



HAL
open science

Le radar WISDOM à bord du Rover de la mission ExoMars : Caractérisation et préparation du retour scientifique

Yann Herve

► **To cite this version:**

Yann Herve. Le radar WISDOM à bord du Rover de la mission ExoMars : Caractérisation et préparation du retour scientifique. Planétologie et astrophysique de la terre [astro-ph.EP]. Université Paris Saclay (COMUE), 2018. Français. ⟨NNT : 2018SACLV071⟩. ⟨tel-02078240⟩

HAL Id: tel-02078240

<https://theses.hal.science/tel-02078240v1>

Submitted on 25 Mar 2019

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.



HAL Authorization

Le radar WISDOM à bord du Rover de la mission ExoMars : Caractérisation et préparation du retour scientifique

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à l'Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines

Ecole doctorale n°127 Astronomie et Astrophysique d'Île-de-France (AAIF)
Spécialité de doctorat : Astronomie et Astrophysique

Thèse présentée et soutenue à Guyancourt, le 13 Décembre 2018, par

YANN HERVÉ

Composition du Jury :

Richard Dusséaux Pr., LATMOS (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines/ Université Paris Saclay)	Président
Antoine Mocquet Pr., LPGNantes (Université de Nantes)	Rapporteur
Laetitia Thirion-Lefevre Pr., CentraleSupélec SONDRRA (Université Paris Saclay)	Rapporteur
Cathy Quantin-Nataf Pr., LGLTPE (Université Claude Bernard Lyon 1)	Examineur
Sylvain Bouley Dr., GEOPS (Université Paris Sud/ Université Paris Saclay)	Examineur
Jorge Vago Dr., European Space Agency	Examineur
Valérie Ciarletti Pr., LATMOS (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines/ Université Paris Saclay)	Directeur de thèse
Alice Le Gall Dr., LATMOS (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines/ Université Paris Saclay)	Co-directeur de thèse

Titre : Le radar WISDOM à bord du Rover de la mission ExoMars : Caractérisation et préparation du retour scientifique

Mots clés : Mars, radar, permittivité, sous-surface

Résumé : La recherche de trace de vie, passée ou présente, sur Mars est l'objectif principal de la mission martienne européenne ExoMars (ESA-Roscosmos), dont le lancement est prévu pour l'été 2020. Cette mission déposera à la surface de Mars un Rover équipé d'instruments dédiés notamment à l'étude du sous-sol de la planète dont une foreuse collectera des échantillons. Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit porte sur la préparation du retour scientifique de l'expérience du radar WISDOM (Water Ice and Subsurface Deposits Observation on Mars) embarqué à bord du Rover d'ExoMars 2020 et dont l'objectif principal est la caractérisation, avant forage, du sous-sol proche de Mars.

Les données recueillies par WISDOM permettront d'identifier les formations géologiques du sous-sol et de comprendre les processus qui en sont à l'origine. Elles guideront également les opérations de prélèvement d'échantillons en profondeur. L'objectif de cette thèse était de préparer les outils de traitements et d'interprétation de ces données. Les résultats obtenus doivent permettre d'exploiter au mieux les possibilités de l'instrument et d'atteindre

les ambitieux objectifs technologiques (en termes notamment de résolution et de sensibilité) et scientifiques fixés. Plus précisément, il s'agissait de mettre en place des outils pour aboutir à une description des premiers mètres du sous-sol via l'interprétation des radargrammes de WISDOM en termes d'épaisseur de couche(s), de rugosité des interfaces, de distribution en taille d'éventuelles roches enfouies, d'orientation des strates et de constantes géo-électriques pour les unités géologiques détectées.

Ce travail de thèse a permis la mise en place d'une chaîne de traitement de données ainsi que d'outils d'interprétation (traitement automatique et modélisation du radar). L'approche a été d'aborder le problème à la fois du point de vue théorique et du point de vue pratique. En conséquence, ce travail s'est appuyé sur deux aspects indissociables que sont, d'une part, la modélisation (analytique et numérique) du fonctionnement de l'instrument dans son environnement et, d'autre part, le traitement des données simulées et/ou expérimentales obtenues en milieu contrôlé ou lors de campagnes de mesures organisées dans le cadre de cette thèse.

Title : The WISDOM radar on board the Rover of the ExoMars mission: Characterization and preparation of the scientific return

Keywords : Mars, radar, permittivity, subsurface

Abstract : The main objective of European ExoMars (ESA-Roscosmos) mission is to search for signs of past or present life on Mars. The mission, to be launched in summer 2020, will deliver a rover on the surface of Mars. This rover accommodates instruments designed to investigate the close subsurface and, in particular, a drill that will collect samples at depth ranging from 0.5 m to 2 m. This thesis manuscript relates the preparation of the scientific return of the WISDOM (Water Ice and Subsurface Deposits Observation on Mars) radar experiment whose main objective is to characterize, before drilling, the shallow subsurface of Mars.

Data obtained by WISDOM will shed the light on geological structures in the subsurface and therefore help trace back the history of the investigated Martian sites. Furthermore, they will help to identify the most promising locations to collect samples without jeopardizing the drill. The objective of this thesis was to efficiently pave the way to data interpretation and

appraise WISDOM's potentiality.

In order to reach the ambitious scientific and technology objectives (especially in terms of resolution and sensitivity) of WISDOM, we have developed tools that rely on a deep understanding of the instrument. The ultimate goal of these tools is to provide a reliable representation of the shallow subsurface and quantitative interpretation in terms of thickness and orientation of underground layers, roughness at interfaces, distribution of buried rocks and geoelectrical constant for each geological unit detected.

This thesis manuscript describes the signal processing chain and tools developed in order to prepare WISDOM's scientific return. When possible, approaches based on automatic detection were preferred. This work relies both on theoretical and practical investigations, including an accurate (analytical and numerical) modeling of the instrument operations and test on experimental data acquired during field campaigns on potential Martian analogs.



Table des matières

Remerciements	V
Introduction	I
1 Mars et son sous-sol à portée des radars	1
1.1 Mars	2
1.1.1 La planète Mars	2
1.1.2 L'eau et Mars	5
1.2 De l'observation à l'exploration de Mars	14
1.2.1 L'observation de Mars : une histoire et des découvertes	14
1.2.2 ExoMars 2016	20
1.2.3 ExoMars 2020	22
1.3 Le sondage électromagnétique	26
1.3.1 Propagation des ondes électromagnétiques	26
1.3.2 Estimation de la constante diélectrique du proche sous-sol de Mars	30
1.3.3 Les radars à pénétration de sol (Ground Penetrating Radars)	34
1.4 L'exploration du sous-sol de Mars par les radars sondeurs MARSIS/MEX et SHARAD/MRO	36
1.4.1 MARSIS	36
1.4.2 SHARAD	40
1.5 Conclusion	44
2 Caractérisation du radar à pénétration de sol WISDOM/ExoMars 2020	45
2.1 L'instrument WISDOM	46
2.1.1 L'électronique de WISDOM (WEU)	47
2.1.2 Les antennes de WISDOM (WAA)	49
2.2 Étapes et développement d'un instrument pour une mission spatiale	52
2.2.1 Philosophie des modèles	52
2.2.2 La qualification	52
2.3 Caractérisation de l'instrument	55
2.3.1 Modélisation de la forme d'impulsion radar	55
2.3.2 Comparaison de la forme de l'écho en fonction des modèles	57
2.3.3 Bilan de liaison	59
2.3.4 Performances attendues	63
2.3.5 Comportement de WISDOM en fonction de la température	66
2.3.6 Mesures en espace libre	70
2.3.7 Mesures sur plaque métallique	72
2.3.8 Mesures sur cibles	74
2.4 Techniques d'acquisition	75
2.4.1 Additions cohérentes	75
2.4.2 Technique du gating	75

2.5	WISDOM en campagnes	76
2.5.1	Campagne sur le mont Etna (Italie)	77
2.5.2	Grottes glacées du Dachstein (Autriche)	77
2.5.3	La campagne SAFER (Chili/Angleterre)	78
2.5.4	Campagne dans le sud de la France	78
2.5.5	Campagne à Pérouze (Italie)	79
2.5.6	Terrain d'expérimentation (France)	79
2.5.7	Bilan de campagnes	81
2.6	Conclusion	82
3	Traitement des données du radar à pénétration de sol WISDOM/ExoMars 2020	83
3.1	Traitement des données WISDOM	84
3.1.1	Principe des radars à sauts de fréquences	84
3.1.2	Transformée de Fourier inverse	85
3.1.3	Fenêtre d'apodisation	85
3.1.4	Transformée de Hilbert	88
3.1.5	Filtrage	89
3.1.6	Construction d'un radargramme	89
3.1.7	Atténuation des réflexions parasites	91
3.1.8	Interpolation en temps et distance	92
3.1.9	Application d'un gain	94
3.1.10	Conclusion	95
3.2	Méthodes de réduction des réflexions parasites appliquées aux données du GPR WISDOM	96
3.2.1	Position du problème	96
3.2.2	Premier traitement	97
3.2.3	Filtrage en fréquence	99
3.2.4	Moyenne glissante	100
3.3	Méthodes par identification	101
3.3.1	Réduction des parasites par analyse de l'écho de sol (AES)	101
3.3.2	Méthode de la Soustraction par le Radargramme Décalé par translation temporelle (SRD)	102
3.4	Décomposition en valeurs singulières (SVD)	103
3.4.1	Décomposition d'une image par SVD	104
3.4.2	Décomposition d'une image "bruitée" par SVD	105
3.4.3	Application du filtrage par décomposition en valeurs singulières sur des données simulées	107
3.4.4	Application du filtrage par SVD aux données de WISDOM	108
3.5	Application des méthodes à des données expérimentales	110
3.5.1	Sélection du jeu de données	111
3.5.2	Résultats	111
3.6	Conclusion	115
4	Evaluation de l'algorithme haute résolution MUSIC pour le traitement des données de WISDOM / ExoMars 2020	117
4.1	Position du problème et définition	118
4.2	Modèle du signal	120
4.3	L'algorithme MUSIC (MUltiple SIgnal Classification)	120
4.4	Méthodes de décorrélation	121
4.4.1	Méthode du <i>Spatial Smoothing Preprocessing</i>	122
4.4.2	Méthode du <i>Modified Spatial Smoothing Preprocessing</i>	123
4.4.3	Evaluation des méthodes de décorrélation	123
4.5	Evaluation des performances de l'algorithme MUSIC	124

4.5.1	Evaluation des performances de MUSIC en fonction du SNR	125
4.5.2	Evaluation des performances de MUSIC sur des modèles de sol stratifiés	125
4.6	Application de l'algorithme MUSIC aux données WISDOM/ExoMars 2020	131
4.6.1	Evaluation de MUSIC sur des données de l'EM de WISDOM	131
4.6.2	Evaluation de MUSIC sur des données du prototype de WISDOM	133
4.7	Conclusion	134
5	Méthodes de détection et de caractérisation des structures du sous-sol à partir des données de WISDOM	135
5.1	Détection et interprétation de signatures simulées associées à des configurations géologiques d'intérêt	136
5.1.1	La méthode des différences finies FDTD	136
5.1.2	Modélisation électromagnétique du radar	137
5.1.3	Génération de surface rugueuse	138
5.1.4	Génération d'un milieu non homogène	141
5.1.5	Modélisation du terrain d'expérimentation	142
5.1.6	Modélisation de structures analogues martiens	143
5.2	Estimation de la constante diélectrique du sous-sol	149
5.2.1	Estimation à partir de l'écho de sol	149
5.2.2	Effet de la rugosité de surface	154
5.2.3	Estimation à partir des hyperboles	158
5.3	Utilisation de la polarimétrie pour la caractérisation des réflecteurs en sous-sol	162
5.3.1	Visualisation des données polarimétriques	162
5.3.2	Utilisation de la polarimétrie pour caractériser la forme des réflecteurs	163
5.3.3	Localisation des réflecteurs	165
5.4	Outils d'interprétation des radargrammes	168
5.4.1	Détection automatique des réflecteurs en sous-sol	168
5.4.2	Identification des structures, étude des textures	170
5.5	Vers Mars : Campagne de mesure dans le Colorado provençal	171
5.5.1	Le contexte	171
5.5.2	Résultat sur le site n°2	172
5.5.3	Caractérisation automatique des structures détectées dans le sous-sol	176
5.5.4	Caractérisation des matériaux	178
5.5.5	Polarimétrie	183
5.5.6	Conclusion	184
5.6	Conclusion	184
	Conclusion	185

Remerciements

La thèse de doctorat fut pour moi une expérience extraordinaire, un moment consacré quasi exclusivement à la recherche où l'on donne beaucoup de soi-même. La thèse est aussi une aventure humaine faite de rencontres et de discussions passionnantes.

Je remercie les membres de jury d'avoir lu mon manuscrit et d'avoir assisté à ma soutenance. Merci aux rapporteurs d'avoir examiné mon manuscrit.

J'adresse des remerciements tout particuliers à mes directrices de thèse Valérie Ciarletti et Alice le Gall. Vous m'avez laissé une très grande liberté dans la façon de mener mes recherches et vous vous êtes montrées très disponibles lorsque j'en avais le plus besoin. Merci de m'avoir fait confiance et de m'avoir formé.

Je remercie également l'équipe WISDOM : vous m'avez aidé à comprendre le fonctionnement de l'instrument et à réaliser diverses mesures. Rafik, Olivier, Benjamin, Charlotte, André-Jean, Emmanuel, Sadok, Alexandre, Vivien merci pour votre aide.

Merci à la partie outre-Rhin de l'équipe, responsable de la conception et réalisation des antennes de WISDOM : Dirk, Wolf-Stefan, Marco, Yun et Christophe de l'université technique de Dresdes (TUD).

Merci à Sophie, doctorante qui m'a précédé et co-encadré lors de mon stage de M2 ainsi qu'à Nicolas, doctorant qui me succède et que j'ai à mon tour co-encadré lors de son stage.

Merci à André-Jean, Emmanuel, Damien et Alice qui m'ont accompagné lors de ma campagne de mesure dans le sud de la France dans le désormais célèbre « Colorado Provençal ».

J'ai eu l'opportunité de collaborer avec d'autres laboratoires lors de mes recherches. Merci à Christophe et Alain du XLim ainsi que à Cathy et Damien du Laboratoire de géologie de Lyon.

Merci au LATMOS, aux équipes IMPEC et ESTER, à l'UVSQ et à mon école doctorale de m'avoir accueilli et fait confiance.

Merci au CNES pour son soutien financier et son intérêt pour le projet WISDOM ainsi que pour le financement de ma campagne de mesure et du terrain d'expérimentation.

Merci à mes amis et collègues doctorants avec qui nous avons pu parler de tout et de rien ainsi que se soutenir mutuellement dans l'année décisive que constitue la troisième année de thèse. Merci à Laura.S, Laura.R, Maxence, Clément, Sabrina, Sarah, Loïc, Sophie, Tristan, Robin, Léa, Lora, Audrey, Laurianne, Meriem, Patricia et Eva.

Je remercie tous ceux que j'ai oublié dans ces quelques mots et non ! il n'y a pas d'ordre particulier dans les différentes listes de noms !

Enfin, je remercie mes parents François et Angéline de m'avoir poussé à faire des études et de m'avoir toujours encouragé.

Introduction

A partir de 1659, les observations à la lunette de Mars par Christian Huygens et Giovanni Domenico Cassini révèlent la surface martienne ; sur le premier dessin du globe martien par Huygens figure Syrtis Major Planum et, peu après, Cassini y ajoute la calotte polaire sud. Lors de l'opposition de 1877, Schiaparelli croit observer des canaux à la surface de Mars ; une partie des astronomes de l'époque lui emboîte le pas et cartographie les canaux martiens. La nature de ces canaux n'est pas tranchée ; entre bras de mer et canaux artificiels le débat est ouvert. Il sera, en partie, refermé en 1909 par Eugène Antoniadi qui dément la présence de canaux après observation de la planète rouge avec la lunette de 81 cm de l'Observatoire de Meudon. Mais, en partie seulement, car la question des canaux et celle même de la présence d'êtres intelligents à la surface de Mars agite toujours les débats et les agitera jusqu'aux premières observations de Mars par la sonde Mariner 4 dans les années 60. Les 22 clichés de la sonde montrent, en effet, une planète couverte de cratères et très semblable à notre Lune. Depuis, les missions vers Mars se sont multipliées et, après presque un demi-siècle d'observations à partir d'orbiteurs, d'atterrisseurs et de Rovers, notre connaissance de la planète rouge et surtout de sa surface a bien évolué. Il semblerait finalement que Mars ait une histoire plus proche de celle de notre planète (du moins lors de sa jeunesse) que celle de la Lune. Elle a connu une géologie active et qui surtout a entretenu de l'eau liquide à sa surface comme en attestent de nombreuses observations géo-morphologiques et minéralogiques. C'est, à ce jour, la seule planète connue avec la Terre à posséder cette singularité, ce qui en fait une cible de choix pour la recherche de la vie.

La question de la vie ailleurs que sur Terre dans l'univers est au centre d'une discipline appelée exobiologie ; cette dernière s'intéresse à l'origine du vivant. Tous les objectifs des missions martiennes intègrent désormais des considérations d'exobiologie. En particulier, à la fin des années 90, l'ESA lance un programme martien d'exobiologie qui donnera naissance à la mission ExoMars. Cette mission, menée en partenariat avec l'agence spatiale Russe Roscosmos, a pour objectif la recherche de traces de vie passée ou présente sur Mars. La mission est scindée en deux composantes. La première composante, ExoMars 2016, consiste en l'envoi de l'orbiteur TGO (*Trace Gas Orbiter*) dédié notamment à la recherche de l'origine des émanations de méthane découvertes pour la première fois par Mars Express (le méthane peut être le signe d'une activité biologique bactérienne dans le sous-sol de Mars). La seconde, ExoMars 2020, prévoit de déposer un Rover à la surface de Mars en 2020.

La surface de Mars n'étant pas protégée par un bouclier magnétique, elle est en permanence exposée à des rayonnements énergétiques qui, a priori, interdisent toute vie à la surface de la planète. Si il y a de la vie sur Mars ou des traces d'une vie passée, elles se trouvent plus probablement dans le sous-sol. La mission ExoMars 2020 a donc sélectionné sa charge instrumentale en conséquence ; le Rover est conçu pour étudier le proche sous-sol martien et, pour ce faire, il dispose d'une foreuse capable de forer et de prélever des échantillons jusqu'à deux mètres de profondeur sous la surface. Ces échantillons seront ensuite analysés par un laboratoire embarqué qui y cherchera de la matière organique et des marqueurs du vivant. Pour guider la foreuse mais aussi pour reconstituer l'histoire géologique du sous-sol, le Rover embarque deux instruments : ADRON-RM, un détecteur à neutrons capable de donner la quantité intégrée d'hydrogène dans le premier mètre du sous-sol, et WISDOM (*Water Ice and Subsurface Deposit Observation on Mars*), un radar à pénétration de sol capable de sonder les premiers mètres du sous-sol et d'en donner la structure. Cette thèse porte sur la préparation du retour scientifique de l'expérience WISDOM.

La première utilisation des ondes électromagnétiques pour la détection d'obstacle est attribuée

à Christian Hülsmeier. Ce dernier développe un instrument en 1904 qui pose le principe du radar. Quelques années plus tard, Leimbach et Löwy développent le concept pour la détection de cibles en sous-sol. Depuis les années 70, l'utilisation des radars pour le sondage des sous-sols s'est démocratisée ; les radars à pénétration de sol ou GPR (*Ground Penetrating Radar*) sont utilisés pour la prospective géologique, le génie civil, l'archéologie, le bâtiment ainsi que pour la planétologie. Au même titre que l'imagerie haute résolution ou la spectrométrie, le radar fait partie des outils de télédétection utilisés pour caractériser les surfaces et les sous-sols planétaires. Cette technologie est utilisée pour la première fois en planétologie avec le radar sondeur ASLE (*Apollo Lunar Sounder Experiment*) embarqué sur l'orbiteur de la mission Apollo 17. Pour la caractérisation de la planète Mars, les premiers radars envisagés sont PRISM, intégré à la charge utile de Mars'96 (ESA), et un radar sobrement nommé GPR pour la mission Netlander (CNES). Ces deux GPR étaient français. Malheureusement Mars'96 finira dans l'océan Pacifique et la mission Netlander sera annulée.

Mais l'histoire ne s'arrête pas là. En 2003, la sonde européenne Mars Express est lancée en direction de Mars ; elle emporte avec elle le radar sondeur MARSIS. Quelques années plus tard en 2005, la NASA envoie à son tour un radar sondeur en orbite autour de Mars : SHARAD. MARSIS et SHARAD opèrent depuis plus d'une décennie autour de la planète rouge et ont aidé à lever le voile de sa surface. Ils ont notamment révélé le détail de la stratification des calottes polaires ainsi que des structures souterraines (par exemple, un chenal enfoui) et ont permis de contraindre la composition de plusieurs formations de surface par l'estimation d'une propriété qui dépend de chaque matériau : la permittivité. Récemment MARSIS a permis d'identifier la présence d'eau liquide sous la calotte polaire Sud. Cette découverte relance les espoirs de la vie présente sur Mars et apporte de nouveaux arguments aux exobiologistes. MARSIS et SHARAD ont ouvert une nouvelle dimension dans notre connaissance de Mars, celle de la profondeur. D'ici quelques années, ils seront rejoints par deux radars à pénétration de sol : WISDOM et RIMFAX, respectivement embarqués sur les missions ExoMars 2020 (ESA) et Mars 2020 (NASA).

La profondeur de pénétration d'un radar et sa résolution dépendent de sa fréquence centrale ainsi que de sa bande de fréquences. MARSIS et SHARAD sont des radars dits "basses fréquences" qui peuvent sonder jusqu'à une profondeur supérieure au kilomètre avec une résolution d'une dizaine de mètres pour SHARAD et d'une centaine de mètres pour MARSIS. WISDOM et RIMFAX opèrent à des fréquences beaucoup plus hautes ; ils perdent donc en profondeur de pénétration (de l'ordre de quelques mètres pour WISDOM et quelques dizaines de mètres pour RIMFAX) mais gagnent en résolution (de l'ordre de quelques centimètres). WISDOM et RIMFAX proposeront donc une caractérisation des sous-sols à une échelle très différente de celle des radars sondeurs pionniers MARSIS et SHARAD.

Plus précisément, le radar à pénétration de sol WISDOM opère à une fréquence centrale de 1.75 GHz avec une bande de fréquences de 2.5 GHz. Ces caractéristiques lui permettront de sonder le proche sous-sol martien avec une résolution de quelques cm. L'électronique de l'instrument a été majoritairement développée en France par le LATMOS (Guyancourt) et le LAB (Bordeaux) et ses antennes ont été développées en Allemagne, au TUD (Université Technique de Dresde). Ce manuscrit est dédié à la caractérisation du radar WISDOM ainsi qu'à la préparation des outils d'interprétation des données.

Le manuscrit est composé de cinq parties. Dans la première partie nous introduisons les principaux résultats obtenus par les radars sondeurs MARSIS et SHARAD sur la planète rouge après un bref rappel des grandes étapes de l'exploration de Mars et de l'apport du sondage électromagnétique dans la caractérisation des sols. La deuxième partie s'attache à la description et à la caractérisation de l'instrument WISDOM et présente les données utilisées dans ce manuscrit pour tester les outils de traitement et d'interprétation mis en place. Les troisième et quatrième parties décrivent justement ces outils et la chaîne de traitement des données WISDOM. Dans la troisième partie nous nous intéressons, en particulier, à la réduction des réflexions parasites (internes à l'électronique et provenant de l'environnement extérieur) qui nuisent à la lisibilité des données de WISDOM. Cette partie aboutit à une présentation de la chaîne de traitement complète de WISDOM. La quatrième partie porte sur l'étude des performances d'une méthode devant permettre l'amélioration, post-acquisition, de la résolution des données de WISDOM ; nous y évaluons l'algorithme haute résolution MUSIC.

Enfin, le dernier chapitre nous rapproche de Mars. A travers un travail de modélisation du radar,

nous évaluons les capacités de WISDOM à détecter des structures d'intérêt géologique dans le proche sous-sol de Mars. Nous y présentons également des outils développés pour une meilleure compréhension des données WISDOM; certains de ces outils reposent sur le principe de la détection automatique, d'autres tirent partie des capacités polarimétriques de l'instrument. Nous décrirons aussi les deux méthodes d'estimation de la constante diélectrique que nous avons mises en place. L'estimation de cette propriété apportera de nouvelles contraintes sur la composition du sol martien. Ces méthodes d'estimation de la constante diélectrique, les différentes étapes de la chaîne de traitement des données et les outils d'interprétation développés ont été testés lors d'une campagne de mesure organisée dans le cadre de cette thèse.

Ce travail de thèse a été réalisé au LATMOS (*Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales*, Unité Mixte de Recherche 8190), de l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) qui fait partie de l'Université Paris-Saclay. Il a été financé par une bourse ministérielle attribuée par l'école doctorale d'astronomie et d'astrophysique d'Ile-de-France (ED 127). Les résultats sont le fruit de nombreuses collaborations. Nous citerons notamment l'Université de Limoges pour la partie modélisation, le Laboratoire de Géologie de Lyon pour la préparation de la campagne de mesures et l'Université Technique de Dresde pour la modélisation des antennes. Nous remercions le CNES pour son implication dans le développement de l'instrument ainsi que pour le financement des missions et campagnes.

Chapitre 1

Mars et son sous-sol à portée des radars

Ce chapitre d'introduction décrit le contexte du travail présenté dans ce manuscrit.

La première partie est dédiée à une description sommaire de la planète Mars et de son évolution avec une attention particulière portée sur son habitabilité passée ou présente qui est étroitement liée à la présence d'eau.

La partie suivante retrace les étapes majeures de l'exploration de Mars et présente la mission ExoMars avec ses deux volets. La mission ExoMars 2020, qui déposera sur la surface de la planète un rover à bord duquel le radar WISDOM sera intégré, y est décrite en détail.

Les deux dernières parties sont consacrées au sondage électromagnétique du sous-sol de Mars. Nous décrirons, dans un premier temps, comment le sondage électromagnétique permet de révéler des structures souterraines et de contraindre la composition des matériaux par le biais de l'estimation de leur constante diélectrique. Dans un second temps, une sélection de résultats obtenus grâce aux radars sondeurs actuellement en orbite autour de Mars, MARSIS/Mars Express et SHARAD/Mars Reconnaissance Orbiter, est présentée.

1.1 Mars

Les premières images de Mars obtenues par les sondes Mariner puis Viking, dévoilent une surface qui laisse peu d'espoir quant à l'habitabilité présente de la planète. Mars ressemble, en effet, à un désert inhospitalier, dominé par des tempêtes de poussières ; la planète a du connaître une ou des périodes très mouvementées dans son histoire comme en témoignent les nombreux cratères, volcans et reliefs visibles à sa surface. Cependant, émerge aussi progressivement l'idée que Mars a pu, pendant sa jeunesse, réunir les conditions nécessaires à l'apparition de la vie.

1.1.1 La planète Mars

Mars est la 4^{ème} planète du système solaire, elle fait partie avec Mercure, Vénus et la Terre des planètes telluriques, ce qui signifie qu'elles sont composées de roches et qu'elles sont délimitées par une surface. Surnommée la planète rouge, à cause de la couleur rouge orangé que lui confère l'oxyde de fer, elle expose à sa surface de nombreuses énigmes qui font d'elle un objet d'astrophysique tout à fait fascinant. D'un rayon de 3390 km Mars est légèrement plus grande que Mercure ($R = 2240$ km) mais plus petite que Vénus ($R = 6052$ km) et que la Terre ($R = 6371$ km). Son orbite est légèrement elliptique avec une excentricité de 0.0934. En conséquence, sa distance au soleil varie entre 1.381 et 1.666 UA (Unité Astronomique). Son obliquité actuelle est de 25.19° . Cependant, du fait de l'absence de satellite comparable à notre Lune, l'évolution de cette obliquité est chaotique. D'après [Laskar et al., 2004], la probabilité que l'obliquité de Mars ait dépassée 60° est de 63% dans le dernier milliard d'années et de 89.3% dans les trois derniers milliard d'années. De tels changements ont eu sans aucun doute un impact sur le climat de la planète, la formation des calottes polaires mais aussi sur l'habitabilité de Mars. Aujourd'hui Mars a une atmosphère ténue (6.36 mbar) composée à 95.97% de dioxyde de carbone. A la surface, règne des températures comprises entre -143°C et 27°C avec de fortes variations thermiques entre le jour et la nuit.

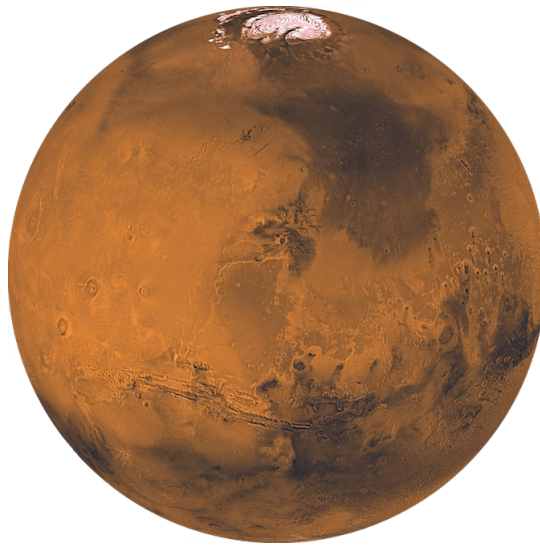


FIGURE 1.1 – Surface de Mars dévoilée par les caméras des orbiteurs de la mission Viking, crédit : NASA/JPL

Ces conditions de pression et température sont incompatibles avec la présence stable d'eau liquide en surface. Les observations de la surface montrent pourtant des réseaux de vallées, des minéraux hydratés et de potentielles lignes de rivages ce qui suggère que par le passé la planète rouge a pu avoir un climat plus chaud avec peut-être, comme sur Terre, un cycle complet de l'eau. La planète a également connu une forte activité volcanique qui a certainement eu un impact sur la répartition de l'eau sur la planète. En effet, Mars possède le plus grand volcan du système solaire avec Olympus Mons ($\simeq 22.5$ km d'altitude). Il repose, avec 3 autres volcans (Ascraeus Mons, Pavonis Mons et Arsia Mons),

sur le dôme de Tharsis qui est une région volcanique de 5000 km de diamètre et de 5 km d'altitude. Une seconde région volcanique de plus petite taille (diamètre de 3000 km), Elysium, contient trois volcans majeurs (Hecates Tholus, Elysium Mons et Albor Tholus). Le dôme de Tharsis se serait formé durant le Noachien (il y a plus de 3.7 milliards d'années) et serait responsable du basculement de l'enveloppe de Mars (manteau et croûte) autour de son noyau [Bouley et al., 2016]. Ce basculement d'environ 20° permet d'expliquer la distribution spatiale actuelle des réseaux de vallées ainsi que celles des zones portant les indices d'anciens glaciers. En corrigeant la géographie de la planète de ce basculement, les réseaux de vallées actuellement observés se répartissent logiquement sur une bande équatoriale et les paléo-pôles (pôles avant basculement) coïncident avec des régions où l'on suspecte une grande quantité de glace en sous-sol [Bouley et al., 2016].

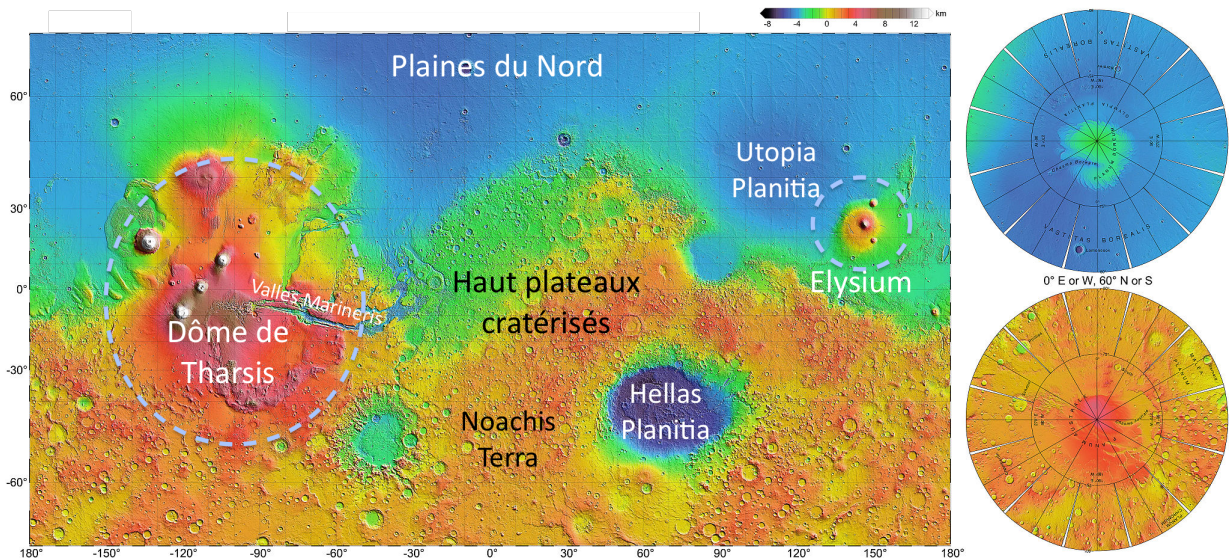


FIGURE 1.2 – Cartes topographiques réalisées à partir des observations de l'altimètre MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) de la mission Mars Global Surveyor (NASA), crédits : NASA/JPL

La Figure 1.2 montre la carte d'élévation de la planète (données MOLA/MGS) ; nous remarquons une dichotomie entre les basses plaines du Nord et les hauts plateaux cratérisés du Sud. La différence d'altitude provient de la différence d'épaisseur de la croûte beaucoup plus fine au Nord. Cette dissymétrie est encore mal comprise ; plusieurs hypothèses s'affrontent entre processus internes et impact catastrophique.

En planétologie, le comptage de cratères est utilisé pour dater les terrains (e.g., [Hartmann et al., 2010] [Hartmann and Neukum, 2001] [Hartmann, 2005]). Plus un terrain est cratérisé, plus il est vieux. En effet, à l'opposé, si une surface est dépourvue de cratères, c'est qu'un événement récent a érodé ou recouvert la surface et effacé les traces d'impacts pré-existants. A partir de ce principe, une chronologie de la surface martienne peut être établie. Mars a connu trois périodes géologiques principales : le Noachien (entre -4.1 milliards d'années et -3.7 milliards d'années), l'Hésperien (entre -3.7 milliards d'années et -3 milliards d'années) et l'Amazonien (entre -3 milliards d'années et aujourd'hui). En fonction des méthodes de datation, les âges des périodes géologiques de Mars peuvent évoluer.

