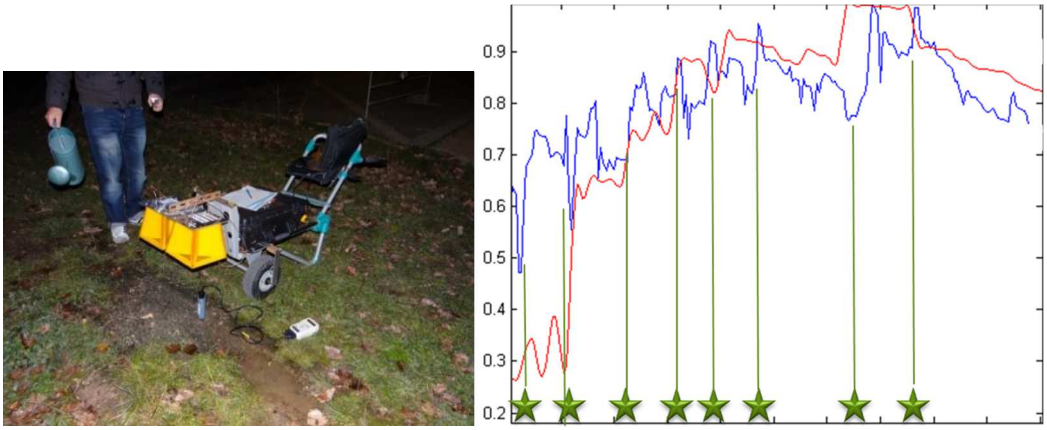


Figure 5.3-1 : Influence de la teneur en haut sur le coefficient de réflexion du radar. Expérience conduite avec WISDOM. Extrait de (Dorizon and Ciarletti, communication AGU 2013)

Si on s'intéresse de plus près à l'amplitude du radar provenant de différentes profondeurs, on voit apparaître des phénomènes intéressants. Les profils de l'écho de surface et de l'écho récolté quelques nanosecondes plus tard (ce qui correspond à quelques centimètres de profondeur considérant une valeur de constante diélectrique moyenne élevée de 10) semblent en effet décalés de quelques pas temporels. L'intercorrélation des signaux (Figure 5.3-2) présente un maximum à un décalage de 2 pas, ce qui équivaut à 20 secondes. Ceci signifie que l'infiltration de l'eau jusqu'à quelques centimètres de profondeur prend environ 20 secondes. Si l'on prend une valeur de 5 centimètres pour la profondeur, ceci mène à une vitesse d'infiltration de 0.25 $cm.s^{-1}$. La valeur théorique pour atteindre une vingtaine de centimètres de profondeur est alors de 80 secondes. Or, si l'on prend la courbe de corrélation entre l'écho de sol et l'écho à 10 cm, on constate un décalage de 3 minutes. Ceci pourrait indiquer un ralentissement de l'infiltration de l'eau dans le sol, néanmoins il convient de prendre en compte le fait que la tâche au sol de l'antenne devient plus importante (environ 20 centimètres de diamètre), et des contributions de terrains secs peuvent venir polluer le signal propre à la zone humide. Il faut alors plus de temps pour que l'humidité couvre toute la zone sondée par le radar, menant, à un temps de réponse plus long.

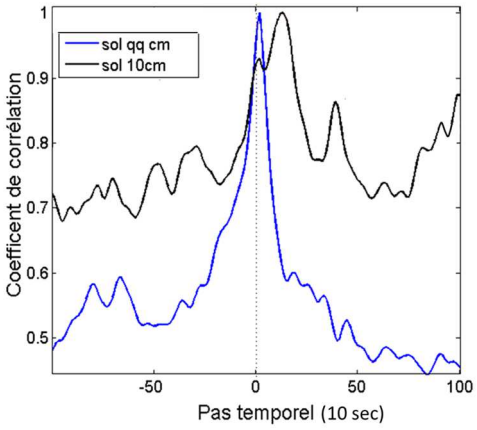


Figure 5.3-2 : Fonctions d'intercorrélations pour différentes profondeurs. On remarque un décalage de 3 minutes entre la réponse de la surface et à une dizaine de centimètres

WISDOM semble donc tout à fait adapté à la détection de variations d'humidité en surface, mais également en profondeur. Si cette situation se présente à la surface de Mars, nous devrions donc pouvoir l'identifier, et quantifier les variations du taux d'humidité avec la profondeur.

5.4 La campagne SAFER

Revenons à présent sur la mission SAFER, dont nous avons brièvement décrit le fonctionnement et les objectifs en fin de Chapitre 3.

5.4.1 Contexte

5.4.1.1 Le désert d'Atacama

Le désert d'Atacama, situé entre la Cordillère des Andes et le Pacifique, est exceptionnel de par le climat qui y règne. Il s'agit de la région la plus sèche du monde (on la qualifie d'hyperaride), avec en moyenne des précipitations annuelles inférieures à 3 mm. Le désert contient une myriade de paléo-paysages (des paysages qui se sont formés il y a plusieurs millions d'années, mais qui restent visibles en surface à ce jour), qui datent pour les plus vieux de 10 à 15 millions d'années. Ceci permet de partiellement reconstruire les histoires tectoniques, géomorphologiques et climatiques sur de longues durées (Brock and Buck, 2009). Au cours de la formation de la Cordillère des Andes, avec le soulèvement des terrains, un réseau de cours d'eau se serait développé, se déversant vers le Pacifique. Une fois les montagnes drainées d'une grande partie de leur eau, le climat hyperaride de la région aurait permis la conservation de ces géomorphologies en surface, ce type d'environnement étant beaucoup moins érodant que les milieux humides. Ainsi, le fort taux d'évaporation a rapidement mené à la formation d'évaporites telles que des perchlorates, nitrates, gypses ou halites (Ericksen, 1983; Bohlke et al., 1997), qui ont ensuite été recouvertes d'une couche de poussière plus ou moins épaisse selon les régions du désert. Les

conditions sont oxydantes, ce qui donne cette couleur orangée en surface. Ces conditions étant similaires à celles rencontrées sur Mars, le désert d'Atacama en constitue donc un très bon analogue des points de vue géologique et exobiologique (étude de la vie en conditions extrêmes). Une stratigraphie de la région (Tableau 5.1-1) est proposée par Dingman (Dingman, 1967) dans la région de San Pedro di Atacama, non loin de la zone investiguée durant la campagne SAFER. Les dépôts les plus récents recouvrent une grande partie des terrains, mais des affleurements des couches sous-jacentes peuvent apparaitre en surface.

Tableau 5.4-1 : Stratigraphie de la zone de San Pedro (Dingman, 1967).

System	Series	Formation	Approximate maximum thickness (meters)	Lithology
Quaternary	Recent	Eolian sand deposits	10	Medium to fine windblown sand.
		Salt deposits	50	Salt and salty silt or clay; well stratified.
		Alluvium	300	Clay, silt sand, and gravel; unconsolidated and poorly stratified.
		Basalt flows	20	Porphyritic; phenocrysts of plagioclase as large as 3 mm.
	Pleistocene	Terrace deposits	5	Sandstone and conglomerate, poorly sorted with subrounded to rounded clasts.
		Piedmont deposits	50	Sandstone and conglomerate, poorly sorted and poorly stratified with angular to subangular clasts.
Tertiary	Pliocene(?)	Ash-flow deposits	30	Ash flows and welded tuff. Tuff ranges from poorly lithified to dense and welded.
		—Conformable on the Tambores Formation; unconformable on older rocks—		
	Lower Tertiary	Tambores Formation	500	Sandstone and conglomerate, poorly sorted and poorly stratified.
		— Conformable, unconformable, or intertongued —		
		San Pedro Formation	2,000+	Shale, siltstone, and fine-grained sandstone; reddish brown; a few conglomerate beds. Thick beds of salt and salty clay.
		— Unconformity —		
Cretaceous		Purilactis Formation: Upper member	1,700	Shale, sandstone, and conglomerate; gray, brown, and olive-green; very hard.
		Purilactis Formation: Middle member	1,200	Sandstone and shale, scarce conglomerate; reddish brown to grayish green, well stratified, crossbedded. Few thin evaporite beds.
		Purilactis Formation: Lower member	500	Sandstone, medium- to fine-grained, medium-gray to grayish-red.
		— Unconformity —		
Jurassic		Tonel Formation	500+	Varicolored shale, sandstone, and conglomerate with intercalated beds of salt and gypsum.
Triassic(?)		Unnamed formation	500	Quartzite, slate, shale, and graywacke interbedded with andesite flows.

Durant la campagne SAFER, nous avons eu l'opportunité de pratiquer des sondages avec l'instrument WISDOM le long du trajet du rover Bridget. Ainsi, en utilisant la méthode basée sur l'écho de sol décrite précédemment, on peut quantifier la constante diélectrique en surface, le long du trajet du rover.

5.4.1.2 Prérequis

Avant toutes choses, assurons-nous que la rugosité ne posera pas de problème majeur pour une restitution fiable de la constante diélectrique en surface. Afin de simuler une mission spatiale réaliste, la carte aérienne dont nous avons disposé au départ et à partir de laquelle nous avons défini différentes zones d'intérêt a été volontairement dégradée afin de reproduire la qualité des images prises par les orbiteurs martiens dont la résolution maximale est d'environ 20 cm. Cette première carte nous a donc permis de découvrir les types de terrain que nous allions investiguer. Les surfaces ont un aspect plutôt lisse, avec des variations de teinte allant du brun au beige, et présentent des dizaines de gros rochers de tailles métriques, répartis aléatoirement sur la surface (Figure 5.4-1).

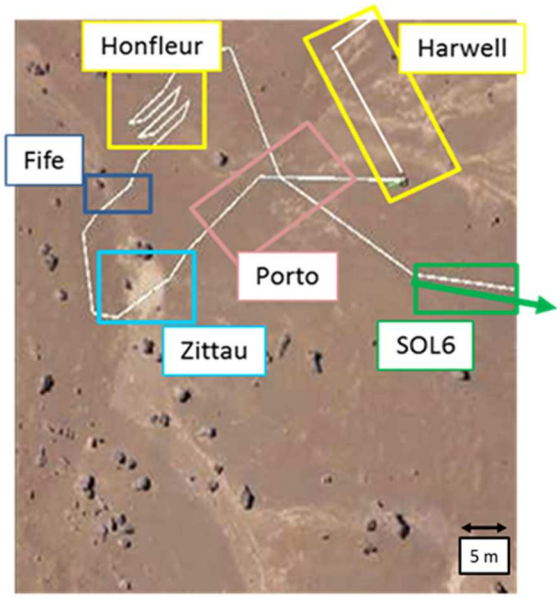


Figure 5.4-1 : Carte aérienne fournie en début de mission, avec les sites d'intérêt sélectionnés par l'équipe scientifique située à Harwell, UK.

La topographie du terrain ainsi que les données de navigation nous ont été fournies par le système de localisation du rover Bridget (Figure 5.4-2).

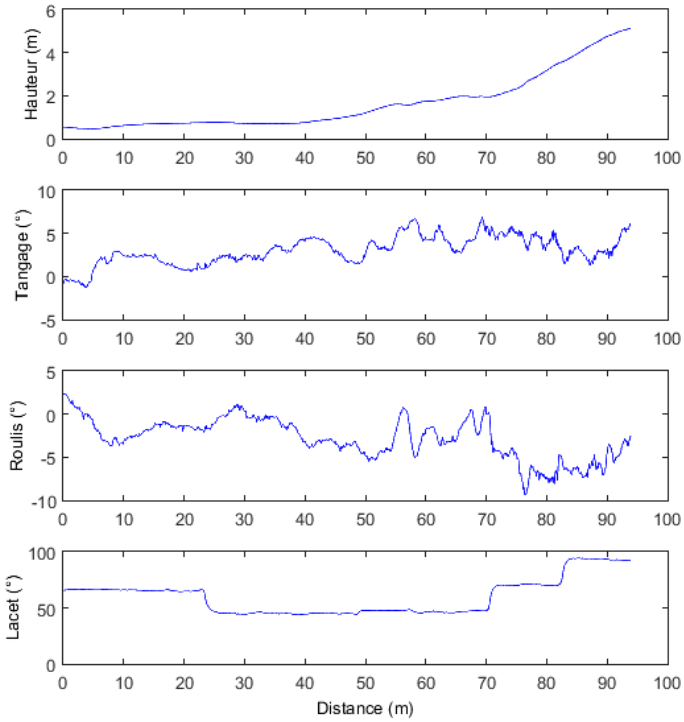


Figure 5.4-2 : Données fournies par le système de navigation du rover pour le Sol 6, un long profil d'une centaine de mètres. De haut en bas : altitude, tangage, roulis, et lacet.

Les instruments PANCAM et CLUPI nous ont quant à eux fourni des informations locales sur la surface et nous ont permis de la visualiser directement (Figure 5.4-3) : celle-ci présente de très petites structures de type gravillons de tailles millimétriques, ponctuellement des rochers de tailles variables, et à plus grande échelle des variations douces de pentes.

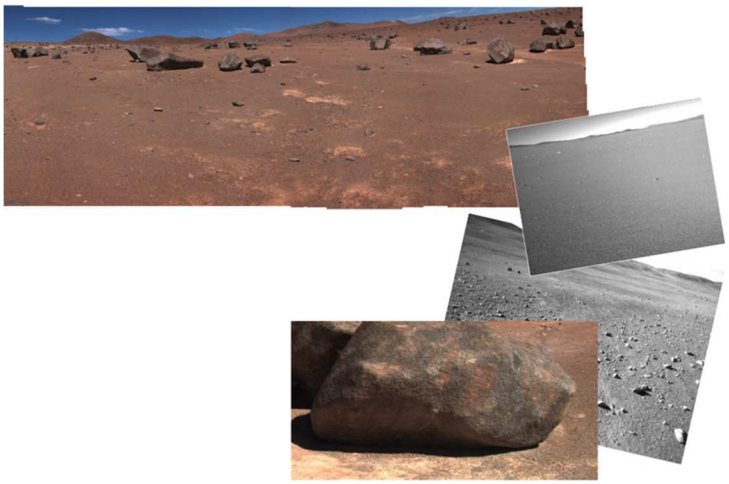


Figure 5.4-3 : Assemblage de photographies prises par les instruments PANCAM et CLUPI le long du trajet du rover. Source : (Woods et al., 2015).

L'écho de surface vu par WSIDOM pour différentes sous-bandes de fréquences sur les différents sites confirme ces informations : la surface apparente est lisse (pas d'étalement de l'écho de sol) et la rugosité vue par l'instrument fournit des valeurs d'écarts-types inférieures à 4 cm et des longueurs de corrélations supérieures à 20 cm. Les simulations conduites sous TEMSI-FD (cf 5.1.2.2) nous indiquent que la surface peut être considérée comme lisse.

On vérifie également que l'attitude du rover (roulis, tangage) n'a pas d'incidence sensible sur la restitution de la constante diélectrique. Aucune tendance n'est observée, les deux quantités semblent bien décorrélées.

5.4.2 Les variations spatiales de la constante diélectrique en surface

Avec les données conjointes du système de navigation et des sondages WISDOM, il est finalement possible de construire une carte de la répartition géographique de la constante diélectrique le long du trajet du rover, comme sur la Figure 5.4-4, que nous pouvons à présent analyser avec confiance après ces quelques vérifications.

5.4.2.1 Cartographie de la constante diélectrique en surface

Premièrement, on observe quelques différences entre les résultats issus des deux modes de polarisations, notamment sur le site d'Honfleur. La variabilité est en effet plus importante dans la configuration 0/0, que pour la polarisation 1/1. On note cependant pour les deux configurations que la constante diélectrique est globalement plus élevée (5-7) au milieu de la grille que le long des profils périphériques (2-5). Les résultats issus des deux modes de polarisation sont cependant beaucoup plus proches sur les autres sites, notamment au niveau de Zittau ou Fife, ce qui laisserait supposer que la variabilité plus importante en mode 0/0 sur le site d'Honfleur est réelle et serait le témoin d'orientations préférentielles lors des processus de dépôts ou d'érosion.

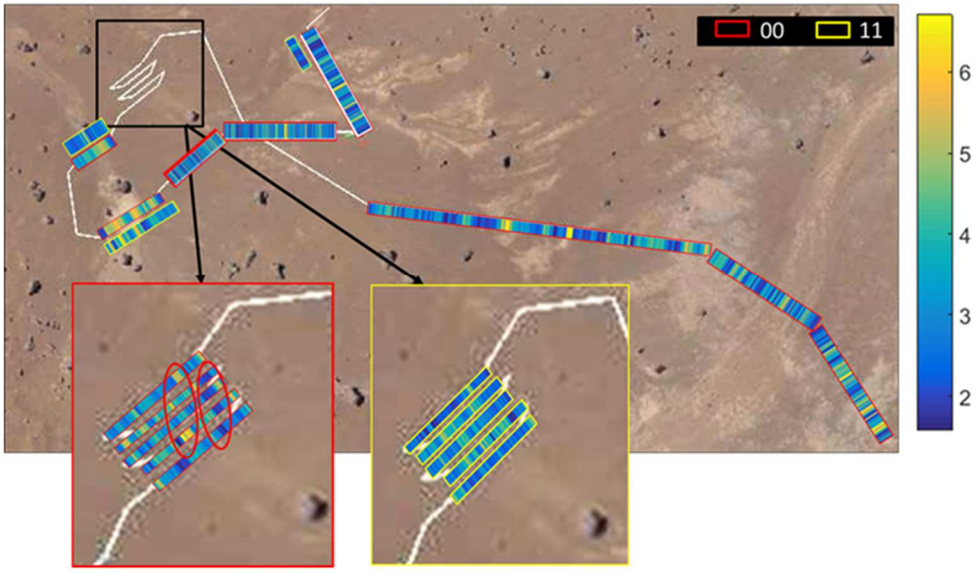


Figure 5.4-4 : Constante diélectrique estimée pour les deux copolarisations 0/0 et 1/1 le long du trajet du rover Bridget, avec un zoom sur la grille effectuée sur le site d'Honfleur.

Globalement, les valeurs de constante diélectrique estimées semblent s'accorder avec les variations de teintes que l'on peut observer en surface : les valeurs les plus fortes sont localisées sur les parties les plus claires, tandis que le sol «sombre» obtient la palme de la constante diélectrique la plus faible (2-3.5). En se basant sur ces résultats, certes limités, on peut tenter de construire une carte globale de la répartition spatiale de la constante diélectrique en surface (Figure 5.4-5). Cette carte a été produite par sélection manuelle des contours des zones de couleurs différentes. On peut bien sûr faire appel à des opérateurs de sélection de contours sous Matlab ou d'autres logiciels pour automatiser la manœuvre dans le cadre d'ExoMars.

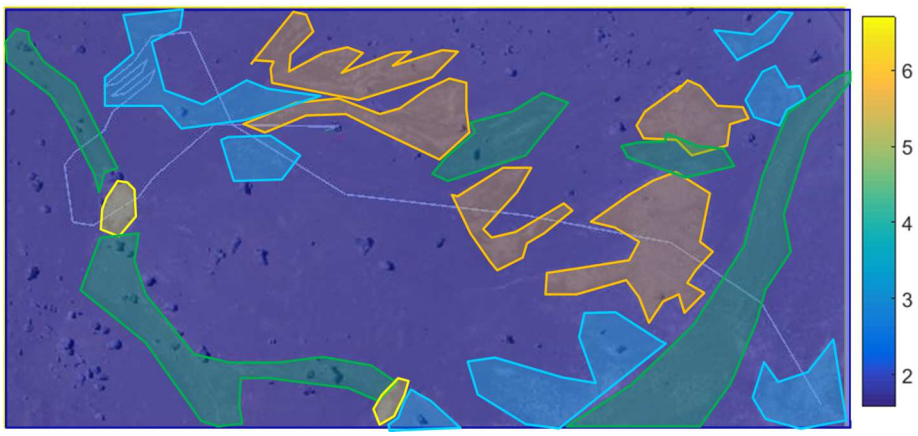


Figure 5.4-5 : Répartition spatiale de la constante diélectrique en surface déduite des mesures le long du trajet du rover.

Bien que les valeurs de constante diélectrique cartographiées soient à considérer avec retenue, on distingue essentiellement 3 types de terrains : les endroits localisés où la couleur est très claire (zones jaunes) ; les terrains légèrement plus sombres qui ressemblent à des figures d'écoulement et de dépôts alluvionnaires (zones vertes) ou d'érosion éolienne (orange), et enfin les zones très sombres (bleu clair et foncé), ou aucune morphologie reconnaissable n'apparaît. Sur le site de Zittau, aucune rupture de pente ou de structure en creux n'a été enregistrée par le système de navigation du rover entre la zone sombre et la zone très claire. Ceci est différent en ce qui concerne le passage à travers Fife. Les photographies montrent une légère baisse de niveau de quelques centimètres lors de la traversée de cette zone (en vert sur la Figure 5.4-5).

5.4.2.2 Discussion(s)

A partir de cette carte globale de la répartition de la constante diélectrique en surface, on peut finalement formuler plusieurs hypothèses : la première concerne la faible constante diélectrique mesurée sur les terrains sombres. Sur un sol de type poussières relativement oxydé, on s'attendrait volontiers à des valeurs légèrement plus fortes (entre 3.5 et 5), ce qui nous incite à penser que la première couche (jusqu'à quelques centimètres de profondeur) serait de nature très poreuse. Bien évidemment, l'hyperaridité de la région entraine des taux d'humidité quasi-nuls, les constantes diélectriques des matériaux correspondent donc aux valeurs limites les plus faibles possibles pour chacun d'entre eux. L'augmentation de ε' avec les terrains de plus en plus clairs pourrait être le témoin d'un changement de nature de la composition de la surface, possiblement un matériau plus riche en évaporites que sur les terrains sombres. On peut effectivement supposer que des lieux comme Zittau résultent de l'accumulation d'eaux saumâtres qui se seraient évaporées, permettant ainsi la formation d'évaporites en grandes quantités, remplissant par couches successives le creux laissé par le lit de la rivière. La situation particulière de ce site « protégé » (coincé entre de gros rochers) aurait pu permettre le maintien de ces évaporites en surface, soit par érosion des couches de poussières due à des couloirs de vent favorisés par cette situation, ou alors inversement, en protégeant suffisamment le lieu de l'accumulation de poussières, contrairement aux autres terrains. Les valeurs de constantes diélectriques mesurées sur les endroits les plus clairs sont en bon accord avec cette hypothèse, puisque l'on peut trouver dans la littérature des études en laboratoires conduites sur des sols évaporitiques, qui prédisent pour les fréquences de WISDOM des valeurs comprises entre 4 et 7 (Aqil and Schmitt, 2008). A contrario, le site de Fife, moins abrité, n'aurait pas permis l'accumulation de tant de matériaux évaporitiques et se serait partiellement rempli via l'accumulation de poussières.

Les moyennes des constantes diélectriques estimées via WISDOM pour chacun des sites sont regroupées dans le Tableau 5.4-2, pour trois bandes de fréquences. Rappelons que la surface est lisse, donc que les disparités par bandes de fréquences ne sont pas imputables à la rugosité de la surface, mais peuvent provenir d'une variation de la constante diélectrique sur de faibles profondeurs. Nous nous trouvons

donc dans un cas opposé à celui de Dachstein (5.1.2.1), pour lequel les différences en sous-bandes de fréquences dépendaient uniquement de la rugosité de surface, étant donné que la glace était homogène sur des profondeurs relativement importantes.

Comme nous pouvions déjà l'observer sur notre carte (Figure 5.4-4), la constante diélectrique (cases bleues du Tableau 5.4-2 qui correspondent aux résultats obtenus en utilisant toute la bande de fréquences) possède une grande variabilité spatiale. Les moyennes calculées sont très différentes selon les lieux étudiés, et même au sein d'un même milieu, certains écarts-types atteignent 50% de la valeur moyenne.

On note cependant que les valeurs les plus fortes se trouvent sur le site de Zittau, qui contient en proportion plus de « terrains clairs » que pour les autres sites.

Tableau 5.4-2 : Constante diélectrique estimée sur les différents sites d'investigation

Lieu	Polarisation	Bande de fréquences	Constante diélectrique	Ecart-type
Harwell	0/0	ALL	2.9	0.2
		BF	3.9	1.3
		HF	2	0.3
	1/1	ALL	2.8	0.4
		BF	2.9	0.5
		HF	2.4	0.5
Porto	0/0	ALL	3.2	0.3
		BF	3.3	0.9
		HF	2	0.4
Zittau	0/0	ALL	4.2	0.3
		BF	3.8	0.8
		HF	4.1	1.4
	1/1	ALL	4	0.4
		BF	3.4	0.6
		HF	2.7	0.6
Fife	0/0	ALL	3.5	0.5
		BF	3.7	1
		HF	2.9	0.7
	1/1	ALL	3.2	0.4
		BF	3.6	0.4
		HF	3	0.7
Honfleur	0/0	ALL	3.6	0.5
		BF	3.8	0.9
		HF	2.3	0.8
	1/1	ALL	3.4	0.5
		BF	3.6	0.4
		HF	2.7	0.6
Sol 6	0/0	ALL	3.3	0.5
		BF	4.1	1.2
		HF	3	1.5

Les opérations de simulation de forages nous ont permis d'avoir accès à des échantillons en surface sur deux des sites, à savoir Zittau et Honfleur. Ces échantillons ont ensuite été analysés en laboratoire pour déterminer leur constante diélectrique (Figure 5.4-6). Les mesures ont été effectuées avec une sonde coaxiale (85070E Dielectric Probe Kit) qui fonctionne entre 200 MHz et 50 GHz, réputée pour être

moins fiable pour les basses fréquences. C'est pourquoi nous avons sélectionné, pour notre comparaison avec les données WISDOM, les valeurs « stables » de 1 GHz à 3 GHz pour références.

On note que la constante diélectrique en surface est plus élevée sur le site de Zittau que sur le site d'Honfleur, ce qui est cohérent avec les tendances enregistrées par WISDOM. Les valeurs de ε' mesurées sont cependant inférieures aux valeurs dérivées des données du GPR : on obtient un écart d'environ 0.5 entre les deux méthodes.

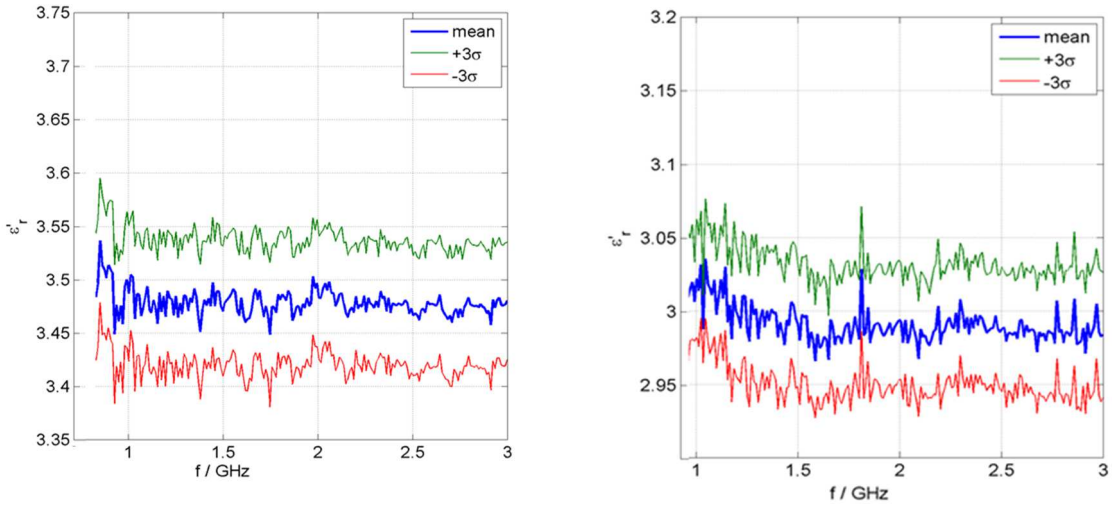


Figure 5.4-6 : Constante diélectrique des échantillons récupérés sur les sites de Zittau (gauche) et Honfleur (droite).

La différence entre les mesures en laboratoire et les valeurs déduites des données WISDOM peut avoir plusieurs explications :

La méthode utilisée en laboratoire nécessite des manipulations sur les échantillons, ce qui peut avoir une incidence non négligeable sur les résultats obtenus (modification du degré de compaction des matériaux). Ceci aurait tendance à augmenter la constante diélectrique du milieu, or nous observons l'effet inverse, à savoir une valeur plus importante de ε' via la quantification à partir des données de WISDOM.

Une deuxième explication pourrait être que l'écho de sol vu par WISDOM ne correspond pas uniquement à la surface : si l'on considère que l'épaisseur sondée est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, il devient intéressant d'observer les résultats en sous-bandes de fréquences. Les valeurs du Tableau 5.4-2 sont plus élevées en basses fréquences et beaucoup plus faibles en hautes fréquences (excepté sur le fameux site de Zittau). La longueur d'onde correspondant à la plus basse fréquence de WISDOM (0.5 GHz) dans un sol de constante diélectrique égale à 4 est de 15 cm, contre 2.5 cm pour la plus haute fréquence (3 GHz). Les valeurs de constantes diélectriques estimées via WISDOM sont donc cohérentes avec l'hypothèse d'un sol extrêmement sec et poreux en très proche surface, et dont le degré de compaction augmenterait progressivement avec la profondeur. Ceci pourrait partiellement expliquer

cette différence de valeur entre les mesures en laboratoire et les estimations faites sur toute la bande de fréquence dans le Tableau 5.4-2, excepté pour le site de Zittau qui a un comportement visiblement différent : il s'agit de la seule zone où les basses fréquences ne restituent pas une constante diélectrique supérieure à toutes les autres, ce qui suggèrerait que ce site est relativement homogène sur (au moins) une vingtaine de centimètres de profondeur. Les mesures en laboratoire des échantillons prélevés lors des forages en surface et en profondeur (Figure 5.4-7) viennent confirmer cette hypothèse : pour Zittau, l'échantillon prélevé en surface donne une constante diélectrique de 3,5 contre 3,7 à 1 mètre de profondeur (autrement dit, il n'y a pas d'évolution notable). Ceci est différent pour les autres sites comme Honfleur, où l'on obtient une augmentation de la constante diélectrique de 1 entre la surface et 60 cm de profondeur (cette fois ci, évolution plus que notable). Nos résultats en sous-bandes de fréquences, mise à part la différence « absolue » évoquée plus haut, sont donc tout à fait cohérents avec les mesures prises en laboratoire. Pour le site de Zittau, il est possible que l'effet « stable en profondeur » de la constante diélectrique soit dû à la présence d'un premier matériau de forte permittivité en surface, et d'un milieu moins réfringent légèrement plus bas : l'effet de compaction progressif avec la profondeur pourrait alors partiellement compenser cette baisse de la constante diélectrique, ce qui provoquerait cette stabilité apparente.

5.4.3 Le gradient de la constante diélectrique

Maintenant que nous avons bien décrit la distribution de la constante diélectrique en surface, intéressons-nous au sous-sol. Les radargrammes présentant des figures de diffraction (signatures « hyperboliques ») ont été exploités afin de retrouver les valeurs des constantes diélectriques sur différentes gammes de profondeurs. Malgré le très faible nombre de diffuseurs, ces résultats nous ont permis de constater une augmentation globale de la constante diélectrique avec la profondeur. Bien évidemment, certaines figures de diffraction correspondent à des rochers se trouvant en surface, ce qui ne constitue pas un problème majeur : la constante diélectrique obtenue est égale à 1, puisque le trajet des ondes s'effectue uniquement dans l'air. Nous les avons donc identifiés puis retirés de nos résultats. En ce qui concerne les blocs réellement enfouis dans le sous-sol, l'évolution de la constante diélectrique avec la profondeur est cohérente avec l'augmentation du degré de compaction des matériaux : ces derniers deviennent plus denses (moins poreux), ce qui augmente mécaniquement la proportion roche/air du milieu, résultant en une augmentation de la constante diélectrique. Les forages nous ont permis de vérifier ce comportement par visualisation directe (Figure 5.4-7). On distingue bien sur cette photographie une première couche d'une petite dizaine de centimètres, moins consolidée que les suivantes. On retrouve cette augmentation de la constante diélectrique via les mesures conduites en laboratoire : les échantillons qui ont pu être récoltés ne l'ont pas été qu'en surface, deux prélèvements provenant de Zittau et d'Honfleur ont été effectués, à des profondeurs respectives de 1 m et 60 cm. Les résultats de ces analyses sont présentés sur la droite de la Figure 5.4-7.

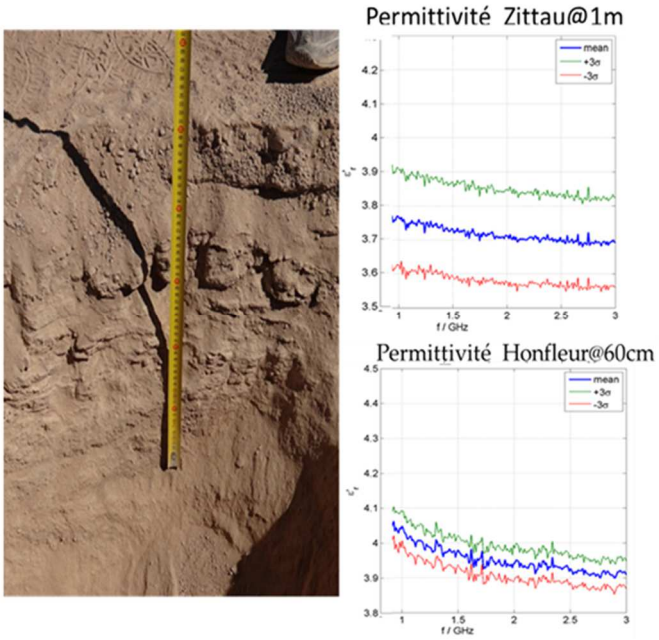


Figure 5.4-7 : Gauche : stratigraphie révélée par « forage » sur le site d'Honfleur. Droite : Constantes diélectriques estimées par analyse en laboratoire pour des échantillons prélevés sur les sites de Zittau et d'Honfleur à différentes profondeurs.

Enfin, nous avons pu estimer le gradient vertical de la constante diélectrique à partir de deux sites, Harwell, et surtout Zittau. Comme évoqué précédemment pour ce site, la constante diélectrique serait plutôt stable dans le premier mètre du sous-sol et augmenterait ensuite selon une forme exponentielle, comme l'illustre la Figure 5.4-8.

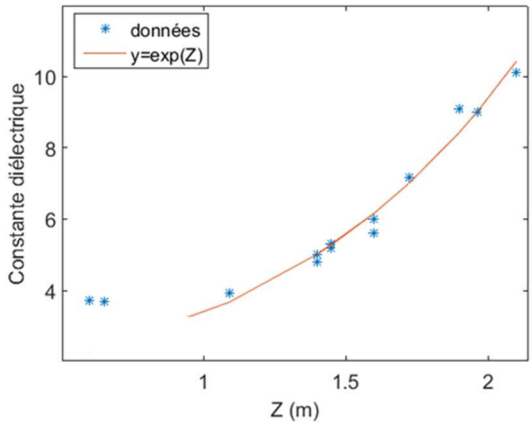


Figure 5.4-8 : Constante diélectrique estimée à partir de la signature des diffuseurs identifiés sur les radargrammes des sites d'Harwell et Zittau.

Dans le prochain chapitre, nous aurons l'occasion de présenter les radargrammes associés à la campagne SAFER pour une approche plus « géométrique » des données : l'estimation de la constante diélectrique en surface et à différentes profondeurs nous permet à présent de convertir nos temps de trajet en distances sur nos radargrammes.

Conclusion

Afin d'interpréter le plus finement possible les résultats issus des mesures du GPR WISDOM, il convient de le tester sur des environnements variés pour créer une base de données comparative pour les futures mesures sur Mars et de mettre au point des méthodes d'estimation des propriétés diélectriques et géométriques du sous-sol à partir des données. Nous avons ainsi développé deux méthodes, l'une qui s'appuie sur l'exploitation de l'écho de sol via une réflexion sur un conducteur parfait, qui donne accès à la constante diélectrique en surface, et l'autre qui s'appuie sur la signature des diffuseurs présents dans le sous-sol pour en déduire la constante diélectrique moyenne du milieu et la profondeur des objets. On récolte ainsi des informations sur l'évolution de la constante diélectrique avec la profondeur. Afin de valider et d'évaluer les performances de ces méthodes, nous avons pris soin d'effectuer des tests en environnements contrôlés avec le prototype de l'instrument. Les résultats issus des deux méthodes de restitution des paramètres sont en très bon accord avec les conditions réelles et les modélisations conduites, démontrant que WISDOM fonctionne de façon nominale et permet une restitution fiable de la constante diélectrique du milieu. Nous avons également quantifié l'impact de certains paramètres tels que la rugosité sur la restitution des paramètres du sous-sol. Ceci permettra à terme de corriger les estimations de la constante diélectrique en accord avec la rugosité apparente vue par l'instrument pour différentes gammes de fréquences. Les méthodes développées au cours de la thèse ont ensuite été utilisées pour exploiter les données des différentes campagnes de mesures, notamment celle de SAFER au Chili qui nous a permis de produire des cartes de la répartition géographique de la constante diélectrique en surface et de mesurer le gradient vertical de la constante diélectrique. On note sur cette zone de grandes variabilités spatiales (horizontale et verticale). Ces méthodes nous ont donc permis d'en apprendre davantage sur les propriétés diélectriques de la surface et du sous-sol, nous autorisant à émettre des hypothèses sur leur nature et leur composition. Pour contraindre davantage les milieux, nous préconisons la poursuite de ces travaux en s'intéressant davantage à l'atténuation des ondes, ceci afin de quantifier la partie imaginaire de la permittivité, directement reliée à la conductivité. Ceci pourrait permettre de discriminer de discriminer des terrains de différentes natures ou compositions dont les valeurs de constantes diélectriques seraient similaires. Enfin, une simple expérience nous a permis de montrer que WISDOM est capable de détecter les variations d'humidité en surface et jusqu'à quelques dizaines de centimètres de profondeur. Il conviendra de pratiquer des tests supplémentaires en environnement contrôlé pour quantifier davantage la sensibilité de l'instrument pour aboutir à terme à une réelle quantification de l'humidité. A présent que nous disposons de méthodes pour estimer la constante diélectrique du milieu, nous pouvons convertir les temps de trajet des ondes en profondeur pour obtenir des informations sur la géométrie du sous-sol. C'est ce que nous allons voir dans le Chapitre 6.

Références

Annan, A. P., & Davis, J. L. (1976). Impulse radar sounding in permafrost. Radio Science, 11(4), 383-394.

Aqil, S., Schmitt, D. R. (2008). Dielectric Permittivity of Evaporite Minerals. Back to Exploration, 12-15.

Bohlke, J.K., Ericksen, G.E., Revesz, K.M., 1997. Stable isotope evidence for an atmospheric origin of desert nitrate deposits in northern Chile and Southern California, U.S.A.. Chemical Geology 136, 135–152

Brock, A.L., Buck, B.J., 2009, Polygenetic development of the Mormon Mesa, NV petrocalcic horizons: geomorphic and paleoenvironmental interpretations, Catena 77:65-75

Chanzy, A., Tarussov, A., Judge, A., Bonn, F. (1996). Soil water content determination using a digital ground-penetrating radar. Soil Science Society of America Journal, 60 (5), 1318-1326.

Costard, F., Aguirre-Puente, J., Greeley, R., Guillemet, G., & Makhloufi, N. (1996, March). Martian fluvial-thermal erosion: Laboratory simulation. In Lunar and Planetary Science Conference (Vol. 27, p. 261).

Dechambre, M., Biancheri-Astier, M., Ciarletti, V., Dorizon, S., Hassen-Khodja, R., Saintenoy, A., ... & Séjourné, A. (2012, July). Wisdom GPR measurements in a cold artificial and controlled environment. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International (pp. 606-609). IEEE.

Dingman, R. J. (1967). Geology and ground-water resources of the northern part of the salar de Atacama, Antofagasta Province, Chile (No. 1219). US Govt. Print. Off.

Dorizon, S., Ciarletti, V. (2013, April). Evaluation of the first simulation tool to quantitatively interpret the measurements of the ExoMars mission's Wisdom GPR. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 15, p. 6851).

Dorizon, S., Ciarletti, V., Clifford, S. M., Plettemeier, D. (2013, December). WISDOM GPR aboard the ExoMars rover: a powerful instrument to investigate the state and distribution of water in the Martian shallow subsurface. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 1, p. 07).

Dorizon, S., Ciarletti, V., Plettemeier, D., Benedix, W. S. (2015). Performance validation of the ExoMars 2018 WISDOM GPR in ice caves, Austria. Planetary and Space Science.

Ericksen, G.E., 1983. The Chilean nitrate deposits. American Scientist 71, 366–374.

Friis, H. T., Crawford, A. B. and Hogg, D. C. (1957), A Reflection Theory for Propagation Beyond the Horizon. Bell System Technical Journal, 36: 627–644. doi: 10.1002/j.1538-7305.1957.tb03856.x

Maser, K. R., & Scullion, T. (1992). Automated pavement subsurface profiling using radar: Case studies of four experimental field sites. Transportation Research Record, (1344).