La Figure 1.3 résume les grands événements martiens en fonction des périodes géologiques. Le Noachien a vu la formation des premiers volcans ainsi que celle des réseaux de vallées. Cette période a dû être chaude et humide et permettre un cycle complet de l'eau liquide ; elle est la plus propice à l'apparition de la vie. Les terrains du Noachien les plus cratérisés (et donc les plus anciens) présentent des indices géomorphologiques (réseaux de vallées) et minéralogiques (altération des roches par de l'eau liquide) témoignant d'un passé où l'eau liquide a pu être présente en surface. L'Hésperien marque une rupture brutale ; la planète se refroidit, l'eau se réfugie en sous-sol sous forme de glace et des vallées de débâcles se forment sous l'action de la montée du volcanisme. Il est possible qu'une activité fluviale se soit poursuivie pendant cette période [Bouley and Craddock, 2014] (voire même un cycle de l'eau

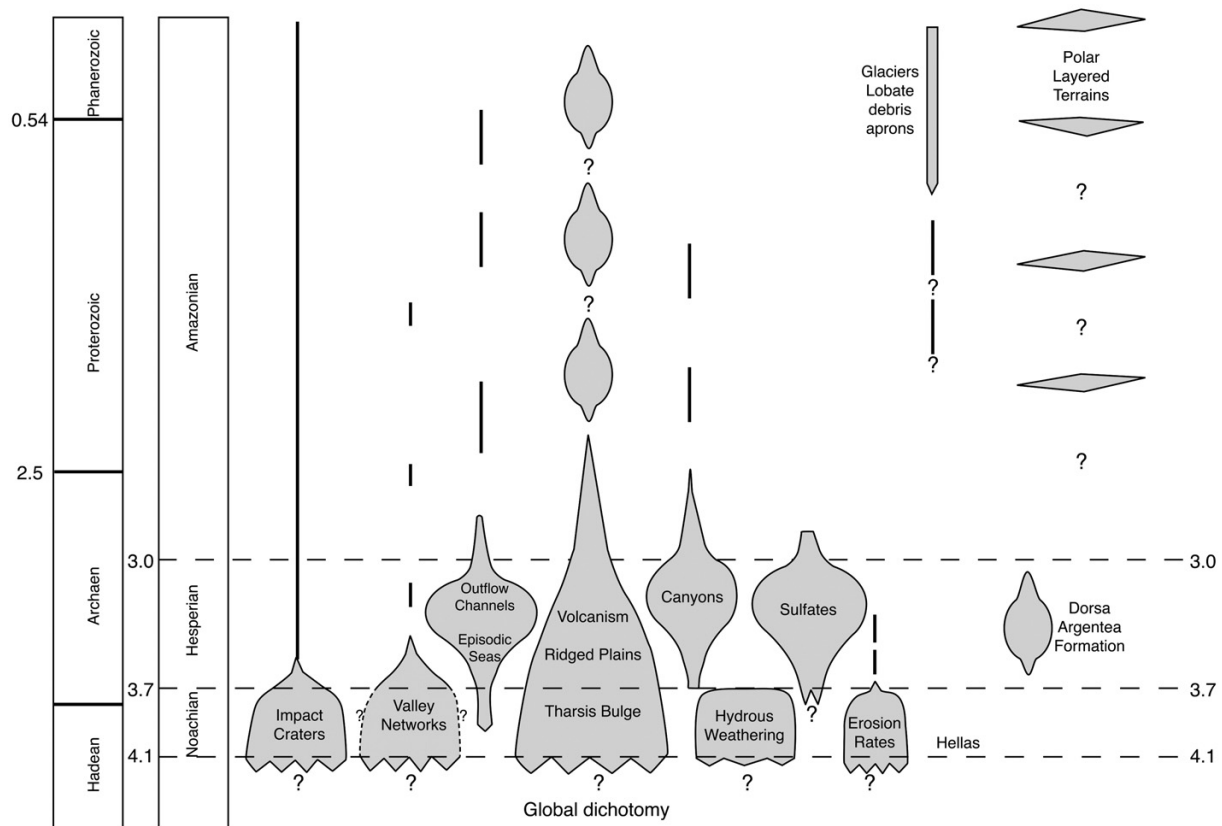


FIGURE 1.3 – Grand événements martiens en fonction des périodes géologiques de la planète. Extrait de [Carr and Head III, 2010].

complet avec des précipitations ou des tombées de neige) ; pendant l'Hespérien Mars passe donc d'une planète très semblable à la Terre à la planète froide et aride que l'on observe aujourd'hui. La période géologique que connaît actuellement la planète est l'Amazonien ; pendant cette période Mars a vu des événements volcaniques ainsi que la formation d'étendues de glace d'eau aux pôles.

Ces différents éléments nous permettent de proposer une histoire de Mars. Il y a 4.5 milliards d'années, au même moment que la Terre, Mars se forme. Tout comme sur Terre, ses roches dégagent d'importantes quantités de dioxyde de carbone, ce qui lui permet d'avoir une atmosphère beaucoup plus dense que celle d'aujourd'hui. Tout comme la Terre, Mars possède initialement (ainsi que l'atteste les traces de champ magnétique rémanent) un champ magnétique produit par un effet dynamo dans le noyau de la planète. Cependant celui-ci s'arrête prématurément sur Mars. Une explication possible serait la solidification de son noyau suite à un refroidissement qui s'explique par la petite taille de la planète (plus un corps est petit, plus il perd rapidement sa chaleur), d'autres explications s'appuient sur une activité de bombardement météoritique intense (qui aurait chauffé le manteau annulant le gradient thermique nécessaire aux mouvements de convection du noyau) ou au basculement de la croûte et du manteau autour du noyau. Sans le bouclier que constituait la magnétopause, l'atmosphère de la planète est soumise à un puissant vent solaire. La faible gravité de la planète (à cause de sa petite taille) ne parvient pas à éviter l'échappement de l'atmosphère. La pression et la température diminuent ainsi que la teneur en dioxyde de carbone, qui assurait un effet de serre à la planète. De plus, l'absence de tectonique des plaques ne permet pas de régénérer des carbonates en dioxyde de carbone comme sur Terre. La planète rentre alors dans un hiver éternel. Les conditions de pression et température ne permettent plus à l'eau liquide de d'exister en surface. La planète devient inhospitalière et sèche en surface. Il est cependant possible qu'une activité géothermale soit toujours présente dans le sous-sol de Mars. L'état du noyau de la planète est toujours sujet à discussion, tout comme le passé chaud et humide de Mars. Les indices laissés par l'eau liquide sur Mars font en effet couler beau-

coup d'encre sur Terre. Deux visions s'opposent entre une planète Mars chaude et humide à ses débuts [Ramirez and Craddock, 2018] [Grotzinger et al., 2015] et une planète glacée [Wordsworth et al., 2013] [Wordsworth et al., 2015]. D'un côté les modèles climatiques peinent à expliquer une planète chaude avec un soleil jeune, de l'autre même si des mécanismes invoquant des nappes d'eau souterraines peuvent expliquer une partie des indices géomorphologiques et minéralogiques, les observations vont dans le sens d'étendue d'eau liquide à la surface et donc d'un climat chaud. Il faut garder à l'esprit le fait que Mars n'est pas une planète morte aujourd'hui. De nombreux phénomènes se produisent encore de nos jours et peuvent être observés en surface, les coulées de lave les plus jeunes ne datent que de quelques millions d'années, et l'apparition de nouveaux écoulements (qui ne font pas intervenir de volcanisme) a été récemment observé par les imageurs en orbite de la planète rouge.

1.1.2 L'eau et Mars

Dans le cadre de la mission ExoMars et de la recherche de traces de vie (passée ou présente), la détection de la présence d'eau liquide, même ancienne, serait un indice précieux de l'habitabilité de la planète. En conséquence, nous consacrons la partie qui suit à l'examen des principaux signes qui témoignent actuellement d'un passé aqueux sur Mars.

Les indices d'écoulements d'eau à la surface de la planète

Alors que les toutes premières images de Mars (obtenues depuis la Terre et lors de la mission Mariner 4) ont dévoilé une planète désertique, la première cartographie de la surface par Mariner 9 a permis de mettre en évidence des structures en canaux d'aspects variés dont certains sont très similaires à des rivières terrestres [McCauley et al., 1972] et d'autres semblent être d'origine volcanique [Masursky, 1973]. La découverte de ces canaux a ouvert de nombreux débats sur les processus de formation ainsi que sur la nature du fluide qui les a sculptés. Dans un premier temps, l'eau liquide est communément admise comme étant le fluide à l'origine des canaux martiens. Pour les plus petits canaux, la pluie est ainsi évoquée comme mécanisme de formation [Masursky, 1973] [McCauley et al., 1972] [Milton, 1973]. Ces premières conclusions bousculent une nouvelle fois la représentation de l'époque qui attribuait à Mars une destinée similaire à celle de notre Lune. Les images de Mariner 9 évoquent un passé plus proche de celui de la Terre avec des rivières creusées par de l'eau liquide, un climat plus chaud et humide [Pollack et al., 1987]. D'autres hypothèses sur la nature du fluide à l'origine des canaux sont en parallèle envisagées : la lave [Carr, 1974], l'érosion éolienne [Cutts and Blasius, 1979] ainsi que des hydrocarbures [Yung and Pinto, 1978]. Cette dernière hypothèse, apparue 30 ans avant la découverte du premier lac d'hydrocarbures à la surface de Titan [Stofan et al., 2007], suppose que pendant sa jeunesse Mars était dotée d'une atmosphère de méthane, et que, par conséquent, des hydrocarbures auraient pu creuser des canaux à sa surface. Les travaux réalisés à partir des images de Mariner 9 ont permis une première classification des canaux martiens. Quelques années plus tard, Mars est presque entièrement cartographiée avec une meilleure résolution par les orbiteurs Viking, ce qui permet une datation plus précise et une classification plus rigoureuse de ces canaux martiens [Carr and Clow, 1981] [Masursky et al., 1977] [Baker and Kochel, 1979].

Il s'avère qu'il existe des canaux formés par volcanisme et d'autres par de l'eau liquide. Deux types de chenaux fluviaux sont identifiés : les vallées de débâcles (*Outflows channels*) et les réseaux de vallées (*Valley Network*), plus complexes avec de nombreux embranchements. Les vallées de débâcles sont beaucoup plus larges (entre 10 et 100 km) et plus longues (jusqu'à 2000 km) que les réseaux de vallées. Elles se trouvent près des terrains chaotiques qui sont des zones au relief torturé probablement formées lors de l'effondrement d'un pergélisol riche en glace d'eau en période de réchauffement.

La Figure 1.4 est une vue d'Ares Vallis, une vallée de débâcle. Les formes en larme sont caractéristiques de ces vallées et témoignent d'un écoulement turbulent provoqué par un important et rapide écoulement d'eau ; des mécanismes tels que la fonte de pergélisol sous l'action du volcanisme peuvent en être à l'origine. Ces vallées de débâcle datent de l'Hespérien.

Les réseaux de vallées désignent des réseaux dendritiques de tailles et de formes variables. Ils se

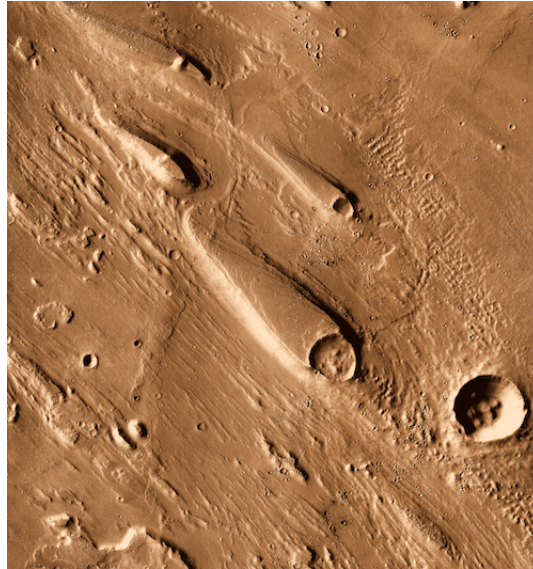


FIGURE 1.4 – Ares Vallis, image THEMIS, Crédit : NASA/JPL/ASU

trouvent principalement sur les hauts plateaux cratérisés et sont datés de la fin du Noachien. Plusieurs mécanismes expliquant leur origine font intervenir l'eau liquide. Bien que semblables à nos réseaux fluviaux terrestres, les réseaux de vallées martiens semblent moins ramifiés et moins développés, ce qui suggère des mécanismes de formation différents. En effet, ces réseaux pourraient avoir été créés par sapements de terrain (effondrements causés par la présence de nappes d'eau souterraines), par des sources hydrothermales [Malin and Carr, 1999] [Goldspiel and Squyres, 2000] ou bien par des précipitations. L'origine de la formation des réseaux de vallées est donc encore aujourd'hui sujette à débat.

Une formation par précipitations supposerait une planète Mars au passé humide alors que des formations liées au volcanisme ou nécessitant des nappes d'eau souterraines n'impliqueraient pas forcément un climat martien différent de celui d'aujourd'hui. Il est commun de penser que ces mécanismes de formation sont complémentaires et expliquent les différences observées entre les réseaux de vallées.

La Figure 1.5A montre un réseau de vallées observé en infrarouge thermique par l'instrument THEMIS/Mars Odyssey dans la région de Valles Marineris. Les zones sombres représentent les zones les plus froides et dévoilent des ramifications supplémentaires. En effet, les canaux sont recouverts par du sable ou des poussières qui ont, la nuit, une température plus froide que la roche. Le degré de ramification, le nombre de sources, leurs orientations selon la pente locale et leurs morphologies sont semblables à ce que l'on peut observer sur Terre. Ces similitudes sont en accord avec une formation par précipitation. De plus, ce réseau de vallée se trouve dans une zone datée de l'Hespérien, une période géologique théoriquement froide de Mars. Cela implique, soit que Mars était plus chaude à cette période, soit qu'il y a eu des réchauffements épisodiques durant l'Hespérien [Mangold et al., 2004].

Autres indices potentiels d'écoulement : les ravines ou *gullies* sont des chenaux qui se trouvent principalement entre les latitudes 30° et 50° Nord et Sud sur des pentes, des flancs de vallées ou sur les remparts de cratères d'impact qui font généralement face aux pôles. Ils débutent par une alcove et se termine par une zone de dépôts de sédiment en aval. Leur mécanisme de formation n'est pas entièrement compris, cependant ils ne semblent pas être formés par l'action de l'eau liquide ou de saumures. En effet d'après [Núñez et al., 2016], les données CRISM (le spectromètre infrarouge à bord de l'orbiteur MRO) ne montrent pas de preuves minéralogiques de présence d'eau. Ces travaux sont en accord avec les travaux de [Pilorget and Forget, 2016] qui proposent un mécanisme qui ne fait pas intervenir de l'eau liquide mais de la glace carbonique. Dans ce scénario, une couche de glace carbonique se dépose à la surface de Mars pendant l'hiver ; cette couche vient recouvrir un régolithe poreux et,

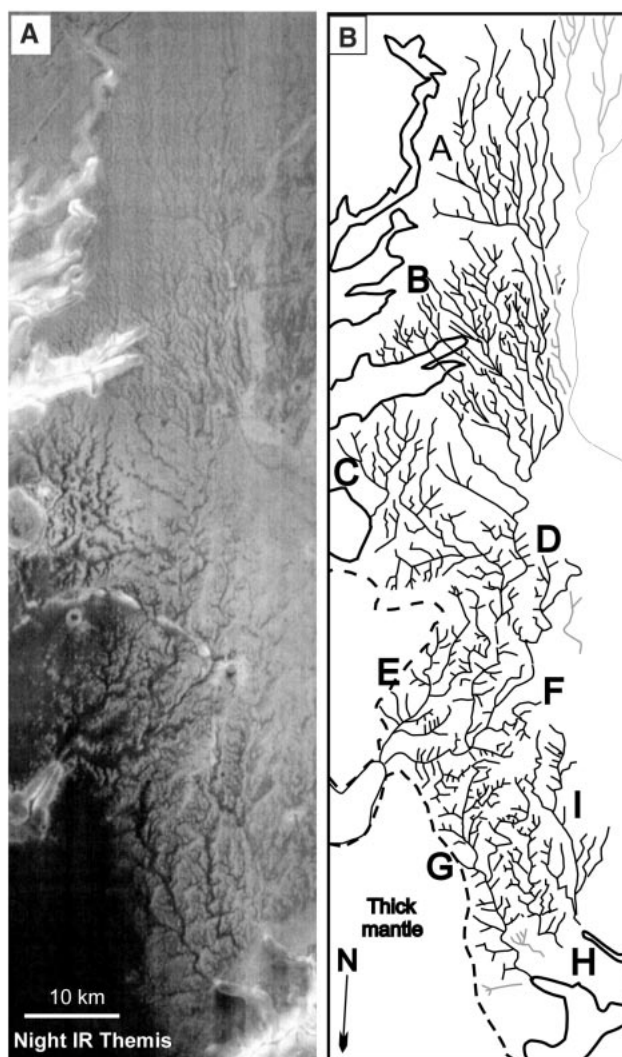


FIGURE 1.5 – Réseaux de vallée sur West Elysium Chasma plateau (0°N , 81°W), a) Image THEMIS/Mars Odyssey, b) Carte du réseau, Extrait de [Mangold et al., 2004]

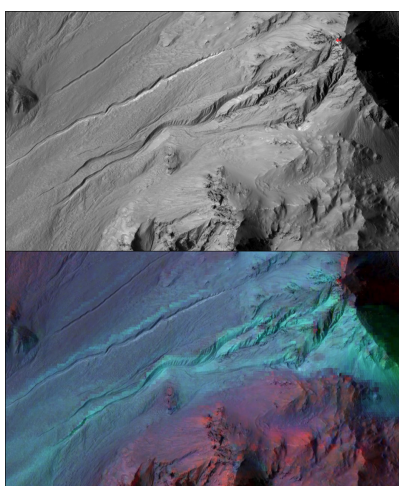


FIGURE 1.6 – Haut : ravines photographées par HiRISE/MRO. Bas : la combinaison avec les données CRISM ne montre pas d'altération par de l'eau liquide, Crédits : NASA/JPL-Caltech/UA/JHUAPL

une fois exposée aux rayons solaires, elle chauffe par sa base et se sublime. La pression augmente donc sous la glace qui finit par craquer, libérant le gaz piégé et provoquant un éboulement.

En 2011, un nouveau type de traces d'écoulement potentiel est découvert par HiRISE, la caméra haute résolution de l'orbiteur MRO. Il s'agit des RSL (*Recurring Slope Lineae*). Ces structures, dont l'aspect est sombre (Figure 1.7), sont situés sur des pentes de 25 à 45° qui font en majorité face à l'Equateur et apparaissent durant le printemps et l'été martien à des latitudes comprises entre 48°S et 32°S [Mangold et al., 2004]. Les RSL sont de plus petite taille que les ravines.

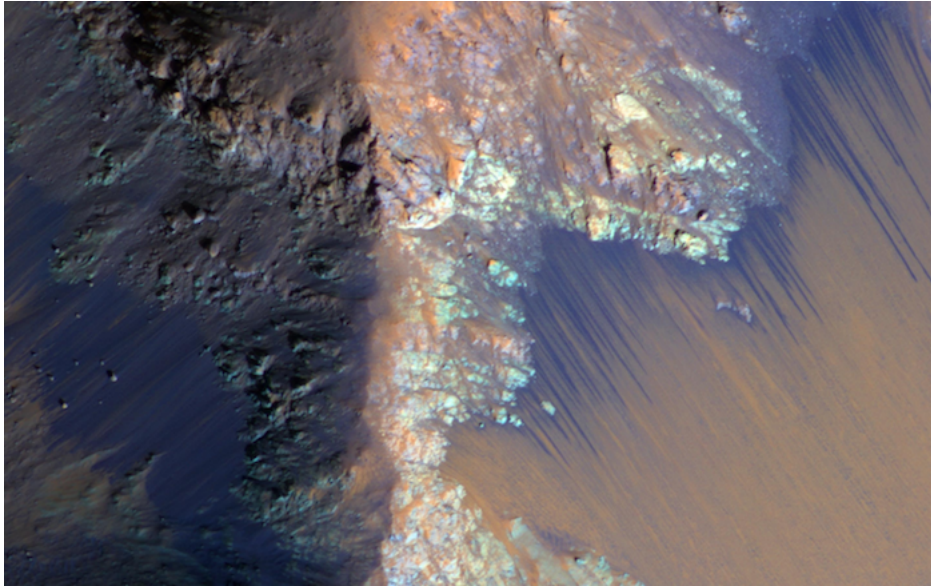


FIGURE 1.7 – Recurring Slope Lineae (RSL) dans Coprates Chasma, image HiRISE, crédit : NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona

Le mécanisme de formation des RSL n'est pas bien compris. Cependant, l'hypothèse d'écoulement d'eau liquide ou plutôt de saumure (mélange de sel et d'eau qui permet d'abaisser le point de fusion) est d'abord retenue [McEwen et al., 2014] [McEwen et al., 2011]. [Ojha et al., 2015] conforte cette hypothèse par la détection de sels hydratés à l'endroit des RSL (dans quatre zones) avec l'instrument CRISM (*Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars instrument*) de MRO. Cependant [Schmidt et al., 2017], entre autres, propose un mécanisme de formation des RSL qui ne nécessite pas la présence d'eau liquide ou de fluide. La question de la formation des RSL reste donc ouverte.

Il existe d'autres formations suggérant une érosion par de l'eau liquide, comme par exemple les chenaux inversés qui se forment par érosion différentielle où les polygones de dessiccations qui, sur Terre, résultent de l'assèchement de zones riches en argiles. Même si l'origine de ces formations est toujours sujette à débats, l'étude de la minéralogie et les observations au sol permettent d'affirmer que de l'eau liquide a un jour coulé à la surface de Mars. Des observations au sol réalisées avec la caméra du Rover Curiosity (*Mastcam*) ont montré, sur des affleurements, la présence de conglomérats (grains de sable consolidés en roches sédimentaires) ainsi que des galets. Ces galets arrondis ont été façonnés après un contact abrasif prolongé avec de l'eau liquide. La formation de ces conglomérats martiens ainsi que le transport des galets a nécessité un courant d'eau liquide d'une profondeur comprise entre 30 et 90 cm pour une vitesse moyenne elle même comprise entre 0.2 et 0.75 m/s [Williams et al., 2013].

La Figure 1.8 montre une comparaison entre des galets martiens et terrestres. La taille ainsi que la forme de ces galets sont similaires ce qui suggère un processus d'érosion de même nature. Les observations TES/MGS/NASA et du Rover Opportunity sur le terrain de Meridiani Planum ont révélés des sphérules d'hématite (oxydes de fer) [Calvin et al., 2008]. Ces sphérules peuvent s'être formées par l'action de l'eau liquide ; cependant d'autres processus de formation peuvent expliquer leurs présences.

Le spectromètre infrarouge OMEGA/Mars Express a permis la cartographie de deux types de

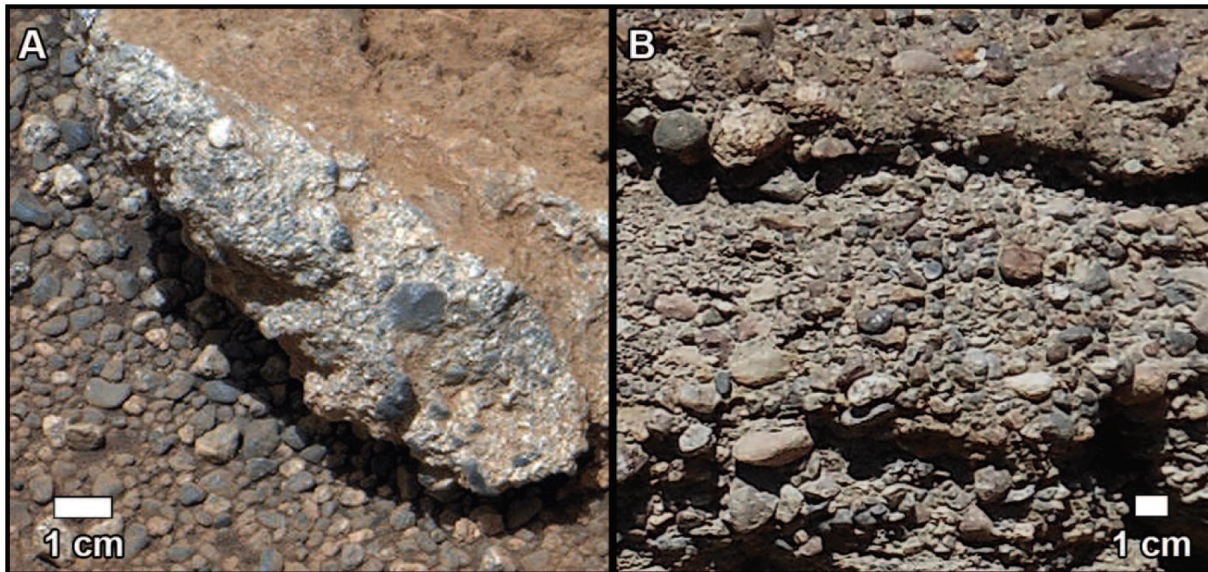


FIGURE 1.8 – Comparatif entre des galets a) observés sur Mars (au niveau d'un affleurement surnommé "Link" et imagé par la Mastcam/Curiosity) et, b) sur Terre dans le désert d'Atacama, au Chili. Extrait de [Williams et al., 2013]

minéraux hydratés : les phyllosilicates et les sulfates. Ces minéraux ne peuvent se former qu'en présence d'eau, ils sont donc la signature d'un passé humide. Cependant leur formation respective requiert des conditions très différentes. Les phyllosilicates sont situés sur des terrains anciens âgés du Noachien alors que les sulfates se trouvent sur des terrains plus jeunes datant de l'Hespérien. Les phyllosilicates se forment par contact prolongé avec de l'eau liquide, dans un milieu neutre ou alcalin alors que les sulfates sont formés dans des milieux acides. [Bibring et al., 2006] propose une chronologie en parallèle des temps géologiques martiens : les argiles (phyllosilicates) se sont formés par altération des roches par de l'eau liquide dans une période appelé le Phyllosian qui prend place pendant le Noachien. Cette période s'arrête lorsque commence, à la fin du Noachien, d'intenses épisodes volcaniques. Les éjections de composés soufrés retombent sous forme de pluies acides qui, au contact des roches, créent des sulfates. Cette période est appelée le Theiikian ; elle débute à la fin du Noachien, pendant l'Hespérien. A l'issue du Theiikian, Mars rentre dans le Siderikian, une période marquée par une altération de la surface (oxydes de fer) due exclusivement à l'action de l'atmosphère. Cette période débute à la fin de l'Hespérien et se poursuit de nos jours [Bibring et al., 2006]. La période la plus propice à l'apparition de la vie est sans aucun doute celle du Phyllosian, pendant le Noachien.

La Figure 1.9 montre la détection de minéraux hydratés par OMEGA sur le site de Marwth Vallis qui est aujourd'hui candidat comme site d'atterrissage pour la mission ExoMars 2020 ; les minéraux sont déposés sur les rives et non au fond du chenal. Ces zones constituent donc des objectifs prioritaires pour la recherche de la vie passée sur Mars. [Loizeau et al., 2012] retrace le contexte géologique du site de Mawrth Vallis qui expose à sa surface l'un des plus grands dépôts de phyllosilicates.

Au regard des fascinantes découvertes faites à la surface de Mars par les imageurs hautes résolutions ou les spectromètres infra-rouge, il est communément admis que la planète rouge a vu de l'eau couler à sa surface. Cependant, que Mars la rouge fut, il y a quelques milliard d'années, Mars la bleue ne coule pas de source !

L'hypothèse de l'océan

Les premières données martiennes provenant des sondes Mariner 4, 6 & 7 ont révélé un monde très différent de celui de la Terre, où la présence d'un hypothétique océan dans un passé lointain fut initialement jugée comme peu probable [Leighton and Murray, 1971].

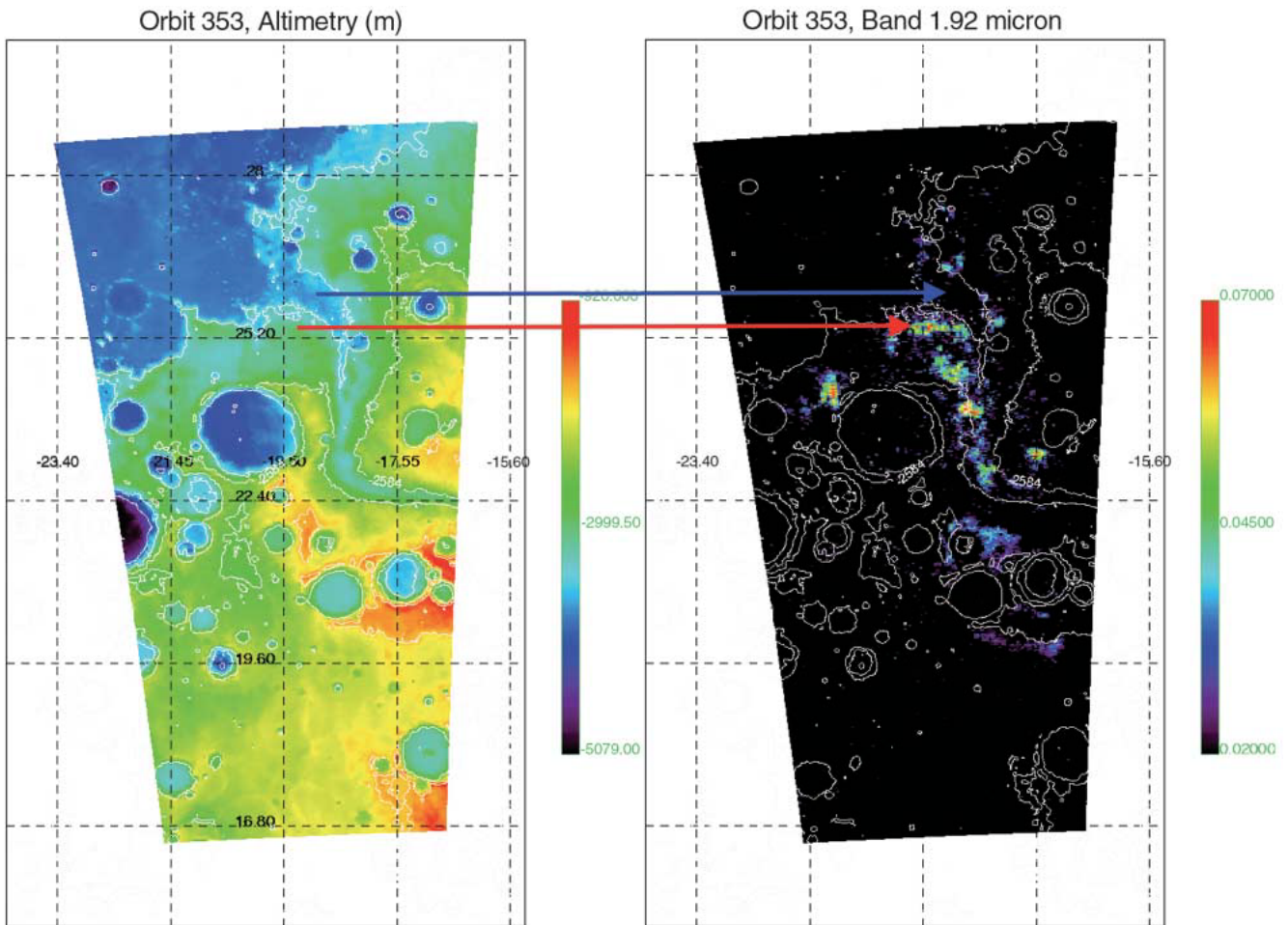


FIGURE 1.9 – Carte des minéraux hydratés dans la région de Marwth Vallis, les minéraux ne se trouvent pas dans le chenal (flèche bleue) mais sur les rives (flèche rouge). Extrait de [Bibring et al., 2006]

Cependant, les observations de canaux fluviatiles ont relancé les hypothèses d'une planète Mars au passé chaud et humide. [Parker et al., 1989] [Parker et al., 1993] [Clifford and Parker, 2001] proposent des lignes de rivage situées dans les plaines Nord de Mars. Ces lignes pourraient délimiter les contours d'un ancien océan martien. Quelques années plus tard, [Head et al., 1999] travaillent également sur l'hypothèse d'un océan martien dans les plaines du Nord à partir des données de topographie provenant de l'altimètre laser MOLA (à bord de l'orbiteur Mars Global Surveyor). Le tracé et l'élévation de ces hypothétiques lignes de rivage, appelées «contact 1» et «contact 2» et précédemment identifiées dans [Parker et al., 1989] [Parker et al., 1993], sont analysés afin de déterminer leur pertinence. La Figure 1.10 montre une projection de la planète Mars centrée sur son pôle Nord, les couleurs correspondent aux élévations fournies par l'altimètre MOLA. Les lignes de rivage "contact 1" et "contact 2" sont représentées en noir. Au regard de critères tels qu'une élévation quasi constante, un tracé qui suit une surface équipotentielle [Head et al., 1999] et une faible rugosité à l'intérieur de la ligne de contour, l'étude [Head et al., 1999] montre que la ligne de rivage "contact 2" constitue l'hypothèse la plus crédible et apporte des éléments en faveur de l'existence d'un ancien océan martien dont le volume est estimé à $1.4 \times 10^7 \text{ km}^3$ [Head et al., 1999]. Plus récemment et de façon indépendante, plusieurs études morphologiques de structures lobées observées dans Arabia Terra ont révélé l'existence de possibles dépôts résultant de tsunamis. Une telle découverte apporte un argument supplémentaire en faveur d'un paleo-océan sur Mars [Rodriguez et al., 2016] [Costard et al., 2017] [Head et al., 1999].

Cependant, si les données MOLA permettent d'identifier des structures, elles ne fournissent pas d'information sur leur composition. [Mouginot et al., 2012] apporte, grâce aux données du radar MAR-

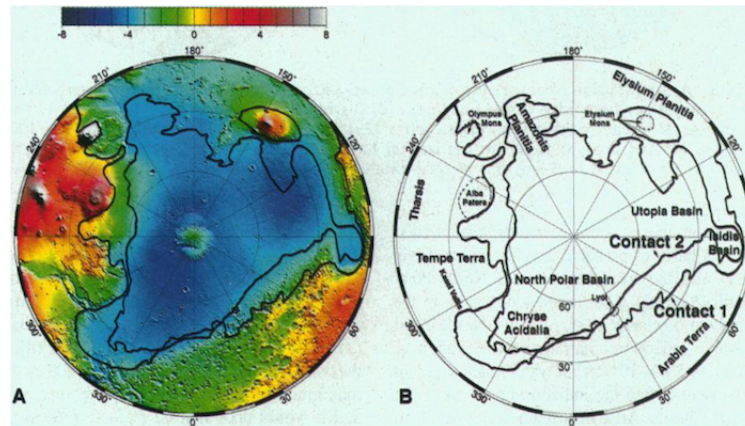


FIGURE 1.10 – Carte d'élévation de l'hémisphère Nord où figurent les lignes de rivage "contact 1" et "contact 2". Extrait de [Head et al., 1999]

SIS de la mission Mars Express, de nouveaux éléments qui accréditent l'existence d'un océan martien. En effet, à partir de l'amplitude du signal MARSIS réfléchi par la surface, il est possible d'estimer une valeur moyenne de la constante diélectrique des matériaux qui composent le sous-sol sur une profondeur d'une centaine de mètres. Les valeurs de constante diélectrique obtenues autour de la calotte polaire Nord sont faibles et compatibles avec la présence de sédiments riches en glace d'eau [Mouginot et al., 2012].

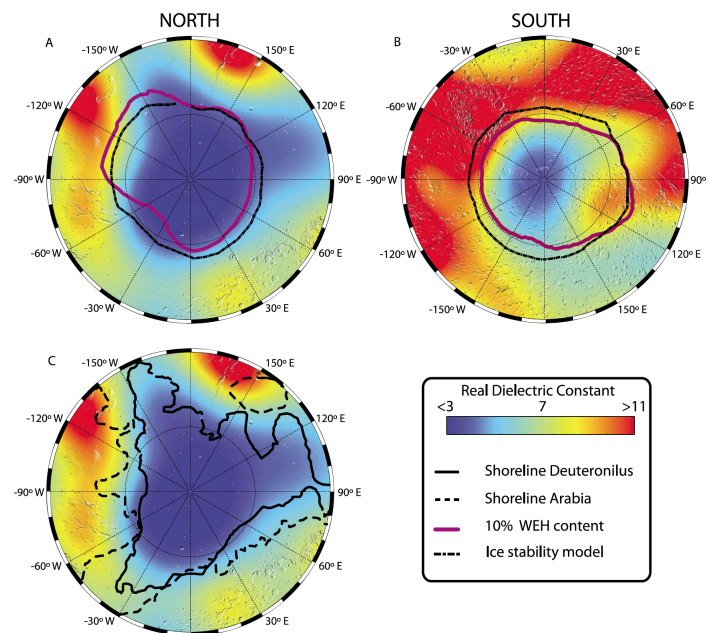


FIGURE 1.11 – Constante diélectrique estimée à partir des données MARSIS/Mars Express. Extrait de [Mouginot et al., 2012]

La Figure 1.11 montre l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud de la planète. Le code couleur correspond à l'estimation de la constante diélectrique à partir des données MARSIS. Sur chacune des deux figures du haut, est également tracée en noir la courbe qui délimite la zone autour du pôle susceptible de contenir une quantité significative de glace d'eau (contenu en eau estimé à 10 % de la masse). Cette information a été obtenue à partir des données des deux spectromètres à neutrons de la mission Mars Odyssey qui ont mesuré le contenu en hydrogène intégré sur une profondeur d'un mètre environ. La non-correspondance entre la carte de constante diélectrique produite par MARSIS et le contenu en eau

déduit par les détecteurs à neutrons provient certainement du fait que les profondeurs d'investigation des deux instruments sont très différentes. Il faut également noter que pour les deux instruments, l'estimation du contenu en eau est très indirecte.