Martinez, A., & Byrnes, A. P. (2001). Modeling dielectric-constant values of geologic materials: An aid to ground-penetrating radar data collection and interpretation. Kansas Geological Survey, University of Kansas.

Mätzler, C. (1996). Microwave permittivity of dry snow. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 34(2), 573-581.

Mätzler, C. (1998). Microwave permittivity of dry sand. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 36(1), 317-319.

Petrenko, V.F. and Whitworth, R.W. (1999). Physics of ice. Oxford University Press, Oxford.

Rust, A.C., Russell, J.K., Knight, R.J. (1999). Dielectric constant as a predictor of porosity in dry volcanic rocks. Journal of Volcanology and Geothermal Research 91, 79–96.

Slob, E., Sato, M., and Olhoeft, G., 2010, Surface and borehole ground-penetrating-radar developments. Geophysics, Vol.75, no 5_September_October 2010, P. 75A103–75A120. doi: 10.1190/1.3480619.

Védie, E., Costard, F., Font, M., & Lagarde, J. L. (2008). Laboratory simulations of Martian gullies on sand dunes. Geophysical Research Letters, 35(21).

Williams, K. K., Greeley, R. (2004). Measurements of dielectric loss factors due to a Martian dust analog. Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012), 109(E10).

Woods, M., Wallace, I., Shaw, A., Malinowski, M., Rendell, P., Simulating Remote Mars Rover Operations in the Atacama Desert for Future ESA Missions –Autonomy Aspects, 11th May 2015 ASTRA, ESTEC, The Netherlands.

Chapitre 6 : La reconstitution du sous-sol à partir des données de WISDOM

Sommaire :

Introduction

6.1 La localisation des diffuseurs avec le GPR WISDOM 176

6.1.1 Une méthode mise au point grâce au système d'antennes de WISDOM 176

6.1.1.1 Principe 176

6.1.1.2 Validation en milieu contrôlé 177

6.1.2 Une planification judicieuse de la trajectoire du rover 179

6.1.2.1 Principe 179

6.1.2.2 Validation 181

6.2 Identification des structures de dépôts 183

6.2.1 Le froid 183

6.2.1.1 Dachstein : les grottes glacées 183

6.2.1.2 Neige et glacier 189

6.2.2 Le chaud 191

6.2.2.1 Retour sur SAFER : milieu désertique 191

6.2.2.2 L'Etna 197

6.3 Reconstitution du sous-sol en 3 dimensions 198

6.3.1 Les strates 198

6.3.2 Les diffuseurs 201

Conclusion

Références

Introduction

Maintenant que nous disposons de méthodes de restitution de la constante diélectrique en surface et à différentes profondeurs qui nous fournissent des informations sur la vitesse de propagation dans les milieux sondés, nous pouvons convertir les temps de trajet des ondes en distances sur nos radargrammes. La compréhension des processus de dépôts et la reconstruction des sous-sols passent également par une analyse plus « géométrique » de nos données. Il est important de garder à l'esprit que les paramètres déduits de notre méthode basée sur la signature des diffuseurs, présentée dans le Chapitre 5, correspondent à la moyenne de la constante diélectrique entre la surface et le diffuseur et à la distance entre la surface et l'objet, non à sa profondeur réelle. Ainsi, les hyperboles détectées peuvent provenir d'objets relativement éloignés de la verticale du point de sondage, pouvant se situer sur la droite ou sur la gauche de celui-ci par rapport à la direction de déplacement. Afin de retrouver la position réelle des diffuseurs, nous avons développé une méthode qui repose sur le fait que nous disposons avec WISDOM d'antennes polarimétriques qui offrent 4 configurations d'acquisition possibles. C'est ce que nous nous proposons d'aborder dans ce dernier chapitre. Après une première partie consacrée à la présentation et à la validation en environnement contrôlé de notre méthode de localisation en 3D des diffuseurs, nous discuterons des figures de dépôts identifiées dans les environnements que nous avons sondés lors des diverses campagnes de mesures pour une approche « structurelle » des données. Nous mettrons l'accent sur les résultats associés à la campagne de Dachstein, pour laquelle nous avons obtenu une reconstitution en 3 dimensions du sous-sol.

6.1 La localisation des diffuseurs avec le GPR WISDOM

Nous allons montrer comment l'utilisation du système d'antennes de WISDOM permet de mieux contraindre la position d'un réflecteur détecté dans le sous-sol à partir d'un profil unique, puis comment tirer parti de plusieurs profils acquis dans la même zone pour repositionner et estimer l'étendue des diffuseurs, en 3 dimensions.

6.1.1 Une méthode mise au point grâce au système d'antennes de WISDOM

6.1.1.1 Principe

Lorsque l'on repère la signature d'un diffuseur sur un radargramme, il convient de prendre en compte le fait que le passage des antennes ne se fait pas nécessairement juste au-dessus de celui-ci. Le système des antennes de WISDOM offre le moyen d'estimer cette position relative des objets par rapport au déplacement des antennes. Celles-ci sont en effet composées de deux éléments orthogonaux orientés à 45° et -45° par rapport à la direction de déplacement qui n'éclairent pas de façon identique la zone à sonder (voir la Figure 3.1.6 du Chapitre 3).

Pour une position du radar donnée, l'amplitude de l'onde émise en direction d'un diffuseur va dépendre de la position de ce diffuseur par rapport à l'élément rayonnant utilisé. Si l'on considère en première approximation que la réponse du diffuseur est la même quel que soit l'angle sous lequel il est éclairé, la variation d'amplitude le long de la signature hyperbolique reçue par le radar va permettre de discerner une cible située à droite, à gauche ou à la verticale de sa trajectoire. Ce phénomène est illustré sur la Figure 1-1. Pour chaque signature hyperbolique détectée, nous pouvons déterminer l'indice de réfraction moyen au-dessus du diffuseur, la distance d de ce diffuseur par rapport aux antennes et, comme nous venons de l'expliquer, contraindre, dans les cas favorables, la zone dans laquelle se trouve le diffuseur. L'objet, à ce stade, se situe donc sur l'intersection d'un arc de cercle de rayon d et de la moitié (droite ou gauche) du volume éclairé par les antennes.

Les données acquises en milieu naturel montrent que l'acquisition de mesures dans les deux modes de copolarisation permet dans un grand nombre de cas de tirer parti de cette méthode et de déterminer les positions des diffuseurs par rapport au déplacement des antennes, même si les signatures sont plus difficiles à gérer qu'en milieu parfaitement contrôlé (comparer par exemple les Figure 1-4 et Figure 1-5).

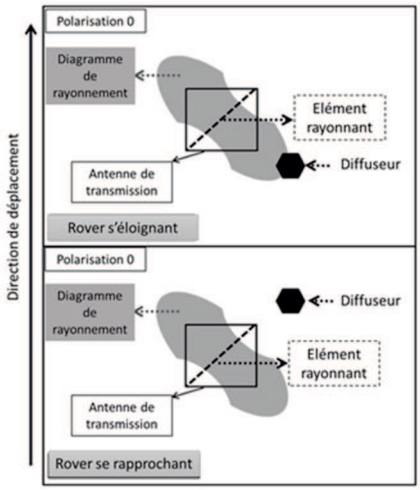


Figure 1-1 : Configuration pour la détection de diffuseurs ponctuels dans le cas de la polarisation 0/0. Le diffuseur n'est éclairé intensément que lorsque les antennes ont dépassé la position horizontale de l'objet.

6.1.1.2 Validation en milieu contrôlé

L'expérience que nous allons présenter consiste en une série de profils effectués dans une grande halle au LATMOS. Pour ce test, les antennes sont orientées vers le haut et deux cibles métalliques, une sphère de diamètre 8 cm ainsi qu'une boîte de dimensions ($17cm \times 12cm \times 11\ cm$), sont suspendues à 1,95 m du sol. Deux séries de plusieurs profils ont été effectuées en faisant passer les antennes du radar au milieu puis de part et d'autre des objets (Figure 1-2).

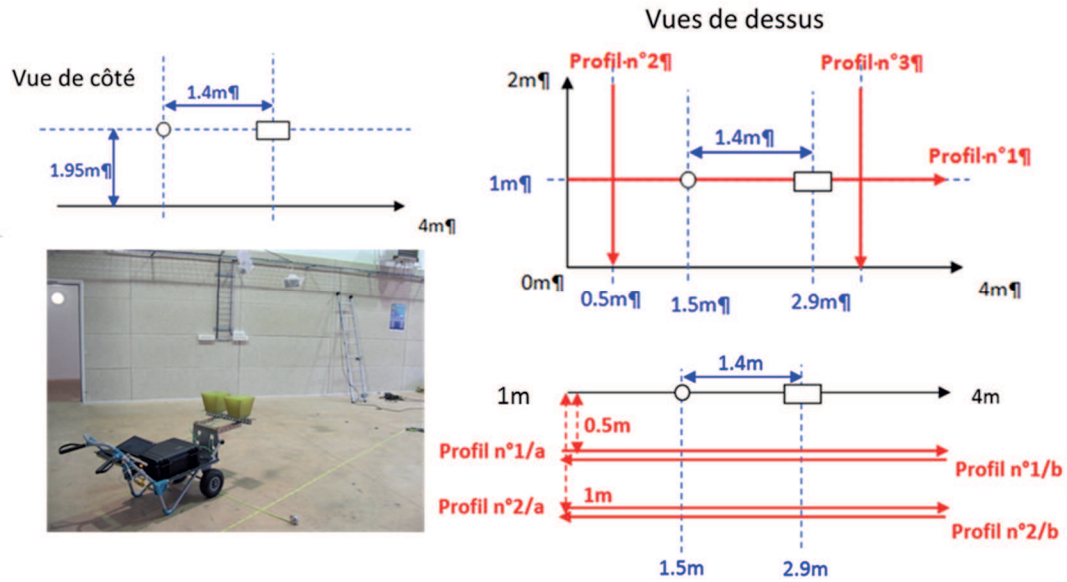


Figure 1-2 : Configuration de l'expérience des cibles suspendues et profils effectués.

Parmi les profils, le n°1 est celui qui passe à la verticale exacte des deux cibles. En conséquence, les signatures hyperboliques présentent une symétrie en amplitude de part et d'autre de leur sommet (Figure 1-3).

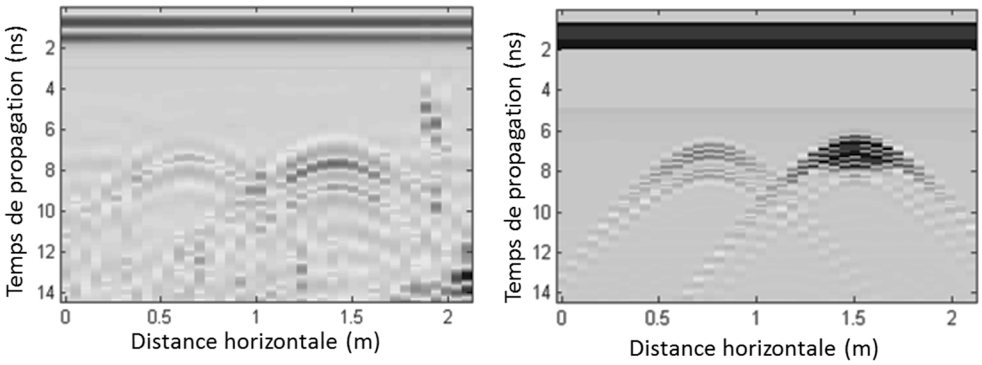


Figure 1-3 : Radargrammes correspondants au profil n°1 de l'expérience des cibles suspendues. A gauche les données expérimentales, à droite les données simulées correspondant à la meilleure configuration trouvée via la méthode décrite dans le Chapitre 5

Par contre, les autres profils qui sont décalés par rapport aux cibles mettent en évidence la différence en amplitude décrite plus haut (voir figure 6.1-5).

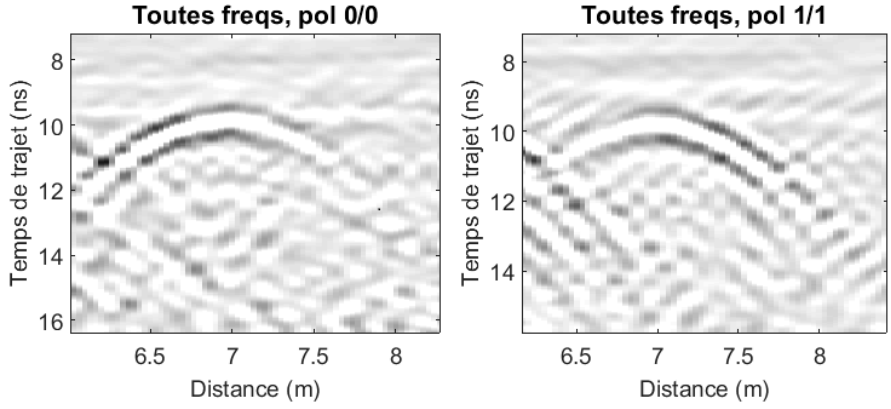


Figure 1-4 : Radargrammes correspondants au profil n°1/a de l'expérience des cibles suspendues (la zone correspondant à la sphère est sélectionnée). On note la différence d'amplitude le long des branches de « l'hyperbole » selon la polarisation sélectionnée.

Chacun des radargrammes de la Figure 1-4 permet indépendamment de déterminer que la sphère se trouve à gauche par rapport au déplacement du radar. La combinaison des deux permet dans un cas moins clair de lever l'ambiguïté droite/gauche.

En théorie, lorsque la forme du diffuseur est connue et que le milieu est homogène, cette dissymétrie sur l'amplitude peut être modélisée et permettre d'estimer la distance du diffuseur par rapport à la trajectoire ; cependant en environnement naturel (où le milieu n'est pas homogène et dans lequel les

diffuseurs sont de forme irrégulière), il n'est pas possible de quantifier l'effet et seule l'ambigüité droite/gauche pourra être levée. Sur le radargramme de la figure 6.1-6 obtenu lors de la campagne de mesure à Dachstein, on distingue clairement une signature qui correspond à un diffuseur situé à droite du trajet du radar. Ce type d'information sera de toute première importance lorsqu'il s'agira de choisir un emplacement pour forer le sous-sol martien afin de recueillir des échantillons.

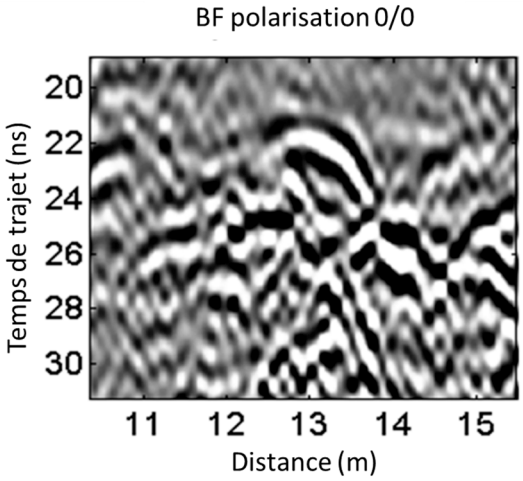


Figure 1-5 : Portion de radargramme acquis durant la campagne de Dachstein, qui met en évidence la différence d'amplitude observée pour un diffuseur se trouvant à droite du déplacement des antennes

6.1.2 Une planification judicieuse de la trajectoire du rover

6.1.2.1 Principe

Afin de retrouver la position exacte d'un diffuseur dans un environnement naturel, un seul profil n'est pas suffisant, il faut pouvoir disposer de plusieurs profils parallèles ou perpendiculaires sur la même zone. C'est ce qui est prévu dans le cadre des opérations rover d'ExoMars au voisinage des zones d'intérêt où une acquisition sous forme de grille a été prévue.

Dans une situation idéale où il serait possible d'acquérir des données avec un pas suffisant dans les deux dimensions horizontales, une migration sur les deux dimensions permettrait de reconstituer la structure 3D du sous-sol. Cependant, les contraintes sur la trajectoire du rover, le temps d'acquisition et le volume de données rendent cette hypothèse totalement irréaliste. La 'grille WISDOM' nominale consiste en 3 à 5 profils parallèles de 5 à 7 mètres de long espacés de 1 mètre chacun. Les sondages seront effectués tous les 10 cm dans les quatre configurations de polarisation possibles. La distance de 1 m entre les différents profils exclut toute migration possible dans cette direction. Notre objectif est donc de tirer parti de ces profils pour localiser au mieux les diffuseurs détectés.

Lorsque la même hyperbole peut être détectée sur plusieurs radargrammes, on obtient plusieurs portions d'arcs de cercle qui se coupent et permettent de localiser le point diffusant. Lorsque les dimensions de

l'objet diffusant sont supérieures à la résolution obtenue, il n'est pas possible de parler d'un diffuseur ponctuel. Les portions d'arcs de cercle vont permettre de déterminer un volume dans lequel se trouvent les points diffusants de l'objet.

Afin de prendre en compte les incertitudes liées à cette méthode (restitution de la profondeur), à la position horizontale des antennes et au pas spatial entre les mesures (géométrie d'acquisition), nous avons associé aux arcs de cercle un volume : l'incertitude sur la distance *d* se traduit par une épaisseur (de 5 cm dans le cas de la glace au Dachstein) et l'incertitude sur la position des antennes par une largeur de 4 cm. Ces valeurs peuvent être définies facilement dans le programme que nous avons mis au point, selon la résolution théorique de l'instrument dans le milieu sondé ainsi qu'en fonction de notre degré de confiance sur la précision du pas d'acquisition (l'utilisation d'une roue codeuse nous permettrait par exemple de diminuer cette valeur de 4 cm pour la largeur de notre arc de cercle). L'exemple présenté à la fin de la partie 6.2.2.1 nous permet de considérer que dans le cadre d'ExoMars, une incertitude de 3 cm ou 4 cm sur la position horizontale serait adaptée.

Lorsque le nombre de diffuseurs augmente, il est possible de rencontrer des configurations où deux arcs de cercles qui correspondent à deux diffuseurs différents se coupent. Il est alors important de limiter le plus possible l'extension angulaire de ces arcs de cercles en tenant compte de l'information supplémentaire présentée au 6.1.

Les positions de l'espace où les intersections sont les plus nombreuses correspondent alors à la position la plus probable du diffuseur, comme illustré sur la Figure 1-6 qui correspond à un cas observé en conditions naturelles, lors de la campagne de Dachstein.

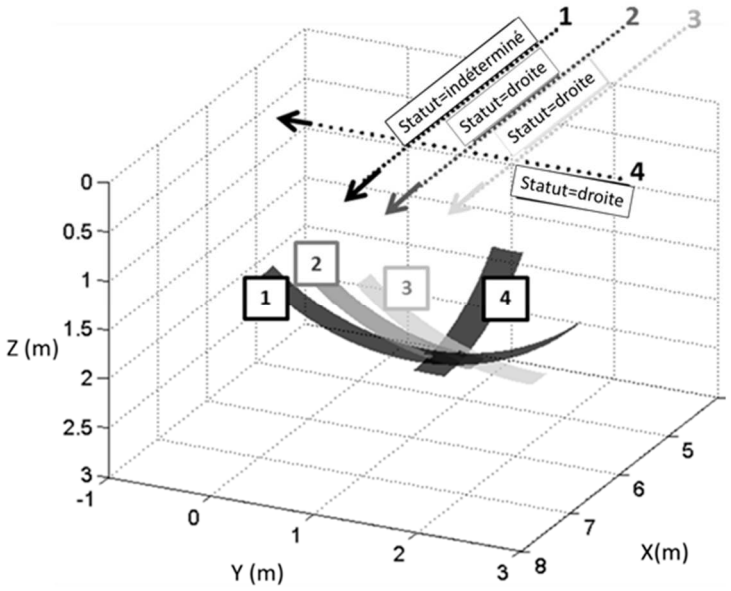


Figure 1-6 : Illustration de la méthode développée pour localiser la position des diffuseurs pour un cas de données réelles acquises selon une grille d'acquisition durant la campagne de Dahstein.

Cette méthode a été validée sur des données réelles acquises dans des configurations simples et connues avant d'être utilisée sur des données acquises en environnement naturel plus complexe.

6.1.2.2 Validation

L'expérience dans la halle du LATMOS a permis d'acquérir des données sur des profils parallèles et perpendiculaires qui permettent de valider la méthode que nous avons développée. La méthode basée sur la forme des signatures des diffuseurs décrite dans le Chapitre 5 a permis de vérifier que les objets étaient bien immergés dans un milieu de constante diélectrique correspondant à celle de l'air (ε'=1) et de retrouver les distances correctes de la sphère et de la boîte métallique sur chacun des 7 profils. Afin de tester la reproductibilité de cette méthode, l'ensemble du processus a été répété dix fois de façon indépendante sur le même profil, et nous avons systématiquement obtenu le même couple de solutions (ε', d).

Comme expliqué plus haut, il est également possible de tirer parti du diagramme de rayonnement des antennes de WISDOM pour différentes polarisations pour contraindre ultérieurement la position des diffuseurs. Pour le cas de l'expérience des cibles suspendues, la méthode décrite sur la Figure 1-6 a été appliquée pour restituer les positions des objets (Figure 1-7 et Figure 1-8). Les résultats sont stockés sous la forme d'un nuage de points qui représentent les positions potentielles des objets diffusants au sein d'un maillage spatial de dimensions modulables (ici $1cm \times 1cm \times 1cm$). Chaque maille de l'espace se voit alors attribuer un nombre n_{inter} égal au nombre d'intersections qui y est contenu. La restitution des objets du sous-sol passe par l'affichage des volumes qui correspondent à une valeur n_{inter} choisie par l'utilisateur. Ce nombre est bien sûr fonction du nombre total de profils disponibles. Les volumes correspondant à n_{inter} =2 et n_{inter} =3 pour l'expérience de la halle décrite plus haut sont affichés Figure 1-7 et Figure 1-8.

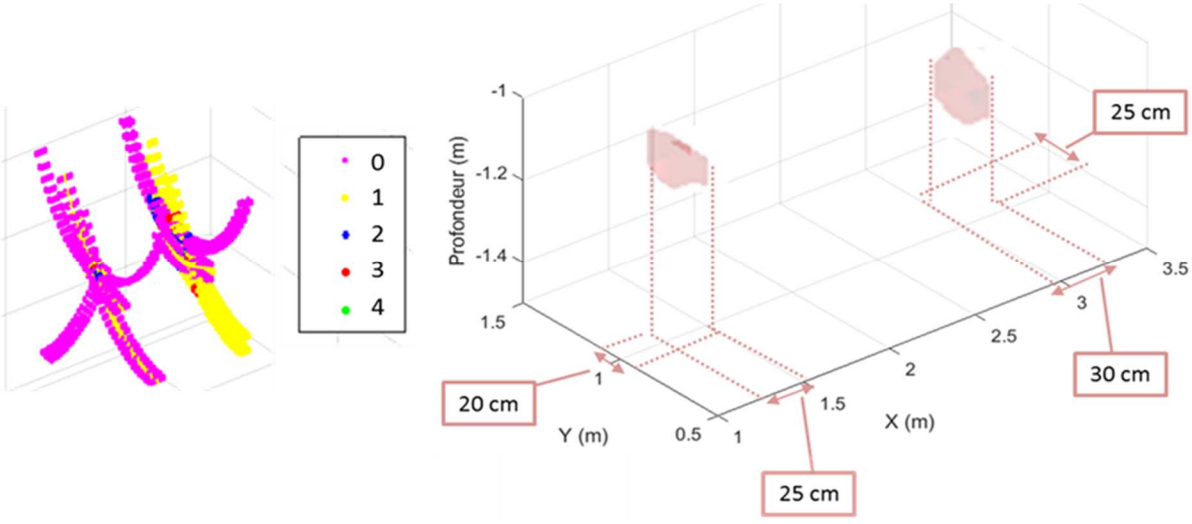


Figure 1-7 : Gauche : nuage de points en fonction du nombre d'intersections n_{inter} de portions de sphères. Droite : localisation et volumes restitués des objets à partir des données WISDOM pour n_{inter} =2.

La subtilité consiste donc à trouver la valeur de n_{inter} qui permettra une restitution des positions et des dimensions les plus fines possibles pour chacun des objets.

Pour n_{inter} =3 (Figure 1-8), le long de l'axe X, on obtient une longueur de 15 cm pour la boite (contre 17 cm en réalité) et un diamètre de 7.5 cm pour la sphère, qui mesure 8 cm en réalité, tandis que pour n_{inter} =2 (Figure 1-7), les volumes surestiment largement les dimensions réelles des objets. On peut donc grandement affiner la restitution des positions et des dimensions pour chaque objet en sélectionnant un nombre n_{inter} adéquat.

Ces estimations sont en revanche largement sous-estimées dans la direction Y pour n_{inter} =3 : on obtient 4 cm de largeur pour la boite, contre 12 cm en réalité, et 3.5 cm pour le diamètre de la sphère. Ce grand écart est dû à la répartition des profils effectués avec l'instrument, cinq le long de l'axe X contre deux dans la direction Y. Cette méthode, pour qu'elle soit précise, nécessite donc plusieurs passages du radar le long des axes X et Y, idéalement de façon équitable, d'où l'intérêt de pratiquer des grilles lors des sondages sur le terrain.

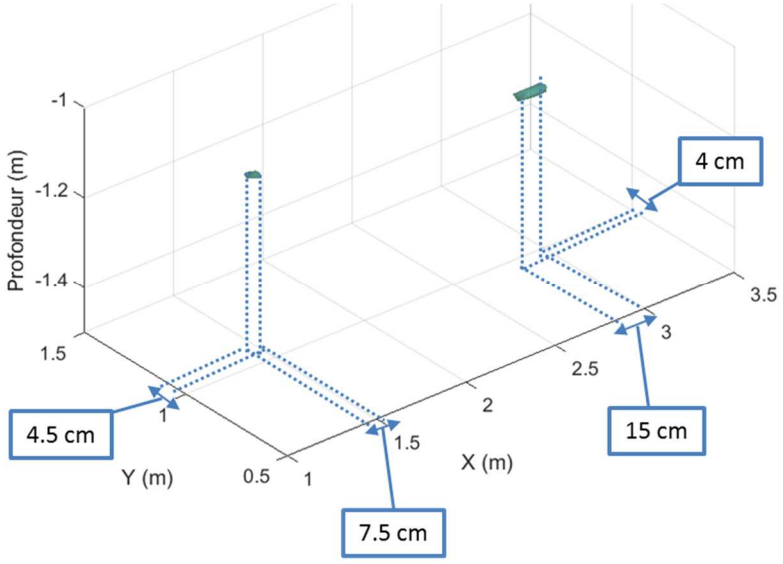


Figure 1-8 : Zoom sur les volumes restitués (n_{inter} =3) et dimensions des objets correspondants.

Les discussions concernant le protocole d'acquisition sous forme de grille dans le cadre d'ExoMars sont toujours en cours, et nous en profitons pour préconiser dans ce cadre d'effectuer non seulement des profils parallèles mais aussi au moins quelques profils perpendiculaires, qui apporteraient une plus-value importante pour le dimensionnement des objets.

La Figure 1-8 a été générée en considérant une seule signature par cible. Néanmoins, si l'on observe plus attentivement la signature correspondant à la boîte métallique sur la Figure 1-3 (deuxième « hyperbole »), on constate en fait qu'il y en a deux : une arrivant à 7 ns et l'autre juste après autour de

9 ns. En considérant cette deuxième signature (lorsqu'elle est détectée sur un profil) comme un objet indépendant, on obtient la reconstruction de la boite avec davantage de précision. On voit en effet apparaître deux objets qui correspondent à ses extrémités. La largeur de la boite métallique dans la direction Y est améliorée pour atteindre 14 cm, surestimant la vraie dimension de 2 cm (Figure 1-9).

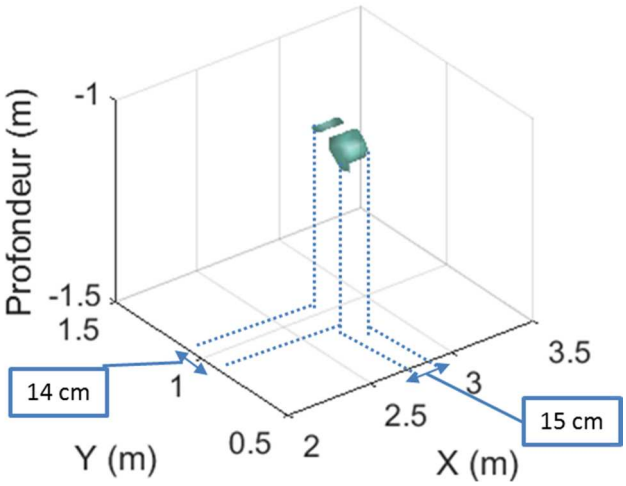


Figure 1-9 : Volume obtenu pour la boite métallique en considérant la deuxième signature.

6.2 Identification des structures de dépôts

Nous nous proposons ici de décrire les différentes figures de dépôts que nous avons rencontrées au cours des campagnes de mesures menées dans des environnements divers.

6.2.1 Le froid

6.2.1.1 Dachstein : les grottes glacées

Nous reprenons dans cette partie les résultats principaux de la Mars Simulation 2012, qui ont fait l'objet d'une publication dans Planetary and Space Science (Dorizon et al., 2015).

La Mars Simulation 2012 fut pour nous l'occasion de tester l'instrument WISDOM dans un contexte de grottes gelées. Nos mesures ont été effectuées dans la grotte nommée «The Giant Ice Cave », située à 1460 m d'altitude, où des sondages GPRs ont déjà été effectués en 2006 (Behm and Haussmann, 2008, Haussmann and Behm, 2011) à l'occasion du projet AUSTRO ICE CAVES 2100. Même si nos sondages n'ont pas été effectués exactement au même endroit, il peut être intéressant de comparer nos résultats à ceux-ci. En se basant sur leurs résultats et nos observations directes lors du choix des différents sites d'investigation, nous pouvons déjà prédire plusieurs choses : globalement, les « salles » de la grotte sont toutes recouvertes d'une couche de glace dont l'épaisseur peut varier de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres. La diversité à l'intérieur de la cave est importante et nous avons pu constater la présence en certains endroits de nombreux rochers de tailles variables (de l'ordre de quelques dizaines de centimètres jusqu'à environ 2 m de diamètre). La glace en certains endroits apparait

comme stratifiée, avec de fines couches empilées les unes sur les autres, aux teintes variées (de translucide jusqu'à gris foncé), de l'ordre de quelques centimètres d'épaisseur. Le toit de la grotte apparait comme extrêmement fracturé, ce qui devrait être également le cas pour le socle sous la couche de glace. On s'attend donc à des radargrammes présentant une première couche quasi-transparente, avec de forts échos correspondant aux nombreuses figures de diffraction dues aux rochers piégés dans la glace, et un peu plus bas un assemblage de figures « hyperboliques » lorsque les ondes atteignent le socle fracturé.

Au total, nous avons effectué plus de 2400 sondages sur 4 sites à l'intérieur de la grotte. La carte des salles avec la localisation de nos sondages est présentée sur la Figure 2-1. Cette campagne de mesures fut aussi l'occasion de tester WISDOM installé sur différentes plateformes (Figure 2-2) : notre « Cart » classique, le petit rover nommé « White-Magma » de l'ABM Space Education en Pologne (Meszyński et al., 2013), et le "Cliffbot" développé par l'Association Française de la planète Mars.

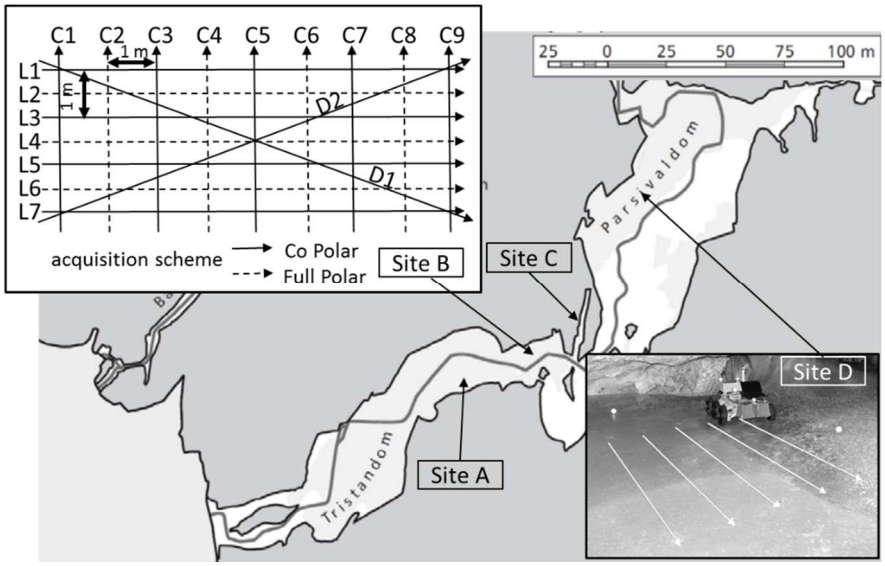


Figure 2-1 : Carte des sites étudiés au cours de la Mars Simulation 2012. Les zones investiguées avec WISDOM (A, B, C, D) sont également indiquées. Le site B a fait l'objet d'une grille de sondage, avec 7 profils longitudinaux et 9 transversaux. Modifiée à partir de (Groemer et al., 2012).

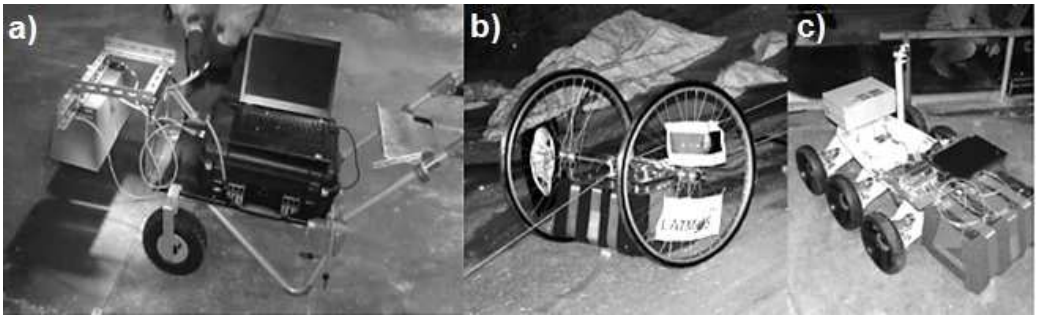


Figure 2-2 : Les 3 plateformes utilisées pendant la Mars Simulation 2012. a) le cart WISDOM, b) le Cliffbot, c) le rover Magma-White.

Tableau 2-1 : Mesures effectuées sur les différents sites					
Site (voir Figure 2-1)	Plateforme	Hauteur des antennes	Nombre de sondages	Données acquises	Caractéristiques de la surface
Site A	Cliffbot	8	197	2 profils parallèles de 6 m et 8 m	Glace lisse
Site B	Cart	30	1074	Grille (voir le schéma de la Figure 2-1)	Glace lisse
Site C	Cart	30	142	1 profil de 7 m	Glace lisse
Site D	Rover White Magma	17	102	5 profils parallèles de 1.5 m 1 profil de 4 m	Glace lisse Glace rugueuse

Pour chacun des radargrammes acquis à Dachstein, nous avons appliqué nos deux méthodes de restitution de la constante diélectrique. Les résultats en surface et à différentes distances donnent des valeurs comprises entre 3.1 et 4 sur de grandes profondeurs (entre 1.5 m et 3 m), et augmente ensuite très rapidement pour atteindre des valeurs de permittivité réelle comprises entre 6 et 10. Quelques figures de diffraction correspondent à des rochers présents en surface, on obtient donc des valeurs de 1 pour la constante diélectrique (Figure 2-3). On en déduit que le milieu traversé par les ondes jusqu'aux « hyperboles » peu profondes est constitué majoritairement de glace, mais potentiellement mélangée avec des impuretés (la valeur pour la glace pure étant de 3.2. Encore plus bas, on aurait un mélange de glace et de roches dont la permittivité réelle est supérieure à 6, avec une proportion roche/glace qui augmenterait avec la profondeur.

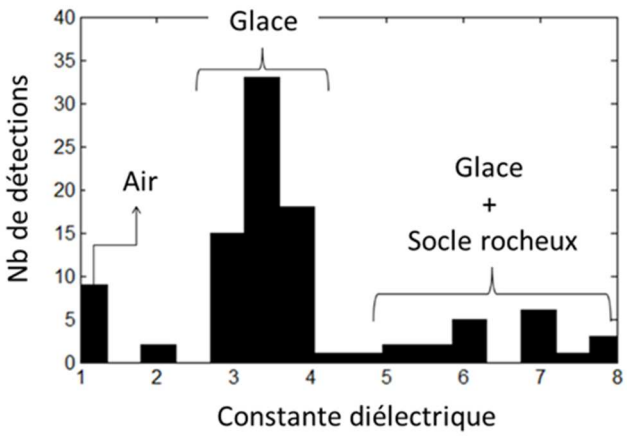


Figure 2-3 : Histogramme des valeurs de constantes diélectriques déduites de la forme des signatures de diffuseurs identifiées sur les radargrammes.

La technique de la migration nous a permis de confirmer ces résultats : une vitesse de 0.168 $m.ns^{-1}$ pour les ondes, ce qui correspond à une constante diélectrique de 3.2, nous permet de refocaliser les signatures des diffuseurs en un seul point (Figure 2-4).

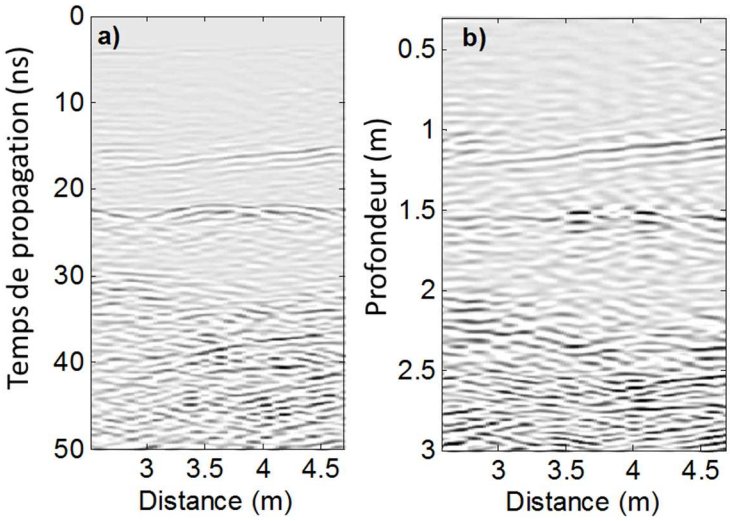
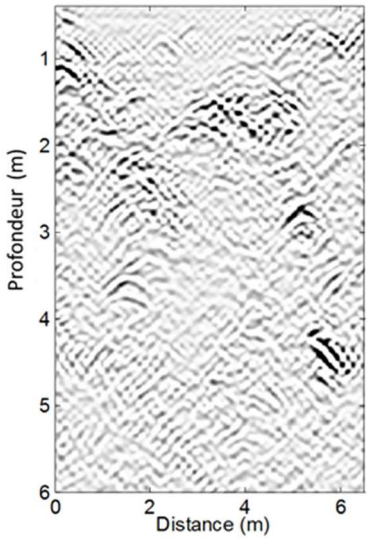
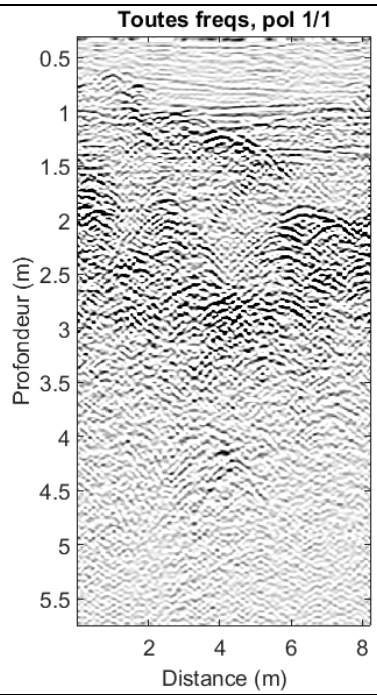
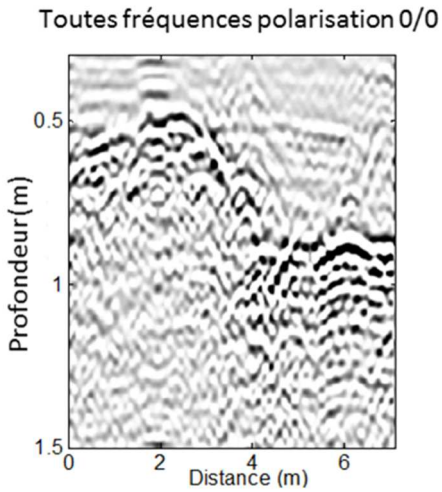
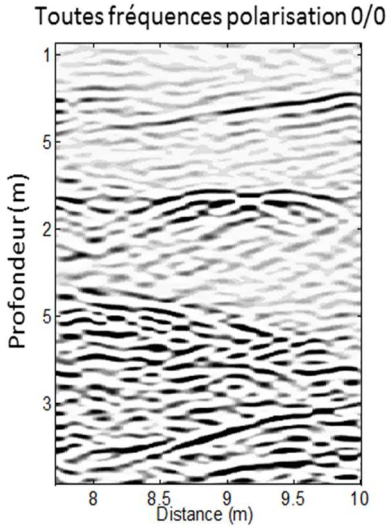


Figure 2-4 : Radargrammes acquis sur le site D de Dachstein, non migré (a) et migré (b) en utilisant v = 0.168 m.ns^{-1} pour la vitesse des ondes.