En contraste, la figure du bas met en évidence le fait que la zone où la constante diélectrique est faible correspond très bien à la zone délimitée par la ligne de rivage "contact 2", redéfinie dans [Clifford and Parker, 2001] [Carr and Head, 2003] et appelée "Deuteronilus shoreline". Grâce à une profondeur d'analyse bien supérieure aux autres méthodes, MARSIS révèle une zone riche en glace d'eau vestige d'un ancien océan martien dans l'hémisphère Nord. Il faut cependant garder à l'esprit qu'une faible valeur de constante diélectrique (< 5) peut s'expliquer également par une porosité élevée (voir plus loin).

La glace souterraine et en surface

Nous avons vu qu'il y avait de nombreux éléments attestant de la présence passée d'eau liquide à la surface de Mars. Qu'est-il advenu de cette eau ?

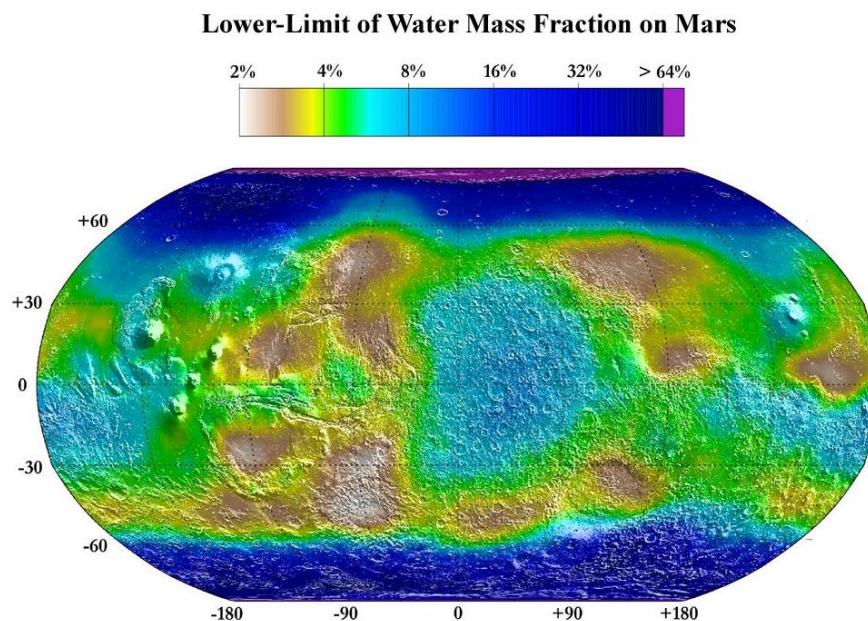


FIGURE 1.12 – Carte du contenu en hydrogène, et donc indirectement en eau, du premier mètre du sous-sol martien déduit des mesures du spectromètre à neutrons de l'instrument GRS/Mars Odyssey/NASA. Crédits : NASA/JPL/Los Alamos National Laboratory

De nos jours, les conditions de pression et de température à la surface de Mars ne permettent à l'eau liquide de subsister dans état stable en surface. En revanche, elle peut exister sous forme solide dans certains endroits. Les ressources en eau actuellement répertoriées de la planète se trouvent essentiellement aux pôles et dans le sous-sol. Les réservoirs les plus visibles sont sans doute les calottes de glace aux pôles Nord et Sud. Ces calottes stratifiées sont en majorité composées de glace d'eau ; sous forme liquide elles recouvriraient la planète entière par un océan de 22 mètres de profondeur [Carr and Head, 2015].

D'autre part, le détecteur à neutrons de la sonde Mars Odyssey (NASA) a permis de cartographier l'hydrogène dans le premier mètre du sous-sol martien. Le principe de la mesure est le suivant : les rayons cosmiques, très énergétiques, interagissent avec le sous-sol ce qui libère des neutrons. Ces neutrons interagissent alors avec les noyaux atomiques des espèces présentes dans le sous-sol. En particulier, ils sont ralentis par l'hydrogène et une diminution du flux de ces neutrons trahit donc la présence d'hydrogène dans le sol, et par extension, celle de molécules d'eau (H_2O). La Figure 1.12 montre le pourcentage d'eau contenu dans le premier mètre martien. Nous remarquons que les pourcentages d'eau

sont élevés aux hautes latitudes (entre 30 et 64%). Plusieurs autres cartes montrent de plus faibles quantités d'eau au pôle Nord ; cela s'explique par le dépôt, pendant l'hiver austral, de quelques mètres de glace carbonique qui masquent alors la glace d'eau.

La quantité de glace importante aux hautes latitudes a motivé la mission Phoenix qui s'est posée, en mai 2008, sur Vastitas Borealis (68°N, 233°E). En "grattant", l'atterrisseur a trouvé, comme attendu, de la glace à quelques centimètres sous la surface [Smith et al., 2009] [Mellon et al., 2009].

La glace d'eau en sous-sol est aussi trahie par la forme (couverture d'éjecta lobée) et la composition (riche en glace) de certains cratères d'impact. La Figure 1.13 montre une carte de la distribution de glace d'eau en sous-sol réalisée à partir des données GRS/MO. Les 5 cratères d'impact (sites 1 à 5) observés ont excavé de la matière et leur analyse spectrale montre la présence de glace d'eau [Byrne et al., 2009].

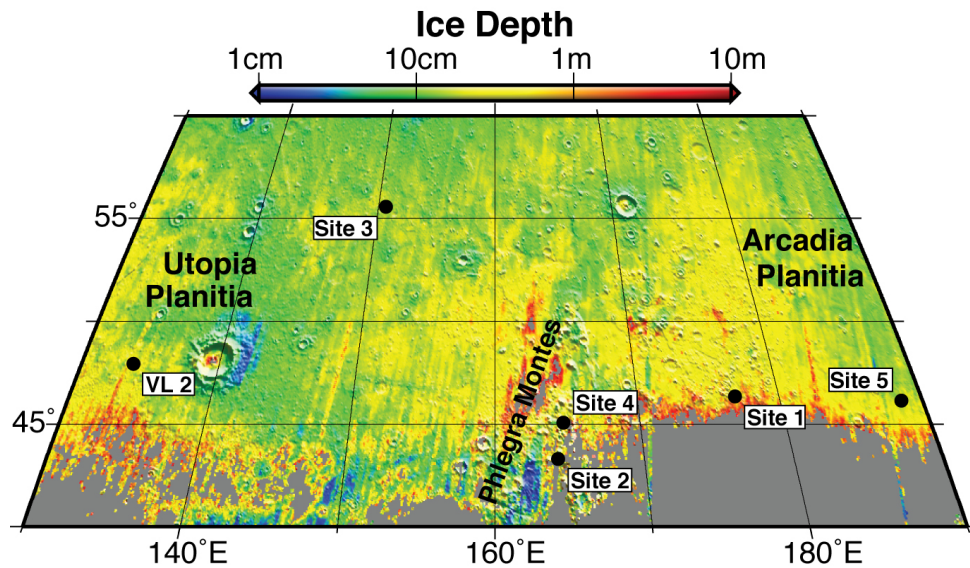


FIGURE 1.13 – Carte du contenu en eau dans les premiers mètres du sous-sol martien à partir des mesures du spectromètre à neutrons de l'instrument GRS/Mars Odyssey/NASA. Extrait de [Byrne et al., 2009]

Enfin, une récente étude [Dundas et al., 2018] s'appuyant sur des observations CRISM/MRO et HiRISE/MRO a montré, aux latitudes moyennes, sur des flancs de falaises, des couches de glaces enfouies à seulement 1 ou 2 mètres de profondeur.

Toutes les observations mentionnées ci-dessus attestent de la présence de glace d'eau dans le proche sous-sol de Mars. Nous verrons, plus loin, comment les radars sondeurs SHARAD et MARSIS ont permis d'identifier des zones riches en glace d'eau en profondeur (à plusieurs centaines de mètres de profondeur).

1.2 De l'observation à l'exploration de Mars

La première observation de Mars n'est pas clairement identifiée, elle est cependant antérieure au II^{ème} millénaire avant JC. La description de Mars à travers les siècles a donné lieu à de nombreuses hypothèses sur sa nature et son mouvement dans le système solaire. Sa trajectoire elliptique et son mouvement rétrograde vu depuis la Terre ont mis à mal le modèle géocentrique en vigueur jusqu'à Copernic. La première carte de Mars peut être attribuée à Huygens en 1659 ; il y fait apparaître une trace sombre qui correspond à Syrtis Major. Il réussit à estimer la période de rotation de Mars ainsi que sa taille relative par rapport à la Terre. En 1666, Cassini observe la calotte polaire Sud (Planum Australe) et fait une estimation encore plus précise de la période de rotation de Mars (il commet une erreur de seulement 3 minutes). En 1877, Giovanni Schiaparelli observe des canaux à la surface de Mars, le terme utilisé dans ses écrits ("canali") ne tranche pas sur la nature de ces canaux. Mais, la croyance populaire s'en empare et une multitude de fantômes sont projetés sur la planète rouge. Certains y voient des mers et des forêts. L'astronome Percival Lowell, en particulier, fut persuadé de l'existence de ces canaux et de leurs origines artificielles. Il donna un nom à chacun d'entre eux et ses cartes ont circulé pendant une bonne partie du XX^{ème} siècle alors que des observations du début du siècle en Europe avaient déjà démenti l'existence de ces canaux. Cependant le mythe des canaux martiens et de ses habitants perdura jusqu'aux premiers survols de Mars. Les premiers concepts de projets de missions habitées vers Mars sont à mettre au crédit de Von Braun (père des moteurs V2 et de la fusée Saturn V) et de son livre "The Mars project" en 1952.

1.2.1 L'observation de Mars : une histoire et des découvertes

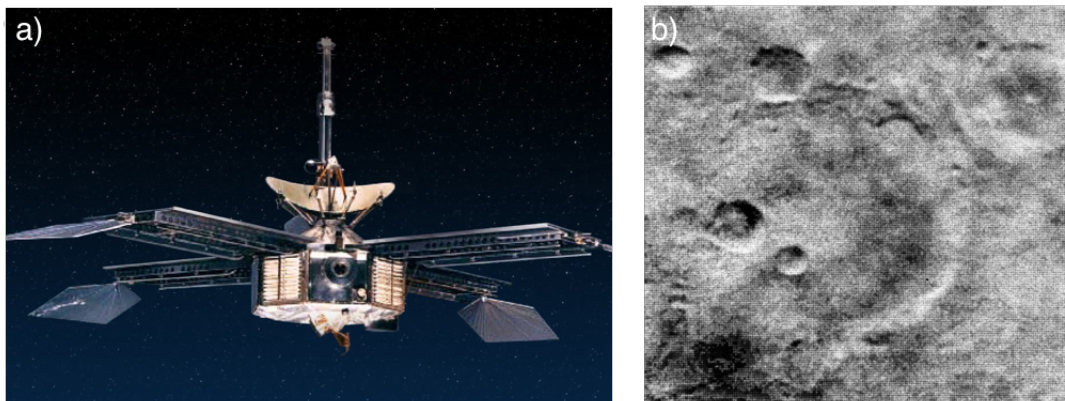


FIGURE 1.14 – Mission Mariner 4 : a) Mariner 4 (Crédit : NASA/JPL-Caltech), b) Première image de Mars prise par la sonde Mariner 4 (Crédit : NASA/JPL)

Dans les années 60, parallèlement à la préparation des missions Apollo vers la Lune, la NASA lance le programme Mariner. Ce programme doit permettre de mieux connaître les trois planètes de notre système solaire que sont Mercure, Vénus et Mars. Les sondes Mariner partagent une plateforme commune sur laquelle vient se greffer une charge instrumentale propre à chaque mission du programme. À cette époque, les observations depuis la Terre ne permettent pas de statuer sur l'habitabilité de ces planètes. Il était commun de penser que Vénus et Mars étaient des planètes où la vie était possible. La 4^{ème} sonde du programme Mariner (Mariner 4) est la première à faire une photo de la surface martienne lors d'un survol en juillet 1965 (voir Figure 1.14). Cette photo, sur laquelle l'on peut voir un cratère de 152 km de diamètre, balaie les hypothèses d'une planète habitable et laisse présager un désert froid et sans vie. Mariner 4 fait 22 clichés, aucun d'entre eux ne montre de canaux.

Les sondes Mariner 6 et 7 effectuent par la suite des survols de la surface de Mars et apportent de nouvelles images de la surface ainsi que des données sur l'atmosphère de la planète rouge [Leovy et al., 1971]. Les données finement traitées permettent l'étude de la calotte polaire [Sharp et al., 1971], de la na-

ture des terrains [Cutts et al., 1971] qui pour les plus sombres sont suspectés de contenir des canaux [Cutts et al., 1971] [Leighton and Murray, 1971]. Mariner 9 est la dernière mission martienne du programme Mariner. En 1971, elle est la première sonde à se mettre en orbite autour d'une autre planète. Elle permet la cartographie de près de 80 % de la surface et dévoile ainsi un nouveau monde avec une géologie complexe faite de vallées et de volcans [Masursky, 1973]. "*Mariner 9 has thus revealed that Mars is a complex planet with its own distinctive geologic history and that it is less primitive than the moon*" [McCauley et al., 1972].

La même année 1971, l'URSS envoie les orbiteurs jumeaux Mars 2 et Mars 3 à la rencontre de la planète rouge. Ils réussiront tous les deux à s'insérer en orbite martienne. Ces deux missions embarquent deux atterrisseurs. Le premier s'écrase à la surface de Mars et le second se pose sans encombre mais dysfonctionne au bout de quelques secondes. L'atterrisseur de Mars 3 contenait un ancêtre des Rovers baptisé Prop-M. Ce petit robot, relié par câble à l'atterrisseur, était équipé d'une paire de tiges métalliques semblables à des skis lui permettant de se déplacer sur une distance de 15 m.

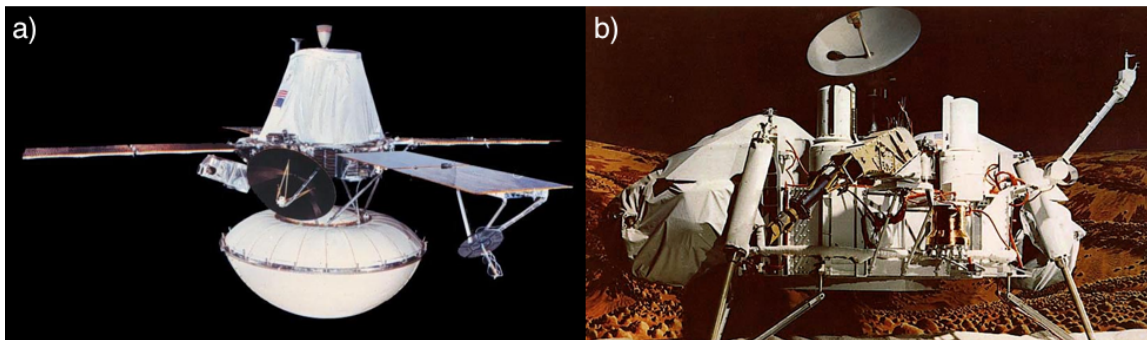


FIGURE 1.15 – Mission Viking/NASA : a) Orbiteur Viking b) Atterrisseur Viking, crédit : NASA/JPL

Le programme américain Viking succède au programme Mariner. Viking 1 et Viking 2 sont lancés respectivement les 20 août et 9 septembre 1975. Ce nouveau programme est ambitieux, il consiste à envoyer 2 orbiteurs et 2 atterrisseurs à la surface de Mars (Figure 1.15). Les orbiteurs ont pour objectif de cartographier Mars et d'identifier des sites d'atterrissages pour les sondes. Le 20 juillet 1976 la sonde Viking 1 atterrit à la surface de Mars et prend un cliché qui restera comme la première image d'un autre monde prise depuis sa surface (Figure 1.16).

Les deux atterrisseurs embarquent plusieurs expériences destinées à chercher des traces de vie à la surface de Mars, mais aussi à mieux contraindre la structure du sous-sol martien grâce notamment à des sismomètres. Cependant, un seul de ces instruments fonctionnera (celui de Viking 2) et la stabilité relative de la sonde ne permettra pas une interprétation fiable des résultats. L'atterrisseur Viking 1 opérera pendant près de six ans. Le programme Viking aura fait entrer l'exploration de Mars dans l'ère moderne. La cartographie quasiment complète qu'il a fait de la surface de Mars (à plus de 95%) restera une référence jusqu'à la mission Mars Global Surveyor (NASA). Les nombreux échecs des missions ayant pour objectif d'atterrir à la surface de Mars rendent d'autant plus remarquables -au regard des moyens technologiques de l'époque- les résultats obtenus par le programme Viking. Désormais l'étude de Mars se fera depuis l'espace et depuis la surface.

Mars vue du ciel

L'utilisation d'instruments en orbite autour de Mars permet de viser une couverture quasi-globale de la planète. Après le succès des orbiteurs Mariner et Viking, la NASA lance de plusieurs missions vers Mars. Mars Global Surveyor (MGS) [Albee et al., 1998], lancée en 1996, prend la suite des orbiteurs Viking. Ses objectifs sont la cartographie de Mars ainsi que l'étude de son atmosphère. L'orbiteur comprend notamment l'instrument TES (*Thermal Emission Spectrometer*) [Christensen et al., 2001b] qui a identifié pour la première fois des hématites à la surface [Christensen et al., 2001a] (reconnues plus tard par le rover Opportunity [Christensen et al., 2004] sur le site de Meridiani Planum) et l'alti-

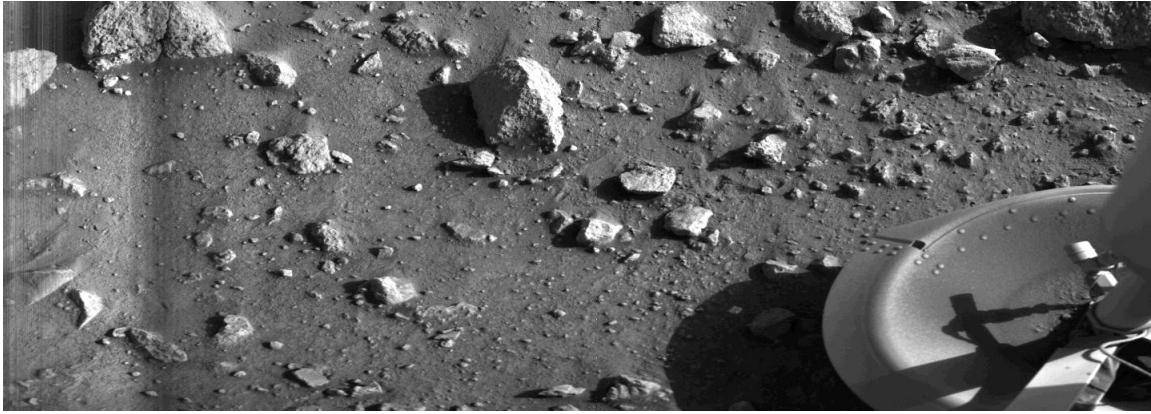


FIGURE 1.16 – Première image prise à la surface de Mars par la sonde Viking (1976). Crédit : NASA/JPL

mètre laser MOLA (*Mars Orbiter Laser Altimeter*) [Zuber et al., 1992]. La topographie de la planète [Smith et al., 1999] est reconstituée à partir des observations MOLA avec une résolution horizontale de l'ordre du kilomètre et une précision verticale de l'ordre du mètre. Les données MOLA sont essentielles à l'interprétation des données fournies par d'autres instruments. Elles permettent d'estimer la rugosité à la surface de Mars, d'identifier des lignes de rivage dans les plaines du Nord [Head et al., 1999] et aide à l'interprétation des données radars [Mouginot et al., 2012]. La mission MGS prend fin le 2 novembre 2006.

En avril 2001, la NASA lance Mars Odyssey. Cet orbiteur toujours en fonction a permis de cartographier la distribution de minéraux en surface avec le spectromètre-imageur THEMIS (*Thermal Emission Imaging System*) mais aussi de l'hydrogène dans le sous-sol à l'aide des deux détecteurs à neutrons faisant partie de la suite instrumentale GRS (*Gamma Ray Spectrometer*) [Mitrofanov et al., 2002]. L'instrument MARIE (*Mars radiation Environment Experiment*) a pour objectif d'étudier les radiations dans l'environnement martien.

Afin de préparer les prochaines missions au sol et de poursuivre l'exploration de Mars, la NASA lance en août 2005 l'orbiteur MRO (*Mars Reconnaissance Orbiter*). Ses objectifs sont de caractériser l'atmosphère et la surface martienne mais également son sous-sol. MRO est notamment équipé d'un mini-télescope HiRISE (*High Resolution Imaging Science Experiment*) pouvant atteindre une résolution de 30 cm par pixel ; c'est cet instrument qui a révélé d'énigmatiques écoulements à la surface de Mars : les RSL [Mangold et al., 2004]. L'orbiteur embarque également le deuxième radar sondeur après MARSIS destiné à la caractérisation du sous-sol martien : SHARAD (*SHallow RA-Dar*) [Seu et al., 2007][Seu et al., 2004]. Les principaux résultats obtenus par SHARAD feront l'objet d'une section plus loin. La mission a été récemment prolongée pour servir de relais à la prochaine mission NASA au sol : Mars 2020.

Le dernier orbiteur lancé par la NASA est MAVEN (*Mars Atmosphere and Volatile Evolution*) [Jakosky et al., 2015]. Toujours actif, son objectif est l'étude de la haute atmosphère et de la ionosphère martienne. Il doit notamment évaluer le taux d'échappement des différents gaz afin de comprendre l'évolution de l'atmosphère martienne exposée au vent solaire.

Alors que les Etats-Unis par le biais de leur agence spatiale (NASA) rencontre de nombreux succès dans l'exploration robotique de la planète rouge (en dépit de quelques échecs : Mars Observer, Mars Climate Orbiter et Mars Polar Lander), l'agence spatiale européenne (ESA) se lance en juin 2003 dans la course. La mission Mars Express est le premier succès européen dans l'exploration martienne. Comme son nom peut le laisser deviner, la mission Mars Express a été mise en place en un temps record (4 ans) et pour un coût contrôlé (budget de 300 millions d'euros). En effet, une partie de la conception est empruntée à la mission Rosetta et des instruments conçus et développés pour Mars 96 sont finalement adoptés par Mars Express (la caméra HRSC, le spectromètre PFS ...). L'orbiteur embarque avec lui une petite sonde britannique baptisée Beagle 2. Malheureusement, suite à un problème de déploiement

d'un panneau solaire, elle ne pourra jamais communiquer avec l'orbiteur après son atterrissage.

La mission européenne Mars Express innove. Elle a pour objectif la caractérisation de l'atmosphère, de la surface et pour la première fois du sous-sol de Mars jusqu'à des profondeurs kilométriques grâce au premier radar sondeur martien MARSIS (voir plus loin). Mars Express réalise avec son spectromètre imageur OMEGA la première découverte de minéraux hydratés [Bibring et al., 2006] et détecte avec MARSIS de l'eau liquide au pôle Sud [Orosei et al., 2018]. Ces découvertes vont dans le sens d'une planète Mars qui a connu un climat plus chaud dans son passé et à la surface de laquelle ruisselait de l'eau. La découverte controversée de traces de méthane par le spectromètre PFS (*Planetary Fourier Spectrometer*) [Formisano et al., 2004] relance l'intérêt exobiologique de la planète Mars. Le méthane peut, en effet, être de nature géologique ou biologique. La faible quantité détectée au regard de la sensibilité du capteur modère cependant sa découverte.

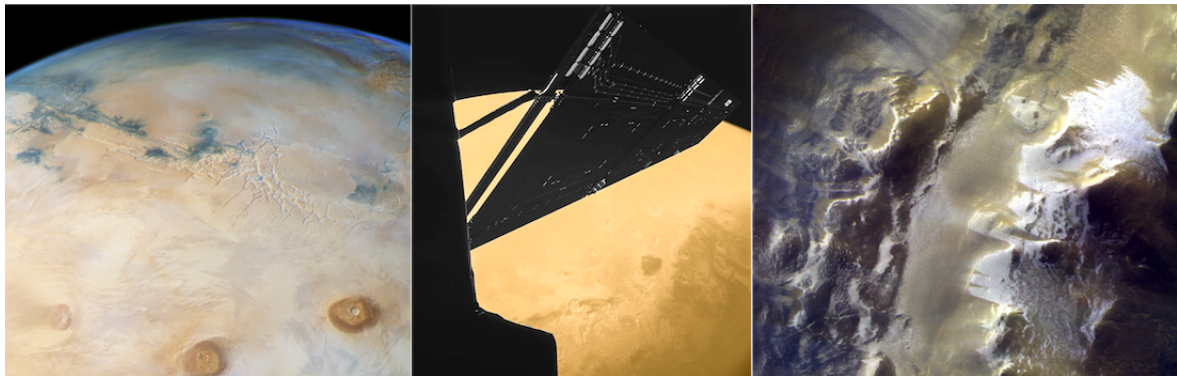


FIGURE 1.17 – Mars vue par l'Europe : a) Image HRSC/Mars express de Mars, crédits : ESA/DLR/FU Berlin, CC BY-SA 3.0 IGO, b) Image CIVA prise depuis le lander Philae à bord de Rosetta, crédits : ESA/Rosetta/Philae/CIVA, c) Image CaSSIS/TGO du rebord du cratère Korolev, crédits : ESA/Roscosmos/CaSSIS

La Figure 1.17 montre des images de Mars acquises respectivement par les caméras des missions européennes Mars Express, Rosetta et TGO. La mission Rosetta, destinée à l'étude de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko, a effectivement réalisé un survol de Mars durant son périple afin de bénéficier de son assistance gravitationnelle.

En résumé, les orbiteurs ont révolutionné notre représentation de la planète rouge. Loin d'une planète à l'agonie à la surface de laquelle une civilisation extra-terrestre aurait installé des canaux pour drainer l'eau confinée aux pôles, les premières images de Mariner 9 ont montré une planète qui a connu dans un lointain passé une géologie active. La découverte de volcans, de canyons, de réseaux de vallées ont balayé les premières conclusions apportées par Mariner 4, à savoir une planète semblable à notre satellite naturel, la Lune. Les caméras MOC, HRSC et HiRISE ont permis d'étudier la surface de Mars à haute résolution et d'observer des processus géologiques bien connus sur Terre. La découverte des RSL par HiRISE [McEwen et al., 2011] nous rappelle qu'aujourd'hui encore la planète n'a pas révélé tous ses secrets.

La recherche d'eau fait partie des moteurs de l'exploration spatiale ; les détecteurs à neutrons et gamma ont permis de contraindre la quantité d'hydrogène dans le sous-sol proche alors que les spectromètres OMEGA et CRISM ont révélé en surface des phyllosilicates, résultats d'un contact prolongé avec de l'eau liquide. L'étude du sous-sol par les radars MARSIS et SHARAD a permis d'identifier la présence de glace d'eau, vestiges probables d'un passé martien humide. Récemment le radar sondeur MARSIS a même identifié une zone probablement saturée en eau liquide sous la calotte polaire Sud. En plus de dévoiler une planète au passé riche, les orbiteurs permettent de préparer les missions en surface en identifiant les sites d'atterrissage qui présentent à la fois un intérêt scientifique et des conditions propices à un atterrissage. Ces orbiteurs servent aussi de relais de télécommunication entre la Terre et le Rover/sonde à la surface de Mars. En 2017, le premier volet de la mission ExoMars

(ESA) a mis TGO (*Trace Gas Orbiter*) en orbite autour de la planète rouge. Après une année de manoeuvre, l'orbiteur est prêt à commencer sa mission. Il servira en 2020 de relais pour le Rover et la plateforme instrumentée de la mission ExoMars 2020.

Mars vue du sol

La mission Pathfinder est lancée le 4 décembre 1996, pour une arrivée sur le sol martien en juillet 1997. Pathfinder atterrit dans Ares Vallis, qui est une vallée de débâcle. Pour cette mission une nouvelle procédure d'atterrissage est adoptée : des airbags amortissent la chute de la plateforme. La mission Pathfinder introduit aussi un nouvel outil d'exploration : le Rover. Baptisé Sojourner, ce petit laboratoire mobile embarque l'instrument APXS (*Alpha Proton X-ray Spectrometer*) qui permet de contraindre la composition des roches étudiées. Les multiples caméras de la station fixe Pathfinder ont permis d'étudier la forme des roches et de conclure que certaines d'entre elles avaient été charriées et façonnées par de l'eau liquide. La découverte de ces galets apporte une pierre à l'édifice d'une planète Mars chaude et humide dans sa jeunesse.

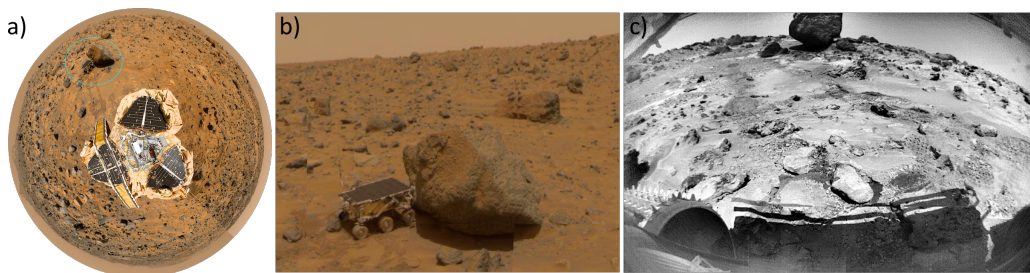


FIGURE 1.18 – a) Vue du dessus de la station Pathfinder, b) Sojourner en pleine analyse du rocher Yogi, c) Vue du rocher Yogi par la caméra de Sojourner. Crédit des images : NASA/JPL

La mission MER (*Mars Exploration Rover*) est particulièrement ambitieuse. Après le succès de Sojourner, la mission MER propose d'envoyer deux Rovers (Spirit et Opportunity). Cette stratégie permet de réduire les risques d'échec mais aussi les coûts en cas de succès. Les deux rovers atterrissent tous les deux en janvier 2004 dans le cratère de Gusev pour Spirit et sur Meridiani Planum pour Opportunity. Comme Sojourner, ils embarquent un spectromètre APXS afin de caractériser les roches mais aussi un spectromètre infra-rouge Mini-TES. Le Rover Spirit achève son aventure en 2011 lorsqu'il s'enlise et interrompt quelques mois plus tard toutes communications. Actuellement, la mission MER se poursuit toujours avec Opportunity. Cependant depuis la tempête de sable de mi-juin 2018, les communications avec le petit rover ont été perdues. Sans réponse début 2019, la mission MER sera considéré comme terminée. Opportunity aura néanmoins battu tous les records de longévité avec plus de 45 km parcourus en près de 14 ans d'activité.

Avec la mission Phoenix, la NASA revient à un mode d'exploration que l'on croyait abandonné après le succès des Rovers : celui d'une sonde statique à la surface. Phoenix atterrit à la surface de Mars en mai 2008 dans les plaines du Nord, plus exactement dans Vastitas Borealis. Elle est pour le moment la seule sonde à s'être aventurée à de si hautes latitudes. A l'aide de son bras mécanique, Phoenix dévoile de la glace d'eau à quelques centimètres de la surface. L'analyse du proche sous-sol révélera la présence de carbonates [Boynton et al., 2009] ainsi que de perchlorates [Hecht et al., 2009].

La mission MSL (*Mars Search Laboratory*) atterrit le 6 août 2012 à la surface de Mars dans le cratère de Gale. Le système d'airbags est abandonné au profit de puissantes rétrofusées arrimées à un étage supérieur ; le Rover atterrit sur ses propres roues. Curiosity est à ce jour le rover le plus perfectionné à la surface de Mars ; il pèse près de 900 kg contre seulement 185 kg pour les Rovers MER. Contrairement à ses prédécesseurs, Curiosity ne tire pas son énergie de panneaux solaires mais d'un générateur à radio-isotopes. Sa charge instrumentale a notamment permis d'effectuer des forages dans le sous-sol martien (sur une profondeur d'environ 5 cm), de découvrir de la matière organique (les fameuses briques du vivant) [Eigenbrode et al., 2018], de confirmer la présence de méthane dans l'atmosphère martienne

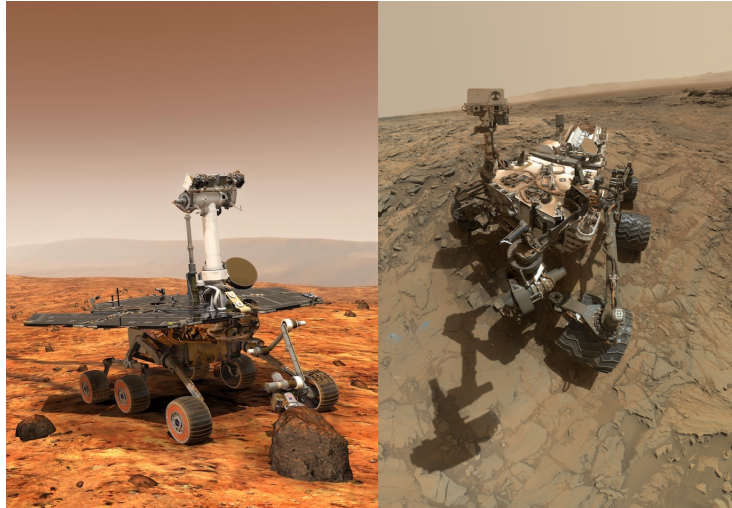


FIGURE 1.19 – Rovers toujours en activité à la surface de Mars : a) Vue d'artiste du Rover de la mission MER, crédits : NASA/JPL/Cornell University/Maas Digital, b) Auto-portrait du Rover MSL, crédits : NASA/JPL-Caltech/MSSS

[Webster et al., 2018] et d'observer des traces d'érosions par l'eau liquide comme des conglomérats dans le cratère de Gale [Williams et al., 2013]. Au mois de janvier 2018, MSL a parcouru 18 km.

Seules les missions avec un retour scientifique significatif ont été évoquées ci-dessus. L'exploration martienne a essuyé de nombreux échecs, notamment du côté de l'Union soviétique. Depuis les années 60, l'URSS a envoyé de nombreuses sondes nommées Mars, qui se sont pour la plupart soldées par des échecs. Nous notons une domination des missions américaines. Cependant depuis 20 ans de nouveaux partenaires comme l'Europe ou récemment l'Inde avec son *Mars Orbiter Mission* ont lancé un programme d'exploration martienne signe de l'attractivité internationale de la planète rouge.



FIGURE 1.20 – a) Le Rover ExoMars crédit : ESA/ATG medialab b) le Rover Mars2020 crédit : NASA/JPL-Caltech

La surface de Mars est aujourd'hui bien connue, mais la question d'une vie primitive passée voire toujours présente en sous-sol où elle est protégée des conditions hostiles de surface n'est pas réglée. De nouvelles missions sont prévues pour mieux comprendre la structure de Mars mais aussi chercher de nouveaux éléments de réponse à la question de la vie et plus certainement de l'habitabilité de la planète dans sa jeunesse. À l'heure actuelle, la mission Insight/NASA est en transit vers Mars ; cette mission a pour instrument principal le sismomètre SEIS (*Seismic Experiment for Interior Structures*) qui devrait permettre de contraindre la structure interne de la planète. En 2020, deux missions sont

prévues : la première est Mars 2020 (NASA), elle est bâtie sur la structure de la mission MSL. Elle sera suivie de la mission européenne ExoMars 2020.