Les radargrammes acquis sur les différents sites, convertis en distance en considérant une constante diélectrique moyenne de 3.2, sont représentés dans le Tableau 2-2. Les résultats sont en accord avec nos prédictions : on observe bien une première couche plutôt homogène et transparente, parsemée de figures de diffraction jusqu'à atteindre une concentration importante d' « hyperboles » qui finissent par constituer le socle rocheux.

Tableau 2-3: Caractérisation des différents sites à partir des profils 2D pour la campagne de Dachstein (Dorizon et al., 2015)

Site	Profil 2D correspondant	Couverture de glace	Socle rocheux	Informations supplémentaires à partir de la comparaison en sous-bandes de fréquences et des différentes polarisations
Site A		Nombreux rochers et blocs piégés à l'intérieur de la glace Pas de stratification détectée.	Transition glace/socle rocheux non identifiée	Rochers anguleux de tailles variables (de moins de 10 cm jusqu'à un ou deux mètres, basé sur la comparaison entre les sous-bandes de fréquence)

Site B		Stratification dans la glace détectée jusqu'à environ 1.5m de profondeur. Nombreux rochers et blocs piégés à l'intérieur de la glace	Socle situé entre 1.5 m et 3 m	Socle qui résulte de l'assemblage de nombreux diffuseurs : le socle peut-être soit très fracturé, soit constitué de des rochers anguleux distincts
Site C		Stratification dans la glace détectée, avec une première strate d'environ 40 cm, suivie de couches de plus en plus fines jusqu'au socle	Socle situé entre 50 cm (première moitié) et ~1m (deuxième moitié) de profondeur	Socle très fracturé, semblable à un assemblage de rochers anguleux, dont la taille varie de 10 cm jusqu'à un ou deux mètres (basé sur la comparaison entre les sous-bandes de fréquence)
Site D		Deux diffuseurs piégés dans la glace à 1.8 m de profondeur. Pas de stratification détectée exceptée une couche inclinée, entre 1.2 et 1.5 m de profondeur. Source possible : inclusion de poussières, de calcite...	Socle entre 2.5 m et 3 m de profondeur	La signature des diffuseurs suggère une forme plutôt arrondie (basé sur la comparaison des co et cross polarisations. Leurs dimensions seraient supérieures à environ 15 cm (comparaison des sous-bandes de fréquence). Le socle est probablement très fracturé.

En opposition aux conclusions de Haussmann et Behm (2011), nos données montrent donc que la glace dans la grotte n'est pas homogène, mais stratifiée. Une partie zoomée d'un radargramme converti en distance est présentée sur la Figure 2-6 avec une photographie de la stratigraphie apparente le long du trajet touristique de la grotte. Sur la photographie, nous pouvons identifier des couches avec différentes teintes, allant du diaphane à une couleur brun foncé. Ces couches ont des épaisseurs variant de quelques centimètres à environ dix centimètres. L'image et l'acquisition de données radar n'ont pas été prises au même endroit, ce qui empêche d'effectuer une comparaison quantitative, mais on peut supposer que les couches de glace à l'intérieur de la grotte sont du même ordre d'épaisseur. Les strates identifiées sur la Figure 2-5 sont inclinées et varient horizontalement, ce qui nous conforte dans notre idée que ces échos ne proviennent ni d'artefacts instrumentaux (qui produiraient des lignes parfaitement horizontales avec la même amplitude) ni de réflexions multiples.

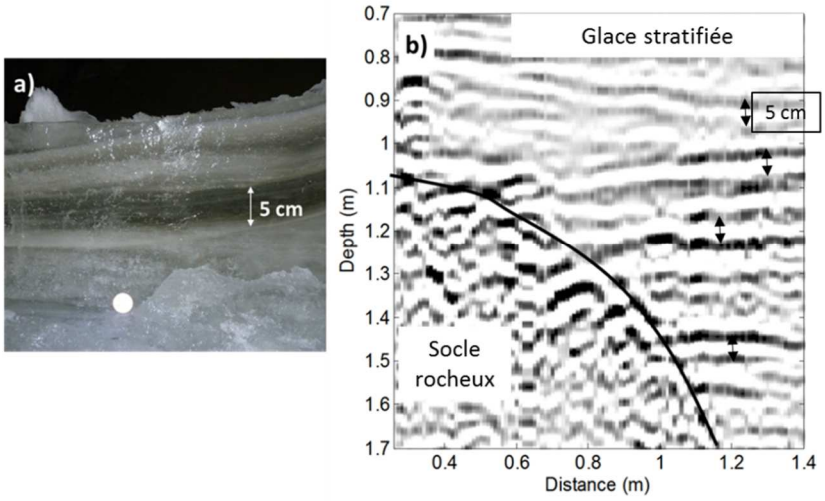


Figure 2-6: a) Photographie de la stratigraphie apparente de la glace le long du chemin touristique dans la grotte, entre Tristandom et le site A (voir Figure 2-1). b) Radargramme converti en profondeur (ε'=3.2) zoomé sur lequel on peut observer la stratigraphie et la transition entre la glace et le socle rocheux.

Ces résultats nous indiquent donc que la glace serait composée de fines strates de quelques centimètres d'épaisseur aux propriétés électromagnétiques différentes, autrement dit aux compositions différentes, comme la présence de plus ou moins de poussières (comme des inclusions de calcite) ou de bulles d'air. Les strates les plus fines (<5 cm d'épaisseur) ne sont cependant pas détectées par l'instrument : la résolution théorique de WISDOM dans la glace est d'environ 8 cm et l'on considère que l'on peut améliorer cette valeur de quelques centimètres en « suivant » les strates le long d'un profil horizontal pour atteindre une résolution maximale de 5 cm.

6.2.1.2 Neige et glacier

Observons maintenant l'apparence des radargrammes en contexte de sondage de glacier : les radargrammes des Figure 2-8 et Figure 2-9 ont été acquis dans la région de Chamonix, lors d'une campagne de mesures en Janvier 2011 (après un début d'hiver froid et à fortes précipitations de neige). Les ondes radar pénètrent très profondément du fait de la transparence du milieu (pertes très faibles), qui constitue un environnement favorable pour les sondages GPR : on atteint ainsi des profondeurs de détection supérieures à supérieures à 10 m, voire 15 m. On retrouve donc les performances attendues par simulations dans les cas les plus favorables, que nous avons présentées dans le Chapitre 4.

Figure 2-7 : Gauche : photographie de la zone n°1 située au niveau de l'arrivée du téléphérique des Grands Montets, Chamonix. Droite : zone n°2, sur la Vallée Blanche, Chamonix. Les sondages ont été effectués avec l'instrument WISDOM monté sur une luge pour faciliter les déplacements et la fiabilité du pas de 10 cm entre les mesures.

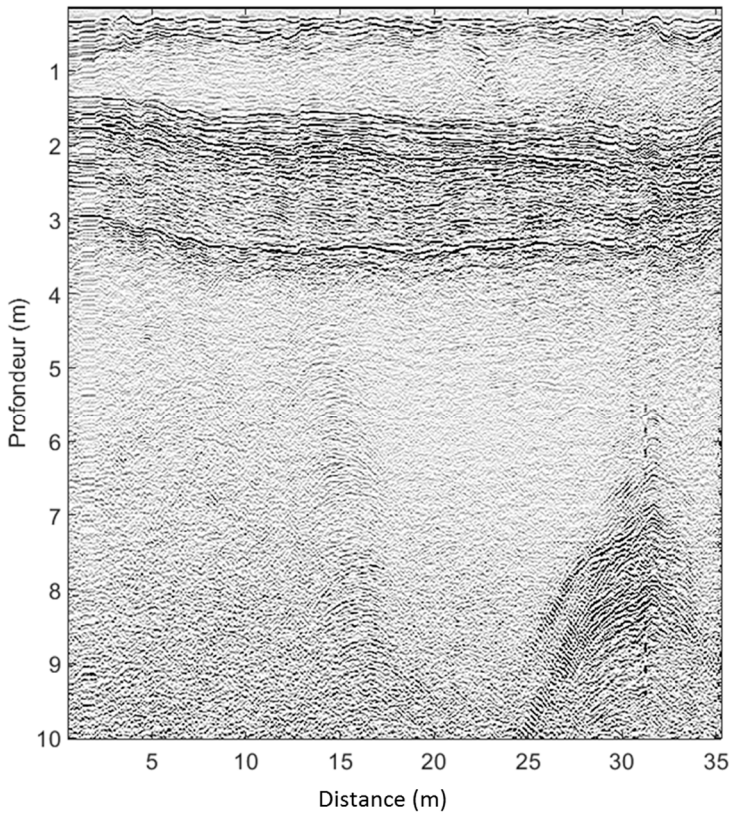


Figure 2-8 : Radargramme acquis sur la zone n°1 (voir Figure 2-7).

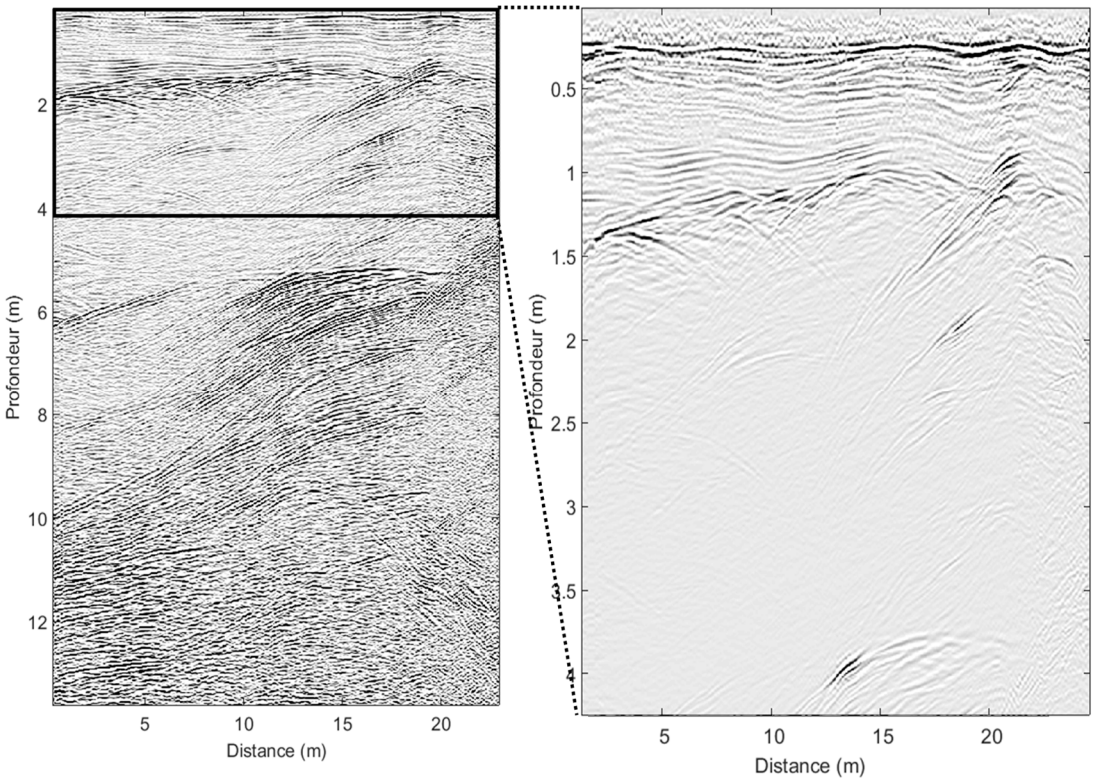


Figure 2-9 : Radargramme acquis sur la Vallée Blanche, avec un zoom sur les quatre premiers mètres de profondeur à droite. Le traitement est passé par l'application d'un gain exponentiel de facteur 2 pour révéler les structures les plus profondes.

Les radargrammes acquis sur les deux zones (Figure 2-8 et Figure 2-9) présentent des caractéristiques similaires : la première couche, d'une épaisseur d'une vingtaine à une cinquantaine de centimètres, correspond à de la neige relativement fraîche, faiblement compactée avec une présence importante d'air entre les grains. On observe ensuite la structure stratifiée de la neige, qui apparaît clairement avec des interfaces très marquées jusqu'à des profondeurs respectives de 3 m (site 1) et 1.5 m (site 2) ; elle se transforme ainsi progressivement en névé[1]. L'interface entre la neige et la glace se situerait vers 3 mètres de profondeur pour le site 1 et 1,5 mètres pour le n°2, ce qui est conforté par la présence de structures très réfléchissantes dans la glace (diffuseurs à environ 7-8 m pour le site 1 et éparpillés pour le site 2) qui correspondent très probablement pour la majorité d'entre elles à des crevasses, ponctuellement à des fractures ou de gros bloc enfouis, et témoignent des très faibles pertes que les ondes ont subi au cours de leur trajet (et donc de la quasi transparence du milieu), comportement typique dans la glace. La transition entre neige stratifiée et glace est cependant différente sur les radargrammes : alors qu'elle apparaît relativement progressive sur le site n°1, on observe plutôt une concentration importante de diffuseurs vers 1,5 m de profondeur sur le profil de la Vallée Blanche. Ceci pourrait donc correspondre à un socle de glace très fracturé, peut-être la limite haute du glacier pérenne apparent en été, qui présente une surface chaotique.

WISDOM, comme nous avons pu le constater, est donc particulièrement performant pour identifier les structures de dépôts et localiser les lieux d'intérêt dans des environnements glacés. Nous allons voir que pour des milieux moins propices, à pertes importantes, les radargrammes sont plus complexes à interpréter.

6.2.2 Le chaud

6.2.2.1 Retour sur SAFER : milieu désertique

Les profils effectués le long du trajet du rover Bridget au cours de la campagne SAFER nous ont permis de détecter quelques structures intéressantes. Les ondes pénètrent cependant moins profondément dans le sous-sol qu'en contexte « glacé », et les phénomènes de diffusion sont nombreux, ce qui complexifie l'interprétation et la mise en contexte géologique plus étendu.

Le radargramme de la Figure 2-10 a été acquis durant le Sol n° 2 et converti en altitude grâce aux données de navigation du rover, avec une constante diélectrique de 3 à partir de la surface. On remarque une première couche présentant de forts échos jusqu'à une trentaine de centimètres de profondeur, suivie par des signaux d'amplitude plus faible, ce qui témoigne du caractère atténuant du milieu. On observe également des dépôts stratifiés inclinés, non parallèles à la surface, en accord avec la stratigraphie apparente le long du forage effectué à Honfleur (Figure 2-12).

[1] Amas de neige qui, comprimé par son propre poids, se transforme progressivement en glace et alimente un glacier.

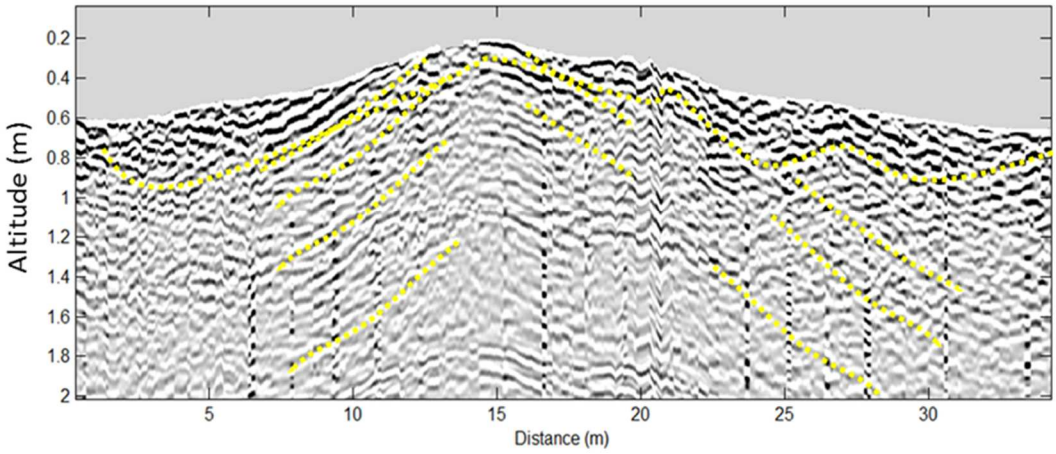


Figure 2-10 : Passage sur la zone de Porto (Sol 2).

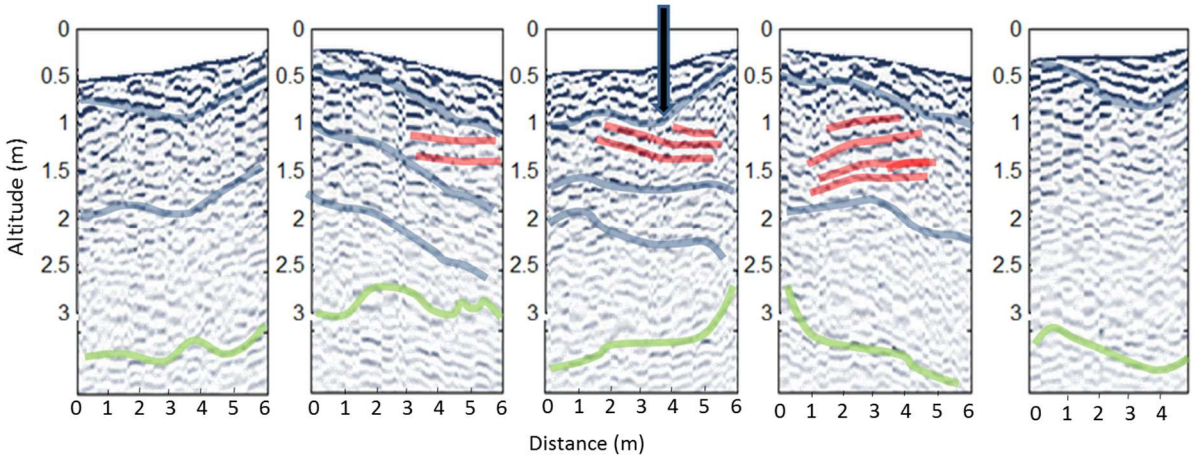


Figure 2-11 : Passage sur la zone d'Honfleur, avec 5 profils parallèles. Les structures que nous avons pu identifier sont soulignées. La flèche noire indique l'emplacement d'un forage programmé par le centre d'opérations à Harwell (voir Figure 2-12).

La zone d'Honfleur présente quelques caractéristiques intéressantes. On distingue une première couche présentant de forts échos, à l'instar du radargramme de la Figure 2-10, avec une stratification fine sur les 50 premiers centimètres de profondeur. Ces strates présentent une légère inclinaison par rapport à la surface (échos bleu). Les surlignages rouges correspondent à des échos relativement forts qui diffèrent du milieu environnant en termes d'orientation. Ceux-ci sont principalement localisés vers -1,3 mètres d'altitude, ce qui correspond à environ 80 cm de distance par rapport à la surface. Enfin, le surlignage vert représente ce que nous pensons être une limite d'unité géologique, l'écho étant relativement fort et ne semblant pas relever d'un artefact instrumental ni d'une réflexion multiple. La comparaison avec l'image du forage (Figure 2-12) effectué au niveau de la flèche noire (sur la Figure 2-11) est intéressante : on retrouve cette stratification inclinée sur les premiers centimètres de distance, de plus en

plus compactée au fur et à mesure que l'on descend en profondeur. A 80 cm, on observe au niveau de la flèche rouge l'apparition d'un matériau différent, de couleur blanchâtre : ceci pourrait correspondre aux strates rouges que nous avons identifiées sur les radargrammes d'Honfleur, dont la composition pourrait être du gypse. Ceci expliquerait alors les échos relativement forts observés à cet endroit, et beaucoup plus faibles en dessous, le gypse étant par définition un matériau contenant un fort taux de sels, très conducteur, dont la constante diélectrique est élevée (ε'~6.5) (Martinez and Byrnes, 1999).