En effet, après des années de péripéties programmatiques, un accord signé en 2013 entre l'agence spatiale européenne (ESA) et son homologue Russe (Roscosmos) confirme la mission ExoMars. Elle comporte le lancement d'un Orbiter (TGO) en 2016 et d'un Rover deux ans après. L'ESA s'engage à fournir l'orbiteur TGO ainsi que la petite station météorologique Schiaparelli pour ExoMars 2016 puis le Rover pour ExoMars 2018. Roscosmos doit fournir les lanceurs (fusées Proton) et prendre en charge l'atterrissage du Rover. Le second volet de la mission ExoMars est finalement reporté au début de l'été 2020. Les rebondissements de la mission ExoMars sont résumés dans la Figure 1.21.

1.2.2 ExoMars 2016

La mission ExoMars 2016 est lancée avec succès le 14 mars 2016 du cosmodrome de Baïkonour. Ses objectifs sont multiples ; la mission doit notamment permettre l'étude de l'atmosphère martienne grâce au satellite TGO (*Trace Gas Orbiter*), l'atterrissage du module démonstrateur Schiaparelli ainsi que la préparation de la mission ExoMars 2020.

Schiaparelli

Schiaparelli aussi appelé EDM pour ExoMars Entry, Descent and Landing Demonstrator Module, avait pour objectif principal la validation des procédures d'atterrissage en préparation de la mission ExoMars 2020. Le module comportait une charge utile (DECA, AMELIA, COMARS) destinée à suivre le bon déroulement de la séquence d'atterrissage et à recueillir le maximum de données dans l'environnement proche de la sonde (température, pression, vents). Schiaparelli embarquait également une charge scientifique nommée DREAMS (Dust characterisation, Risk assesement, and environnement analyser on the Martian Surface). DREAMS avait pour mission d'évaluer les conditions météorologiques locales, la vitesse du vent (metwind), l'humidité (DREAM-H), la pression (DREAM-P), la température (MarsTem), la transparence de l'atmosphère (SIS) et enfin le champ électrique (MicroAres). La charge instrumentale était alimentée par une batterie, la sonde étant dépourvue de cellule photovoltaïques, ce qui confèrait à la mission une autonomie comprise entre 2 et 8 sols.

Cependant, le 19 octobre 2016 alors que Schiaparelli entame sa descente vers sa dernière destination et que le module gère parfaitement son entrée dans l'atmosphère martienne, la communication entre la petite sonde et la Terre est brutalement interrompue. Quelques heures plus tard, Mars Reconnaissance Orbiter retrouve le cratère d'impact provoqué par le crash de Schiaparelli et ce qui semble être le parachute de la sonde. Schiaparelli a pu transmettre quelques données de télémétrie, qui ont permis de comprendre les causes du crash. Ces données semblent imputer l'accident à une défaillance provenant de la centrale inertielle. Lors de la descente, les mouvements de nutations ont été bien plus importants que ceux prédits par simulation, allant jusqu'à atteindre le niveau de saturation de l'un des capteurs. Bien qu'encore à environ 4 kilomètres du sol, l'ordinateur de bord a calculé une altitude erronée, dont la valeur a automatiquement déclenché l'ultime phase d'approche. La sonde a mis en fonctionnement ses rétrofusées bien trop tôt, a consommé son carburant puis a effectué une chute libre non prévue de plusieurs kilomètres. Avec Schiaparelli, l'Europe échoue pour la seconde fois à déposer en douceur et déployer un engin à la surface de Mars.

Trace Gas Orbiter

Le 19 octobre 2016, le Trace Gas Orbiter est le deuxième orbiteur européen après Mars Express à se positionner en orbite autour de la planète rouge. Le principal objectif scientifique de TGO est de rechercher et comprendre l'origine des traces de méthane observées par Mars Express et MSL. Plus généralement, la charge utile de TGO va analyser la composition de l'atmosphère martienne et cartographier la distribution d'eau dans le premier mètre du sous-sol. L'orbiteur devra aussi servir de relais de télécommunication pour le Rover et la plateforme de la mission ExoMars 2020. Afin d'étudier l'atmosphère de Mars, TGO embarque deux spectromètres : NOMAD (spectromètre avec 2 canaux



CU : Charge Utile
 PDR (Preliminary Design Review) : Revue préliminaire de conception
 CDR (Critical Design Review) : Examen critique de conception
 STM (Structural and Thermal Model): Modèle structural et thermique
 EM (Engineering Model) : Modèle d'ingénierie
 FM (Flight Model) : Modèle de vol
 FS (Flight Spare) : Modèle de rechange
 EIS (Electrical Interface Simulator) : Simulateur d'interface électrique
 TGO : Trace Gaz Orbiter

Recommandations pour une mission européenne d'exobiologie

Etudes préliminaires pre-Phase A

ExoMars : première mission du programme Aurora/ESA d'exploration robotique et humaine de système solaire.
 Lancement initialement prévu en 2009 rapidement décalé à 2011

Appel à proposition pour des instruments (50 propositions, 22 évaluées)

Sélection des instruments du rover (CU Pasteur) et de la plateforme instrumentée (CU Humboldt)

Début de phase B
 Choix des principaux sous-traitants

Lancement décalé en 2013 avec une fusée Ariane 5
 Revue de confirmation de CU

La mission ExoMars a 2 volets (orbiteur & atterrisseur puis Rover)

Collaboration NASA et l'ESA. Deux rovers MAX-C et ExoMars seront lancés par une fusée Atlas et déposés sur Mars par la NASA.
 La mission est scindée en 2 parties : lancements 2016 et 2018

La NASA se retire du projet - 7 instruments restent dans la CU

L'agence russe Roscosmos rejoint l'ESA pour une mission ExoMars commune.
 2 instruments arrivent dans la CU rover

Report du 2^{ème} volet d'Exomars de 2018 à 2020
 14 mars 2016 : Lancement d'ExoMars 2016 (orbiteur TGO qui assurera aussi le relais des données d'ExoMars 2020 et atterrisseur Schiaparelli)

Entrée Descente et Atterrisage avant le 29 mars

29 octobre fin de la mission nominale

1999

2000

2001

2002 Proposition d'une suite de 2 GPR (UHF et VHF) et d'une sonde de permittivité

2003

2004 WISDOM (version UHF) est sélectionné

2005

2006

2007

2008 PDR de WISDOM
 Passage en phase B2

2009 Prototype représentatif du modèle de vol

2010 Phase B2X3

2011 Phase B2X4
 Campagne de mesures SAFER au Chili

2012

2013 Phase B2X5 – Achat des composants
 Livraison du STM WISDOM

2014

2015 Livraison de l'EIS WISDOM
 CDR de WISDOM Début de phase C/D

2016 L'EM de WISDOM est fonctionnel

2017

2018 Livraison du FM et de l'EM de WISDOM
 Campagne de mesures ExoFit en Espagne

2019

2020 Livraison du FS de WISDOM

2021 Opérations – Traitement et interprétation des données

2022

FIGURE 1.21 – Historique de la mission ExoMars, Crédit : ESA/ROSCOSMOS/NASA

infrarouge et un canal UV) et ACS (ensemble de trois spectromètres infrarouge). CaSSIS cartographiera la surface de Mars avec une résolution pouvant atteindre 4.5 m/pixel. Utilisant ses capacités de stéréovision, CaSSIS produira également des modèles numériques de terrain. Enfin FRENDD est un détecteur à neutrons qui aura pour objectif de construire une carte de l'hydrogène en sous-sol (eau et minéraux



FIGURE 1.22 – Mission ExoMars 2016 : Trace Gas Orbiter et son module Schiaparelli, Crédit : ESA/ATG medialab

hydratés) sur un mètre de profondeur avec une résolution inégalée [Vago et al., 2015].

1.2.3 ExoMars 2020

Le second volet de la mission ExoMars, ExoMars 2020 sera lancé en juillet 2020 avec un atterrissage prévu au printemps 2021 sur le sol martien. Cette mission a pour objectif la recherche de traces de vie passée ou présente sur Mars. Plus sûrement, la mission étudiera l’habitabilité passée ou actuelle de la planète rouge et, en conséquence, se focalisera également sur l’analyse de la répartition de l’eau dans le sous-sol proche. Comme il a été vu précédemment, Mars a perdu son bouclier magnétique et possède une atmosphère ténue (6 mbar), sa surface est donc exposée à de nombreux rayonnements énergétiques nocifs pour les organismes vivants. Il y a donc très peu de chances de trouver des traces de vie à la surface de Mars. Nos meilleurs espoirs ne se trouvent pas en surface mais dans le sous-sol martien. Sous quelques mètres de profondeur, les traces de vie ont plus de chance d’avoir été préservées des rayonnements [Vago et al., 2015]. Le Rover de la mission ExoMars embarquera une foreuse capable de forer jusqu’à une profondeur de 2 m, ce qui constitue une première dans l’exploration des sous-sol planétaires (à l’exception notable des missions Luna 16, 20 et 24 qui ont effectué des carottages allant jusqu’à 3 mètres de profondeur dans le sol de notre satellite). Malgré un faible pouvoir de pénétration, de l’ordre de quelques centimètres, la foreuse de la mission américaine MSL a révélé l’aspect très différent du proche sous-sol par rapport à la surface. L’étude et la récolte d’échantillons à des profondeurs plus importantes est donc porteuse d’espoir. Notre connaissance de la surface martienne s’est considérablement développée depuis les premières images apportées par Mariner 9. De nos jours, la surface de Mars a été et est encore observée par les imageurs haute résolution en orbite et sa topographie est connue grâce à l’altimètre laser MOLA. Cependant son sous-sol nous reste sensiblement inconnu, même si les radars sondeurs SHARAD et MARSIS ont permis de cartographier les calottes polaires et de dévoiler quelques structures enfouies, comme par exemple un canal creusé par un magma en fusion sous la plaine d’Elysium, et les détecteurs à neutrons ont permis de cartographier l’abondance d’hydrogène dans le premier mètre du sous-sol. Outre son intérêt exobiologique, la mission ExoMars 2020 va lever le voile de la surface martienne, ouvrir une nouvelle dimension, celle de la profondeur. Jusqu’à maintenant, l’étude de la composition d’échantillons se limitait majoritairement à des matériaux exposés en surface ; ExoMars 2020 disposera de toute une palette d’instruments afin d’étudier le proche sous-sol martien (de 0.1 à 2 m). La mission nominale doit durer 218 sols soit environ 7 mois. La masse totale du Rover est de 310 kg (26 kg pour la charge instrumentale) ce qui le place entre les Rovers de la mission MER et le Rover MSL.

ExoMars 2020 a pour l’ambition de révéler à notre connaissance la sous-surface martienne mais aussi de déposer le premier Rover de conception européenne sur le sol martien. Les deux tentatives



FIGURE 1.23 – Rover de la mission ExoMars 2020, Crédit : ESA/ATG medialab

européennes de poser une sonde à la surface de Mars se sont malheureusement soldées par des échecs et la récente découverte de Beagle 2 n'amointrit pas la déception du crash du démonstrateur Schiaparelli. Du côté de l'agence spatiale Russe, la planète rouge n'a pas apporté plus de réussite. Nous garderons en mémoire la perte soudaine du prometteur Mars 96 désintégré avant même de rejoindre l'océan Pacifique ainsi que l'échec de la mise en orbite martienne de la sonde Phobos-Grunt dont l'objectif était l'étude ainsi que le retour d'échantillons en provenance du satellite naturel martien Phobos.

La charge utile

Le Rover de la mission ExoMars comporte neuf instruments dédiés à l'étude de la surface et du sous-sol de Mars. Nous pouvons aisément regrouper ces instruments en trois catégories, les instruments conçus pour étudier la surface (PanCam, CLUPI et ISEM), ceux pour étudier le sous-sol (ADRON-RM, WISDOM et Ma_MISS) et enfin le laboratoire embarqué pour l'analyse des échantillons collectés par la foreuse (MicrOmega, RLS et MOMA).

Exploration de la surface

PanCam, CLUPI et ISEM vont caractériser la surface et replacer le site étudié dans un contexte géologique global. PanCam est composé d'une caméra haute résolution mais aussi d'une paire de caméras (stereo-caméras) qui permettront de reconstruire en 3D les sites à l'étude [Coates et al., 2017]. CLUPI (CLOse-UP Imager) est une caméra haute résolution capable d'acquérir des images avec une FOV comprise entre 1.9×1.3 cm (à 10 cm avec une résolution de $7 \mu\text{m}/\text{pixel}$) et 104.4×44.4 cm (à 500 cm avec une résolution de $394 \mu\text{m}/\text{pixel}$), elle permettra de caractériser la texture des roches mais aussi de rechercher des signatures laissées par d'éventuels micro-organismes [Josset et al., 2017]. ISEM (*Infrared Spectrometer for ExoMars*) est un spectromètre infrarouge qui va contraindre la minéralogie et pétrologie des roches en surface [Korablev et al., 2017].

Exploration du sous-sol

Le sous-sol de Mars est bien moins connu que sa surface ; c'est cependant l'endroit où des traces de vie passées ou présentes ont le plus de chance d'être préservées. Le Rover ExoMars 2020 permettra de l'étudier, de façon non destructive, grâce aux instruments WISDOM et ADRON-RM. WISDOM est un radar à pénétration de sol, il sera capable de sonder le sous-sol jusqu'à 2 – 3 mètres

de profondeur [Ciarletti et al., 2011] [Ciarletti et al., 2017a] et fournira des informations cruciales pour l'interprétation de l'histoire géologique du site étudié et de son évolution. ADRON-RM est un détecteur à neutrons, comme ses cousins en orbite, il fournira la quantité intégrée d'hydrogène dans le sous-sol sur environ 1 mètre de profondeur [Mitrofanov et al., 2017]. La combinaison des données fournies par ces deux instruments permettra de caractériser le sous-sol martien et de trouver le site le plus prometteur pour prélever des échantillons. En outre, WISDOM, grâce à sa résolution centimétrique, guidera la foreuse. Intégré à cette dernière, le spectromètre infrarouge Ma_MISS fournira une analyse minéralogique du sous-sol lors des sondages verticaux [De Sanctis et al., 2017].

Analyse des échantillons

Les échantillons collectés en surface ou dans le sous-sol martien seront analysés par un véritable laboratoire embarqué (ALD, *Analytical laboratory drawer*). Ce laboratoire est composé de trois instruments : le spectromètre Raman RLS (*Raman Laser Spectrometer*) [Rull et al., 2017], le microscope proche infra-rouge MicrOMEGA [Bibring et al., 2017] et le détecteur de molécules organiques MOMA (*Mars Organic Molecule Analyser*) [Goesmann et al., 2017]. Ces instruments sont conçus pour être capables d'identifier des molécules organiques et de déterminer la composition des minéraux présents dans les échantillons.

Le site d'atterrissage

Le choix du site d'atterrissage est capital pour remplir les objectifs de la mission ; il doit satisfaire des critères scientifiques tout en prenant en compte des contraintes techniques liées à l'atterrissage et au déplacement du rover en surface. D'un point de vue scientifique, l'objectif principal de la mission ExoMars est la recherche de traces de vie passée (voire présente). Le site d'atterrissage doit donc présenter des caractéristiques favorables à l'apparition d'une vie primitive qui aurait pu se produire pendant le Noachien. Le site doit donc présenter des terrains anciens datant du Noachien. Puisque la vie semble intrinsèquement liée à la présence d'eau liquide qui est un excellent solvant et favorise de ce fait une chimie très riche, le site retenu doit également avoir été abondamment humide dans le passé. La présence de traces d'érosion par de l'eau liquide fait donc partie des conditions à remplir pour le site retenu. De plus, bien que l'objectif numéro un soit la recherche de la vie, cette ambition se doit de respecter les règles de protections planétaires dictées par le COSPAR (*Committee on Space Research*). Ces règles ont notamment pour objectif de protéger la planète Mars de contaminations par la Terre qui pourraient mettre en danger une éventuelle vie présente sur Mars. "Comment observer un système sans le perturber ?" est un thème récurrent dans les sciences, et la recherche de la vie dans des mondes extra-terrestres n'y échappe pas. En conséquence, le niveau de propreté requis pour une mission d'exploration dépend du type de mission. Pour Mars, les missions de survol et mise en orbite haute sont classées en catégorie III, les investigations avec atterrisseurs sont de catégorie IV. Parmi ces dernières, les missions ayant pour but de découvrir des traces de vie sont classées catégories IVb et celles qui visent des zones où des organismes terrestres pourraient se multiplier sont de catégorie IVc (de telles zones sont définies par le COSPAR et appelées les *Mars special regions*). Les missions de catégories IVc imposent une exigence de propreté supérieure à celle requise pour les missions de catégorie IVb dont une stérilisation complète de la plateforme. La mission ExoMars 2020 est de catégorie IVb. Par conséquent, les sites d'atterrissages pressentis ne sont paradoxalement pas situés dans des zones spéciales qui présentent les meilleures conditions d'habitabilité présente [Vago et al., 2017]. A l'heure actuelle, aucune mission en surface n'est prévue pour étudier de plus près les RSL dont l'intérêt exobiologique est pourtant élevé.

A ce jour, deux sites ont été sélectionnés : Oxia Planum (18.159°N, 335.666°E) et Mawrth Vallis (22.160°N, 342.050°E). Le site Oxia Planum est situé à la sortie de Cogoan Vallis. Des Mg/Fe phyllosilicates ont été détectés sur près de 80% de la surface délimité par l'ellipse d'atterrissage. Leur formation est datée par comptage de cratères à 3.9 Ga. Cependant des unités beaucoup plus jeunes (autour de 100 Ma) révélées par érosion éolienne sont aussi présentes [Quantin et al., 2016]. Le site de Mawrth Vallis se situe proche de la dichotomie Nord/Sud. Les données OMEGA montrent une large distribution de

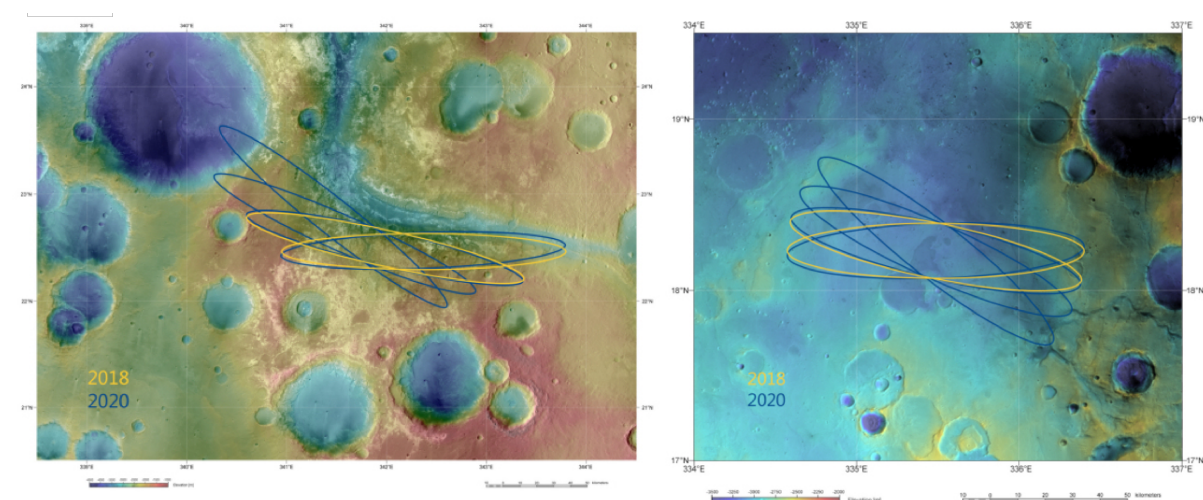


FIGURE 1.24 – Sites d’atterrissages à l’étude pour la mission ExoMars 2020, à gauche Mawrth Vallis, à droite Oxia planum, Credit : ESA/DLR/FU Berlin et NASA MGS MOLA Science Team

philosilicates [Loizeau et al., 2007]. Les deux sites respectent les critères d’élévation (< -2 km d’après MOLA), cependant le site d’Oxia Planum présente moins de pentes et possède une altitude inférieure à celle de Mawrth Vallis (ce qui facilite les manoeuvres d’atterrissage). La sélection définitive du site d’atterrissage sera faite dans le courant de l’année 2019.

1.3 Le sondage électromagnétique

La plupart des données qui ont été collectées lors de missions martiennes concernent la surface ou le sous-sol très peu profond, les seuls instruments qui ont permis de révéler l'existence de structures profondes sous la surface sont les radars sondeurs MARSIS et SHARAD. Les ondes électromagnétiques dans le domaine des micro-ondes peuvent, en effet, se propager dans des milieux matériels qui sont opaques pour les instruments qui travaillent à des longueurs d'onde plus courtes. C'est cette propriété qui rend les radars incontournables quand il s'agit de révéler des structures cachées par une épaisse atmosphère (comme c'est le cas pour les surfaces de Vénus et de Titan) ou enfouies sous la surface. Le sondage électromagnétique est utilisé sur Terre dans de nombreux domaines comme le génie civil, le contrôle des infrastructures (ponts, routes ...), les métiers du bâtiment (sondage de cloisons, identification des matériaux), l'archéologie (fouilles, recherches de cavités....) ainsi que la caractérisation géologique des sous-sols, l'hydrologie et la glaciologie. Cette technique de sondage non invasif repose sur l'utilisation d'ondes électromagnétiques qui sont émises, se propagent et sont finalement captées par l'antenne réceptrice après interaction avec le milieu étudié.

1.3.1 Propagation des ondes électromagnétiques

Dans cette partie, nous rappelons très succinctement les grandes lois qui régissent la propagation des ondes dans un milieu matériel homogène.

Equations de Maxwell

Dans un milieu matériel, les relations locales liant les champs vectoriels électrique et magnétique, associés à une onde électromagnétique, sont données par les équations de Maxwell :

- Loi de Maxwell-Ampère :

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{J}_c(\vec{r}, t) + \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (1.1)$$

- Loi de Gauss magnétique :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0 \quad (1.2)$$

- Loi de Maxwell Faraday :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (1.3)$$

- Loi de Gauss électrique :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) = \rho(\vec{r}, t) \quad (1.4)$$

où $\vec{E}(\vec{r}, t)$ et $\vec{H}(\vec{r}, t)$ sont respectivement les champs électriques et magnétiques, $\vec{B}(\vec{r}, t)$ le champ magnétique, $\vec{D}(\vec{r}, t)$ le déplacement électrique, $\rho(\vec{r}, t)$ la densité de charge électrique par unité de volume (C/m^3) et $\vec{J}_c(\vec{r}, t)$ le vecteur de densité surfacique de courant (A/m^2). Ces relations font intervenir les constantes de permittivité et de perméabilité du vide ϵ_0 et μ_0 . L'équation de Maxwell Faraday traduit le fait qu'un champ électrique est généré par des variations temporelles du champ magnétique. Sous leur forme d'intégrale, les lois de Gauss magnétique et de Maxwell Ampère attestent de la conservation du flux magnétique et du théorème d'Ampère.

Les équations constitutives du milieu

Les relations constitutives font le lien entre le champ électromagnétique ($\vec{E}(\vec{r}, t)$ et $\vec{H}(\vec{r}, t)$) et les vecteurs de déplacement électrique ($\vec{D}(\vec{r}, t)$) et d'excitation magnétique ($\vec{B}(\vec{r}, t)$). Elles traduisent les interactions entre le champ électromagnétique et le milieu.

Dans un milieu linéaire, isotrope, homogène, local et invariant dans le temps, le vecteur de déplacement magnétique est égal au produit de convolution causal entre la permittivité et le champ électrique :

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \epsilon_r(t) * \vec{E}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \int_{t' \leq t} \epsilon_r(t - t') \vec{E}(\vec{r}, t') dt' \quad (1.5)$$

Cette équation relie le vecteur de déplacement magnétique et le champ électrique en faisant intervenir la permittivité relative percussionnelle $\epsilon_r(t)$. En régime harmonique (dans le domaine fréquentiel, avec des champs en $e^{j\omega t}$ avec $\omega = 2\pi f$), on utilise les notations complexes et on introduit les vecteurs $\underline{\vec{E}}, \underline{\vec{H}}, \underline{\vec{D}}$ et $\underline{\vec{B}}$ qui sont les vecteurs d'amplitudes complexes des grandeurs vectorielles réelles $\vec{E}(\vec{r}, t)$, $\vec{H}(\vec{r}, t)$, $\vec{D}(\vec{r}, t)$ et $\vec{B}(\vec{r}, t)$.

Le produit de convolution précédent devient alors une simple multiplication :

$$\underline{\vec{D}}(\vec{r}, f) = \epsilon_0 \hat{\epsilon}_r(f) \underline{\vec{E}}(\vec{r}, f) \quad (1.6)$$

Cette dernière relation introduit la permittivité relative complexe $\hat{\epsilon}_r(f)$ qui correspond à la transformée de Fourier de $\epsilon_r(t)$.

$$\hat{\epsilon}_r(f) = TF[\epsilon_r(t)] = \hat{\epsilon}_r'(f) - j\hat{\epsilon}_r''(f) \quad (1.7)$$

où la partie réelle de la permittivité relative complexe $\hat{\epsilon}_r'$ est aussi appelée la constante diélectrique. Elle dépend de la composition du milieu, de sa porosité, de sa structure, de la température ainsi que de la fréquence considérée. Nous la noterons par la suite ϵ_r' . On définit aussi couramment l'angle de perte $\delta(f)$ qui caractérise les pertes dans le milieu, à partir de sa tangente :

$$\tan \delta(f) = \frac{\hat{\epsilon}_r''(f)}{\hat{\epsilon}_r'(f)} \quad (1.8)$$

D'autre part, pour un milieu non magnétique, les relations constitutives sont celles du vide. La relation entre $\vec{B}(\vec{r}, t)$ et $\vec{H}(\vec{r}, t)$ est une relation de proportionnalité qui fait apparaître la perméabilité magnétique du vide μ_0 :

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{\vec{B}(\vec{r}, t)}{\mu_0} \quad (1.9)$$

En régime harmonique, l'équation (1.9) devient :

$$\underline{\vec{H}}(\vec{r}, f) = \frac{\underline{\vec{B}}(\vec{r}, f)}{\mu_0} \quad (1.10)$$

Enfin, la loi d'Ohm, pour une onde harmonique, permet de mettre en relation la densité de courant de conduction \vec{J}_c et la conductivité complexe $\hat{\sigma}(\vec{r}, f)$

$$\vec{J}_c(\vec{r}, f) = \hat{\sigma}(\vec{r}, f) \underline{\vec{E}}(\vec{r}, f) \quad (1.11)$$

A partir de cet ensemble d'équations, il est possible de chercher des fonctions mathématiques solutions.

Propagation des ondes EM dans un milieu

En régime harmonique (ce qui permet d'intégrer aisément les équations constitutives du milieu) et en appliquant l'opérateur rotationnel aux équations de Maxwell-Faraday et de Maxwell-Ampère, il est possible d'obtenir une équation vectorielle ne faisant intervenir, par exemple, que le vecteur $\vec{E}(\vec{r}, t)$ ou que le vecteur $\vec{H}(\vec{r}, t)$. Nous retrouvons les équations d'onde :

$$\nabla^2 \underline{\vec{E}} = \hat{\sigma} \mu_0 \frac{\partial \underline{\vec{E}}}{\partial t} + \mu_0 \hat{\epsilon}_r \frac{\partial^2 \underline{\vec{E}}}{\partial t^2} - \vec{\nabla} \left(\frac{\rho}{\hat{\epsilon}_r} \right) \quad (1.12)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \hat{\sigma} \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu_0 \hat{\epsilon}_r \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (1.13)$$

Nous considérons l'absence de charge-source soit $\rho = 0$. Dans ces conditions, l'équation 1.13 devient :

$$\nabla^2 \vec{E} = -\underbrace{\mu\omega^2 (\hat{\epsilon}_r - j\frac{\sigma}{\omega})}_{k^2} \vec{E} \quad (1.14)$$

où k représente le nombre d'onde, qui est dans le cas général, complexe. Il s'exprime en fonction des paramètres α la constante d'atténuation et β la constante de propagation.

$$k = \beta - j\alpha \quad (1.15)$$

Parmi l'infinité de solutions possibles, nous considérons un cas particulier simple pour illustrer l'effet d'un nombre d'onde complexe : en considérant une onde plane, harmonique, polarisée selon (O_x) qui se propage selon \vec{e}_z , l'équation d'onde devient :

$$\frac{\partial^2 \underline{E}_x(z)}{\partial z^2} + k^2 \underline{E}_x(z) = 0 \quad (1.16)$$

et les solutions réelles sont de la forme :

$$E_x(z, t) = E_0 \cos(\omega t - \beta z) e^{-\alpha z} \quad (1.17)$$

La formule précédente permet de mettre en évidence le terme de propagation qui résulte du couplage entre le temps t et la variable d'espace z et le terme $e^{-\alpha z}$ qui atténue exponentiellement l'onde au fur et à mesure de sa propagation dans le milieu.

Pour un milieu non magnétique, nous pouvons montrer que la constante d'atténuation est égale à :

$$\alpha = \omega \left[\frac{\mu_0 \epsilon_r' \epsilon_0}{2} \left[\sqrt{\left(1 + \left(\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}\right)^2}\right) - 1 \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.18)$$

Cette expression fait apparaître le fait que α est proportionnelle à la fréquence de l'onde et que, par conséquent, dans un milieu à pertes, les ondes basses fréquences pénètrent mieux que les ondes hautes fréquences qui sont atténuées rapidement. Ce point est essentiel lorsqu'il s'agit de choisir la fréquence de travail d'un radar.

On considère habituellement qu'un milieu est à faibles pertes si $\delta(f)' < 0.01$ à la fréquence de travail. Dans ce cas, l'expression se simplifie et on obtient :

$$\alpha = \frac{\pi \epsilon_r''}{\lambda_0 \sqrt{\epsilon_r'}} \quad \text{et} \quad \delta_{peau} = \frac{1}{\alpha} \quad (1.19)$$

où δ_{peau} est la profondeur de peau électrique à la longueur d'onde d'observation (λ_0).

Nous ferons, dans la suite de ce manuscrit, l'hypothèse que les milieux sont non magnétiques et à faibles pertes. La profondeur de peau δ_{peau} rend compte des pertes dans le milieu. Elle est définie comme l'épaisseur sur laquelle l'amplitude du champ est atténuée de $1/e$.

Réflexion et transmission au niveau d'une interface

Entre deux milieux d'impédances différentes, une partie de l'énergie est renvoyée vers l'émetteur et l'autre partie est transmise. Dans le cas d'une interface réelle, la modélisation du phénomène de réflexion et de réfraction est extrêmement complexe. Heureusement, il est possible, avec des hypothèses restrictives (onde incidente plane, interface plane, infinie et lisse entre deux milieux homogènes semi-infinis), de calculer analytiquement les directions des ondes après interaction avec l'interface ainsi que les coefficients de réflexion et de transmission à l'interface entre deux milieux. Les deux milieux, notés

1 et 2, sont usuellement caractérisés par leur indice de réfraction noté n dont le carré est égal à la permittivité du milieu.

$$n_1^2 = \epsilon_{r1}, \quad n_2^2 = \epsilon_{r2} \quad (1.20)$$

Les lois de Snell-Descartes permettent de calculer les directions de propagation de l'onde réfléchie (direction spéculaire) et de l'onde transmise dans le second milieu. Un résultat remarquable est le fait que ces directions sont indépendantes de la polarisation de l'onde incidente. On note θ_i l'angle d'incidence mesuré par rapport à la normale, θ_r l'angle de réflexion et θ_t l'angle de réfraction de l'onde transmise dans le milieu 2. Ces angles sont liés par les relations suivantes :

$$\theta_r = \theta_i \quad (1.21)$$

$$\theta_t = \sin^{-1}\left(\frac{n_1 \sin \theta_i}{n_2}\right) \quad (1.22)$$

Par contre, les coefficients de Fresnel, qui donnent l'amplitude des ondes réfléchie et transmise, dépendent de la polarisation de l'onde incidente. On parle de polarisation parallèle lorsque le vecteur champ électrique est parallèle au plan d'incidence (défini par la direction de l'onde incidente et la normale à l'interface) et de polarisation perpendiculaire lorsque le vecteur champ électrique est perpendiculaire au plan d'incidence. Les formules sont rappelées ci-dessous.

Coefficients de Fresnel en amplitude en réflexion :

$$r_{\parallel} = \frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i}, \quad r_{\perp} = \frac{n_i \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (1.23)$$

Coefficients de Fresnel en amplitude en transmission :

$$t_{\parallel} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i}, \quad t_{\perp} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (1.24)$$

Si la polarisation de l'onde n'est pas linéaire ou si elle est linéaire mais avec une direction ni parallèle ni perpendiculaire, il faut décomposer le vecteur champ électrique selon les directions parallèle et perpendiculaire afin d'utiliser les coefficients de Fresnel.

Nous verrons plus loin dans le document que ces coefficients permettent d'obtenir une estimation des amplitudes des signaux réfléchis par la surface et par les couches sous-jacentes si celles-ci sont 'raisonnablement' lisses.

L'équation radar

Les résultats précédents permettent de modéliser de façon théorique la réflexion et la réfraction d'une onde plane par une interface. Dans une configuration plus réaliste, il faut tenir compte du fait que l'onde est générée par une antenne qui se trouve à une certaine distance du réflecteur (cible) qui n'est pas infini et plan. L'équation radar exprime la puissance reçue par l'antenne de réception à partir de la puissance émise par l'antenne de transmission. Soit δq la densité surfacique de puissance émise par l'antenne d'émission (en W/m^2) :

$$\delta q_{source} = \frac{P_t}{4\pi R_t^2} G_t \quad (1.25)$$

où P_t est la puissance émise par une source isotrope (dans toutes les directions), R_t la distance entre le réflecteur et l'antenne et G_t le gain de l'antenne de transmission dans la direction de la cible. La puissance reçue par la cible est une fraction de la puissance rayonnée par l'antenne d'émission. La cible, à son tour va émettre dans toutes les directions. La densité surfacique de puissance δq_{cible} émise par la cible fait intervenir sa surface d'interception appelée section efficace radar (σ_{RCS} , *Radar Cross Section*) dans la direction du récepteur. La section efficace radar d'un réflecteur dépend de nombreux

paramètres. Certains lui sont propres (sa taille, sa rugosité, sa forme, la valeur de sa permittivité), d'autres dépendent du radar (fréquence, polarisation) et d'autres encore de la configuration géométrique du sondage (comme la direction de visée).

$$\delta q_{cible} = \frac{P_t}{(4\pi R_t R_r)^2} G_t \sigma_{RCS} \quad (1.26)$$

La puissance reçue par l'antenne de réception est finalement égale à la densité surfacique de puissance renvoyée par la cible, multipliée par la surface effective A de l'antenne de réception dans la direction de la cible pour la polarisation de l'onde reçue, et pondérée par l'efficacité de l'antenne ξ . En remplaçant A et ξ par leur expressions respectives ($A = (\frac{\lambda^2}{4\pi}) D_r$ et $\xi = G_r/D_r$, où D_r est la directivité de l'antenne de réception), nous obtenons l'équation radar :

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2} \sigma_{RCS} \quad (1.27)$$

Pour un radar mono-statique (l'antenne de réception et l'antenne émettrice sont co-situées), $R = R_r = R_t$. Si les ondes du radar se propagent dans un milieu matériel, nous devons prendre en considération les pertes par effet Joule (liées à la partie imaginaire de la permittivité du milieu) A_{Att} et les pertes par diffusion A_{sc} (notamment dans le cas d'un milieu présentant des hétérogénéités de la taille de l'ordre de la longueur d'onde). L'équation radar devient alors :

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_{RCS} A_{Att} A_{sc} \quad (1.28)$$

La Figure 1.25 montre comment varie le terme de pertes A_{Att} , dans le cas de faibles pertes. Nous confirmons que les pertes dépendent de la fréquence, les hautes fréquences étant les plus atténuées. Ce facteur est également très dépendant de la partie imaginaire de la permittivité qui contrôle les pertes. En fonction des caractéristiques du milieu, les pertes par effet Joule peuvent influencer considérablement sur les performances du radar.