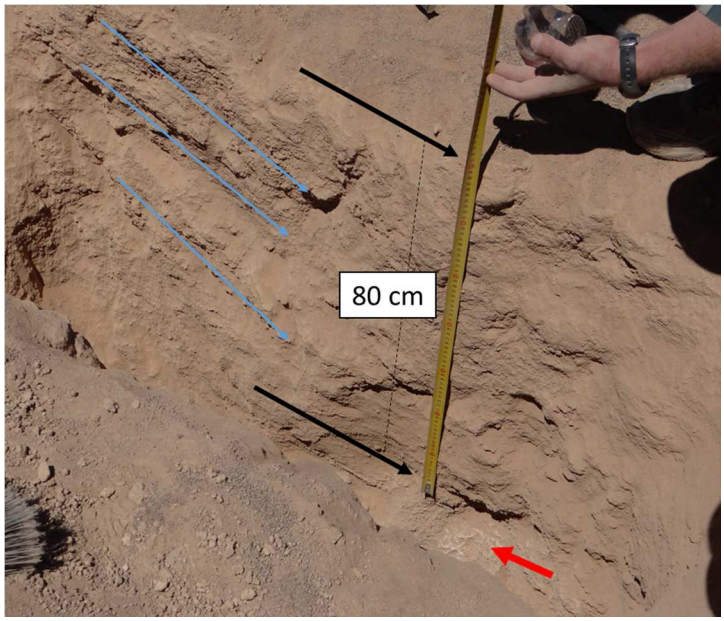


Figure 2-12 : Forage effectué dans la zone d'Honfleur. On remarque l'orientation inclinée des dépôts et l'apparition d'une couche plus claire à 80 cm de profondeur, en accord avec l'orientation détectée sur les radargrammes de la Figure 2-11.

Le passage sur la zone de Zittau (de ~2 m à ~6 m sur la Figure 2-13) présente des caractéristiques similaires, à savoir une première couche stratifiée sur les premières dizaines de centimètres de profondeur avec des échos relativement puissants. Il est cependant difficile de distinguer un mode de dépôts bien organisé. On observe également des signatures de diffuseurs bien prononcées, qui correspondent en fait aux rochers situés en surface. Le radargramme affiché correspond à la polarisation 0/0, qui implique un écho fort lorsqu'on se rapproche des rochers qui sont à droite de la trajectoire du rover. Le caillou rouge devrait apparaître au fur et à mesure que l'on s'éloigne de lui, cependant il demeure invisible sur le radargramme. Il se peut que ce dernier se trouve « noyé » dans les signatures des autres diffuseurs, ou qu'il s'agisse d'un effet purement géométrique, dû au fait que les ondes sont envoyées dans une autre direction lorsqu'elles interagissant avec ce rocher.

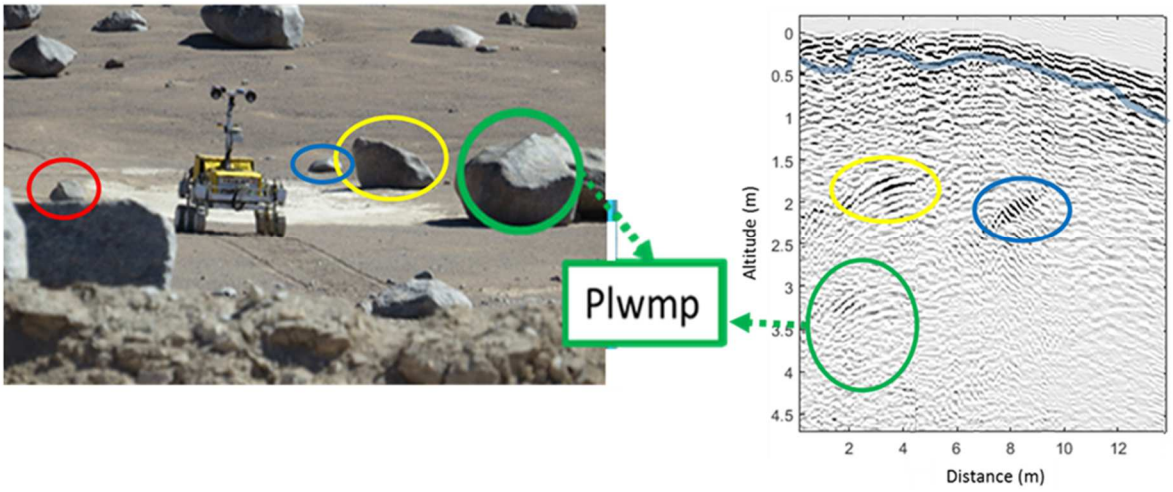


Figure 2-13 : Sol 4 avec le passage sur Zittau (de 1 m à 5 m sur le radargramme à droite).

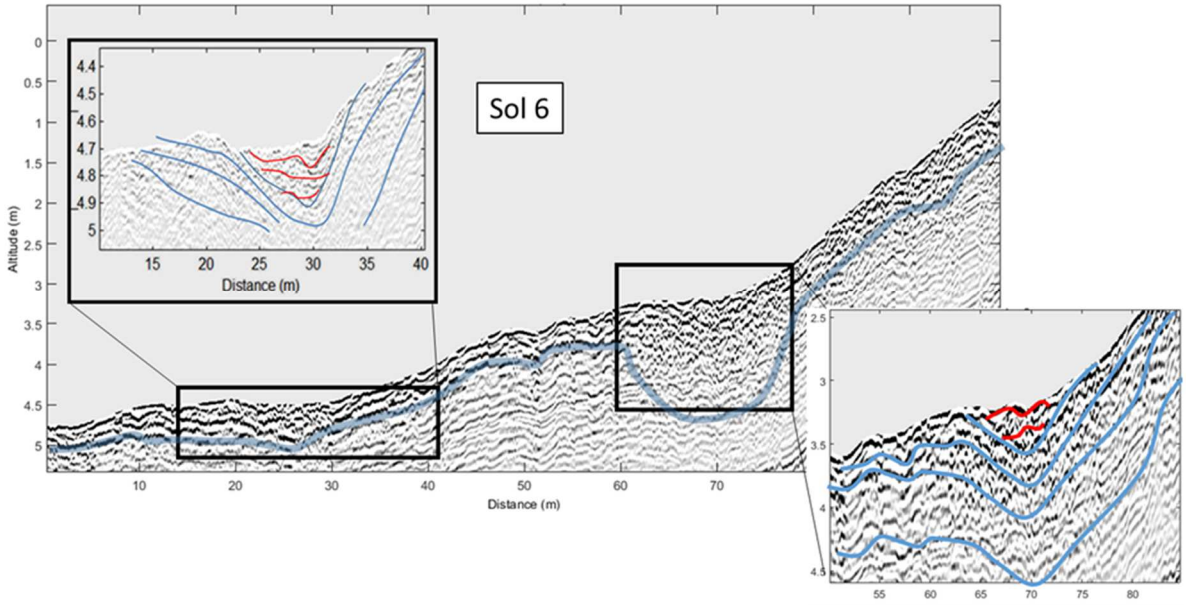


Figure 2-14 : Radargramme acquis sur le profil correspondant au Sol 6

Le long profil du Sol 6 (Figure 2-14) présente également des figures de dépôts intéressantes : globalement, une première couche de 20/30 cm peut être identifiée (en bleu tout le long du profil), et on observe entre 10 m et 40 m une structure en creux, d'une trentaine de centimètres de profondeur, avec une superposition de couches fines qui suivent les pentes sur une vingtaine de centimètres d'épaisseur (traits bleus). Plus haut, les couches deviennent horizontales (traits rouges) et on assiste à la superposition de strates qui remplissent progressivement le creux. Ceci pourrait correspondre à un ancien lit de rivière qui aurait été comblé par l'apport progressif de matière, par dépôts sédimentaires liés à une activité aqueuse qui aurait stoppé, puis par l'influence du vent. Notons également que la zone

située entre 60 m et 75 m est particulière, puisque les ondes pénètrent beaucoup plus profondément (sur environ 1 m de profondeur) que sur le reste du profil. Ceci indique un changement de nature du milieu, et le zoom nous permet d'observer qu'il s'agit également d'une structure en creux, dont le remplissage horizontal est cependant moins important que précédemment. On peut supposer qu'il s'agit également d'un lit de rivière, qui aurait pu s'assécher plus récemment ou plus doucement. Ainsi, les dépôts fluviatiles auraient suivi les pentes jusqu'à assèchement total et le vent serait ensuite venu combler le creux restant. Cette hypothèse est confortée par l'aspect du terrain en surface à ces endroits. La Figure 2-15 représente le trajet effectué par le rover lors du Sol 6. Les points bleus correspondent aux extrémités des zooms de la Figure 2-14. On remarque bien que les structures en creux observées sur le radargramme sont localisées autour des zones les plus claires.

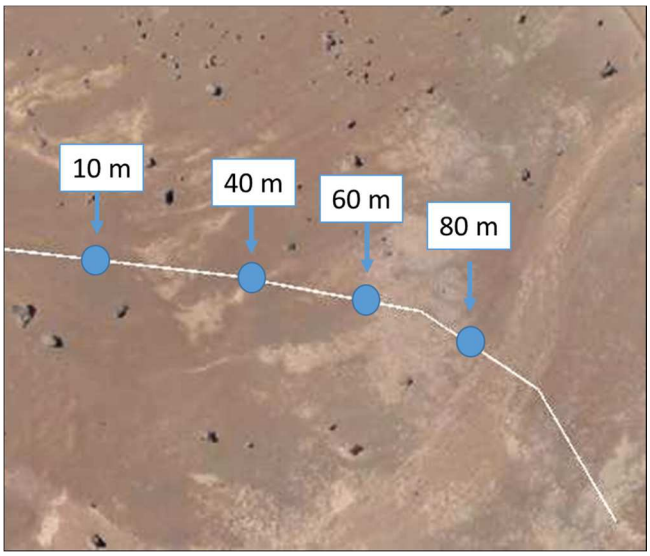


Figure 2-15 : Trajet correspondant au Sol 6. Les points bleus représentent les bornes des zooms fournis sur la Figure 2-14

En fin de parcours (X>80 m), il devient difficile d'identifier la stratification sur les premières dizaines de centimètres de profondeur, contrairement au début du profil : cette nature plutôt « désorganisée » pourrait être due à la nature des opérations en elles-mêmes : à la fin du Sol 6, le temps venait à manquer le pas spatial d'acquisition a été augmenté pour passer de 10 cm à ~15cm et plus. Les pas réellement effectués au cours de la campagne sont représentés sur la Figure 2-16. L'histogramme nous indique que le pas d'acquisition moyen est de 11 cm pour l'ensemble de la campagne de mesures, avec un écart-type de 3 cm. Concernant la fin du Sol 6, on s'aperçoit qu'effectivement, les pas sont très aléatoires et ne permettent pas de restituer les radargrammes de façon conforme à la réalité en utilisant un pas constant égal à 10 cm pour notre traitement.

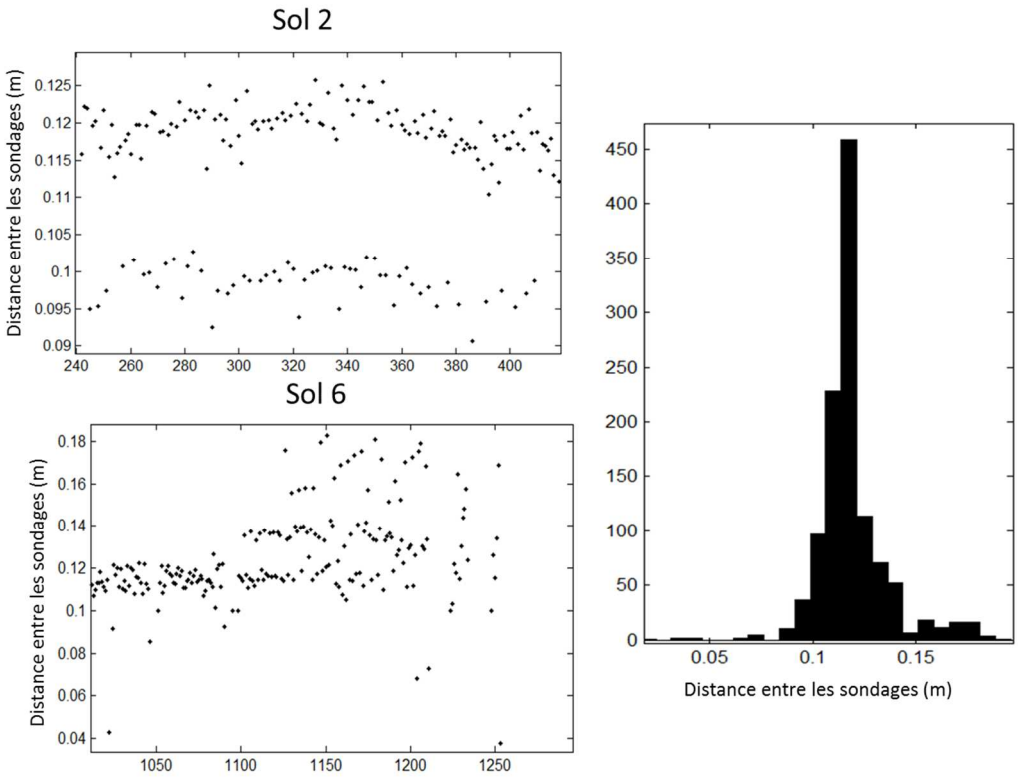


Figure 2-16 : Pas d'acquisition réellement observé pour les Sols 2 et 6 (gauche). A droite : histogramme des pas d'acquisition pour toute la campagne de mesures

Enfin, nous pouvons évoquer les possibilités de synergie instrumentales avec les autres instruments présents à bord du rover Bridget, notamment PANCAM (Paar et al., 2015), avec lequel il est possible d'imager à la fois la surface et une représentation du sous-sol. Ces visualisations permettent une mise en contexte géologique immédiate, qui peut s'avérer très intéressante dans le cadre du guidage du rover en toute sécurité vers des sites d'intérêt. Un exemple de visualisation fournie par l'équipe SCISYS (mais sans l'information PANCAM) est présenté sur la Figure 2-17.

Nous avons fourni aux membres de l'équipe SCISYS nos données « simplifiées » (en ne prenant qu'un point sur trois dans les deux dimensions « temps » et « distance »), qui nous ont alors retourné une visualisation des données WISDOM en accord avec la localisation géographique du rover et les données de navigation. Ce type de visualisation, couplée aux données d'autres instruments tels que PANCAM peut permettre une mise en contexte géologique intéressante. Bien évidemment, une réelle interprétation du sous-sol ne peut être faite à partir de ces données simplifiées, cependant l'outil est encourageant et mérite d'être développé davantage pour une visualisation complète de toutes les informations disponibles en un endroit donné, en surface et en profondeur. La figure ci-dessous représente le Sol 2, effectué juste avant le passage sur la fameuse zone plus claire de Zittau.

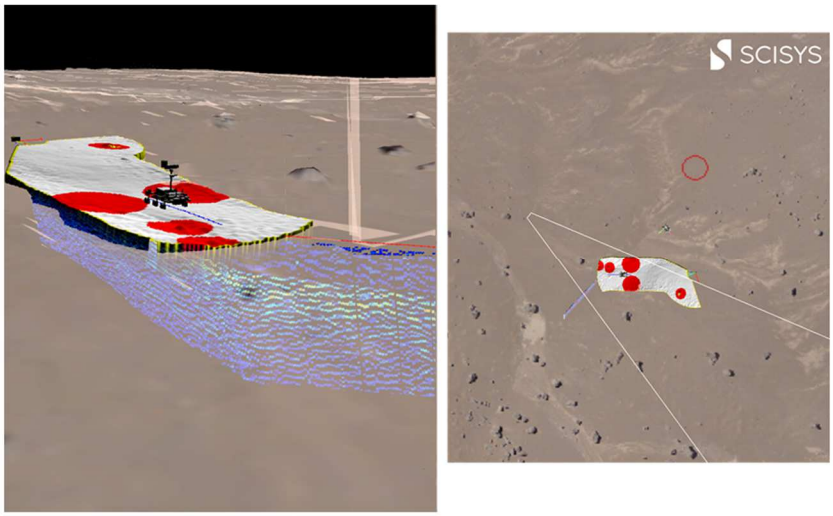


Figure 2-17 : Visualisation proposée par SCISYS pour coupler les données de surface et les données WISDOM

6.2.2.2 L'Etna

La campagne de mesures sur l'Etna a été effectuée dans des conditions peu propices : le sol était très humide du fait de nombreuses averses. Ainsi, on pénètre difficilement dans le sous-sol et la résolution est rapidement dégradée car les hautes fréquences sont vite atténuées. On peut cependant distinguer deux unités différentes sur le radargramme de la Figure 2-18 : la première, d'une épaisseur d'environ 80 cm, correspond à des dépôts pyroclastiques[2], visibles sur la photographie. Elle est « horizontale », constituée de strates rugueuses d'une dizaine de centimètres d'épaisseur, empilées les unes sur les autres et plutôt « désorganisées ».

La deuxième unité est semblable en termes de dépôts mais présente une forte inclinaison en début de profil. Il est possible que ces couches constituent les témoins de plusieurs éruptions successives (l'épaisseur d'une couche de lave est en effet très variable et dépend de la pente locale, de la viscosité du fluide et de sa composition), ou qu'il s'agisse d'une seule éruption dont le contenu se serait refroidi et donc figé progressivement, en plusieurs étapes, laissant ainsi des strates légèrement différentes en termes de propriétés diélectriques. Il est cependant difficile de déterminer si l'épaisseur des couches constituant cette unité est en moyenne plus importante que celle des dépôts pyroclastiques les plus récentes, ou si la perte de résolution due au fait que les hautes fréquences ne pénètrent plus entraine cette augmentation de l'épaisseur apparente.

[2] Les coulées pyroclastiques caractérisent un mélange à haute température de gaz volcaniques, de vapeur d'eau et de particules solides (fragments de lave, de ponces..) qui s'écoule à grande vitesse au voisinage du sol, fortement soumis à la gravité et guidé par la topographie avec un flux plutôt laminaire. Ce type d'écoulement résulte souvent de l'effondrement d'un panache volcanique.

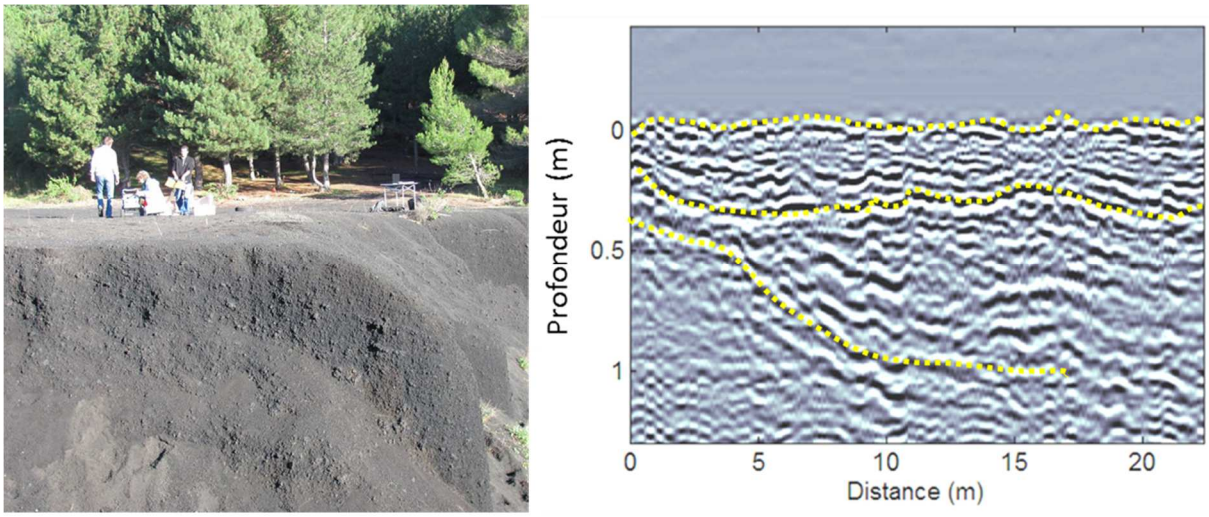


Figure 2-18 : A droite : une des zones investiguées durant la campagne de mesures sur l'Etna. A droite : exemple de radargramme acquis avec quelques couches bien identifiées en jaune.

WISDOM, bien que moins performant dans les milieux à pertes, permet tout de même d'observer des figures de dépôts caractéristiques et une interprétation (certes limitée) du contexte géologique. Nous allons voir qu'il est encore possible d'améliorer notre interprétation en tentant de reconstruire le sous-sol en 3D.