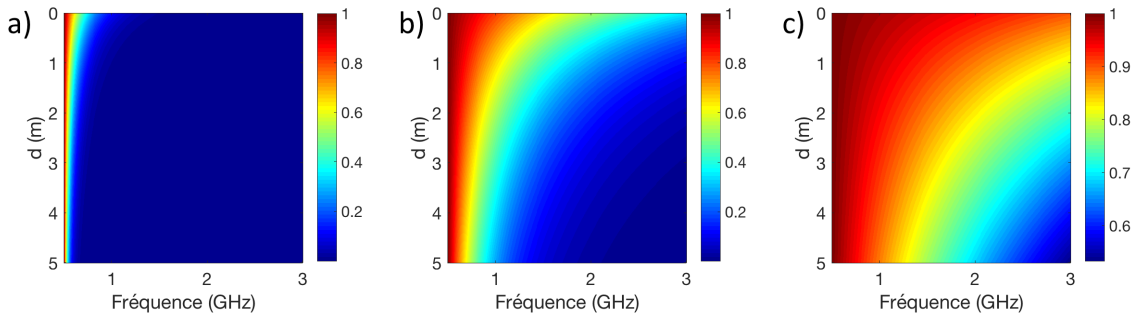


FIGURE 1.25 – Terme A_{Att} en fonction de la profondeur et de la fréquence et des pertes : a) $\epsilon_r'' = 1e-1$, b) $\epsilon_r'' = 1e-2$ et c) $\epsilon_r'' = 1e-3$

En conclusion, l'équation radar montre que la puissance reçue par l'antenne de réception dépend de la cible et également du milieu de propagation entre le radar et la cible. Dans le cas des radars à pénétration de sol, le milieu de propagation est inconnu et à caractériser, ce qui rend l'estimation des performances et l'analyse des données plus compliquées.

1.3.2 Estimation de la constante diélectrique du proche sous-sol de Mars

La permittivité complexe est une propriété des matériaux qui caractérise leur interaction avec une onde électromagnétique. Sa valeur est très sensible à la porosité du matériau. Non avons vu que sa partie imaginaire est étroitement liée à la conductivité $\sigma = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon''$ et définit les pertes dans le milieu, et que, dans un milieu à faibles pertes, sa partie réelle contrôle l'intensité de l'onde réfléchie par

une interface. Avec un instrument étalonné en amplitude, il est donc possible d'estimer la constante diélectrique du milieu sondé. La valeur de la constante diélectrique fournit des informations sur les matériaux qui composent ce milieu. S'il paraît peu réaliste d'identifier un matériau par la valeur de sa permittivité, il est raisonnable de penser que cette valeur va permettre d'exclure des matériaux et/ou d'apporter des contraintes sur leur composition.

La permittivité de l'eau

Avant de dresser une liste des constantes diélectriques possibles du sol martien, nous nous attardons sur le cas spécifique de l'eau, sous forme liquide et solide. L'effet de la présence d'eau sur la propagation des ondes dans le domaine des micro-ondes, est particulièrement contrasté selon la phase dans laquelle l'eau se trouve.

La valeur de sa permittivité est bien modélisée par le modèle de relaxation de Debye [Ulaby et al., 2014] :

$$\epsilon_r = \epsilon_{\text{inf}} + \frac{\epsilon_{\text{st}} - \epsilon_{\text{inf}}}{1 + 2i\pi f\tau} \quad (1.29)$$

où ϵ_{st} correspond à la constante diélectrique statique, ϵ_{inf} la constante diélectrique de l'eau pour une fréquence qui tend vers l'infini. τ est le temps de relaxation. Pour l'eau liquide, [Lane and Saxton, 1952] ont déterminé la valeur à haute fréquence $\epsilon_{\text{inf}} = 4.9$ et la faible dépendance en température permet de l'approximer par une constante. Le temps de relaxation est donné par ([Stogryn, 1971]) :

$$\tau(T) = \frac{1}{2\pi} [(1.1109 \times 10^{-10}) - (3.824 \times 10^{-12})T + (6.938 \times 10^{-14})T^2 - (5.096 \times 10^{-16})T^3] \quad (1.30)$$

Enfin à partir de données expérimentales, [Klein and Swift, 1977] ont établi une courbe d'ajustement pour ϵ_{st} .

$$\epsilon_{\text{st}} = 88.045 - 0.4147T + (6.295 \times 10^{-4})T^2 + (1.075 \times 10^{-5})T^3 \quad (1.31)$$

La Figure 1.26 montre la constante diélectrique ainsi que la partie imaginaire de la permittivité relative de l'eau pure en fonction de la fréquence. De très importantes variations de la valeur de la constante diélectrique se produisent au delà de la bande de fréquence de WISDOM. À la fréquence centrale de WISDOM (1.75 GHz) le terme imaginaire de la permittivité est élevé ($\epsilon_r'' = 7.4$ à 20°C et $\epsilon_r'' = 15$ à 1°C). Cela signifie que, dans cette gamme de fréquences, l'eau pure peut-être considérée comme un milieu diélectrique à fortes pertes et dispersif en fréquence. La valeur élevée de la constante diélectrique fait de l'eau liquide pure ou en mélange un excellent réflecteur pour les ondes radar.

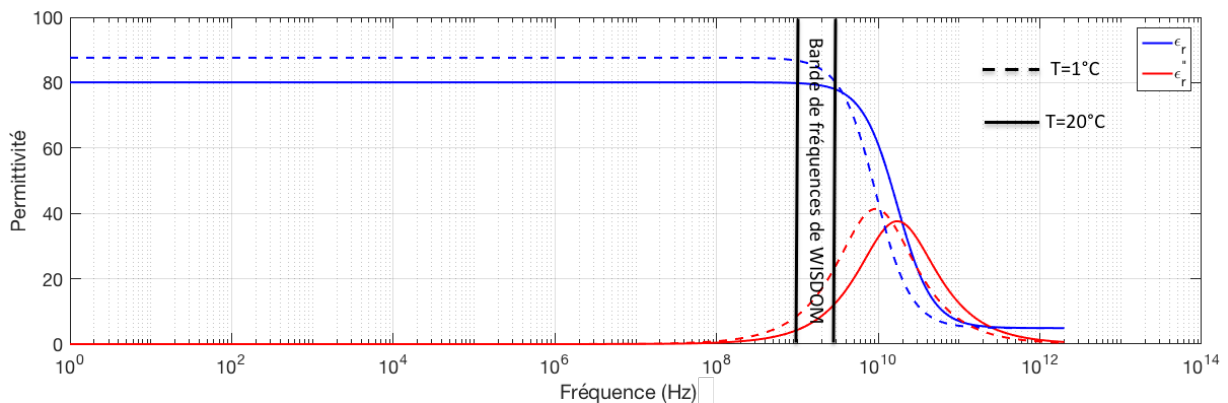


FIGURE 1.26 – Constante diélectrique ϵ_r' et partie imaginaire ϵ_r'' de la permittivité en fonction de la fréquence de l'eau liquide pure à 1 et 20°C

Il est peu probable de trouver de l'eau liquide dans le proche sous-sol martien, l'abondance de sels (perchlorates) [Hecht et al., 2009] permet néanmoins d'abaisser le point de congélation de l'eau et ainsi

permettre à l'état liquide d'exister à des températures négatives. Il faudra, le cas échéant, se tourner vers des modèles qui permettent de prendre en compte le taux de sels afin de comprendre la présence d'éventuelles traces d'eau liquide en surface.

Pour la glace d'eau (Figure 1.27), c'est autour de quelques kHz que l'on observe une variation importante de la valeur de la constante diélectrique. En s'appuyant de nouveau sur le modèle de Debye, le temps de relaxation suit la loi d'Arrhénius suivante :

$$\tau = 4.76 \times 10^{-16} e^{\frac{0.577}{k_B T}} \quad (1.32)$$

L'énergie d'activation est de 0.577 eV, k_B désigne la constante de Boltzman (ici en eV/K) et T la température. Aux hautes fréquences la constante diélectrique peut être considérée comme une constante $\epsilon_{\text{inf}} \sim 3.2$ et la permittivité est donnée par :

$$\epsilon_{st} = 3.2 + \frac{20715}{T - 38} \quad (1.33)$$

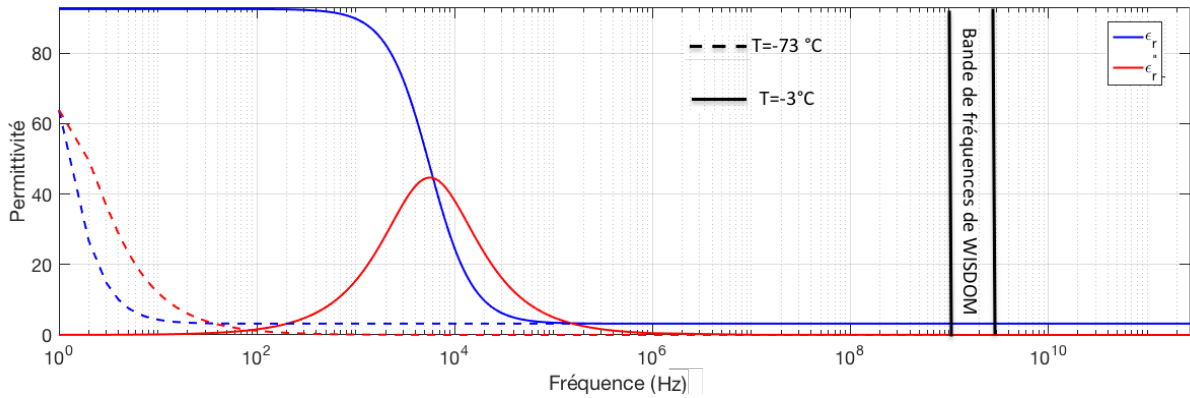


FIGURE 1.27 – Constante diélectrique ϵ'_r et partie imaginaire ϵ''_r de la permittivité en fonction de la fréquence, pour de la glace l'eau pure à -3 et -73°C

Nous remarquons qu'aux fréquences de WISDOM la permittivité est quasi constante ($\epsilon'_r = 3.2$ et $\epsilon''_r = 3.7 \times 10^{-4}$ à -3°C). À ces fréquences, la glace d'eau pure est un milieu non dispersif et à faibles pertes ($\epsilon''_r \ll \epsilon'_r$). Il s'agit d'un milieu presque transparent. La présence de poches de glace d'eau pure dans le proche sous-sol devrait donc avoir une signature facilement identifiable.

Estimation sur analogues martiens

La NASA prépare une mission de retour d'échantillons (*Mars Sample Return*) mais, en attendant, les analyses en laboratoire sur Terre des sols martiens se limitent à la caractérisation des rares météorites martiennes disponibles. Afin de préparer les futures missions mais aussi de mieux comprendre le proche sous-sol martien, la NASA a fabriqué en 1997 un simulant de régolithe martien à partir des données recueillies par les sondes Viking et l'atterrisseur Pathfinder. Ce simulant, baptisé JSC Mars-1, est représentatif du régolithe martien en terme de minéralogie, composition chimique, taille des grains, porosité, masse volumique et de propriétés magnétiques [Allen et al., 1998]. Il a été fabriqué à partir des cendres du cône volcanique de Pu'u Nene. [Leuschen, 1999] et [Williams and Greeley, 2004] ont mesuré la permittivité du simulant JSC Mars-1 et trouvent des valeurs similaires ($\epsilon'_r \sim 3.2$ et $\epsilon''_r \sim 0.2$). [Campbell and Ulrichs, 1969] a mesuré la permittivité de nombreux matériaux terrestres afin de mieux comprendre les observations radar de la Lune. Ces matériaux peuvent aussi constituer de bons analogues pour certains sols martiens. Des basaltes, en particulier, ont été caractérisés électriquement par [ElShafie and Heggy, 2013]. Les valeurs de constante diélectrique d'analogues martiens sont résumées dans le Tableau 1.1.

Matériaux	ϵ'_r	$\tan \delta$	Source
JSC Mars-1	3.09-3.18 ~ 3.2	~ 0.06 ~ 0.06	[Williams and Greeley, 2004] [Leuschen, 1999]
Basalte	5.1-9.6 4.33-10.26	0.004-0.017	[Campbell and Ulrichs, 1969] [ElShafie and Heggy, 2013]
Cendres volcaniques	2.7-3.4	0.03-0.07	[Campbell and Ulrichs, 1969]
Grès	6.1	0.06	[Campbell and Ulrichs, 1969]
Coulée de lave/Basalte	7-8	~ 0.05	[Heggy et al., 2006]
Tephra	4.2-5.5	~ 0.04	[Heggy et al., 2006]
sable	~ 3.6	~ 0.007–0.010	[Williams and Greeley, 2004]

TABLE 1.1 – Estimation de la constante diélectrique d’analogues martiens. Code couleur : gris (analysé dans des fréquences voisine (450 MHz-1.5 GHz) de celles de WISDOM), blanc (analyse entre 10 et 200 MHz)

La constante diélectrique d’un matériau dépend de sa composition, de la fréquence d’analyse, de la température, de l’humidité ainsi que de sa porosité. En effet, [Ulaby et al., 1988] a réalisé des mesures avec différentes techniques sur 80 roches (entre 0.5 et 18 GHz) de compositions variées aboutissant à un lien entre masse volumique et constante diélectrique ($\epsilon'_r = 1.96\rho$ avec ρ en g.cm^{-3}) très proche de la loi trouvée par [Olhoeft and Strangway, 1975] à partir de 92 mesures (au dessus de 100 kHz) sur des échantillons lunaires : $\epsilon_r = (1.93 \pm 0.17)\rho$. Aucun lien avec la partie imaginaire n’a pu être établi. Ces lois empiriques sont, encore actuellement, utilisées pour l’interprétation des données SHARAD et MARSIS [Carter et al., 2009a] [Watters et al., 2007] [Stillman and Grimm, 2011b].

Soulignons, enfin, que les mesures effectuées en laboratoire sont à prendre avec prudence dans la mesure où elles supposent que les matériaux étudiés sont de bons analogues et que la façon dont il ont été manipulés (notamment transformés en pastilles) ne modifie pas leur propriétés électriques.

Estimation à partir de mesures sur Mars

Les radars sondeurs en orbite autour de Mars, MARSIS et SHARAD, ont permis d’estimer la permittivité de nombreuses régions de la planète. Contrairement aux mesures en laboratoires, ces estimations se sont faites sans manipulation qui pourraient fausser les valeurs de permittivité en modifiant la texture du sol, sa porosité ou son contenu en volatiles, par opposition aux mesures faites sur échantillons en laboratoire.

[Mouginot et al., 2010] a estimé la constante diélectrique à partir de l’amplitude de l’écho de sol extrait des données MARSIS. Il en résulte la Figure 1.28 qui est une carte interpolée des valeurs de constante diélectrique, ainsi obtenues, à la surface de Mars à 3-5 MHz. Les valeurs aux pôles sont plus faibles (2.8-4) qu’ailleurs ce qui peut s’expliquer par des sols riches en glace d’eau, en accord avec les observations du détecteur à neutrons GRS.

Par rapport au détecteur à neutrons qui détecte l’hydrogène seulement sur le premier mètre, MARSIS estime une constante diélectrique moyenne intégrée sur une profondeur d’une centaine de mètres. Les faibles valeurs de constante diélectrique trahissent donc sans doute des sous-sols riches en glace d’eau. Un travail similaire a été réalisé à partir des données SHARAD [Castaldo et al., 2017]. Cependant, contrairement aux valeurs estimées par MARSIS, SHARAD montre plutôt une bonne correspondance entre la dichotomie Nord/Sud et les constantes diélectriques évaluées : les constantes diélectriques sont plus élevées dans les hauts plateaux cratérisés du Sud (7-10) que dans les basses plaines du Nord (3-7).

[Watters et al., 2007] et [Carter et al., 2009b] ont évalué la constante diélectrique de la Medusa Fossae Formation ; celle-ci est anormalement basse ($\epsilon'_r \sim 3$). Les mesures radar seules ne permettent pas de trancher entre un milieu très poreux ou un milieu riche en glace d’eau. Cependant, contrai-

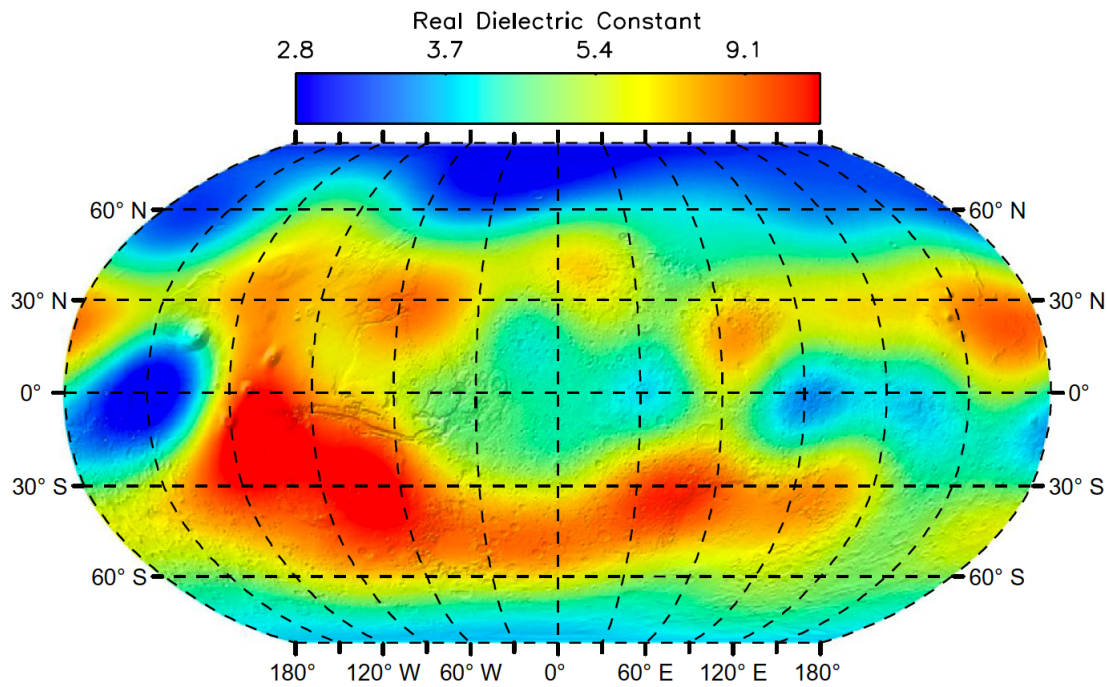


FIGURE 1.28 – Carte interpolée des valeurs de constante diélectrique déterminées à partir des données de MARSIS/Mars Express. Extrait de [Mouginot et al., 2010]

rement aux données sur les calottes polaires, SHARAD n’observe pas de stratification ce qui oriente vers l’hypothèse d’un milieu poreux. Des valeurs de constante diélectrique similaires sont observées sur Utopia Planitia, qui montre des signes géomorphologiques trahissant la présence de glace d’eau en sous-sol [Stuurman et al., 2016]. [Lauro et al., 2010] et [Orosei et al., 2018] estiment la constante diélectrique de la couche basale (couche sur laquelle repose les étendues de glace d’eau) des calottes polaires Nord et Sud. [Lauro et al., 2010] trouve une constante diélectrique à partir d’un modèle simple à deux couches, compatible avec du basalte sous le pôle Nord alors que [Orosei et al., 2018] identifie une couche d’eau liquide au pôle Sud. Enfin [Carter et al., 2009a] estime la constante diélectrique de coulées de lave présentes sur Ascreus Mons ; les valeurs estimées sont compatibles avec celles du basalte.

L’évaluation des valeurs de constante diélectrique fait partie des résultats importants des radars sondeurs MARSIS et SHARAD. Nous reviendrons plus en détails sur leurs découvertes dans la section suivante. Alors que les estimations globales de la constante diélectrique sont faites à partir de carte de réflectivité de la surface, interprétée à partir de simulations [Mouginot et al., 2010][Castaldo et al., 2017], d’autres estimations reposent sur l’étude de temps d’arrivée d’échos venant de couches enfouies. La présence de structures inclinées en sous-sol permet également d’évaluer la puissance reçue en fonction de la profondeur et par conséquent de remonter à la partie imaginaire de la permittivité. La sonde TECP/Phoenix (*Thermal and Electrical Conductivity Probe*) a estimé la constante diélectrique sur le site de la sonde Phoenix ; les valeurs trouvées sont comprises entre 2.4 et 2.8, ce qui est compatible avec des mélanges de sédiments, de glace d’eau et de sels [Stillman and Grimm, 2011a]. Ces faibles valeurs ne sont pas étonnantes en raison de la glace d’eau présente dans le proche sous-sol à ces latitudes. Les valeurs de constante diélectrique évaluées sur des formations martiennes sont résumées dans le Tableau 1.2.

1.3.3 Les radars à pénétration de sol (Ground Penetrating Radars)

Il existe plusieurs types de radar (acronyme de RAdio Detection And Ranging) : les radars à pénétration de sol (GPR en anglais pour Ground Penetrating Radar), les radars à ouverture de synthèse (SAR pour Synthetic Aperture Radar), les altimètres, les diffusiomètres, les radars à ouverture de

Formation	$\bar{\epsilon}_r$	$\tan \delta$	Composition	Source
Mesusae Fos- sae Formation (MFF)	2.9 ± 0.4	0.002-0.006	Sédiment/cendres riches en glace ou très poreux	[Watters et al., 2007]
Mesusae Fos- sae Formation (MFF)	3		Matériaux très poreux	[Carter et al., 2009b]
Utopia Plani- tia	2.8 ± 0.8		Mélange air/poussière/glace d'eau	[Stuurman et al., 2016]
Couche basale de la NPLD	4 – 9		Basalte	[Lauro et al., 2010]
Couche basale de la SPLD	> 15		Mélange eau li- quide et sels	[Orosei et al., 2018]
NPLD	3.1	0.0026	Glace d'eau pure	[Grima et al., 2009]
Askraeus mons nord	6.2-17.3	0.01-0.03	Basalte	[Carter et al., 2009a]
Askraeus mons sud	7-14	0.01-0.03	Basalte	[Carter et al., 2009a]
Vastitas Bo- realis	2.4-2.7		Mélange régolithe et saumures	[Stillman and Grimm, 2011a]
Vasistas Bo- realis	4.6 ± 0.5		Sédiments	[Mouginot et al., 2012]
Isidis PLanitia	4 ± 0.5		Dépôts sédimen- taires	[Mouginot et al., 2012]
Elysium	9.3 ± 1		Coulée de lave	[Mouginot et al., 2012]
Noachis Terra	11.4 ± 1		Mélange de dépôts sédi- mentaires et pyroclastiques	[Mouginot et al., 2012]
Mars	2.2-19			[Mouginot et al., 2010]
Mars basses plaines	3-7			[Castaldo et al., 2017]
Mars hautes plaines	7-10			[Castaldo et al., 2017]

TABLE 1.2 – Estimation de la constante diélectrique de formations martiennes à partir des données MARSIS, SHARAD et TECP/Phoenix. Code couleur : MARSIS (blanc), SHARAD (cyan), TECP/Phoenix (orange)

synthèse interférométriques (InSAR pour Interferometric SAR). Ils se différencient principalement par leurs conditions d'utilisation (longueur d'onde, angle de visée, mode d'émission, polarisation) et par le traitement qui suit l'enregistrement du signal réfléchi. WISDOM, qui fait l'objet de cette thèse, est un radar à pénétration de sol ou GPR.

Les GPR sont des radars qui sont spécialement réalisés pour scruter, au-delà de la surface, le sous-sol. Ils sont couramment utilisés dans de nombreuses applications terrestres (telles que la géologie, l'archéologie, les travaux publics, l'hydrologie, la glaciologie...). Chaque élément de leur conception est pensé de façon à faciliter au maximum la pénétration des ondes dans le sous-sol.

Le choix de la fréquence centrale est essentiel puisque, comme nous l'avons vu précédemment, les pertes dans le milieu (même lorsque celui-ci est homogène) croissent exponentiellement avec la fréquence. De fait, le radar sondeur MARSIS en orbite autour de Mars (qui fera l'objet de la partie

suivante avec le sondeur SHARAD) opère à des fréquences HF de l'ordre du MHz pour sonder sur des profondeurs de quelques kilomètres dans un milieu à très faibles pertes comme la glace des pôles. De même, le radar CONSERT, qui a permis de sonder partiellement le noyau de la comète Churyumov-Gerasimenko lors de la mission Rosetta, utilisait une fréquence centrale de 90 MHz.

Les GPR utilisent donc, en général, des fréquences plus basses que les radars qui ont pour objet l'étude de la surface. Pour être efficaces, les antennes de ces GPR doivent être adaptées à la gamme de fréquence utilisée, leur taille étant du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. Ce qui peut poser rapidement des problèmes techniques de conception et déploiement surtout dans le cadre d'une mission spatiale. Les antennes de 40 mètres de long du radar MARSIS n'ont été déployées qu'à la fin de la durée nominale de la mission car un risque important avait été identifié par simulation mécanique après le lancement.

Le second paramètre d'importance est la résolution du GPR, c'est-à-dire sa capacité à discriminer deux réflecteurs proches. Le choix de la fréquence centrale a également un impact sur la résolution temporelle (donc spatiale) de l'instrument. En effet, celle-ci est inversement proportionnelle à la largeur de bande utilisée par le radar qui, typiquement pour des GPR large bande, est de l'ordre de grandeur de la fréquence centrale. En conséquence, plus la fréquence centrale est basse, meilleure est la pénétration mais moins bonne est la résolution. La comparaison des performances des radars sondeurs MARSIS et SHARAD en orbite autour de Mars qui suit, illustre ces propos.

1.4 L'exploration du sous-sol de Mars par les radars sondeurs MARSIS/MEX et SHARAD/MRO

WISDOM (suivi par RIMFAX/Mars 2020) est le premier radar à pénétration de sol sélectionné pour opérer depuis le sol martien. Cependant, depuis plus de 10 ans, deux radars sondeurs scrutent le sous-sol de Mars depuis leur orbite. Parmi les objectifs des radars sondeurs, figure en bonne position la détection d'eau liquide. En effet, comme déjà souligné, les conditions de pression et température à la surface de Mars interdisent l'existence d'eau à l'état liquide ; nos espoirs sont donc enfouis dans le sous-sol de la planète rouge.

1.4.1 MARSIS

Le radar sondeur MARSIS (*Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding*) de la mission Mars Express, en activité depuis 2005, ausculte le sous-sol de Mars à 4 fréquences entre 1.3 et 5.5 MHz sur une bande de fréquence de 1 MHz, avec une puissance à l'émission comprise entre 1.5 et 5 W. Ces paramètres lui confèrent une résolution verticale de 150 m dans le vide. Sa tâche au sol est comprise entre 5 et 30 km, elle dépend de sa fréquence d'opération et de la distance à la surface. MARSIS fonctionne à des altitudes comprises entre 800 et 1200 km. Le déploiement de ses antennes (2 antennes de 20 m et une antenne de 7 m) s'est déroulé avec quelques frayeurs. En effet, la première antenne s'est bloquée à cause du froid spatial mais une période d'exposition au Soleil a finalement permis de déployer les deux antennes de 20 m. Il est à noter que l'objectif de l'expérience MARSIS était double : la caractérisation du sous-sol martien mais aussi de son ionosphère. Le radar opère donc de nuit pour le sondage des sous-sol et de jour pour l'étude de l'ionosphère qui affecte de façon significative la propagation des signaux de fréquence inférieure à 35 MHz.

Nous décrivons ci-dessous quelques résultats marquants de MARSIS.

Les North Polar Layered Deposits (NPLD)

Avant de pénétrer dans le sous-sol, les ondes émises par MARSIS sont réfléchies par la surface qui est donc bien visible et clairement identifiable sur les images, appelées radargrammes. Cependant lorsque la surface n'est pas plane, du fait de la topographie des échos provenant de zones éloignées de la surface peuvent perturber l'analyse des radargrammes. Ces échos, souvent appelés *clutter*, ont des temps de

propagation importants qui peuvent laisser penser qu'ils sont dus à des structures enfouies dans le sous-sol alors qu'ils ne sont, en fait, que le produit de réflexions en surface. Afin d'écartier ces échos parasites, une méthode a été mise en place pour l'étude des données MARSIS : chaque radargramme est comparé à une simulation où seule la surface est modélisée. Ces simulations qui ne prennent en compte que les données de topographie fournies par MOLA, permettent d'avoir la réponse radar de la surface (*clutter*) et donc par identification de discriminer les échos provenant de la surface et du sous-sol. La Figure 1.29a, extraite de [Seu et al., 2007], montre un radargramme acquis à 5 MHz sur la calotte polaire Nord. Le trait rouge sur la Figure 1.29c (topographie MOLA) montre la trace au sol du profil radar ; elle traverse une plaine et passe par dessus la calotte polaire Nord. En mettant en lien les Figures 1.29a et 1.29c, nous voyons ressortir une interface sur le radargramme ; cette interface semble correspondre à la couche basale de les NPLD (socle rocheux sur lequel repose la calotte polaire).

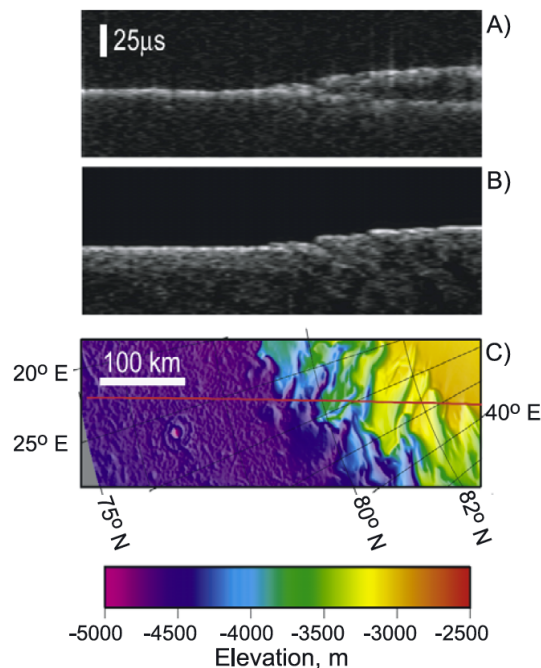


FIGURE 1.29 – Sondage de la North Polar Layered Deposit par MARSIS (orbit 1855) : a) Radargramme MARSIS, b) Simulation à partir des données de topographie MOLA, c) Données MOLA, Crédits : [Seu et al., 2007]

Comme expliqué précédemment, afin de déterminer ce qui provient du sous-sol et de la surface, une simulation à partir de la topographie MOLA a été réalisée (Figure 1.29b). Sur le radargramme synthétique qui en découle, nous ne voyons pas d'interface, ce qui signifie que l'interface identifiée sur le radargramme de la Figure 1.29a provient bien du sous-sol et non de la surface. Le temps de retard maximum de cette interface est de $21 \mu\text{s}$ ce qui correspond à 1.8 km de glace d'eau pure. Un modèle à deux couches a été utilisé afin de contraindre les pertes dans la couche de glace et d'estimer la constante diélectrique de la couche basale. Les résultats donnent de faibles pertes pour la première couche (NPLD) ce qui est compatible avec de la glace d'eau pure et une constante diélectrique de 4.5 pour la couche basale ce qui est assimilable à du regolith compacté [Seu et al., 2007]. Comme expliqué précédemment, les données de MARSIS ont aussi permis d'estimer les constantes diélectriques dans l'hémisphère Nord (et donc dans la NPLD) de Mars [Mouginot et al., 2012].

Medusae Fossae Formation (MFF)

La Medusae Fossae Formation (MFF) est une zone proche de la frontière entre les hauts plateaux cratérisés et les plaines du Nord (dichotomie Nord/Sud). Dans cette zone, des formations identifiées

comme des yardangs (figures allongées formées par l'érosion éolienne) ont été observées. L'origine de ces dépôts n'est pas bien déterminée : les hypothèses de dépôts volcaniques ou bien de matériaux analogues à ceux des pôles déposés lors de périodes de forte obliquité ou précédant le basculement de pôles sont actuellement toujours discutées.

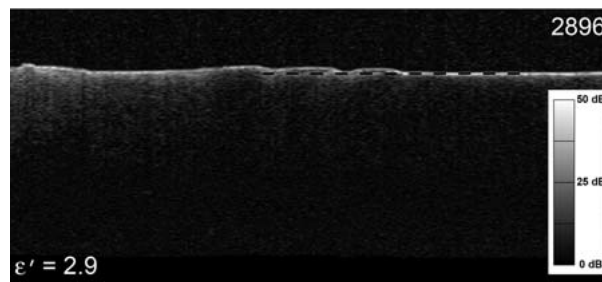


FIGURE 1.30 – Radargramme MARSIS (orbite 2896) acquis au-dessus de la Medusae Fossae Formation. Extrait de [Watters et al., 2007]

La région de Medusae Fossae a été sondée par MARSIS, afin de trancher sur la composition de ses dépôts [Watters et al., 2007]. La Figure 1.30 issue de [Watters et al., 2007] montre un radargramme acquis avec MARSIS au-dessus de la MFF. Nous pouvons y voir des reliefs (les dépôts de la MFF) reposant sur une couche basale (pointillés sur la Figure 1.30). Ces dépôts peuvent atteindre 2.5 km d'épaisseur. La couche basale suit parfaitement la surface et, à partir des données MOLA (hauteurs des reliefs), et des données MARSIS (temps d'arrivée de la couche basale) la constante diélectrique a été évaluée à 2.9 ± 0.4 avec une tangente de perte comprise entre 0.002 et 0.006. Ces valeurs sont compatibles avec des dépôts éoliens et un mélange de sédiments et de glace d'eau. Deux hypothèses restent donc possibles : des dépôts riches en glace d'eau avec une part de sédiments comme pour les calottes polaires ou des dépôts éoliens volcaniques secs et très poreux.

Les South Polar Layered Deposits (SPLD)

Les South Polar Layered Deposits (SPLD) ont été observés par MARSIS entre novembre 2005 et avril 2006. Près de 300 profils ont été acquis lors de cette campagne [Watters et al., 2007]. Les données recueillies ont permis de contraindre la composition de la SPLD : celle-ci est composée de glace d'eau avec relativement peu d'impuretés (i.e. de sédiments). Les images de la Figure 1.31 extraites de [Watters et al., 2007] montrent deux profils radars (orbite 2753 et orbite 2682) acquis au-dessus de la SPLD. Les flèches indiquent la position de la couche basale sur laquelle repose la SPLD.