6.3 Reconstitution du sous-sol en 3 dimensions

6.3.1 Les strates

En effectuant plusieurs profils parallèles et perpendiculaires, il est possible, connaissant la constante diélectrique du milieu, de reconstruire en 3 dimensions les couches identifiées sur les radargrammes. C'est ce que nous avons tenté de faire pour le cas de l'Etna (Figure 3-1) ainsi que pour la grille effectuée à Dachstein avec le rover « Magma-White » (Figure 3-2), ou une strate inclinée a été détectée sur plusieurs profils.

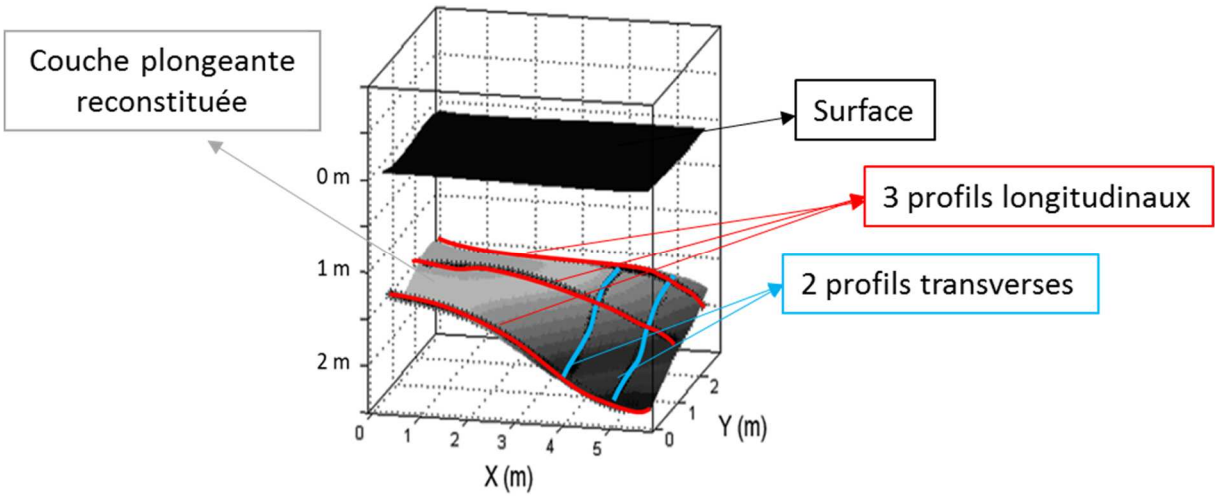


Figure 3-1 : Reconstitution 3D de la surface et d'une couche « plongeante » du sous-sol à partir de 5 profils acquis pendant la campagne de mesures sur l'Etna (extrait de Ciarletti et al., 2012).

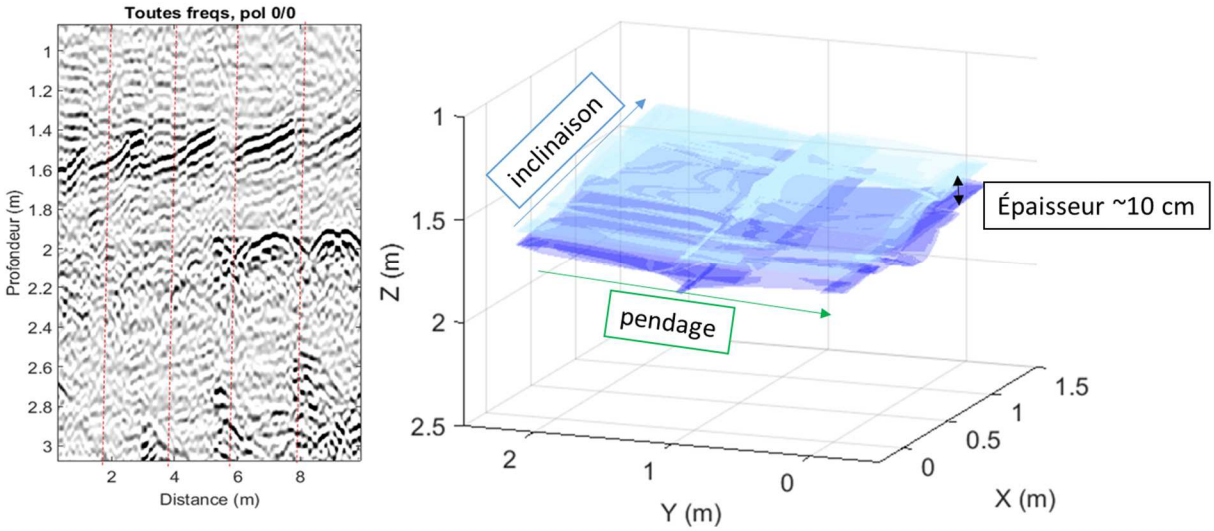


Figure 3-2 : Gauche : radargramme des profils acquis sous forme de grille au Dachstein sur le site D (mis bout à bout). Les profils sont séparés par les pointillés rouges. Droite : reconstitution en 3D de la couche identifiée sur les radargrammes. En bleu clair, le haut de la couche, en bleu foncé, le bas de la couche.

Dans le cas de la campagne de Dachstein, il est intéressant de noter que la couche identifiée sur le site D se trouve « plongée » dans la glace. Autrement dit, on passe d'un milieu de permittivité réelle égale à ~3.2 à un milieu plus réfringent (probablement une couche présentant des inclusions de calcite, dont la valeur de permittivité réelle est proche de 7) à l'entrée de la couche, et d'un milieu plus réfringent à un milieu de constante diélectrique plus faible à la sortie de la couche. Lorsqu'on s'intéresse de plus près aux échos susnommés, on remarque en effet que le signe de l'écho change entre l'entrée et la sortie de la couche, comme illustré sur la Figure 3-3, qui correspond au troisième profil de la grille. On retrouve

ici le comportement que nous avions illustré par simulation grâce au code de lancer de rayons, dans le Chapitre 4 de ce manuscrit.

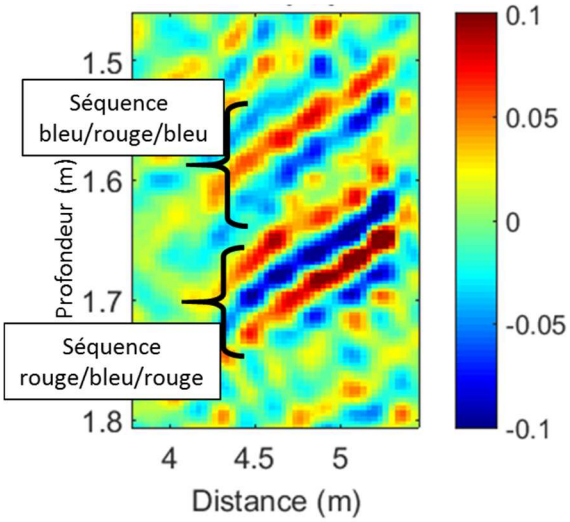


Figure 3-3 : Zoom sur la couche identifiée lors du sondage sous forme de grille (3ème profil) sur le site D. Les signatures en haut et en bas de la couche ont des signes inversés, témoignant du passage vers un milieu plus réfringent en haut et moins réfringent en bas.

Des informations complémentaires peuvent également provenir de la comparaison entre les données acquises en copolarisation et crosspolarisation, comme l'illustre la Figure 3-4, sur laquelle on observe à environ 1 m de profondeur à mi-profil l'apparition d'une strate inclinée en crosspolarisation, invisible sur le radargramme acquis en copolarisation. Ceci suggère que cet écho correspond à une structure dont l'inclinaison 3D favorise un changement d'orientation du champ électrique à la réflexion.

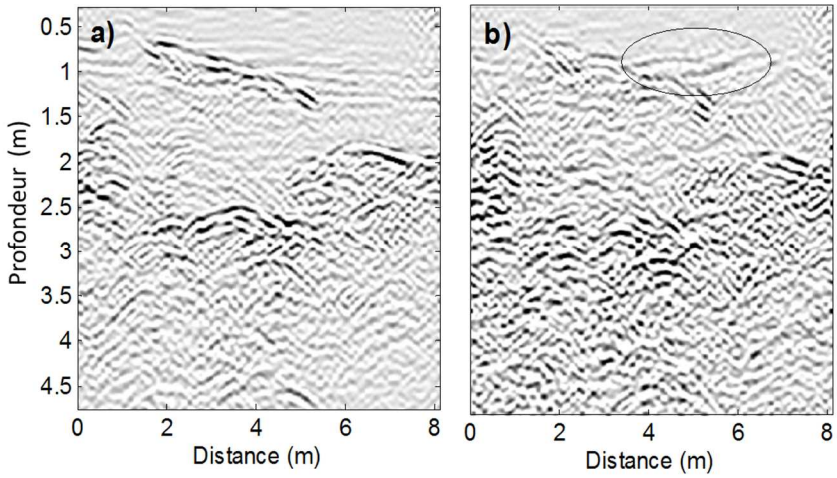


Figure 3-4 : Radargrammes acquis sur le site B à Dachstein, en copolarisation (gauche) et crosspolarisation (droite). On note l'apparition d'une couche inclinée en crosspolarisation, invisible sur le radargramme de gauche.

Ceci est intéressant dans le contexte de la mission ExoMars 2018 : en reconstituant ainsi les différentes couches du sous-sol, on pourra guider la foreuse vers des zones intéressantes et accessibles en termes de profondeur à atteindre. Le fait de pouvoir « suivre » une couche peut également aider à identifier des affleurements (Figure 3-5), qui pourront ensuite être étudiés par les différents instruments à bord du rover (notamment PanCam, MicrOmega, le spectromètre RLS ou encore MOMA).

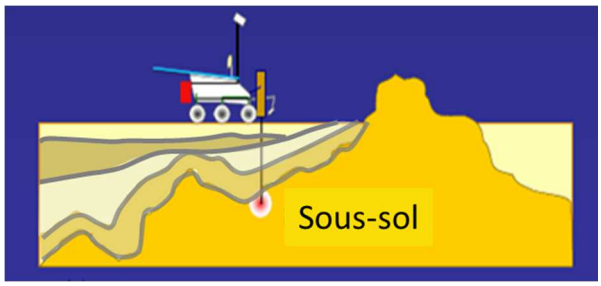


Figure 3-5 : Illustration de l'intérêt de pouvoir suivre des couches du sous-sol jusqu'à des affleurements potentiels.

6.3.2 Les diffuseurs

A partir de la méthode que nous avons décrite dans la première partie de ce chapitre, nous avons reconstruit une carte en 3D qui représente les localisations les plus probables des différents diffuseurs que nous avons identifiés sur la grille effectuée sur le site B au cours de la campagne de Dachstein. Tous les profils en copolarisations 1/1 et 0/0 ont été utilisés pour produire cette carte. Les diffuseurs localisés sur les bords de la grille sont moins bien contraints que ceux situés au milieu, qui apparaissent sur plus de radargrammes. Pour chacun de ces diffuseurs, nous avons estimé la constante diélectrique moyenne du milieu. Ainsi, les diffuseurs donnant une valeur de $\varepsilon'=1$ ont été retirés, étant donné qu'ils correspondent à des objets en surface.

La carte 3D obtenue en cartographiant les diffuseurs fournissant des valeurs de constante diélectrique comprises entre 3 et 3,4 est présentée sur la Figure 3-6. Comme nous l'avons déjà expliqué, ces valeurs correspondent à la permittivité réelle moyenne entre la surface et les diffuseurs. Les diffuseurs, situés entre 1,5 m et 2,5 m de profondeur, sont donc soit localisés à l'interface entre la glace et le socle rocheux, soit piégés dans la glace, soit piégés dans un matériau glacé avec un taux important de poussières ou d'eau liquide.

La représentation 3D montre que sur le site B, la transition entre la glace et le socle rocheux apparaît entre 1,5 m et 3 m de profondeur. La couche de glace a donc une épaisseur d'environ 1,8 m, avec très peu de diffuseurs jusqu'à atteindre le socle. La comparaison entre les radargrammes et notre reconstitution 3D nous permet de conforter cette interprétation (Figure 3-7).

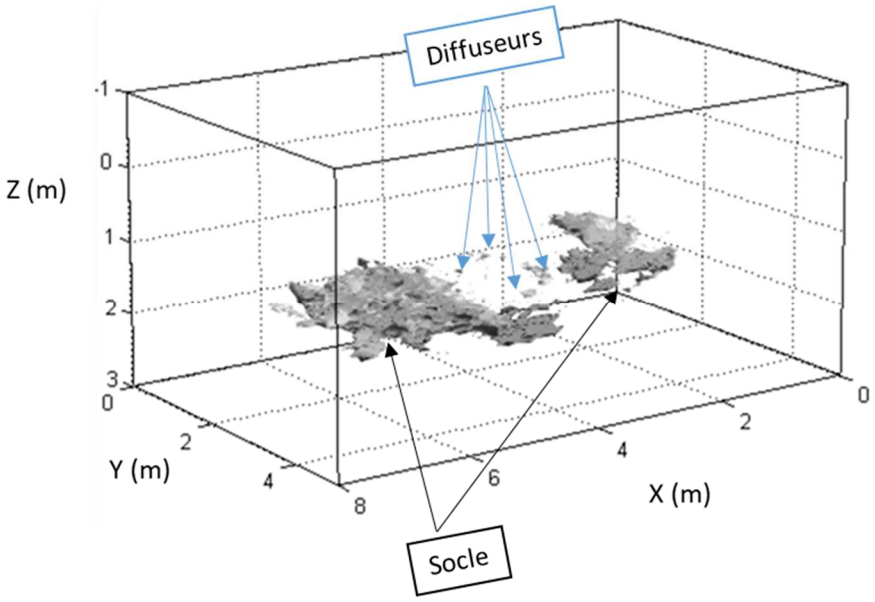


Figure 3-6 : Reconstitution 3D du socle rocheux identifié sur le site B, basée sur la méthode décrite en 6.1

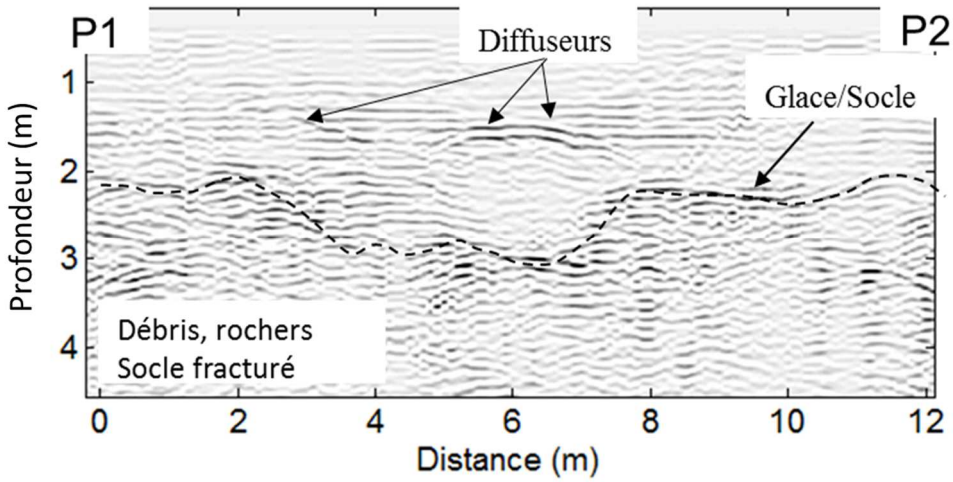


Figure 3-7 : Radargramme acquis sur la diagonale de la grille (voir Figure 2-1) sur le site B à Dachstein.

Le radargramme de la Figure 3-7 est en très bon accord avec la reconstitution 3D : on remarque les diffuseurs piégés dans la glace entre 4 m et 7 m vers 1.8 m de profondeur, et le socle rocheux qui peut-être soit constitué d'un assemblage de diffuseurs, soit extrêmement fracturé, les failles possédant le même type de signature que les diffuseurs sur les radargrammes. On note cependant quelques différences dues au fait que les radargrammes ne représentent pas une coupe 2D du sous-sol réel, mais plutôt une projection déformée sur un plan.

Conclusion

Une interprétation complète des données acquises avec WISDOM passe par l'estimation des paramètres diélectriques des différentes unités géologiques identifiées, mais aussi par une approche plus géométrique des données pour « reconstituer » le sous-sol le plus précisément possible, éventuellement en 3 dimensions, et comprendre les processus de dépôts qui ont abouti à la morphologie observée sur les radargrammes. Cette interprétation géologique nécessite de créer une base de données WISDOM en interaction avec des environnements divers, ce que nous avons initié avec plusieurs campagnes de mesures, sur l'Etna, à Dachstein ou encore dans le désert d'Atacama. Ceci nous a permis d'identifier des morphologies de dépôts en contextes géologiques variés, que nous pourrons ensuite comparer aux données martiennes. Les objectifs d'ExoMars 2018 concernant WISDOM passent également par le guidage du rover et de la foreuse vers des sites d'intérêt suffisamment sécurisés. Ceci nécessite de pouvoir « suivre » les différentes couches identifiées pour déterminer la position en surface la plus propice pour un forage, ou d'identifier les affleurements intéressants pour permettre à d'autres instruments de conduire une analyse complète. Des acquisitions sous forme de grille nous permettent de reconstituer ces couches en 3 dimensions, comme nous l'avons montré pour les cas de Dachstein et de l'Etna. La restitution complète du sous-sol nécessite également de retrouver les positions des objets enfouis dans le sous-sol : nous avons ainsi mis au point une méthode basée sur l'amplitude des signatures des diffuseurs en fonction de la configuration polarimétrique des antennes pour estimer la position relative des objets par rapport au déplacement du radar le long d'un profil. On obtient une première information qui nous indique si l'objet étudié se trouve à gauche, au-dessous, ou à droite du profil. Lorsqu'on effectue des grilles d'acquisition avec plusieurs profils parallèles et/ou perpendiculaires, il est possible de recouper ces informations, pour finalement aboutir à la position exacte des diffuseurs. Notre méthode a d'abord été testée dans des configurations simples pour estimer la précision obtenue et le nombre de profils requis pour une restitution exacte des positions et des dimensions des objets, pour être ensuite appliquée dans le cadre de la campagne de mesures de la Mars Simulation 2012 à Dachstein.

WISDOM, une fois les données analysées avec les méthodes que nous avons développées, est donc un outil qui autorise une interprétation complète des sous-sols, avec des informations quantitatives sur la constante diélectrique, mais aussi en termes de morphologie, d'histoire et de contexte géologique, qui permettront d'orienter les forages comme l'exigent les objectifs de la mission ExoMars 2018.

Références

Behm, M. and Hausmann, H., 2008, Determination of ice thicknesses in Alpine caves using géoradar. Proceedings of the 3rd International Workshop on Ice.

Ciarletti, V., Clifford, S. M., Plettemeier, D., Mangold, N., Petinelli, E., Herique, A., Heggy, E. (2012). Analyzing the Shallow Martian Subsurface with the WISDOM GPR. LPI Contributions, 1679, 4201.

Dorizon, S., Ciarletti, V., Plettemeier, D., Benedix, W. S. (2015). Performance validation of the ExoMars 2018 WISDOM GPR in ice caves, Austria. Planetary and Space Science.

Groemer, G., Luger, U., Sander, K., Plettemeier, D., 2012, Dachstein Mars Simulation 2012 Mission_Report, https://www.researchgate.net/publication/235753475_Dachstein_Mars_Simulation_2012Mission_Report

Hausmann, H. and Behm, M., 2011, Imaging the structure of cave ice by GPR. The Cryosphere, 5, 329–340.

Martinez, A., and Byrnes, A., 1999, Dielectric probe procedures: Kansas Geological Survey, Open-file Report 99-1, 17 p

Meszyński, S. and Józefowicz, M., 2013, Analog Mars Rover Service as a Robotic Hardware and Team Building Platform. GSTF Journal of Engineering Technology (JET), Vol. 2 No. 3.

Paar, G., Hesina, G., Traxler, C., Ciarletti, V., Plettemeier, D., Statz, C., Sander, K., Nauschnegg, B. (2015). Embedding sensor visualization in martian terrain reconstructions. Astra.