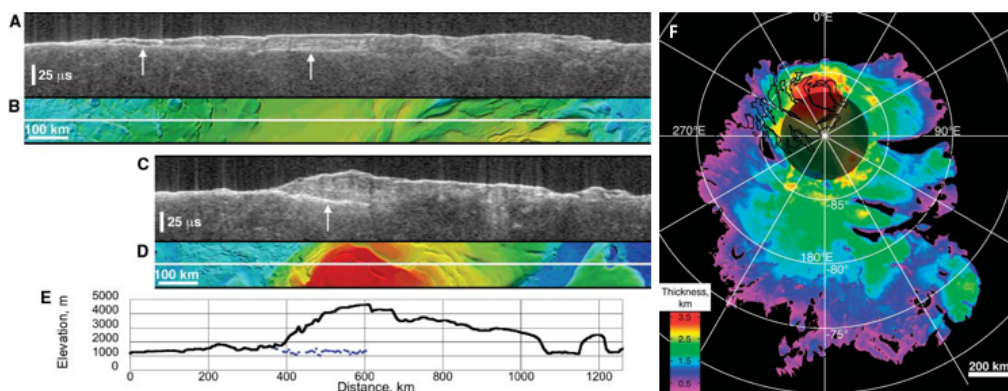


FIGURE 1.31 – Calotte polaire Sud (SPLD) : A et C radargrammes MARSIS acquis au-dessus de la SPLD, B et D données MOLA, F épaisseur de la SPLD estimée à partir des données MARSIS. Extraits de [Plaut et al., 2007]

Entre la surface et la couche basale, nous remarquons plusieurs couches. La Figure 1.31E montre la topographie MOLA le long du profil sur laquelle est affichée en pointillés la couche basale détectée par MARSIS. La couche basale est dans le prolongement des plaines qui entourent la SPLD ; son altitude est comprise entre 1000 et 1500 km ce qui est compatible avec une SPLD composée de glace d'eau pure ($\epsilon'_r = 3.1$). La détection de la couche basale sur de multiples profils ou orbites a permis d'établir une carte en trois dimensions de la couche basale. Avec les données MOLA et la correction de l'élévation, une carte de l'épaisseur de la SPLD a alors pu être établie (Figure 1.31F) [Plaut et al., 2007]. L'épaisseur maximum de la SPLD est de 3.7 ± 0.4 km et le volume total estimé de la SPLD est de 1.6 ± 0.2 10^6 km³.

[Plaut et al., 2007] mentionne aussi une forte réflexion basale par endroit mais l'hypothèse d'un lac d'eau liquide pure est écartée car incompatible avec les conditions de pression et de température. Une source de chaleur ou un mélange d'eau et de sels pourrait néanmoins expliquer la détection d'une forte réflexion sans doute associée à la présence d'eau liquide. Quelques années après la caractérisation de la SPLD par MARSIS une nouvelle campagne est lancée : entre mai 2012 et décembre 2015, une zone de près de 200 km² située dans la région de Planum Australe (au pôle Sud) est scrupuleusement sondée [Orosei et al., 2018]. Pour cette campagne, les données acquises n'ont pas été pré-traitées par l'ordinateur de bord (le traitement automatique lissant les anomalies).

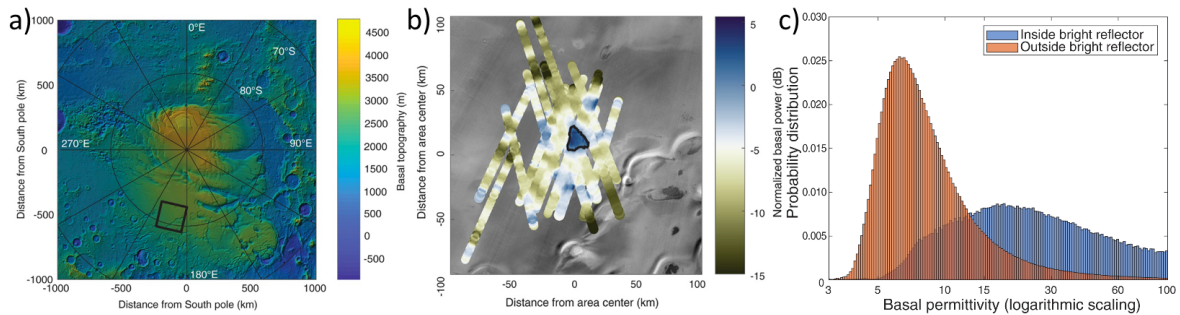


FIGURE 1.32 – Sondage de la SPLD par MARSIS : a) Données MOLA de la SPLD où figure la zone à l'étude (carré noir), b) Intensité du signal réfléchi par la couche basale (dB), c) Estimation de la constante diélectrique à l'intérieur et à l'extérieur de la zone réfléchissante. Extrait de [Orosei et al., 2018]

La Figure 1.32b) extraite de [Orosei et al., 2018] montre la puissance de l'écho provenant de la couche basale normalisée par rapport à la médiane de la puissance de l'écho provenant de la surface. Nous remarquons au centre une zone d'approximativement 20 km² où la réflexion sur la couche basale est forte et même supérieure à la réflexion sur la surface. Cette forte réflexion peut s'expliquer par un fort contraste diélectrique entre la SPLD et la couche basale. Afin de pouvoir estimer la constante diélectrique et ainsi contraindre la composition de la couche basale à l'endroit où se trouve la réflexion de forte intensité, des simulations ont été effectuées pour plusieurs scénarii. Ceux-ci prennent en compte un milieu à trois couches, avec une couche semi-infinie qui a la constante diélectrique du vide (au dessus de la surface), une couche homogène qui correspond à la SPLD avec une constante diélectrique variable (fonction du rapport glace d'eau/sédiments et du gradient de température) et enfin une troisième couche avec une constante diélectrique inconnue. Les résultats permettent d'obtenir les distributions de probabilité de la constante diélectrique de la couche basale (Figure 1.32c). Nous voyons deux distributions en fonction de ce qui se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone très réfléchissante. Pour ce qui se trouve à l'extérieur de la zone réfléchissante, la valeur de permittivité médiane est de 7.5 à 4 MHz (entre 4 et 15 pour toutes les fréquences) ce qui compatible avec de la roche volcanique. Pour ce qui se trouve à l'intérieur de la zone réfléchissante, la valeur de permittivité médiane est de 33 à 4 MHz (entre 22 et 33 pour toutes les fréquences) ce qui est la plus haute valeur estimée sur Mars à ce jour. Cette valeur n'est pas compatible avec de l'eau liquide pure ($\epsilon'_r = 81$) mais peut provenir d'une couche rocheuse saturée en eau. La température au niveau de la couche basale est estimée être proche

de 205 K, ce qui est trop faible pour pouvoir avoir de l'eau liquide, mais la présence de perchlorates pourrait abaisser la température de fonte de l'eau en dessous de 205 K [Orosei et al., 2018].

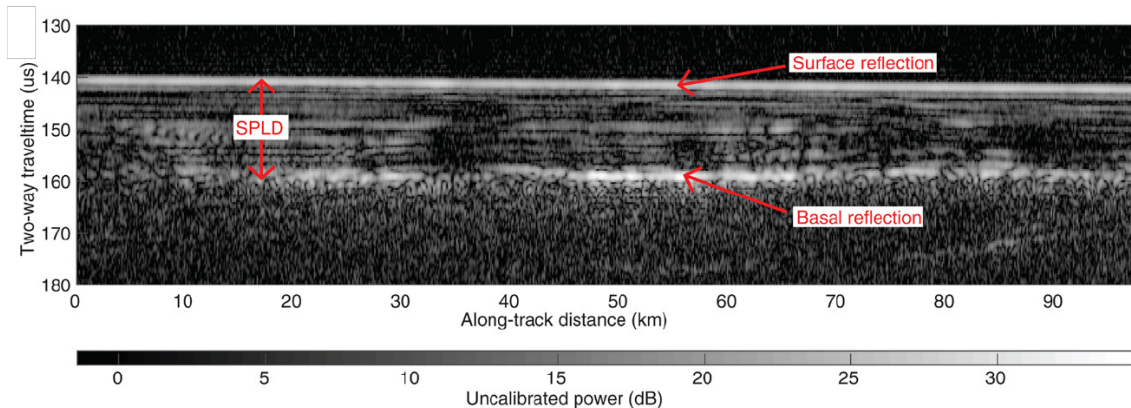


FIGURE 1.33 – Radargramme MARSIS acquis au-dessus de la SPLD (orbite 10737) ; la surface, la zone réfléchissante et l'épaisseur de la SPLD sont indiquées par des flèches. Extrait de [Orosei et al., 2018]

La Figure 1.33 montre un profil acquis au-dessus de la zone réfléchissante ; on y voit la surface, des réflexions multiples au sein de la SPLD et l'interface entre la SPLD et la couche basale. En faisant l'hypothèse d'une SPLD de glace d'eau pure l'épaisseur de la SPLD a été estimée à 1.5 km. Pour pouvoir détecter une couche d'eau liquide, celle-ci doit au moins faire une dizaine de centimètres d'épaisseur. La découverte d'une potentielle zone riche en eau liquide de 20 km² à une profondeur de 1.5 km dans la région de Planum Australe (Figure 1.32a) sous la SPLD (*South Polar Layered Deposits*) est l'une des plus prometteuses dans la recherche de traces de vie sur et sous le sol martien.

1.4.2 SHARAD

SHARAD (*SHallow RADar*) est le radar sondeur de la charge instrumentale de l'orbiteur de la mission MRO (*Mars Reconnaissance Orbiter*). Son principal objectif est la détection des structures en sous-sol, à plusieurs centaines de mètres de profondeur. SHARAD opère à une fréquence centrale de 20 MHz pour une bande de fréquence de 10 MHz. Cette bande de fréquence lui confère une résolution verticale de 15 m dans le vide, bien meilleure que celle de MARSIS mais une profondeur de pénétration moindre. L'instrument est composé d'une partie électronique, la SEB (*SHARAD Electronique Box*), reliée à une antenne dipôle de 2 × 5 m déployable. L'instrument émet une puissance maximum de 10 W. Tout comme MARSIS, SHARAD a révélé de nombreuses structures dans le sous-sol martien notamment au niveau des calottes polaires. Nous en citons quelques unes ci-dessous.

Les North Polar Layered Deposits

Tout comme MARSIS, SHARAD a observé la calotte polaire Nord de Mars. La Figure 1.34 montre un profil radar acquis au-dessus de Planum Boreum. Sur ce radargramme extrait de [Phillips et al., 2008] nous notons un milieu présentant une stratification qui n'était pas visible sur le radargramme obtenu par MARSIS (Figure 1.29). Ce cas illustre l'importance du dimensionnement d'un radar sondeur en fonction de ses objectifs scientifiques ; la largeur de la bande de fréquences de SHARAD garantit une bien meilleure résolution verticale que MARSIS et donne accès à la stratification fine de la calotte polaire Nord.

Plus précisément, nous voyons 4 structures stratifiées en paquet séparées par des zones qui apparaissent sombres et, par conséquent, sont relativement homogènes. Il s'agit de deux niveaux de stratification : les réflexions à l'intérieur des paquets, peuvent être causées par des variations de volume de poussières piégées dans la glace d'eau alors que les couches homogènes contiendraient peu de poussières. La succession de couches hétérogènes (contenant des poussières) et homogènes (couches de

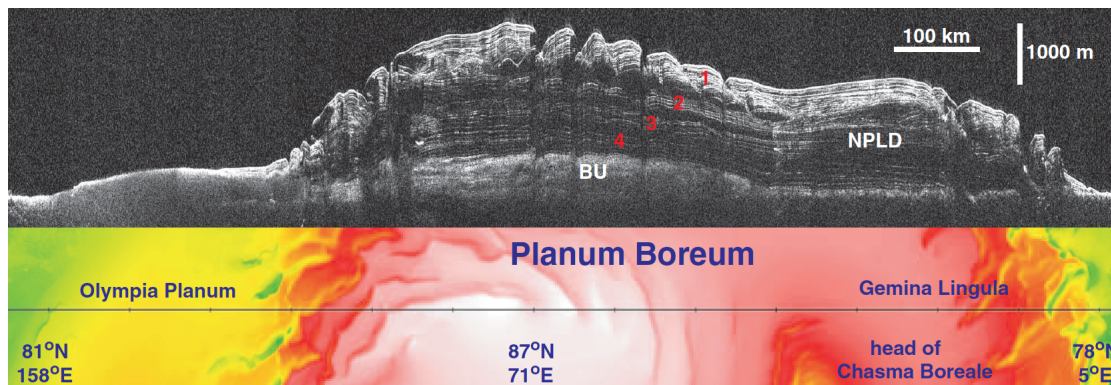


FIGURE 1.34 – Radargramme SHARAD acquis au-dessus de la NPLD. Extrait de [Phillips et al., 2008]

glace d'eau pure) s'expliquerait par des changements de climat liés à des variations des paramètres orbitaux de Mars [Phillips et al., 2008]. La NPLD serait donc un témoin des changements climatiques de la planète rouge [Putzig et al., 2009]. Enfin, ce milieu stratifié repose sur un socle basal facilement identifiable (BU sur la Figure 1.34).

Marte Vallis

Située sur la plateau d'Elysium, Marte Vallis résulte d'un écoulement catastrophique (*outflow channel*). Elle est considérée comme l'une des plus jeunes vallées observées sur Mars (0.5 Ga). Les canaux de Marte Vallis s'étendent sur près de 1000 km de long et 100 km de large. Sa source ainsi que sa profondeur initiale sont restées longtemps indéterminées à cause d'un écoulement de lave récent qui a recouvert toute une partie de la vallée [Morgan et al., 2013].

À partir de 58 profils SHARAD, une reconstitution du canal de Marte Vallis a pu être réalisée en 3 dimensions (Figure 1.35). Cette étude a permis d'identifier la source Cerberus Fossae qui a alimenté Marte Vallis. De plus, à partir des radargrammes (Figure 1.35abc), la profondeur du canal a pu être estimée entre 69 et 110 m de profondeur, soit presque deux fois plus grande que la précédente estimation (40 m) [Morgan et al., 2013].

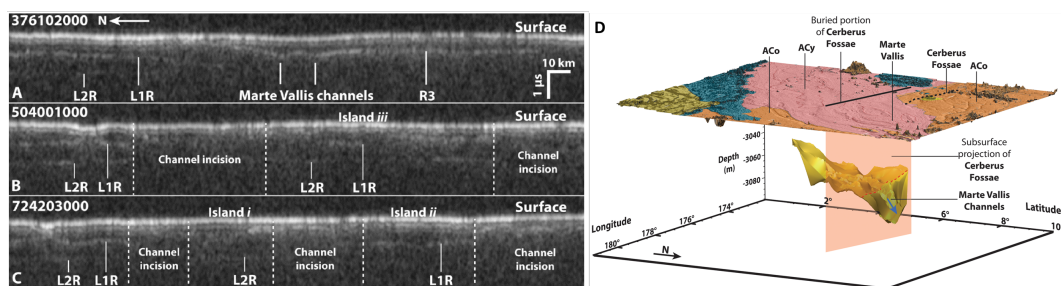


FIGURE 1.35 – a) Radargrammes utilisés dans la reconstruction 3D, b) Reconstruction 3D du canal enfoui à partir des données SHARAD. Extrait de [Morgan et al., 2013].

Utopia Planitia

Utopa Planitia est une plaine située dans l'hémisphère Nord de Mars autour de 45°N et 100°E. Elle présente la particularité d'avoir des terrains potentiellement érodés par sublimation de la glace d'eau dans son proche sous-sol (*Scalloped depression*) et des terrains avec polygones. Ces observations en surface laissent présager que de grandes quantités d'eau glacée sont présentes dans le proche sous-sol. Aujourd'hui, à ces latitudes, la glace d'eau n'est pas stable; elle est rapidement sublimée. Cependant, par le passé, Mars a connu des périodes avec une obliquité bien supérieure à ce qu'elle est

aujourd'hui (à savoir 25.1°), ce qui aurait permis la formation de glaciers à moyenne latitude. Afin de valider cette hypothèse, près de 600 radargrammes acquis avec SHARAD au dessus d'Utopia Planitia [Stuurman et al., 2016] ont été utilisés. Ces radargrammes montrent que la couche supérieure à caractériser est d'épaisseur variable. Cette configuration géométrique, combinée avec les informations d'élévation fournie par MOLA, permet d'utiliser le temps aller et retour de propagation de l'onde dans la couche en question pour estimer la constante diélectrique et obtenir des contraintes sur le matériau qui la compose.

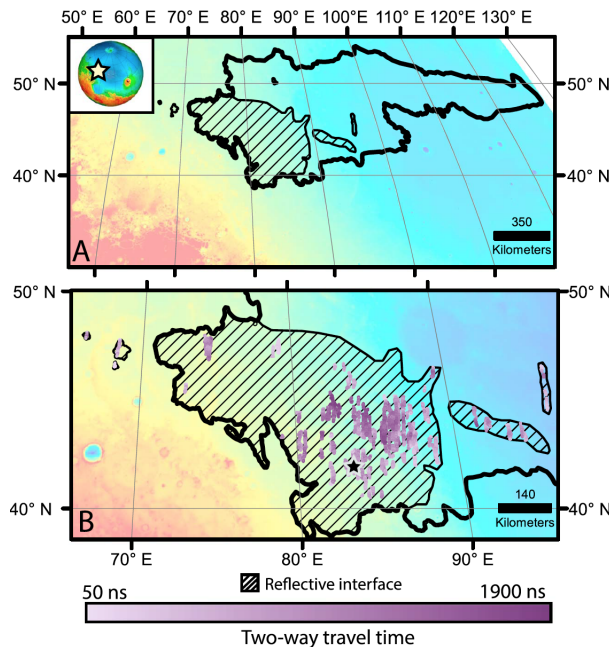


FIGURE 1.36 – Emplacement des sondages SHARAD au dessus d'Utopia Planitia. Extrait de [Stuurman et al., 2016]

Une constante diélectrique de 2.8 ± 0.8 a été estimée pour une couche dont l'épaisseur est comprise entre 80 et 170 m. Ces valeurs sont compatibles avec une couche composée d'un mélange de glace d'eau et de sédiments (entre 50 et 85% d'eau) ce qui représente un volume de glace d'eau compris entre 8400 et 14300 km³ [Stuurman et al., 2016]. Ces conclusions tranchent avec la croyance que les grands réservoirs d'eau sont contenus dans les pôles de la planète. En réalité, ces observations radar démontrent qu'il peut y en avoir à des latitudes moyennes. En effet, de nombreux terrains situés entre 45 et 60° Nord et Sud présentent des caractéristiques de surface similaires à Utopia Planum et sont donc susceptibles de cacher des sous-sols riches en glace d'eau.

En conclusion, SHARAD et MARSIS ont apporté une importante contribution à notre compréhension de Mars et démontrent l'intérêt du sondage électromagnétique pour la caractérisation de la planète Mars et plus généralement pour la planétologie. La découverte récente de MARSIS au Pôle Sud suscite beaucoup d'espoir. En effet, même si la présence d'eau liquide ou de mélanges était déjà suspectée (ravines, cratères d'impact ...), la potentielle détection par MARSIS d'eau liquide en quantité sous la calotte polaire Sud marque un véritable tournant dans l'étude de l'habitabilité passée et présente de la planète. Comme déjà évoqué, deux nouvelles missions en préparation seront lancées en 2020 avec un radar à pénétration de sol à bord de leur rover : WISDOM pour la mission russo-européenne ExoMars 2020 et RIMFAX pour la mission américaine Mars 2020.

Pour finir, le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques des radars sondeurs en fonction ou à venir qui ont été développés pour l'exploration de Mars. En fonction de la fréquence à laquelle ils opèrent, ils permettent d'ausculter la planète rouge à différentes échelles afin de comprendre au mieux

le sous-sol martien (proche sous-sol avec WISDOM et RIMFAX et le sous-sol profond avec MARSIS et SHARAD).

	MARSIS	SHARAD	WISDOM	RIMFAX
Mission	Mars Ex-press	MRO	ExoMars	Mars2020
Date	2003	2005	2020	2020
F_c	1.3-5.5 MHz	20 MHz	1.7 GHz	150-1200 MHz
B_f	1 MHz	10 MHz	2.5 GHz	
Antenne	Dipôle (40 m)	Dipôle (10 m)	Vivaldi (17 cm)	Papillon
Puissance	1.5-5 W	10 W	1 W	5-10 W
Résolution	$\sim 150m$	$\sim 15m$	$\sim 3cm$	15-30 cm
Pénétration	quelques km	<km	3 m	10 m

TABLE 1.3 – Radars sondeurs martiens

1.5 Conclusion

Mars est aujourd'hui la planète qui est, en dehors de la Terre, la plus étudiée grâce à un nombre important de missions. Outre sa proximité avec la Terre, ce statut est justifié par deux arguments de poids : le passé et l'avenir. Par son passé, Mars a vu de l'eau liquide à sa surface ce qui lui confère un intérêt certain pour l'exobiologie et en fait, avec la Terre, un objet singulier. En effet, même si nous suspectons de nombreux satellites naturels de notre système (Europe, Encelade,...) de contenir de l'eau liquide dans leur sous-sol, voire des océans internes, seules Mars et la Terre montrent des traces évidentes d'un passé aqueux à leur surface. En outre, Mars offre la possibilité d'explorer des terrains anciens datant de l'époque où la vie est apparue sur Terre et permet, d'une façon détournée, d'explorer la passé de notre Terre. Pour ce qui est de l'avenir, après le premier pas sur la Lune de Neil Amstrong à la fin des années soixantes, Mars constitue certainement la prochaine étape de l'exploration spatiale par l'homme. Les explorations robotiques mais aussi les études menées depuis la Terre, qui mobilisent des domaines aussi divers que la psychologie, la philosophie et les sciences exactes, préparent activement ce qui pourrait être une seconde fois le plus grand exploit de l'humanité.

Les missions martiennes nous ont apporté une importante quantité d'informations qui nous ont permis de contraindre le passé de Mars, même si de nombreux débats restent ouverts (sur la période d'habitabilité de Mars, les événements ayant conduit à son état actuel, les sources de méthane, la présence d'un ancien océan, la quantité d'eau actuellement présente dans le sous-sol, l'origine des ravines, la nature des RSL). Les orbiteurs ont largement contribué à la caractérisation de la surface martienne qui porte les stigmates d'un passé agité en comparaison d'un présent plus figé, la surface montre de nombreuses traces d'érosion par de l'eau liquide (réseau de vallées, écoulement catastrophiques, ravines) ainsi que des minéraux (phylosilicates) n'ayant pu se former qu'à partir d'un contact prolongé avec de l'eau liquide.

La recherche d'eau liquide stable en surface étant vouée à l'échec du fait des conditions de pression et température, les espoirs se concentrent sur le sous-sol de la planète rouge, là où une pression et une température plus élevée autorisent la présence d'eau liquide. En contact avec un substrat et une source de chaleur interne ces poches d'eau liquide pourraient constituer des refuges pour des microorganismes martiens. Le sondage électromagnétique trouve donc ici un écho favorable dans la recherche de ces abris. Deux radars sondeurs exploitant cette technologie ont été envoyés pour sonder les profondeurs de Mars : SHARAD et MARSIS. Dernièrement l'analyse fine des données de MARSIS a permis de conclure à l'existence d'une possible région saturée en eau liquide sous la calotte polaire Sud.

Nous avons vu dans ce chapitre les premiers clichés de Mars apportés lors de survols par les missions Mariner, puis les premières images à la surface par les sondes Vikings, ainsi que quelques radargrammes du sous-sol venant des premiers radars sondeurs en orbite autour de Mars. Au même titre que ces missions/instruments pionnier(es) WISDOM livrera des radargrammes du proche sous-sol martien avec une précision et une résolution inégalée qui nous permettront, en synergie avec la charge instrumentale de la mission ExoMars, de reconstituer le contexte géologique des sites à l'étude. Le chapitre suivant sera dédié au radar WISDOM dont nous ferons une description détaillée et présenterons une estimation des performances attendues en termes de profondeur de pénétration et de résolution.

Chapitre 2

Caractérisation du radar à pénétration de sol WISDOM/ExoMars 2020

Ce manuscrit de thèse traite de la mise en place d'une chaîne de traitement de données ainsi que d'outils d'interprétation destinés à préparer le retour scientifique de l'expérience WISDOM sélectionnée pour la mission ExoMars 2020. Dans ce chapitre nous présentons cet instrument.

La première partie est consacrée à la description des objectifs techniques de WISDOM ainsi que des principaux sous-systèmes de l'instrument, en particulier de l'unité électronique (WEU, *WISDOM Electronic Unit*) et des antennes (WAA, *WISDOM Antenna Assembly*).

Le développement d'un instrument pour une mission spatiale passe par la fabrication de plusieurs modèles (prototype, modèle de vol, modèle de rechange...) ainsi que par des étapes de validation spécifiques. Après une brève description de ces étapes, nous détaillerons et comparerons les caractéristiques des différents modèles de l'instrument WISDOM (mesures de calibration, comportement en fonction de la température, forme de l'onde émise ...).

Enfin, dans la dernière partie, nous dresserons la liste des campagnes de mesures conduites avec le prototype de l'instrument et dont les données seront utilisées dans ce manuscrit.

2.1 L'instrument WISDOM

WISDOM (*Water Ice Subsurface Deposits Observation on Mars*) est le radar à pénétration de sol sélectionné pour intégrer la charge utile de la mission ExoMars 2020 [Ciarletti et al., 2011] [Ciarletti et al., 2017a]. Le concept retenu pour WISDOM est celui d'un radar à sauts de fréquences. Ce type de modulation présente de nombreux avantages comme le contrôle des fréquences émises, une gestion efficace de la puissance et une réduction du bruit, en contrepartie d'une électronique complexe ainsi que de l'apparition de lobes secondaires parasites [Stickley et al., 2000]. WISDOM opère sur une bande de fréquences de 2.5 GHz comprise entre 0.5 et 3 GHz. Cette large bande garantit une résolution verticale de quelques centimètres pour une profondeur de pénétration d'environ 3 mètres dans un sol lithique et jusqu'à environ 10 mètres dans un environnement favorable comme la glace d'eau (voir 2.3.4).

Les objectifs de WISDOM ont été dictés par le cahier des charges de la mission ExoMars 2020 [Vago et al., 2017][Vago et al., 2015]. Ils s'énumèrent ainsi :

- Caractériser le proche sous-sol martien, notamment par l'identification de structures enfouies dans le sous-sol afin de reconstituer le contexte géologique du site exploré.
- Contraindre la composition du sous-sol, en particulier, via l'estimation de la constante diélectrique ϵ'_r du sol.
- Cartographier la distribution en eau du sous-sol, en synergie avec le détecteur de neutron ADRON-RM/ExoMars 2020.
- Guider la foreuse dans le choix d'un site de forage à la fois pertinent d'un point de vue géologique et sans danger (le foret risque d'être endommagé dans une zone riche en roches enfouies).

ExoMars 2020 sera lancée entre le 25 juillet et le 13 août 2020 pour une arrivée en mars 2021 à la surface de Mars. Il sera, peut-être ex-aequo avec le radar RIMFAX embarqué sur la mission NASA Mars 2020 [Hamran et al., 2015], le premier radar à pénétration de sol à opérer depuis la surface d'une planète autre que la Terre.

La mission ExoMars innove en proposant de caractériser le proche sous-sol martien et, grâce à ses performances en terme de profondeur de pénétration et de résolution, WISDOM tiendra un rôle central dans la réalisation de cet objectif. Bien que l'instrument ne soit pas capable de détecter de la vie, il contribuera à identifier des sites qui ont pu abriter de la vie dans le passé et guidera le prélèvement d'échantillons, ce qui s'inscrit directement dans les objectifs exobiologiques de la mission ExoMars.

WISDOM est composé de deux sous-systèmes : un boîtier contenant toute l'électronique et les antennes. L'électronique a été principalement développée en France au LATMOS (*Laboratoire Atmosphères et Observations Spatiales*) en collaboration avec le LAB (*Laboratoire d'Astronomie de Bordeaux*) alors que les antennes ont été fabriquées et caractérisées en Allemagne, au TUD (*Technische Universität Dresden*).

La fabrication des cartes électronique a été sous-traitée dans l'industrie. Les PCB (*Printed Circuit Boards*) de l'électronique ont été fabriqués par Systronic et Ciretec et le report des composants a été effectué par MATRA Electronique et Steel Electronique. Les antennes, quant à elles, ont été construites sous la direction du TUD par le sous-traitant INVENT GmbH, en Allemagne. Tous ces industriels sont certifiés pour le spatial et respectent des procédures contraignantes dans la fabrication et dans le report des composants.

2.1.1 L'électronique de WISDOM (WEU)

L'électronique de WISDOM (WEU) est confinée dans un boîtier de $14.5 \times 15.9 \times 5 \text{ cm}^3$ en aluminium nickelé pour une masse totale de 803 g.

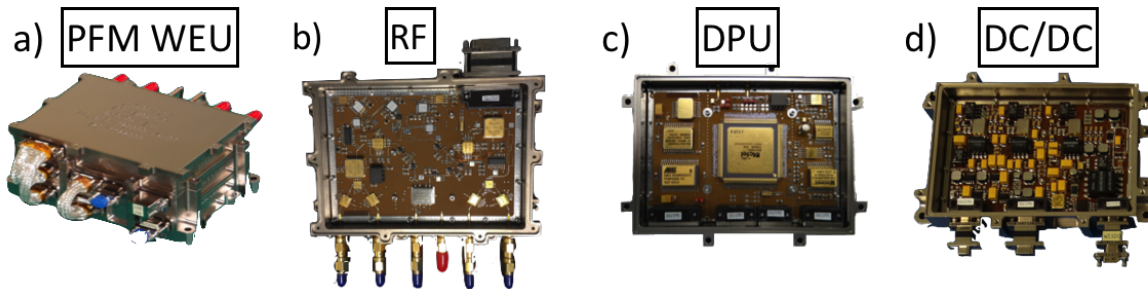


FIGURE 2.1 – Module électronique (WEU) du modèle de vol (PFM) : a) WISDOM (PFM), b) Carte Radio-Fréquence (RF), c) Carte Numérique (DPU, *Data Processing Unit*), d) Carte DC/DC (*Direct Current to Direct Current converter*)

Cette unité est constituée de trois cartes superposées (Figure 2.1) connectées entre elles par des harnais :

- **La carte Radio-Fréquence ou carte RF** (Figure 2.1b) est composée d'un générateur de fréquences qui produit des signaux harmoniques à des fréquences comprises entre 0.5 et 3 GHz, d'une voie d'émission et d'une voie de réception. Ces deux voies comportent un amplificateur, un switch permettant d'alternier entre les différentes polarisations et une fonction *gating* (voir plus loin). Sur chaque voie se trouve un atténuateur variable qui permet de contrôler la puissance émise et la puissance reçue (avec une atténuation maximum de 31 dB sur chaque voie). En fonction de la nature des sols sondés, les atténuateurs permettent d'éviter la saturation du signal mesuré et d'obtenir la meilleure dynamique possible. La dynamique est la différence de niveaux maximum (en dB) entre l'écho le plus fort et l'écho le plus faible pouvant être mesuré. Enfin, la voie de réception contient un mélangeur, qui permet de comparer les signaux émis et reçus.
- **La carte numérique ou carte DPU (*Data Processing Unit*)** (Figure 2.1c) contient un convertisseur analogique/numérique (ou ADC, *Analogue to Digital Converter*) ainsi qu'un FPGA (*Field Programmable Gate Array*).

Le nombre de bits de l'ADC contrôle la dynamique du radar à une fréquence donnée. La dynamique théorique D est donnée par la formule suivante :

$$D = 20 \log(2^{N_{ADC}}) \quad (2.1)$$

L'ADC de WISDOM ayant 16 bits, la dynamique théorique du radar est de 96 dB. En pratique, sa dynamique effective est de 84 dB.

Le FPGA est un circuit intégré programmable. Ses fonctions sont multiples : il permet le contrôle du radar par l'opérateur, pilote la carte radio-fréquence, contrôle les switches (polarisation et *gating*), gère la mémoire, les additions cohérentes, la communication avec le Rover ainsi que l'acquisition des données de "bonne santé" (*Housekeeping data*) telles que les tensions secondaires, les courants ainsi que les températures des différentes cartes. Sur Terre, le contrôle du radar se fait via le SGSE (*Software Ground Support Equipment*) ou le RVIS (*Rover Vehicule Interface Simulator*). Le FPGA gère les télécommandes (TC) et la télémetrie (TM). Les télécommandes sont les instructions envoyées depuis la Terre vers l'instrument. Les télémessures correspondent aux informations envoyées par l'instrument au centre de contrôle sur Terre baptisé le ROCC (*Rover Operation Control Center*) et situé à Turin.

- La carte DC/DC (Figure 2.1d) est un convertisseur DC/DC (*Direct current to Direct Current*) qui génère les tensions secondaires (entre -5 et 15 V) nécessaires à l'alimentation de la carte radio-fréquence et de la carte numérique à partir de la tension fournie par le Rover ($+28$ V).

La Figure 2.2 donne un schéma synoptique de l'architecture du radar WISDOM. Elle présente une vue simplifiée des principaux éléments du radar.

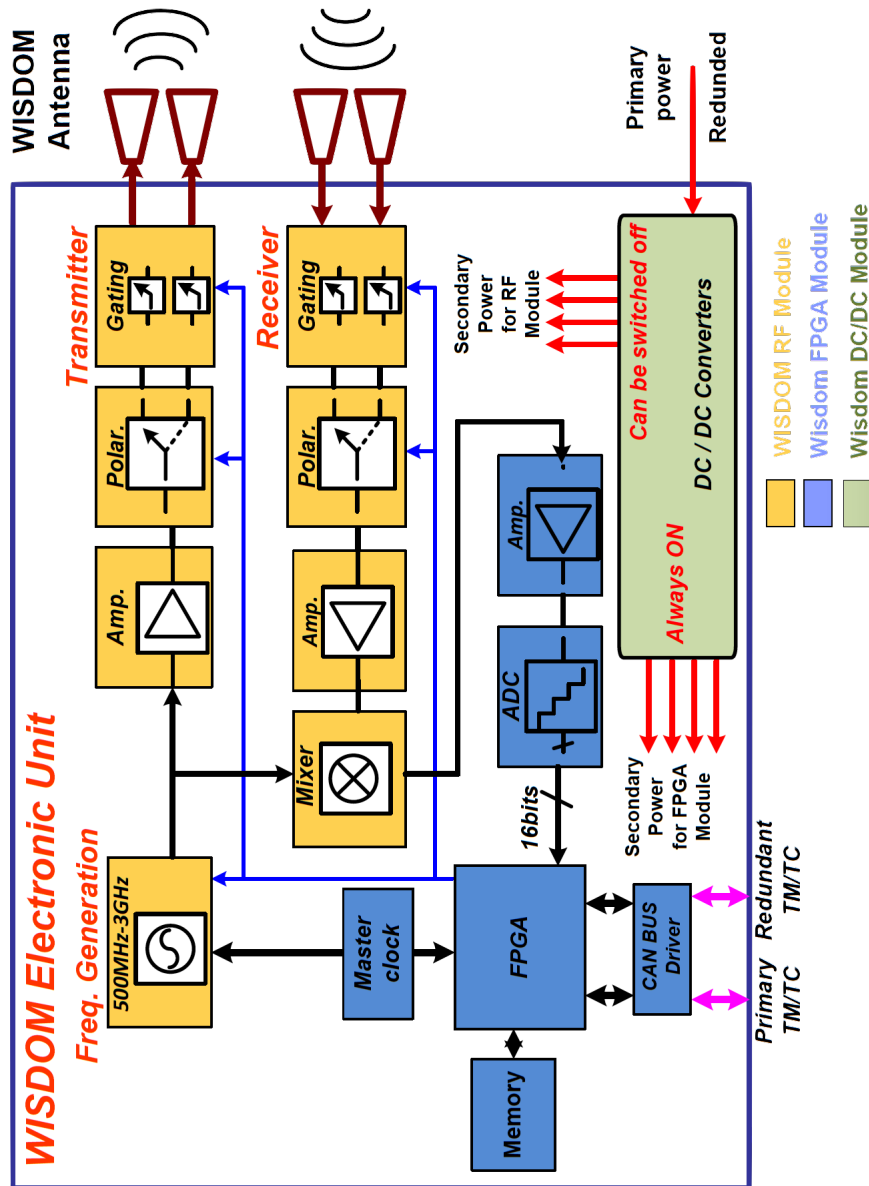


FIGURE 2.2 – Schéma synoptique de WISDOM

Le Tableau 2.1 récapitule les paramètres ainsi que les performances attendues de WISDOM dans le cadre de la mission ExoMars 2020. L'électronique de WISDOM sera intégrée à l'intérieur du corps du Rover alors que les antennes seront, elles, placées à l'extérieur, à l'arrière du Rover par rapport au sens de la marche. Les deux sous-systèmes seront reliés par quatre câbles coaxiaux.

Paramètres nominaux du radar WISDOM	
Type de radar	Radars à sauts de fréquences
Mode	Polarimétrique
Fréquence centrale	1.75 GHz
Gamme de fréquences	0.5 à 3.0 GHz
Nombre de fréquences	1001
Pas en fréquence F_e	2.5 MHz
Bande de fréquences	2.5 GHz
Puissance max ¹	15 dBm
Nombre de bits de l'ADC (N_{ADC})	16
Performances du radar WISDOM	
Dynamique effective	84 dB
Résolution	quelques cm
Profondeur de pénétration ²	entre 2 et 10 m

TABLE 2.1 – Caractéristiques et performances attendues du radar WISDOM

2.1.2 Les antennes de WISDOM (WAA)

Afin de répondre aux objectifs scientifiques, la solution retenue pour le radar d'ExoMars 2020 est un radar large bande doté de capacités polarimétriques. Ces exigences ont conduit au choix d'antennes de type Vivaldi qui sont à large bande et dont la fréquence centrale dépend de leur taille ainsi que de la largeur de leurs fentes.

Les antennes Vivaldi de WISDOM ont une ouverture progressive qui suit un profil exponentiel (voir la Figure 2.3). De plus, ces antennes sont polarisées linéairement ; assemblées perpendiculairement, elles peuvent donc être utilisées pour effectuer des mesures dans différentes polarisations. Le schéma de la Figure 2.3b, montre la disposition des éléments rayonnants. Lorsque deux éléments sont parallèles nous parlerons de co-polarisation (configurations 11 et 00) et lorsqu'ils sont perpendiculaires, de cross-polarisation (configurations 10 et 01). En fonction de la nature des sols et des réflecteurs, les ondes électromagnétiques réfléchies peuvent être dépolarisées. Par conséquent, les capacités polarimétriques de WISDOM permettent de caractériser la forme des réflecteurs et d'estimer le degré d'hétérogénéité du sous-sol. La disposition des antennes et la tâche au sol dont l'axe principal est perpendiculaire à l'axe des antennes permet d'affiner la localisation des réflecteurs dans le sous-sol c'est-à-dire de déterminer si les réflecteurs sont à droite ou à gauche du système d'antenne [Dorizon et al., 2016]. Le premier désign envisagé pour les antennes de WISDOM fut une antenne cornet avec deux éléments Vivaldi perpendiculaires d'une hauteur de 28 cm [Plettemeier et al., 2009]. Afin d'en réduire la taille et d'éviter des contraintes mécaniques supplémentaires, le choix final s'est porté sur un bloc de 4 éléments Vivaldi de plus petite taille (16 cm), perpendiculaires deux à deux et alimentés par une ligne d'alimentation à l'arrière de l'antenne. Cette solution nécessite un diviseur de Wilkinson [Benedix et al., 2013] qui permet de diviser et combiner les signaux envoyés et reçus sur deux éléments Vivaldi.

Les antennes ainsi que leurs substrats -c'est-à-dire les supports sur lesquels reposent les éléments rayonnants- sont en fibre de verre avec une structure en nid d'abeille. Elles sont surplombées par une plaque d'aluminium, avec une structure également en nid d'abeille qui rend les antennes solidaires et permet de les intégrer mécaniquement au Rover. Les antennes seront montées à l'arrière du Rover,

1. $P(\text{dBm}) = 30 + 10 \log \frac{P(\text{W})}{1\text{W}}$
2. 10 m dans de la glace d'eau

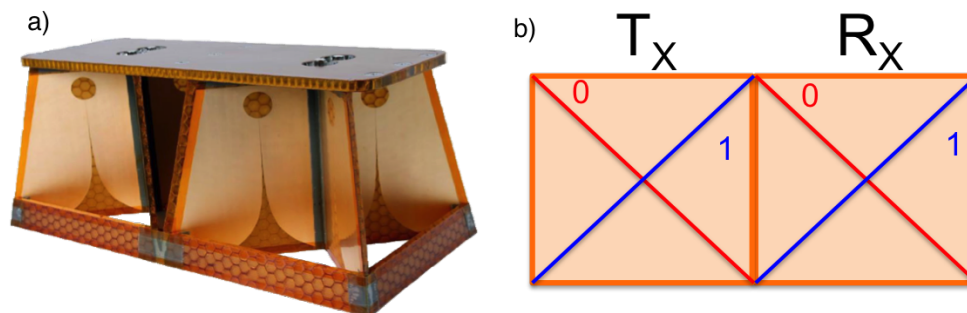


FIGURE 2.3 – a) Photo du système d’antennes de WISDOM (Tx : antenne émettrice, Rx : antenne réceptrice), b) Disposition des éléments rayonnants

là où les interactions avec les différents éléments du Rover sont les plus limitées. La structure en nid d’abeille permet d’abaisser la masse du système d’antennes qui ne doit pas excéder 400 g. Les antennes ont été conçues pour résister à une large gamme de températures (entre $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $115\text{ }^{\circ}\text{C}$) afin de pouvoir supporter les températures à la surface de Mars ainsi que les protocoles de stérilisation.

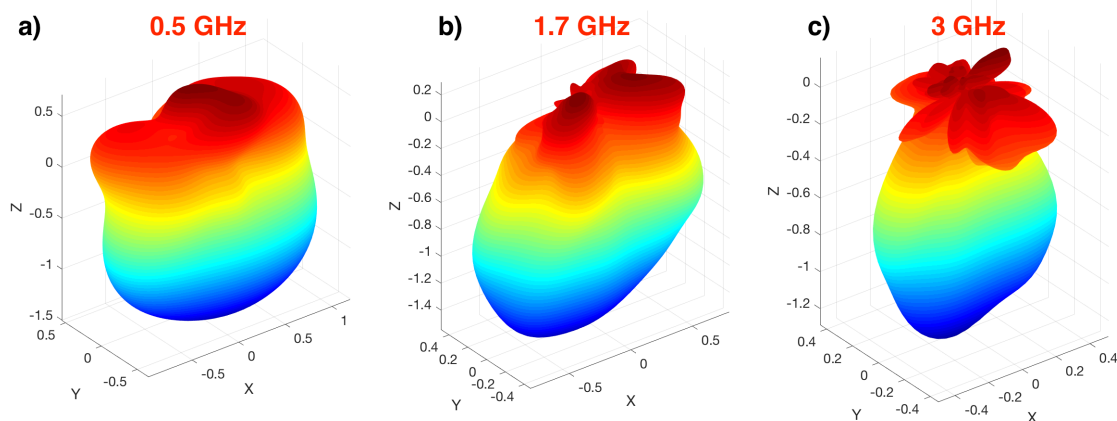


FIGURE 2.4 – Diagrammes de rayonnement 3D des antennes de WISDOM à différentes fréquences : a) 0.5 GHz, b) 1.7 GHz, c) 3 GHz.

La Figure 2.4 montre des diagrammes de rayonnement des antennes de WISDOM à différentes fréquences. Ceux-ci ont été obtenus à partir de mesures en chambre anéchoïde au TUD. Une chambre anéchoïde est un environnement censé simuler l’espace libre ; ses murs sont tapissés par des cônes absorbants destinés à annihiler la réflexion des ondes électromagnétiques.

Nous remarquons que le lobe principal est homogène et ne présente pas d’aspérité. Le diagramme devient de plus en plus directif lorsque la fréquence augmente. D’autre part, nous observons l’apparition de lobes secondaires à hautes fréquences. Ceci sera à prendre en considération lors de l’interprétation des données. En effet, les lobes secondaires ne sont pas dirigés vers le sous-sol et vont, par conséquent, intégrer aux données une réponse parasite provenant de la surface.

Les antennes de WISDOM seront montées à l’extérieur du Rover, à 38 cm au dessus du sol. Cette particularité est due aux contraintes de la mission ExoMars 2020 ; le Rover doit pouvoir se mouvoir sans risquer d’abimer ou de perdre ses antennes, ce qui est impossible avec des antennes trop proches du sol. À l’exception des radars de chaussée, la plupart des radars à pénétration de sol opèrent avec leur antennes collées au sol ce qui est la configuration optimale. En effet, la plus grosse partie de la puissance est ainsi transmise au sous-sol et il n’y a pas de réflexions parasites (ou clutter) venant de la surface. La position surélevée des antennes de WISDOM constitue donc une contrainte supplémentaire dont nous tiendrons compte au moment de l’interprétation des données et dans la mise en place des

traitements. Nous verrons que cette contrainte permet, en contrepartie, l'analyse de la surface (voir le Chapitre 5).

Caractéristiques attendues	
Gamme de fréquences	0.5 à 3 GHz
Bande de fréquences	2.5 GHz
Polarisations	co et cross (00-11-01-10)
Largeur du lobe principal	>20°, H-plane>E-plane
Gain	augmente avec la fréquence (entre 1 et 8 dB)
Couplage direct	< -15 dB
Tolérance en température	entre -120°C et 115°C
Masse	< 400 g

TABLE 2.2 – Caractéristiques attendues du système d'antennes de WISDOM

2.2 Étapes et développement d'un instrument pour une mission spatiale

2.2.1 Philosophie des modèles

Le développement d'un instrument pour une mission spatiale passe par la fabrication de plusieurs modèles destinés à valider, étape par étape, les exigences de la mission.

- **Le BreadBoard model (BB)** : Le *BB model* ou prototype est une version fonctionnelle de l'instrument qui permet de valider le concept et d'effectuer les premiers tests. Il existe habituellement plusieurs versions du BB, les plus abouties étant représentatives du modèle de vol (en forme et en fonction). Nous utilisons une version représentative du modèle de vol pour les campagnes de mesures ; nous appellerons dans le manuscrit ce modèle "le prototype".
- **L'Electrical Interface Simulator Model (EIS)** : Ce modèle doit être représentatif du modèle de vol en terme d'interfaces électriques ; il doit pouvoir être piloté par un simulateur de Rover, RVIS (*Rover Vehicule Interface Simulator*) ou ATB (*Avionic Test Bench*).
- **Le Structural/Thermal Model (STM)** : Le STM doit avoir les mêmes dimensions, masse et consommation que le modèle de vol. Il est représentatif du modèle de vol en terme de dissipation de la chaleur. Ce modèle est non fonctionnel, les composants sont remplacés par des composants factices.
- **L'Engineering Qualification Model (EQM)** : L'EQM est un modèle fonctionnel de l'instrument réalisé à partir de composants dits "qualifiés" c'est-à-dire validés pour le spatial. Ils sont robustes et capables de résister à des conditions de pression, de radiation, de température et de vibration compatibles avec la mission. Leurs empreintes sont parfois différentes de celles des composants classiques ; cela peut donc conduire à des choix de réalisation différents de ceux faits pour le prototype. L'EQM participe aux campagnes de qualification qui servent à tester l'instrument dans des conditions plus exigeantes ("niveau de qualification", voir plus loin) que celles de la mission.
- **Le Flight Model (FM)** : Le FM est le modèle qui intégrera la charge instrumentale et partira en mission. Il doit avoir préalablement subi des tests au "niveau d'acceptance" (voir plus loin), donc moins sévères que ceux subit par l'EQM.
- **le Flight Spare Model (FS)** : Le FS est identique au *Flight Model*. Il subit la même campagne de tests et de validation. En cas de panne sur le modèle de vol avant le lancement, le FS remplace le FM. Après le lancement, il peut servir à mieux modéliser/comprendre le vieillissement de l'instrument.

Un EQM permet d'effectuer une campagne de qualification complète, avec pour objectif de valider l'architecture de l'instrument pour la mission. En l'absence d'un EQM, les tests sont reportés sur le modèle de vol (FM) qui devient un PFM (*ProtoFlight Model*). C'est la philosophie choisie pour l'électronique de WISDOM. Un EM (*Engineering Model*) avec des composants non qualifiés a été construit puis un PFM. Pour les antennes la philosophie classique a été suivie (BB, STM, EQM, FM et FS). Il existe donc, en juin 2018, trois versions fonctionnelles de l'instrument WISDOM : un prototype (BB), un EM et PFM. Le *Flight Spare Model* (FS) est en cours de fabrication et devrait être livré fin 2018. Une fois les qualifications terminées, les modèles sont livrés. Seul le prototype est conservé par l'équipe afin de poursuivre des tests complémentaires (campagne de mesures, mesures sur cibles ...).

2.2.2 La qualification

La qualification consiste en un ensemble de tests destinés à examiner la résistance de l'instrument aux conditions qu'il rencontrera pendant la mission (lancement, voyage dans l'espace et opérations en environnement martien). Deux niveaux de test sont réalisés : les "tests de qualification" et les "tests d'acceptance". Les tests de qualification mettent l'instrument dans des conditions plus difficiles que

celles qu'il rencontrera lors de la mission. Une partie de ces tests sont réalisés sur le STM puis l'ensemble est réalisé sur l'EQM. Les tests d'acceptance sont, quant à eux, appliqués sur le FM ; leurs niveaux d'exigence est moins élevé que celui des tests de qualification.

Les tests de qualification mettent à l'épreuve la robustesse de l'architecture ainsi que la conception, alors que les tests d'acceptance vérifient que l'instrument ne présente pas de défauts de fabrication et qu'il est parfaitement opérationnel en conditions de vol. Etant donnée la philosophie choisie pour l'unité électronique de WISDOM (le PFM est le modèle de vol), la campagne de qualification doit veiller à ne pas trop stresser les composants. Un compromis doit donc être trouvé entre les tests de qualification (tests de la conception) et les tests d'acceptance (instrument opérationnel). Par exemple, si des tests mécaniques doivent être répétés pendant un certain nombre de cycles, un compromis peut être trouvé entre nombre de cycles et intensité des tests.

Parmi les tests réalisés en campagne de qualification nous retiendrons particulièrement :

- **Tests de Compatibilité ElectroMagnétique (CEM)** : ces tests ont pour but de vérifier la compatibilité électromagnétique entre l'instrument et son environnement. Dans le cas de WISDOM, il faut veiller à ce que l'instrument ne perturbe pas son environnement lors de son fonctionnement et que l'environnement du Rover ne perturbe pas les mesures. Une attention particulière doit être apportée à l'émission de WISDOM. Bien que conçu pour émettre à l'intérieur d'une bande de fréquences, des produits d'intermodulation peuvent produire des émissions à certaines fréquences en dehors de cette bande de fréquences. Des tests doivent donc être réalisés afin que WISDOM n'émettent pas dans la bande de communication du Rover avec l'orbiteur relais.
- **Tests de vibrations/chocs** : les tests de vibrations et de chocs permettent de vérifier que l'instrument résistera au voyage vers Mars. Les instruments doivent pouvoir résister aux vibrations lors du décollage et de l'atterrissage ainsi que pendant les phases de déplacement du Rover ; ils doivent être aussi capables d'encaisser des chocs violents. Ces tests sont réalisés sur l'unité électronique ainsi que sur les antennes. Des accéléromètres sont disposés sur les éléments afin de contrôler les vibrations et chocs reçus. Les tests consistent à soumettre l'instrument à des vibrations sinusoïdales et aléatoires à différentes fréquences selon les trois axes de l'instrument. Le niveau d'acceptance est ici 1.25 fois plus faible que le niveau de qualification. Cependant pour l'électronique du PFM/WEU un compromis a été trouvé : l'instrument a été qualifié conformément aux tests de qualification (en termes de niveaux de l'accélération et de type de vibrations) mais avec la durée "allégée" des tests d'acceptance.
- **Tests en températures et vide** : l'espace et la surface martienne sont des environnements hostiles ; on y rencontre des températures ainsi que des pressions extrêmes. L'unité électronique et les antennes doivent donc être soumises à tests reproduisant ces conditions. Pour ce faire, WISDOM est placé dans une cuve dont la température ainsi que la pression sont contrôlées. Pour l'unité électronique, des mesures rebouclées et sur charges sont réalisées (sans antenne) à chaque palier de pression et température. L'opération est répétée un certain nombre de fois. La température de l'instrument peut être contrôlée à l'aide de sondes internes et de sondes disposées sur la mécanique de l'instrument. Pour les antennes la procédure est différente ; les antennes sont munies de sondes thermiques et reliées à un analyseur de réseaux. Pendant les cyclages thermiques, les paramètres S (coefficients de transmission/réflexion) sont mesurés. La mesure des paramètres S doit permettre de s'assurer de l'intégrité des antennes. Une forte variabilité de ces paramètres pendant les tests doit alerter.

Durant les tests de température sur l'électronique, nous avons observé une baisse de la puissance émise. Ce résultat doit être quantifié afin de déterminer si nous devons le prendre en considération lors de l'interprétation des données. C'est pour cela que nous détaillerons dans la partie suivante dédiée à la caractérisation de l'instrument, la qualification du modèle de vol (PFM) lors des tests en température.

Le Tableau 2.3 récapitule l'ensemble des tests effectués sur l'unité électronique (WEU) et les antennes (WAA) de WISDOM. Outre les tests mécaniques détaillés ci-dessus, un contrôle minutieux des propriétés physiques (masse, dimensions, centre de gravité et moment d'inertie) ainsi que des interfaces

doit être effectué. Des mesures de calibration doivent aussi être réalisées afin de préparer la mission et d'évaluer les performances de l'instrument.

	WEU					WAA			
	EIS	STM	EM	PFM	PFS	STM	QM	FM	FS
Vibration		■		■	■	■	■	■	■
Choc							■		
Propriétés physiques		■		■	■	■	■	■	■
Contrôle des Interfaces	■	■		■	■				
Température/Vide		■		■	■				
Tests fonctionnels	■		■	■	■	■	■	■	■
CEM (EM Compatibility)			■	■	■				
ESD (Electrostatic Discharge)			■						

TABLE 2.3 – Tests et qualifications des modèles de WISDOM

Une fois les tests passés, les instruments sont livrés à l'industriel en charge de l'intégration des instruments sur le Rover. Les modèles de vol ainsi que leur modèle de rechange sont stérilisés pour des raisons de protection planétaire.

2.3 Caractérisation de l'instrument

La connaissance du signal émis par le radar et de la réponse de l'instrument est à la base de plusieurs techniques de traitement du signal, notamment de la déconvolution, du pré-traitement des données avant utilisation des techniques de haute résolution, mais aussi de la modélisation de la réponse d'un milieu par calculs analytiques, ou différences finies dans le domaine temporel.

2.3.1 Modélisation de la forme d'impulsion radar

WISDOM est un radar à sauts de fréquences. La forme de l'onde émise par le radar peut être reconstruite par transformée de Fourier inverse. Pour correctement prédire le comportement du radar nous avons besoin de fidèlement modéliser l'onde émise par l'instrument que l'on appelle "impulsion". Cette impulsion peut être modélisée par un sinus modulé par une gaussienne parfois simplement dénommée sino-gaussienne. La sino-gaussienne est définie en fonction du temps t par la formule suivante :

$$s(t) = A \sin(2\pi f_0(t - t_0) + \phi_0) e^{-\frac{(t-t_0)^2}{T^2}} \quad (2.2)$$

où A , T , f_0 , ϕ_0 et t_0 désignent respectivement l'amplitude, la largeur, la fréquence centrale, la phase et le retard de l'impulsion.

On considère généralement que deux signaux de même amplitude distants d'une durée inférieure à la largeur à mi-hauteur du signal émis, ne peuvent pas être résolus. La résolution verticale dépend donc entièrement de la largeur à mi-hauteur du signal émis.

Dans la pratique, l'impulsion est couramment déterminée par une mesure sur plaque métallique. Cette méthode est judicieuse, car le coefficient de réflexion sur plaque métallique étant égal à -1 , la réflexion est totale. L'impulsion mesurée intègre alors le rôle des antennes dans la chaîne d'acquisition ainsi que la propagation dans l'air entre les antennes et la cible. Nous avons modélisé et mesuré le signal émis par WISDOM en ayant recours à plusieurs méthodes, dont la mesure sur plaque métallique, avec le souci d'écarter au mieux les signaux parasites. La prudence s'impose lors de ce type de mesures, la qualité de l'impulsion mesurée dépendant directement de la façon dont a été réalisée l'acquisition. En particulier la plaque métallique doit être suffisamment grande et les antennes suffisamment proches pour que la réflexion soit totale. Ces mesures doivent aussi être réalisées en champ libre ou en chambre anéchoïde pour éviter les signaux parasites, notamment ceux liés à la présence de lobes secondaires dans le diagramme de rayonnement des antennes.

Afin de décrire le plus correctement possible l'onde émise par le radar nous avons testé 4 méthodes d'acquisition de l'onde émise, et choisi celle qui restitue le plus fidèlement l'impulsion. Ces méthodes consistent à déterminer l'impulsion par des mesures sur plaque (Figure 2.5a), des mesures sur sol naturel (Figure 2.5b), des mesures avec les antennes face-à-face (Figure 2.5c) et enfin par des mesures sans antenne (Figure 2.5d ; la sortie de l'émetteur Tx du WEU est alors reliée à l'entrée du récepteur du WEU par un câble coaxial). Les deux premières méthodes s'appuient sur des mesures en réflexion et les deux dernières sur des mesures en transmission.

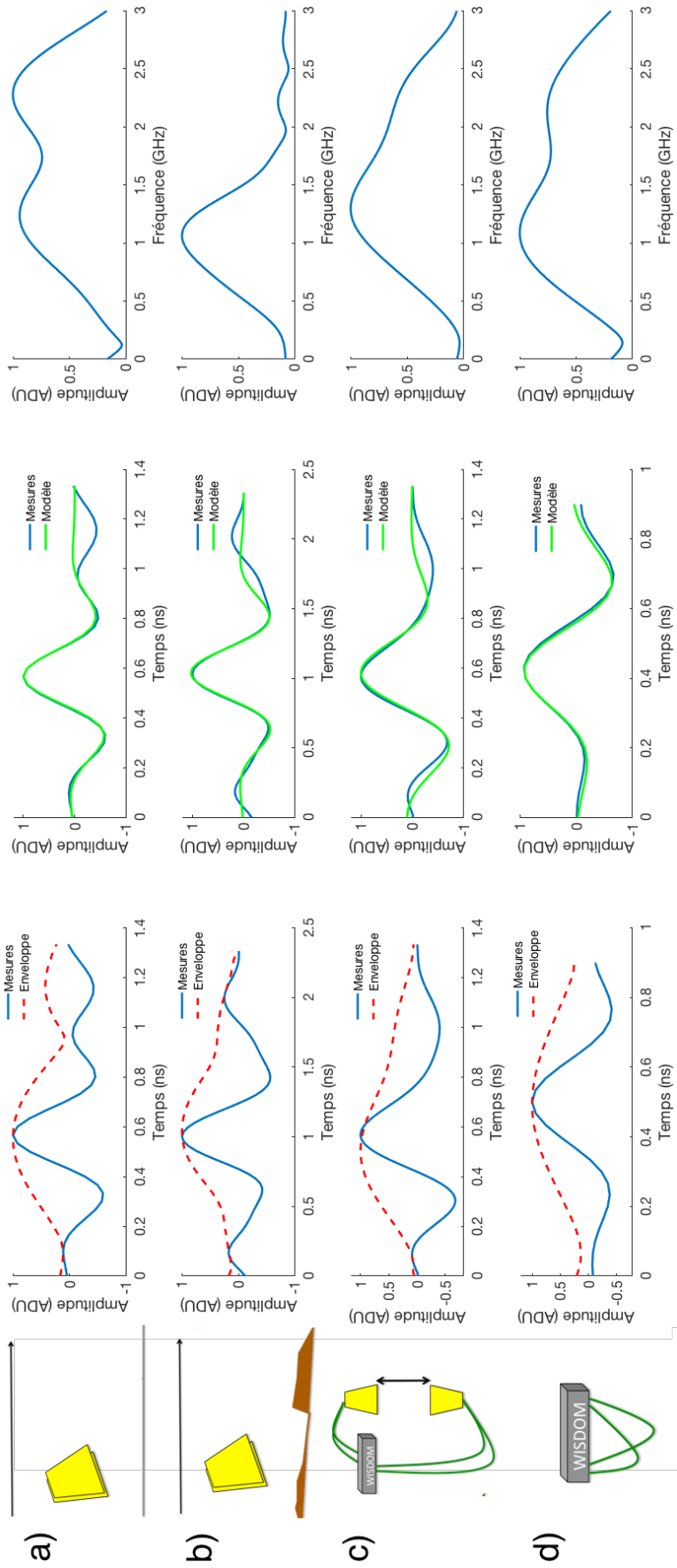


FIGURE 2.5 – Impulsion mesurée (normalisée par le maximum) (2^{ème} colonne) et modélisée (3^{ème} colonne) et leur réponse (normalisée par le maximum) dans le domaine fréquentiel (4^{ème} colonne) pour chaque protocole de mesure décrit dans la 1^{ère} colonne : a) mesures sur plaque, b) mesures sur sol naturel, c) mesures avec les antennes face à face, d) mesures sans antenne.

La Figure 2.5 montre les impulsions mesurées dans le domaine fréquentiel et converties dans le domaine temporel, obtenues dans chaque configuration de mesures. La forme de ces impulsions est bien celle de sino-gaussiennes. La deuxième colonne de la Figure 2.5 présente, pour chaque configuration de mesures, le meilleur ajustement du modèle d’une impulsion sino-gaussienne aux mesures.

Le Tableau 2.4 donne les paramètres de la sino-gaussienne décrivant le modèle d’impulsion pour chaque configuration de mesures. Nous remarquons que la fréquence centrale de la sino-gaussienne est proche de la fréquence centrale de l’instrument (1.75 GHz). Afin de comparer les différentes impulsions recueillies, nous pouvons regarder les largeurs à mi-hauteur du terme gaussien des courbes d’ajustement (Tableau 2.4). La largeur à mi-hauteur et donc la longueur du signal mesuré après réflexion sur un sol naturel (cas b) est bien plus grande que celle obtenue pour les autres configurations de mesure. Nous pouvons attribuer cela à la rugosité de surface des sols naturels : la rugosité atténue les hautes fréquences ce qui a pour effet de réduire la bande de fréquences et donc d’allonger le signal dans le domaine temporel. C’est ce que nous observons aussi en comparant les réponses fréquentielles des impulsions mesurées selon les configurations (Figure 2.5, 4 ème colonne) : la réponse fréquentielle obtenue sur sol naturel, est fortement atténuée à partir de 2 GHz. Nous reviendrons sur ce comportement dans le chapitre dédié à l’estimation de la constante diélectrique de surface (voir Chapitre 5). La surface déformant l’écho émis, nous pouvons donc écarter la mesure sur sol naturel dans notre choix du meilleur modèle de signal émis.

La longueur du signal est sensiblement la même dans les configurations a) et d) ($T \simeq 0.30 \text{ ns}$), et est inférieure à celle obtenue pour une mesure avec des antennes face-à-face ($T_c = 0.36 \text{ ns}$). Cette différence peut s’expliquer par les conditions de mesure de la configuration c). Pour obtenir une mesure de qualité, celle-ci doit être effectuée dans un milieu qui présente peu de réflecteurs. Dans la configuration c) les éléments rayonnants de chaque antenne doivent se situer précisément face-à-face, ce qui est relativement difficile à obtenir dans la pratique et peut expliquer une impulsion plus large.

En revanche, les mesures de la configuration a) ont été effectuées en chambre anéchoïde, et les mesures de la configuration d) ne prennent pas en compte les antennes. Par conséquent les impulsions obtenues lors des mesures dans les configurations a) et d) l’ont été dans un environnement très peu perturbé. Ce sont ces mesures où les impulsions sont les plus courtes. Des deux configurations nous allons par la suite retenir le modèle de signal déterminé par ajustement par une sino-gaussienne de la mesure sur plaque car elle intègre les antennes. Cette mesure est aussi celle qui est la moins perturbée par son environnement. À noter que la mesure sur plaque est très ressemblante de celle obtenue par la mesure sans antenne alors que nous aurions pu nous attendre à un signal élargi par les antennes qui agissent comme un filtre. Le modèle d’impulsion retenu a donc une longueur de 0.30 ns, ce qui correspond à 9 cm dans le vide. On peut donc espérer une résolution d’environ 4 cm dans un milieu de permittivité égale à 4.

Configuration de mesures	T (ns)	$f_0(\text{GHz})$
a) Mesures sur plaque métallique	0.30	1.79
b) Mesures sur sol naturel	0.52	1.07
c) Mesures antennes de réception et de transmission face à face	0.36	1.45
d) Mesures rebouclées (sans antenne)	0.29	1.59

TABLE 2.4 – Paramètres du modèle d’impulsion sino-gaussienne (Equation(2.2)) pour chaque configuration de mesures

2.3.2 Comparaison de la forme de l’écho en fonction des modèles

Bien que le concept soit le même, il y a quelques différences entre les modèles de WISDOM : des différences en terme de composants et parfois même en terme d’architecture. Par exemple l’EM contient deux atténuateurs sur sa chaîne de réception contre un seul pour les autres modèles. De plus, comme évoqué plus haut, l’EM et le PFM ont été conçus avec un système d’évacuation de la chaleur plus efficace que celui du prototype. Regardons si ces différences ont une influence sur la forme de l’écho

émis. Pour décrire la forme de l'écho, conformément aux conclusions de la section 2.3.1, nous avons fait des mesures sur plaque métallique.

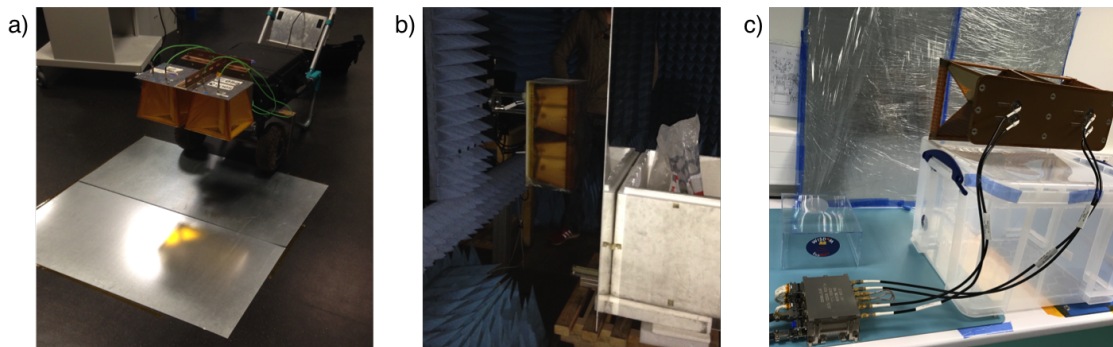


FIGURE 2.6 – Mesures sur plaque : a) Au laboratoire avec le prototype, b) En chambre anéchoïde avec l'EM, c) En salle blanche avec le PFM.

Ces mesures ont été acquises sur une plaque métallique avec le prototype, l'EM et le PFM. Des contraintes supplémentaires pour l'EM et le PFM (manipulation en salle blanche, peu de disponibilités) font que les mesures ont été réalisées dans des conditions différentes (mesures dans le laboratoire, mesures en chambre anéchoïde et mesures en salle blanche). Toutefois les mesures ont été acquises sur la même plaque métallique à une distance de 38 cm (ce qui sera la distance entre le pied des antennes et le sol martien).

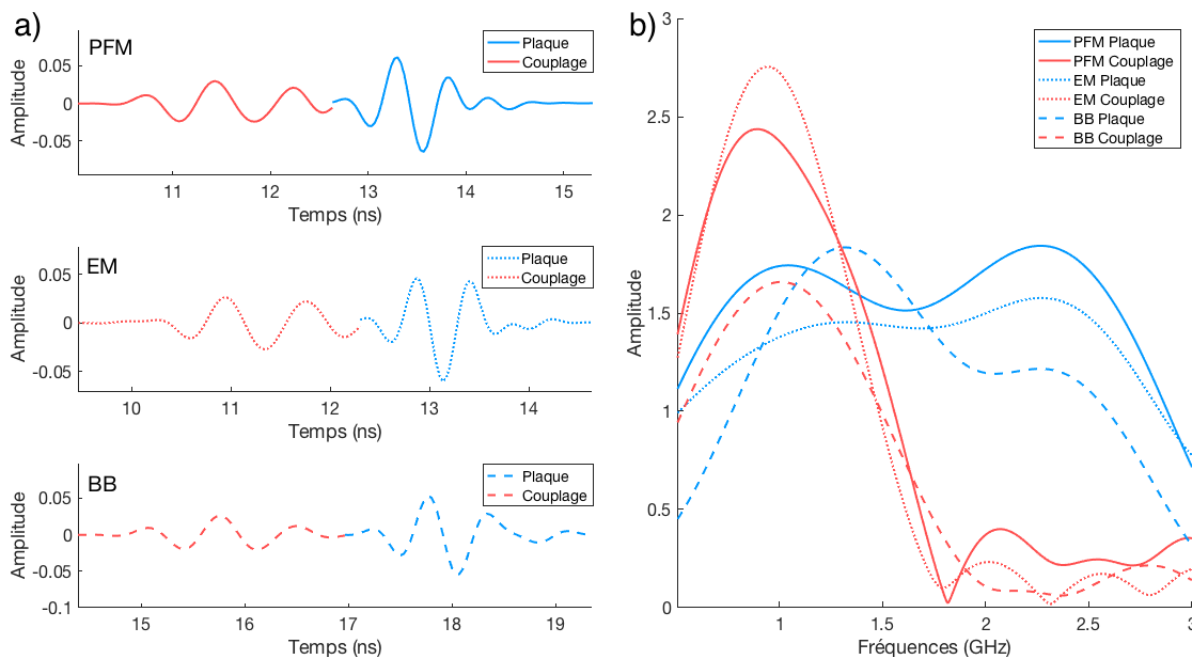


FIGURE 2.7 – Mesures sur plaque avec les différents modèles de WISDOM (PFM, EM, BB) : a) réponses temporelles, b) réponses fréquentielles.

La Figure 2.7 expose les mesures sur plaque métallique pour les trois modèles à l'étude. Tout d'abord, regardons les profils dans le domaine temporel (Figure-2.7a), ils ont été tronqués afin de ne laisser apparaître que le couplage direct (le couplage direct, ici en rouge, désigne l'onde direct dans l'air entre les antennes d'émission et de réception) et la réflexion sur la plaque métallique (en bleu). Les temps d'arrivées de ces signaux diffèrent d'un modèle à l'autre notamment parce que des câbles avec des longueurs différentes ont été utilisés. Les profils radar sont néanmoins très semblables pour

les trois modèles : les formes et durées des échos (couplage direct et écho sur plaque) sont similaires. L'écho sur plaque de l'EM marque une légère différence par rapport aux autres modèles ; la forme de l'écho ressemble à une forme d'onde de Ricker.

Regardons maintenant les spectres du couplage direct et de l'écho de sol ; nous remarquons un comportement analogue entre modèles : le couplage direct est basse fréquence alors que le spectre de l'écho sur plaque s'étale sur toute la bande de fréquences de WISDOM. Les spectres de l'EM et du PFM sont très proches et présentent quelques différences avec le spectre du prototype ; en particulier sur la réponse fréquentielle de l'écho sur la plaque métallique. En effet, la réponse sur la plaque métallique est bi-lobée, mais contrairement à ce que l'on observe avec l'EM et le PFM, le lobe situé dans les hautes fréquences est plus important que celui des basses fréquences. De plus, le "creux" en fréquence est situé autour de 2 GHz alors qu'il est autour de 1.6 GHz pour l'EM et le PFM. Nous pouvons imputer ces différences à la carte radio-fréquence. Les cartes RF de l'EM et du PFM sont, en effet, plus stables que celle du prototype.

Néanmoins, retenons que les différents modèles de WISDOM ont un comportement équivalent en hautes et basses fréquences en ce qui concerne le couplage direct et l'écho sur plaque et que les profils radar acquis avec chacun d'entre eux sont très ressemblants en terme de forme mais aussi de durée. La similitude des réponses temporelles ainsi que des réponses fréquentielles pour les trois modèles conforte l'approche qui consiste à préparer le retour scientifique de la mission ExoMars 2020 en validant les procédures de traitement sur le prototype.