Conclusion et Perspectives

La technique radar, basée sur l'interaction des ondes électromagnétiques avec les hétérogénéités diélectriques des milieux, a montré sa pertinence pour de nombreuses applications sur Terre telles que l'archéologie ou la géotechnique, mais également pour l'exploration et l'auscultation des sous-sols planétaires, comme nous avons pu le constater à travers les cas de MARSIS et SHARAD pour la compréhension du sous-sol martien ou encore le radar de la sonde Cassini pour l'étude de Titan. Dans le cas de Mars, de nombreuses informations concernant la surface de la planète ont été récoltées, grâce aux suites instrumentales envoyées en orbite ou sur sa surface. Ces données nous ont ainsi permis de reconstruire de façon partielle l'histoire de la planète rouge, et l'on sait aujourd'hui qu'au cours du Noachien, l'équivalent de notre période Archéenne sur Terre, l'eau a coulé en abondance et a perduré en surface, néanmoins sur une période plus restreinte que sur notre planète qui, elle, est toujours bien bleue. Un climat chaud et humide, d'après les analyses effectuées sur Terre, est propice à l'apparition et au maintien de la vie telle que nous la connaissons. C'est pourquoi l'une des nouvelles aspirations de l'exploration martienne est de partir en quête de traces potentielles d'une activité biologique, qu'elle soit présente ou passée. Il ne s'agit pas ici de rechercher des fossiles ou les ruines d'une ancienne civilisation, comme l'ont pensé certains astronomes pendant le 16ème siècle, mais plutôt de traquer d'éventuels témoins d'une activité microbienne. Aujourd'hui aride, froide et inondée de radiations, la surface de Mars n'autorise pas la préservation de ces traces en surface. La reconstruction seulement partielle de l'histoire de la planète rouge, notre méconnaissance de son sous-sol et la protection qu'il peut offrir pour ces fameuses traces nous poussent donc tout naturellement à explorer ses profondeurs.

Le volet 2018 de la mission ExoMars aura pour objectif de déposer à la surface de Mars, sur le site d'Oxia Planum, un rover équipé d'une suite instrumentale dont la vocation est l'étude de l'environnement martien et de la composition de son sol, avec un objectif spécifique qui est la recherche de traces de vie passée ou présente. Une foreuse permettra la récolte d'échantillons jusqu'à environ 2 mètres de profondeur. Il s'agit donc d'étudier l'exobiologie martienne et son habitabilité potentielle à travers l'analyse des variations de l'environnement géochimique avec la profondeur. Afin de trouver les endroits propices à la préservation de ces traces de vie, il est nécessaire de connaître le contexte géologique du milieu : le but est de caractériser la nature du sous-sol et d'identifier les figures de dépôts à fort potentiel exobiologique, en se basant sur notre connaissance des milieux terrestres propices à l'émergence et au

développement de l'activité microbienne, tels que les environnements fluviatiles, les dépôts sédimentaires ou les plaines alluvionnaires.

C'est dans ce cadre que le radar à pénétration de sol WISDOM, sélectionné pour faire partie de la charge utile de la mission, interviendra : conçu pour explorer les premiers mètres du sous-sol avec une résolution verticale de quelques centimètres, WISDOM fonctionne sur une large bande de fréquences entre 0,5 GHz et 3 GHz. Ses objectifs sont multiples : d'une part, le GPR aidera à définir le contexte géologique du site d'Oxia Planum, en tentant de détecter et caractériser la structure du proche sous-sol sur quelques mètres de profondeur, en termes de stratigraphie, de figures de dépôts ou de localisation d'objets enfouis. Une interprétation quantitative des données permettra d'estimer les paramètres diélectriques des unités géologiques identifiées, qui peuvent aider à contraindre leurs natures et leurs compositions. D'autre part, l'intérêt du GPR réside dans le guidage du rover et de la foreuse vers des sites d'intérêt, suffisamment sécurisés.

Tout l'enjeu de cette thèse était de développer les outils qui permettraient, à partir des données récoltées par l'instrument, de quantifier les caractéristiques électromagnétiques des environnements sondés et de « reconstruire » le sous-sol le plus finement possible en termes de structure, figures de dépôts, orientation des différentes couches et localisation des diffuseurs enfouis. L'objectif principal était donc d'utiliser le prototype disponible et de développer les bons outils qui permettront de tirer parti des nombreux atouts de l'instrument WISDOM.

Nous avons, dans ce manuscrit, défini le contexte général de ce travail de thèse à travers les deux premiers chapitres, dédiés d'une part à un état des lieux de nos connaissances sur l'histoire de Mars et à la notion d'exobiologie, et d'autre part à l'introduction des principes de fonctionnement et de dimensionnement des radars. Nous avons ainsi montré tout l'intérêt et la pertinence de la technique GPR pour ausculter les sous-sols planétaires, et pointé l'enjeu et la difficulté d'un bon dimensionnement instrumental à travers le cas de WISDOM, conçu pour remplir les objectifs de la mission ExoMars 2018. Lors de la conception d'un radar, il convient en effet de définir les paramètres instrumentaux en fonction des objectifs de profondeur et de résolution à atteindre et en tenant compte des a priori disponibles sur les propriétés du milieu à sonder. Nous nous sommes également attachés à évaluer les performances de l'instrument, via des tests en laboratoire et grâce à deux méthodes de modélisation, l'une que nous avons développée (lancer de rayons) et l'autre qui nous a été fournie (TEMSI-FD) par le laboratoire Xlim. Celles-ci sont complémentaires et offrent un grand nombre de possibilités, tant pour l'aide au dimensionnement de l'instrument WISDOM qu'à l'interprétation des données ou à la prédiction des performances de l'instrument en interaction avec des environnements divers dans des conditions réalistes (interfaces rugueuses, milieux à pertes). Ces simulations nous ont permis de confirmer que les paramètres de fréquence centrale et de largeur de bande choisis pour WISDOM permettent d'atteindre les objectifs de profondeur de détection et de résolution nécessaires au bon déroulement de la mission

ExoMars. La planète rouge avec sa surface oxydée n'étant pas un milieu propice à la pénétration des ondes électromagnétiques, d'autres modélisations devraient être conduites pour quantifier l'impact des pertes dans les milieux sondés en fonction des estimations de conductivité qui ont été faites en surface, tout en faisant varier l'épaisseur des différentes couches qui pourraient être rencontrées.

Une interprétation fine des résultats issus des mesures du GPR WISDOM nécessite non seulement de tester le prototype sur des environnements variés afin de créer une base de données comparative pour les futures mesures sur Mars, mais aussi de mettre au point des méthodes de quantification des propriétés diélectriques du sous-sol à partir des données. Nous avons ainsi développé deux méthodes, l'une qui s'appuie sur l'exploitation de l'écho de sol via une réflexion sur un conducteur parfait, qui donne accès à la constante diélectrique en surface, et l'autre qui s'intéresse à la signature des diffuseurs présents dans le sous-sol pour en déduire la constante diélectrique moyenne du milieu et la profondeur des objets. Dans le but de valider et d'évaluer les performances des outils que nous avons développés, nous avons pris soin de les éprouver en effectuant des simulations et des tests en environnements contrôlés avec le prototype de l'instrument. Force est de constater que nos résultats sont très encourageants et permettent de restituer les paramètres susnommés avec une bonne précision.

Nous avons également tenté de quantifier l'impact de certains paramètres tels que la rugosité sur la qualité de nos résultats. Ceci permettra à terme de corriger les estimations de la constante diélectrique en accord avec la rugosité apparente vue par l'instrument pour différentes gammes de fréquences. Bien qu'encourageantes, les simulations et tests conduits sur des sols aux gammes de rugosité variées ne nous ont pas permis de dégager une loi claire pour la correction de nos estimations de la constante diélectrique, mais uniquement de déduire une limite pour laquelle l'erreur commise est supérieure à 10%. D'autres modélisations, confrontées à des tests en environnements précisément connus via des mesures conjointes de l'humidité, de la constante diélectrique, de la topographie et de sondages WISDOM devraient affiner ces résultats. Ces modélisations ayant été faites en deux dimensions, nous encourageons en outre l'ajout d'une troisième dimension pour étudier la rugosité et son impact en conduisant des tests et simulations avec des acquisitions sous forme de grille, pour différentes configurations polarimétriques des antennes.

Les méthodes de quantification des paramètres diélectriques en surface et en profondeur développées au cours de la thèse ont ensuite été utilisées pour exploiter les données des différentes campagnes de mesures dans des milieux aux propriétés variées, notamment les campagnes de Dachstein et SAFER qui nous ont permis de nous immerger au cœur de projets directement liés à l'exploration exobiologique martienne dans des conditions très proches de celles d'une mission spatiale réelle. Riches en enseignements, ces campagnes ont été l'occasion de collaborer avec des équipes scientifiques internationales, d'évaluer les performances de WISDOM, les possibilités de synergies instrumentales avec les autres instruments sélectionnés pour ExoMars, ou encore de parfaire nos méthodes de traitement

et d'interprétation des données. Dans le cas de la mission SAFER dans le désert d'Atacama au Chili, nous avons produit des cartes de la répartition géographique de la constante diélectrique en surface et estimé le gradient vertical de la permittivité. L'exploitation des données acquises lors de la Mars Simulation 2012 à Dachstein nous a permis de reconstituer l'environnement dans les grottes glacées et de caractériser les milieux rencontrés en termes de structure, composition. Cette campagne a donné lieu à une publication dans Planetary and Space Science en 2015.

Ces outils d'interprétation nous ont donc permis d'en apprendre davantage sur les propriétés diélectriques de la surface et du sous-sol, nous autorisant à émettre des hypothèses sur leur nature et leur composition. Une étude plus poussée de l'impact des paramètres associés aux pertes dans les milieux naturels (tels que la conductivité) sur les données acquises avec le GPR est cependant conseillée : ceci pourrait permettre de discriminer des terrains de différentes natures ou compositions dont les valeurs de constantes diélectriques seraient similaires. Nous estimons en outre que la caractérisation d'analogues martiens sur de larges bandes de fréquences est précieuse et devrait être encouragée, bien qu'elle soit à manier avec précautions dans le cadre de la comparaison avec les sondages GPR du fait de sa nature destructive.

Enfin, la mise en contexte géologique et le guidage du rover nécessitent une analyse géométrique des données, pour reconstituer le sous-sol avec le plus de précision possible. Les antennes de WISDOM de type Vivaldi, dont une particularité importante réside dans la capacité à effectuer des mesures selon quatre modes de polarisation différents, constitue une aide précieuse pour une interprétation fine et géométrique des données. L'exploitation des différents modes polarimétriques nous a autorisés à mettre au point une méthode basée sur l'amplitude des signatures des diffuseurs en fonction de la polarisation des antennes pour estimer la position relative des objets par rapport au déplacement du radar le long d'un profil. On obtient une première information qui nous indique si l'objet étudié se trouve à gauche, au-dessous, ou à droite du profil. Lorsqu'on effectue des grilles d'acquisition avec plusieurs profils parallèles et/ou perpendiculaires, il est possible de recouper ces informations, pour finalement aboutir à la position exacte des diffuseurs et à une reconstruction du sous-sol en 3 dimensions. Notre méthode a d'abord été testée dans des configurations simples pour estimer la précision obtenue et le nombre de profils requis pour une restitution exacte des positions et des dimensions des objets, pour être ensuite appliquée dans le cadre de la campagne de mesures de la Mars Simulation 2012 à Dachstein. La méthode que nous avons développée permet de restituer la position et la taille des objets avec une excellente précision, surpassant la résolution théorique de l'instrument dans les cas les plus favorables. Des acquisitions sous forme de grille nous permettent également de reconstituer en 3 dimensions les couches identifiées sur plusieurs radargrammes, comme nous l'avons montré pour les cas de Dachstein et de l'Etna.

WISDOM, une fois les données analysées avec les outils d'interprétation que nous avons développés, est donc un outil puissant qui autorise une interprétation complète des sous-sols et une mise en contexte géologique, avec des informations quantitatives qui contraignent les milieux étudiés en termes de composition, de taux d'humidité ou de degré de compaction, mais aussi en termes de morphologie et de figures de dépôts, nécessaires à une reconstruction chronologique des évènements. Certes, des améliorations sont envisageables, et nous attendons d'ores et déjà de nouveaux développements intéressants pour les prochaines années, avec une nouvelle thèse démarrée en 2015 par Y. Hervé.

Tout ceci est réellement prometteur pour l'orientation pertinente des forages vers des lieux à fort potentiel exobiologique, comme l'exigent les objectifs de la mission ExoMars 2018. L'impatience (malgré tout limitée par les délais de livraison de l'instrument qui nécessitent un emploi du temps serré) grandit au sein de l'équipe WISDOM, enthousiasmée par la récolte « imminente » de données martiennes réelles.

D'autres missions, dans lesquelles des versions légèrement modifiées de l'instrument WISDOM pourraient potentiellement être parties prenantes, sont actuellement à l'étude, notamment le projet AIM (Asteroid Impact Mission) de l'ESA qui s'inscrit dans le cadre de la mission conjointe ESA/NASA AIDA (Asteroid Impact & Deflection Assessment mission), où l'instrument pourrait être employé pour caractériser le régolithe et sonder l'intérieur (proche sous-surface) d'un astéroïde binaire proche de la Terre (Crotts, A et al., 2015). On parle également du potentiel d'un tel GPR dans le cadre de projets d'exploration lunaire, pour étudier la présence de volatils dans le sous-sol et caractériser leur abondance en fonction de la profondeur, avec une très bonne résolution dans les premiers mètres du régolithe (Ciarletti et al., 2015).

Références

Crotts, A., Heggy, E., Ciarletti, V., Colaprete, A., Moghaddam, M., Siegler, M. (2015, December). Detecting Volatiles Deep in the Lunar Regolith. In AGU Fall Meeting 2015 (pp. P51D-06).

Ciarletti, V., Hérique, A., Plettermeier, D. (2015, December). Two radars for the AIM mission to characterize the regolith and deep interior structure of the asteroid. In AGU Fall Meeting 2015 (pp. NH11A-1893).

Annexes

Annexe A : Fichier de données WISDOM

```
-------------------------------------------------------------------
-----------------------------------
                                          ---REV_REPORT---
-------------------------------------------------------------------
-----------------------------------
      CHECKSUM : 0x0xD723
      EGSE_VERSION : 0x0x0B
      PCB_version : 0xC
      FIRMWARE_version : 0x24
      SOFT_version : 0x10
```

Versions utilisées pour l'électronique et le logiciel d'acquisition

```
-------------------------------------------------------------------
-----------------------------------
                                          ---HK_REPORT---
-------------------------------------------------------------------
-----------------------------------
          Voltage +5V                 := 17554
          Voltage +3.3V               := 20314
          Voltage +1.5V               := 14195
          Voltage -5V                 := -2273
          Voltage +8V                 := 22815
          Voltage +15V                := 32767
          Temperature DC/DC board     := 32767
          Primary current             := 19154
          Temperature RF board        := 14463
          Temperature hot spot RF board := 15220
          Temperature FPGA            := -32752
          Temperature Mag antenna     := -32752
          Test voltage                := -32752
          Temperature PCB FPGA board := -551
-------------------------------------------------------------------
-----------------------------------
                                          ---SCI_REPORT---
-------------------------------------------------------------------
-----------------------------------
```

Mesure des voltages et des températures internes à l'électronique, en entrée et sortie des chaines de transmission et réception, avant mesure

Mesures pour une acquisition : partie réelle du signal retour sur 1081 fréquences, de 0,5 GHz à 3 GHz

---

```
-------------------------------------------------------------------
-----------------------------------
                                          ---HK_REPORT---
-------------------------------------------------------------------
-----------------------------------
          Voltage +5V                 := 2910
          Voltage +3.3V               := 3530
          Voltage +1.5V               := 3971
          Voltage -5V                 := 4226
          Voltage +8V                 := 4358
          Voltage +15V                := 4427
          Temperature DC/DC board     := 4566
          Primary current             := 4726
          Temperature RF board        := 4850
          Temperature hot spot RF board := 4796
          Temperature FPGA            := 4478
          Temperature Mag antenna     := 3867
          Test voltage                := 2895
          Temperature PCB FPGA board := 1847
```

Mesure des voltages en entrée et sortie des chaines de transmission et réception, après acquisition

Mesure des températures et courants internes à l'électronique, pour chacun des composants, après acquisition

---

Annexe B : Liste des communications

Articles dans des revues avec comité de lecture :

2016

Performance validation of the ExoMars 2018 WISDOM GPR in ice caves, Austria
Dorizon S., Ciarletti V., Plettermeier D., Benedix W.-S.
Planetary and Space Science, Elsevier, 2016, 120, pp.1-14. <10.1016/j.pss.2015.10.008> - insu-01227813

2014 (hors travail de thèse)

Geophysical and geochemical methods applied to investigate fissure-related hydrothermal systems on the summit area of Mt. Etna volcano (Italy)
Maucourant S., Giammanco S., Greco F., Dorizon S., Del Negro C.
Journal of Volcanology and Geothermal Research, Elsevier, 2014, 280, pp.111-125. <10.1016/j.jvolgeores.2014.05.014> - hal-01053869

Communications avec actes

2015

Modelling the performances of the WISDOM radar on the Oxia Planum potential landing site for ExoMars
Ciarletti V., Hervé Y., Dorizon S., Le Gall A., Quantin C., Broyer J., Davis J., Grindrod P.
European Planetary Science Congress 2015, Sep 2015, Nantes, France. 10, pp.EPSC2015-574, 2015 - insu-01211292

2014

WISDOM GPR investigations in a Mars-analog environment during the SAFER rover operation simulation
Dorizon S., Ciarletti V., Plettemeier D., Vieau A.-J., Benedix W.-S., Mütze M., Hassen-Khodja R., Humeau O.
European Planetary Science Congress 2014, Sep 2014, Cascais, Portugal. 9, pp.EPSC2014-559, 2014 - hal-01121084

2013

WISDOM GPR Investigations of Ice Thickness, Stratigraphy, Structure and Basal Topography in an Alpine Ice Cave in Dachstein, Austria
Ciarletti V., Clifford S. M., Plettemeier D., Dorizon S., Statz C., Lustrement B., Humeau O., Hassen-Khodja R., Galic A.
Lunar and Planetary Institute. *44th Lunar and Planetary Science Conference*, Mar 2013, The Woodlands, United States. LPI Contribution No. 1719, p.2365 - hal-00908399

Subsurface properties retrieval from the ExoMars WISDOM GPR data.
Dorizon, S., & Ciarletti, V. (2013, September).
European Planetary Science Congress 2013, held 8-13 September in London, UK.
http://meetings.copernicus.org/epsc2013, id. EPSC2013-434 (Vol. 8, p. 434).

In situ sounding of the shallow subsurface with a Radar to understand the nature of the landing site.
Ciarletti, V., Plettermeier, D., Dorizon, S., Clifford, S. M., & Statz, C. (2013, September).
European Planetary Science Congress 2013, held 8-13 September in London, UK. Online at:
http://meetings.copernicus.org/epsc2013, id. EPSC2013-555 (Vol. 8, p. 555).

WISDOM à bord du rover ExoMars en 2018 : Un GPR haute résolution pour caractériser le proche sous-sol de Mars
Dorizon S.
Exobiologie Jeunes Chercheurs (EJC), Nov 2013, Paris, France.

WISDOM GPR aboard the ExoMars rover: a powerful instrument to investigate the state and distribution of water in the Martian shallow subsurface.
Dorizon, S., Ciarletti, V., Clifford, S. M., & Plettemeier, D. (2013, December).
AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 1, p. 07).

2012

Wisdom GPR measurements in a cold artificial and controlled environment
Dechambre M., Biancheri-Astier M., Ciarletti V., Dorizon S., Hassen-Khodja R., Saintenoy A., Costard F., Sejourne A.
IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Jul 2012, Guyancourt, France. IEEE, pp.606-609, 2012, <10.1109/IGARSS.2012.6351521> - hal-00753818

Autres

2014

WISDOM GPR subsurface investigations in the Atacama desert during the SAFER rover operation simulation
Dorizon S., Ciarletti V., Vieau A.-J., Plettemeier D., Benedix W.-S., Mütze M., Hassen-Khodja R., Humeau O.
EGU General Assembly 2014, Apr 2014, Vienna, Austria. pp.16078 - hal-01053871 - (Communications sans actes)

2013

Investigation of an alpine ice cave in Austria with the EXOMARS WISDOM GPR
Ciarletti V., Clifford S., Plettemeier D., Dorizon S., Statz C., Lustrement B., Humeau O., Hassen-Khodja R., Galic A., Cais P.
EGU General Assembly 2013, Apr 2013, Vienna, Austria. 15, pp.EGU2013-11280, 2013 - hal-00944330 - (Communications sans actes)

Evaluation of the first simulation tool to quantitatively interpret the measurements of the ExoMars mission's Wisdom GPR
Dorizon S., Ciarletti V.
EGU General Assembly 2013, Apr 2013, Vienna, Austria - hal-00908390 - (Communications sans actes)

2012

Detecting and characterizing ice units with the WISDOM Radar
Ciarletti V., Plettemeier D., Dorizon S., Clifford S. M., Biancheri-Astier M., Dechambre M., Saintenoy A., Costard F.
AGU Fall Meeting, Dec 2012, San Francisco, United States - hal-00768955 - (Communications sans actes)