2.3.3 Bilan de liaison

Le bilan de liaison vise à retrouver analytiquement la puissance reçue en fonction de la puissance émise. Ce bilan s'appuie sur la connaissance des gains des chaînes d'émission et de réception. Lorsque les deux antennes sont face-à-face, séparée d'une distance d , la puissance reçue P_r par le radar peut être estimée à partir de la puissance émise P_e via la formule de transmission de Friis [Ulaby et al., 2014] (valable en espace libre et en champ lointain) :

$$\frac{P_r}{P_e} = G_e G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.3)$$

où G_e et G_r désignent respectivement les gains des antennes d'émission et de réception. En utilisant la théorie des images il est possible de calculer la puissance réfléchiée par une surface lisse [Ulaby et al., 2014]. L'équation (2.3) devient alors :

$$\frac{P_r}{P_e} = G_e G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi(d_e + d_r)} \right)^2 |\Gamma|^2 \quad (2.4)$$

où Γ est le coefficient de réflexion de la surface et d_e et d_r représentent les distances entre la surface et les antennes émettrices et réceptrices, respectivement.

Nous nous proposons de faire le bilan de liaison de WISDOM à partir de mesures (réalisées avec le prototype) sur une plaque métallique disposée à différentes distances des antennes (voir figure 2.8). Les deux antennes se trouvent alors à la même distance de la plaque donc $d_e = d_r = d$. De plus, nous pouvons considérer que le gain en émission est égal à celui en réception soit $G_e = G_r = G$. L'estimation finale du coefficient de réflexion de la plaque métallique sera ensuite comparée à sa valeur théorique ($|\Gamma_{PM}^2| = 1$).

L'estimation du coefficient de réflexion se fera à partir de la formule (2.4) écrite sous la forme :

$$|\Gamma|^2 = \frac{P_r}{P_e} \left(\frac{8\pi d'}{G\lambda} \right)^2 \quad (2.5)$$

où $d' = \sqrt{0.1^2 + d^2}$ (en mètre) où 0.1 m correspond à la moitié de la distance entre les deux antennes (i.e., 20/2 cm, voir figure 2.8).

Dans ce qui suit nous décrivons comment les paramètres G , P_e et P_r ont été mesurés ou estimés.

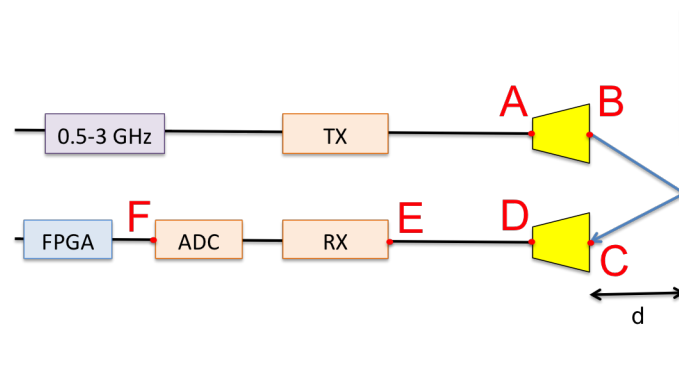


FIGURE 2.8 – Schéma de la configuration de mesure

Gain des antennes

Le gain G a été mesuré pour l'EQM par le TUD. La Figure 2.9 montre ce gain (en dBi c'est-à-dire relatif à une antenne isotrope) en fonction de la fréquence. Nous remarquons qu'il est plus élevé aux hautes fréquences ce qui permet de réhausser le signal à ces fréquences qui sont les premières à être atténuées dans le sous-sol.

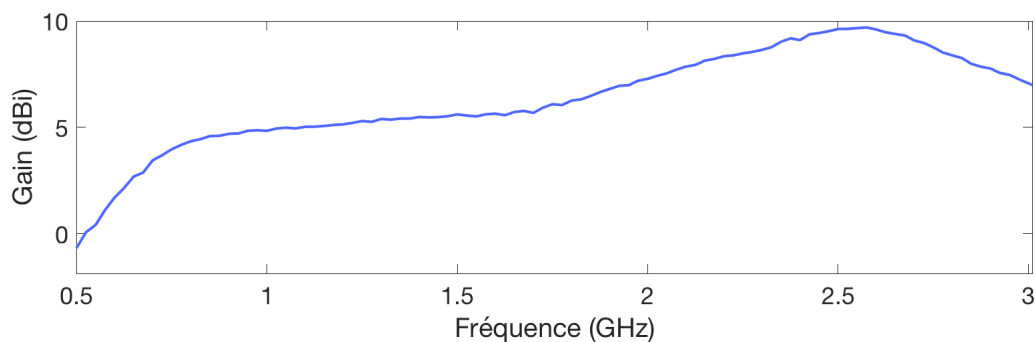


FIGURE 2.9 – Gain des antennes WISDOM EQM en dBi

Mesures de la puissance émise

Nous avons mesuré la puissance émise P_e par le radar en fonction de la fréquence à l'aide d'un analyseur de spectre. La mesure a été effectuée à la sortie de l'électronique (point A sur la Figure 2.8). L'analyseur de spectre était alors branché sur la sortie Tx de l'électronique par l'intermédiaire d'un câble de 1 m dont les pertes sont bien connues.

La Figure 2.10 montre la puissance mesurée à la sortie de la chaîne d'émission en fonction de la fréquence. Elle est d'environ 17 dBm et baisse autour de 1.9 GHz jusqu'à une valeur de 11 dBm. La puissance maximum émise est relativement faible; 17 dBm représentent seulement 50 mW. A titre de comparaison, les routeurs Wifi émettent une puissance de 100 mW à 2.4 GHz. Cette faible émission garantit le caractère non invasif de l'instrument et de la technologie des radars à pénétration de sol pour le sondage des sous-sol. Cette puissance, qui, si besoin est, peut être atténuée par des atténuateurs présents dans la chaîne d'émission, est transmise à l'antenne émettrice.

Estimation de la puissance reçue par WISDOM à partir de la fonction de transfert de l'instrument

Nous ne mesurons pas directement une puissance avec WISDOM mais une tension (comprise en -3.3 et $+3.3$ V) en unité ADU (*Arbitrary Digital Unit*) à la sortie de l'ADC. Pour estimer la puissance

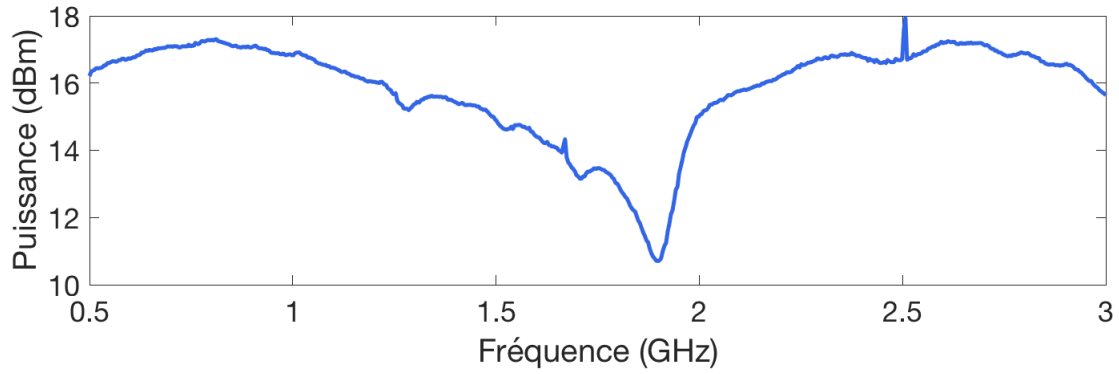


FIGURE 2.10 – Puissance émise en fonction de la fréquence

reçue, il faut donc convertir les unités ADU en unité de puissance (W ou dBm).

Entre son entrée dans la chaîne de réception et la sortie de l'ADC, le signal subit plusieurs opérations : il est notamment mélangé au signal émis puis filtré par un filtre basse fréquence avant d'être converti en signal numérique par l'ADC (Figure 2.2). Afin de déterminer la fonction de transfert de la chaîne de réception nous avons effectué des mesures rebouclées (c'est-à-dire en reliant la chaîne d'émission à la chaîne de réception par un câble) pour plusieurs valeurs d'atténuation (c'est-à-dire pour plusieurs valeurs de puissance en entrée de la chaîne de réception) avec WISDOM et avec un analyseur de spectre. La comparaison de ces deux jeux de mesures (des amplitudes en ADU avec WISDOM, des puissances en W avec l'analyseur) nous a alors permis de trouver une loi de conversion entre la puissance en entrée de la chaîne de réception et la tension mesurée en sortie du convertisseur ADC en unités ADU.

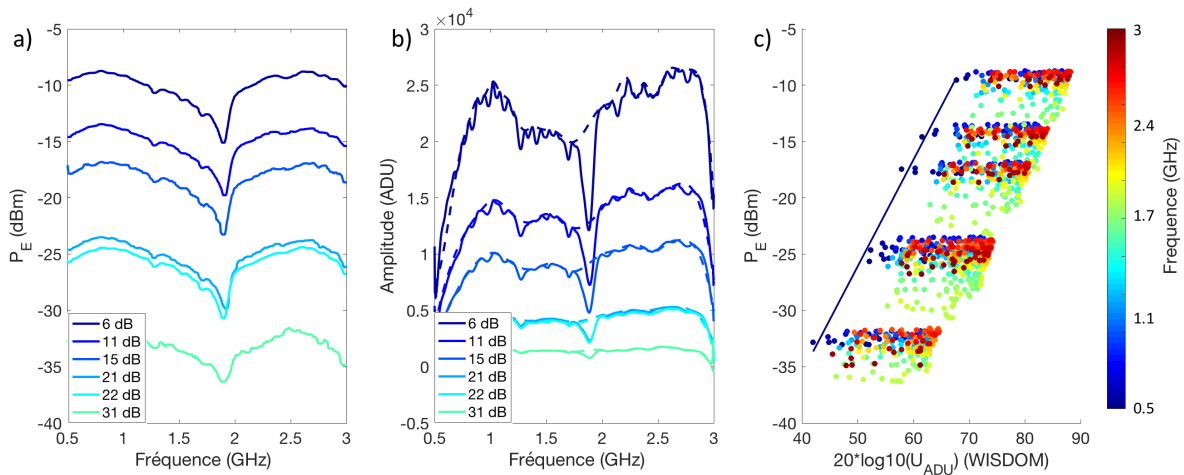


FIGURE 2.11 – Puissance émise en fonction de la fréquence

La Figure 2.11a montre les puissances mesurées à l'analyseur de spectre pour plusieurs valeurs d'atténuation en sortie de la chaîne d'émission (point A sur la Figure 2.8, ou D ou E si on omet les pertes dans les câbles). La Figure 2.11b montre les mesures rebouclées réalisées avec WISDOM. La puissance étant proportionnelle au carré de l'amplitude, nous nous attendons à une fonction de transfert linéaire en dBm du type :

$$P_r(dBm) = 20\log(\text{Amplitude}(ADU)) \times \alpha + \beta \quad (2.6)$$

où α doit avoir une valeur proche de 1 et β est une constante.

La Figure 2.11c montre la puissance mesurée à l'analyseur de spectre en fonction du logarithme de l'amplitude (en unité ADU) mesurée par WISDOM. Nous remarquons que la relation entre la puissance

et l'amplitude (c'est-à-dire la fonction de transfert) est effectivement linéaire mais que les paramètres de la droite liant ces deux grandeurs dépendent de la fréquence. Pour chaque fréquence, nous avons donc calculé les coefficients α et β par ajustement sur les points expérimentaux. En guise d'exemple, nous avons tracé sur la Figure 2.11c la droite de pente α et d'offset β obtenue pour une fréquence de 500 MHz.

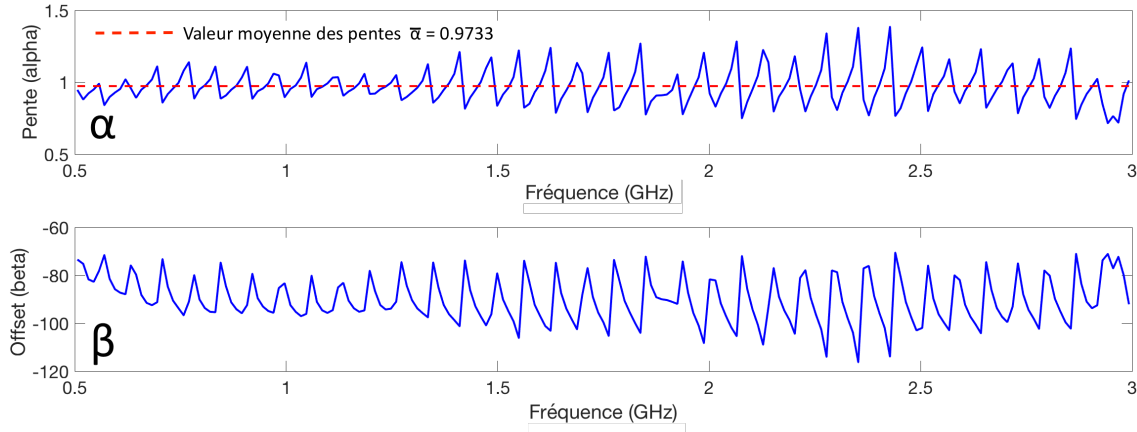


FIGURE 2.12 – α et β en fonction de la fréquence

La Figure 2.12 montre les coefficients α et β calculés par la méthode des moindres carrés à partir des puissances mesurées par l'analyseur de spectre et des amplitudes mesurées par WISDOM. Nous remarquons que le coefficient α fluctue autour d'une valeur moyenne qui est effectivement très proche de 1; ces fluctuations, qui peuvent provenir du dispositif expérimental, restent faibles. Pour β , en revanche, les variations sont plus importantes; ce coefficient dépend fortement de la fréquence.

À présent que nous connaissons la fonction de transfert de la chaîne de réception nous pouvons convertir les mesures de WISDOM en puissance reçue P_r et utiliser l'équation 2.5 pour retrouver le coefficient de réflexion d'une plaque métallique.

Calcul du coefficient de réflexion de la plaque métallique

Afin d'estimer le coefficient de réflexion Γ d'un réflecteur parfait (plaque métallique) nous avons réalisé plusieurs mesures avec WISDOM à différentes distances des antennes (entre 30 et 90 cm). Les amplitudes mesurées sont converties en puissance à partir de l'équation (2.6) puis le coefficient de réflexion est calculé avec l'équation (2.5).

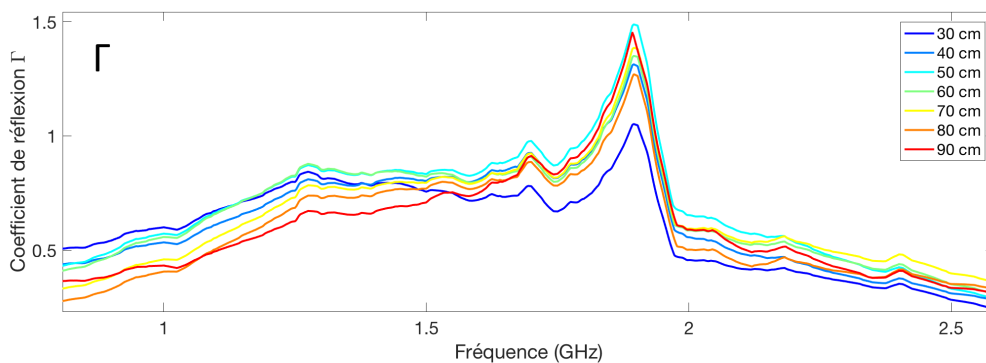


FIGURE 2.13 – Coefficient de réflexion Γ mesuré sur plaque métallique

La Figure 2.13 donne le coefficient de réflexion calculé à partir des mesures de WISDOM sur une plaque métallique en fonction de la fréquence et de la distance aux antennes de cette plaque (d sur la Figure 2.8). Nous trouvons une valeur proche de 1 (0.8) autour de la fréquence centrale (entre 1.4 et

1.8 GHz). Les coefficients mesurés à hautes et basses fréquences sont plus faibles (autour de 0.5) ; cela provient sans doute des valeurs de gain d'antenne utilisés. En effet, nous avons fait l'approximation que le gain en émission était égal au gain en réception et avons utilisé des mesures de gain faites sur l'EQM et non sur le prototype. Des variations de l'ordre du dB entre les gains d'émission et de réception représenteraient une augmentation/diminution de l'ordre de 0.1 du coefficient de réflexion. Enfin l'estimation de Γ repose sur la formule de Friss et la théorie des images qui supposent une étendue lisse et infinie, ce qui n'est pas le cas ici, la plaque métallique ayant une dimension finie (1.5 m x 1.5 m). Les résultats obtenus sont cependant satisfaisants et valident notre approche de caractérisation qui pourra être appliquée au modèle de vol.

2.3.4 Performances attendues

L'instrument a été conçu pour répondre à un cahier des charges bien précis ; il doit notamment être en mesure de sonder au-delà de 2 m de profondeur avec une résolution de quelques centimètres afin de guider la foreuse. A partir des caractéristiques de l'instrument (puissance émise, bande de fréquence, gain d'antennes ...) regardons quelles performances, en termes de profondeur de pénétration et de résolution, peuvent être espérées. Pour ce faire, examinons le rapport signal sur bruit (SNR), c'est-à-dire la puissance du signal reçu d'une cible sur la puissance du bruit P_N (Equation 2.7), en fonction de la profondeur sondée pour un modèle simple de sol. Nous estimons que, pour détecter une cible, un SNR supérieur à 3 dB est requis alors que pour une analyse fine de l'écho de sol le SNR doit être supérieur à 10 dB.

$$SNR = \frac{P_r}{P_N} \quad (2.7)$$

Dans la chaîne de reception le signal reçu est, en particulier, parasité par un bruit de nature thermique dont la puissance peut être estimée par la formule suivante :

$$P_N = k_B T N_F B_{RX} \quad (2.8)$$

où k_B est la constante de Boltzmann, T la température du système, N_F le facteur de bruit et B_{RX} la bande de fréquences instantanée.

Le facteur de bruit peut être théoriquement déterminé à partir des gains de chaque composant de la chaîne de reception. Lors de son passage dans la chaîne de reception le signal reçu est multiplié par le signal émis puis est filtré par un filtre passe-bas. Le facteur de bruit est calculé entre l'entrée de la chaîne de réception et l'entrée du mixeur qui réalise cette opération. Le filtre passe-bas qui a une bande de fréquence (B_{RX}) égale à 1 kHz permet de filtrer des produits indésirables mais aussi de diminuer la puissance du bruit ; cela fait d'ailleurs partie des avantages d'un radar à sauts de fréquences par rapport à un radar impulsif. La Figure 2.14 montre le facteur de bruit théorique ainsi que le facteur de bruit mesuré en fonction de la valeur de l'atténuateur dans la chaîne de reception.

Lors de campagnes de mesures sur sols naturels, nous fixons généralement l'atténuateur à une valeur comprise entre 10 et 15 dB. Cette atténuateur permet d'éviter la saturation du signal. Nous choisissons, pour cette étude, de nous placer dans le cas le moins favorable en prenant un facteur de bruit pour un atténuateur de 15 dB. Nous calculons ensuite la puissance théoriquement reçue d'une interface située entre deux couches : une couche supérieure de permittivité 4 et d'épaisseur d reposant sur une couche de permittivité 5 (voir Figure 2.15). Nous considérons deux cas, celui d'une interface lisse et celui d'une interface rugueuse et estimons le SNR.

Pour estimer la puissance reçue de l'interface enfouie nous partons de l'équation radar :

$$P_r = \underbrace{P'_e e_e}_{P_e} G_e e_r G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{1}{2d^4} A_{att} A_{sc} S_T \quad (2.9)$$

où S_T est la surface équivalente radar de la cible, A_{sc} le coefficient d'atténuation lié aux pertes par diffusion dans le milieu où se trouve la cible - nous les négligeons ici ($A_{sc} = 1$) - et A_{att} le coefficient d'atténuation lié aux pertes par absorption.

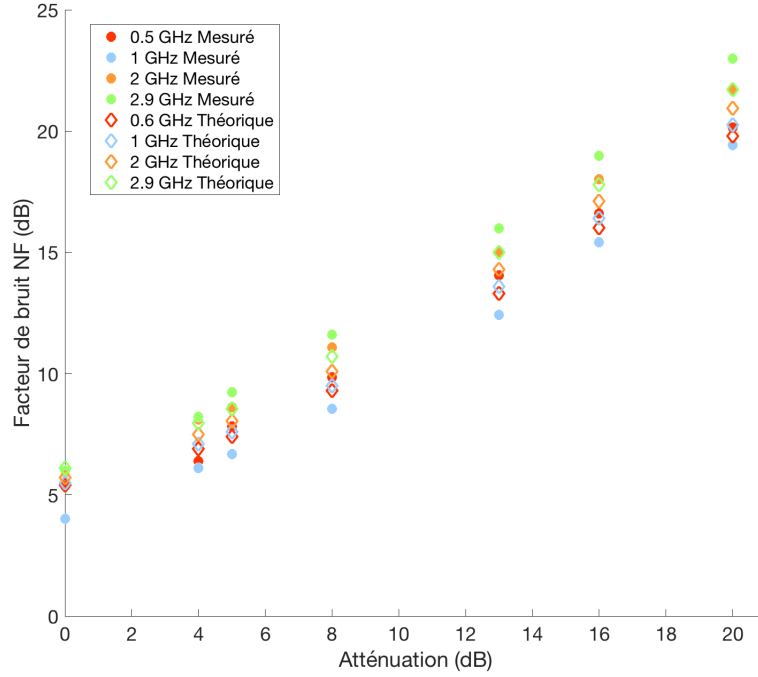


FIGURE 2.14 – Facteur de bruit mesuré et calculé en fonction de l’atténuation (atténuateur de la chaîne de réception) et de la fréquence

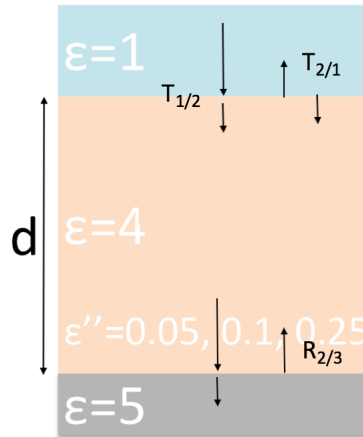


FIGURE 2.15 – Modèle à 2 couches utilisé pour estimer les performances de WISDOM. La surface de la couche supérieure est lisse. L’interface entre la couche supérieure et la couche inférieure peut être lisse ou rugueuse.

Par définition, $A_{att} = e^{-2\alpha d}$ où 2α est l’inverse de la profondeur de peau électrique et dépend notamment de la partie imaginaire de la permittivité ϵ'' de la couche supérieure :

$$\alpha = \frac{\pi\epsilon''}{\lambda\sqrt{\epsilon'}} \quad (2.10)$$

En nous appuyant sur la littérature (voir Chapitre 1), nous avons sélectionné trois valeurs : $\epsilon'' = 0.05$, $\epsilon'' = 0.1$, $\epsilon'' = 0.25$.

D’autre part, comme dans la section 2.3.3, nous considérons que le gain de l’antenne à l’émission est le même que celui à la réception ($G = G_e = G_r$). De plus, nous notons que la puissance à l’émission mesurée dans la section 2.3.3 inclut les pertes de la chaîne d’émission (e_e) et que les pertes de la chaîne

de réception (e_r) affectent de la même manière le signal et le bruit donc nous n'en tiendrons pas compte dans le calcul du SNR.

En ajoutant les coefficients de réflexion et de transmission à chaque interface, l'équation (2.14) devient :

$$P_r = T_{1/2}T_{2/1}R_{2/3}P_eG^2 \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{1}{2d^4} e^{-2\alpha 2d} S_T \quad (2.11)$$

où $T_{1/2}$ est le coefficient de transmission air/sol, $T_{2/1}$ le coefficient de transmission sol/air et $R_{2/3}$ le coefficient de réflexion à l'interface entre les deux couches (voir Figure 2.15).

Ici la cible à détecter est l'interface entre la couche supérieure et la couche inférieure. Nous avons supposé cette interface tour à tour lisse et rugueuse.

Pour une interface lisse, la réflexion est spéculaire et l'expression de l'équation radar est équivalente à celle obtenue par la formule de Friis pondérée par les coefficients de transmission et de réflexion et le terme d'atténuation A_{att} :

$$P_r (lisse) = T_{1/2}T_{2/1}R_{2/3}P_eG^2 \left(\frac{\lambda}{8\pi d} \right)^2 e^{-2\alpha 2d} \quad (2.12)$$

Pour le cas rugueux nous pouvons faire l'approximation que la contribution de l'interface enfouie à la réflexion est restreinte à la première zone de Fresnel [Grimm et al., 2006][Cook, 1975] ce qui modifie l'expression de la surface équivalente radar ainsi :

$$S_T = \frac{\pi \lambda d}{2} \quad (2.13)$$

d'où

$$P_r (rugueux) = T_{1/2}T_{2/1}R_{2/3}P_eG^2 \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{1}{2d^4} \frac{\pi \lambda d}{2} e^{-2\alpha 2d} \quad (2.14)$$

Les Figures 2.16 et 2.17 montrent le SNR estimé dans les cas d'une interface lisse et d'une interface rugueuse, respectivement, en fonction de la profondeur sondée et des pertes (ϵ''). Nous remarquons que le SNR varie significativement avec la fréquence; nous retrouvons bien que les hautes fréquences pénètrent moins le sous-sol que les basses fréquences et cela pour tous les cas envisagés dans cette étude. De plus, comme attendu, les performances déclinent avec les pertes (ϵ''). Enfin nous observons logiquement de meilleures performances lorsque l'interface est lisse.

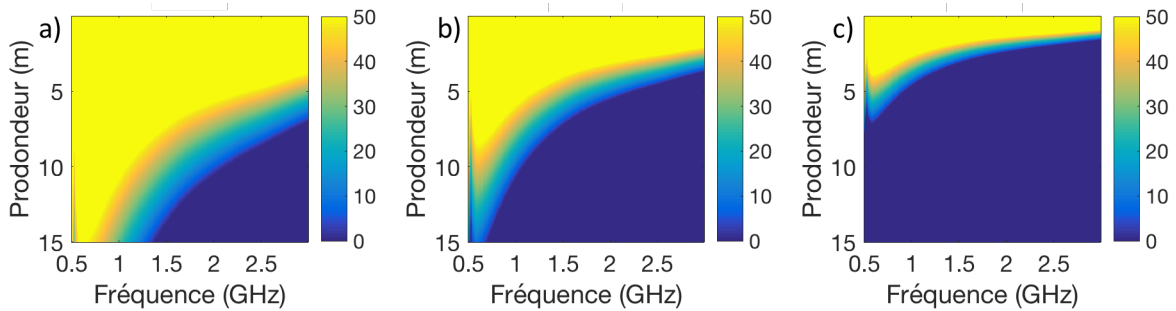


FIGURE 2.16 – SNR en fonction de la fréquence et des pertes (cas lisse) : a) $\epsilon'' = 0.05$ b) $\epsilon'' = 0.1$ c) $\epsilon'' = 0.25$

Dans le cas d'une interface lisse et d'un milieu à faibles pertes ($\epsilon'' = 0.01$) le radar peut détecter une interface jusqu'à 12 mètres de profondeur (SNR > 3 dB). Dans un milieu avec de fortes pertes ($\epsilon'' = 0.25$) la profondeur de détection est réduite à 2.6 m (à la fréquence centrale). Pour une interface rugueuse, les performances sont moins favorables; le radar est théoriquement capable de détecter pour un milieu à faible perte ($\epsilon'' = 0.01$) une interface à 7.5 m de profondeur (SNR > 3 dB) à la fréquence centrale et d'effectuer une analyse fine (estimation de la constante diélectrique) jusqu'à 7 m

de profondeur (SNR > 10 dB). Pour de fortes pertes ($\epsilon'' = 0.25$) la profondeur de détection chute à 2 m (à la fréquence centrale).

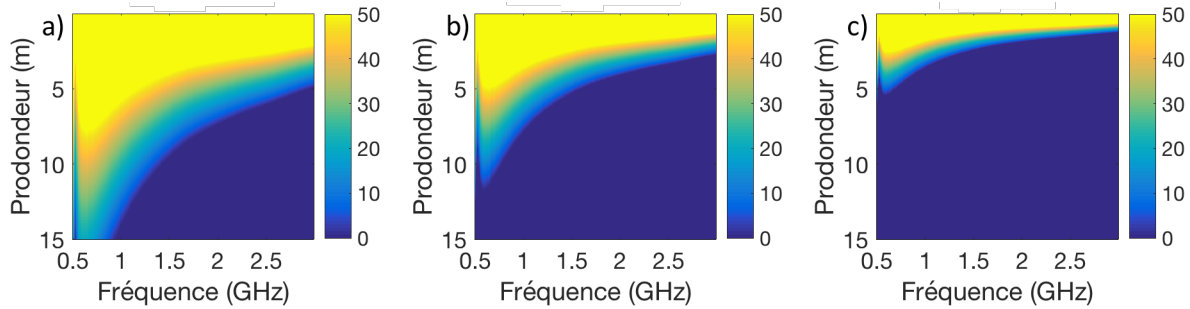


FIGURE 2.17 – SNR en fonction de la fréquence et des pertes (cas rugueux) : a) $\epsilon'' = 0.01$ b) $\epsilon'' = 0.1$ c) $\epsilon'' = 0.25$

Les performances théoriques de l'instrument en terme de profondeur de pénétration sont en adéquation avec les objectifs de la mission. L'instrument est, en effet, capable de détecter une interface au-delà de 2 m de profondeur et cela même dans un cas défavorable (forte pertes). Cependant les profondeurs de pénétration théoriques énumérées plus haut sont données pour la fréquence centrale de l'instrument. En réalité la profondeur de détection dépend de la fréquence. Par exemple, dans le cas lisse/faibles pertes (Figure 2.16a), la détection de l'interface est possible entre 5 et 20 mètres de profondeur entre 0.5 et 3 GHz. Une interface située à 10 mètres de profondeur ne sera détectée que pour des fréquences allant de 0.5 à 2 GHz. Cela correspond à une bande de fréquence effective de 1.5 GHz.

Outre la profondeur de pénétration, les performances de WISDOM doivent être jugées en fonction de la résolution verticale obtenue par l'instrument. La résolution verticale R_v est donnée par la formule :

$$R_v = \frac{c}{2B_{eff}\sqrt{\epsilon'_r}} \quad (2.15)$$

où c est la célérité des ondes électromagnétiques dans le vide, B_{eff} est la bande de fréquences effective et ϵ'_r la constante diélectrique du milieu (4 dans notre cas d'étude).

La Figure 2.18 donne, pour chaque profondeur, la résolution avec laquelle l'interface (lisse ou rugueuse) est détectée. Nous constatons que plus l'interface détectée est profonde, plus la résolution verticale se dégrade. Nous devrions donc observer, sur les radargrammes de WISDOM, un élargissement progressif des échos avec la profondeur. De plus, la résolution est moins bonne pour le cas rugueux que pour le cas lisse. Théoriquement nous pouvons atteindre une résolution verticale de 3 cm. Avec cette résolution, et dans le cas le plus défavorable (fortes pertes/interface rugueuse), WISDOM pénètre jusqu'à 1.2 m de profondeur. Dans ce même cas défavorable, d'après la Figure 2.18, nous pouvons détecter une cible enfouies à 2 m de profondeur avec une résolution verticale de 6 cm. Nous respectons donc le cahier des charges de la mission ExoMars 2020 et notamment la nécessité de sonder entre 2 et 3 m avec une résolution de quelques centimètres pour guider la foreuse. Cela étant dit, notre modèle ne prend pas en compte les pertes par diffusion, et pour anticiper au mieux les performances de WISDOM sur le sol martien il faudra tester l'instrument sur des analogues. Cette étude a néanmoins le mérite de valider le dimensionnement de l'instrument (bande de fréquences, fréquence centrale, puissances à l'émission ...) pour la mission ExoMars.

2.3.5 Comportement de WISDOM en fonction de la température

Située à l'intérieur du corps du Rover d'ExoMars 2020, l'électronique de WISDOM sera exposée à une température comprise entre -40°C (pendant le voyage jusqu'à Mars) et $+60^\circ\text{C}$ (température maximum régulée dans le corps du Rover lors des opérations sur Mars). Nous devons donc nous

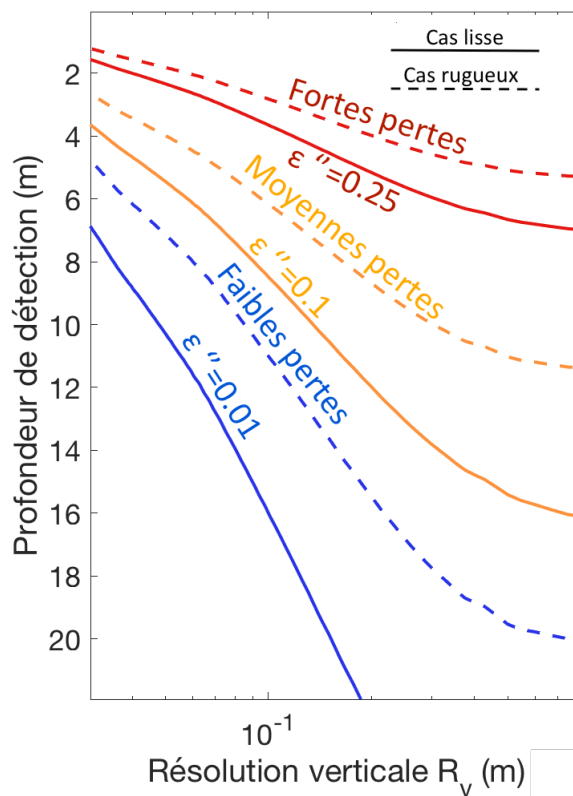


FIGURE 2.18 – Estimation de la résolution verticale R_v en fonction de la profondeur de l'interface enfouie et des pertes dans le milieu dans le cas d'interfaces lisses et rugueuses

assurer du bon fonctionnement de l'instrument dans ces conditions et, même plus, caractériser son comportement en fonction de la température.

Comparaison entre les modèles de l'instrument WISDOM

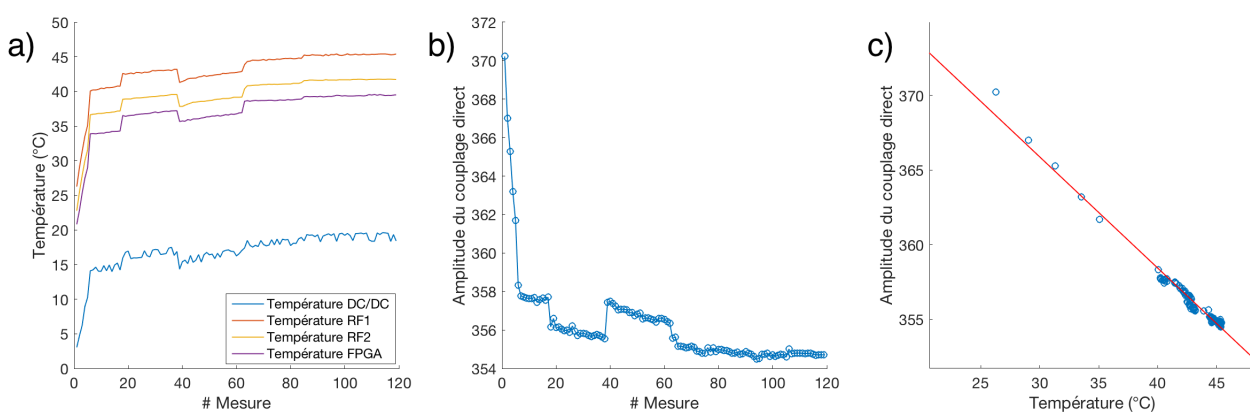


FIGURE 2.19 – Amplitude du couplage direct en fonction de la température pour l'EM, a) Température des cartes de WISDOM, b) Amplitude du couplage direct, c) Amplitude en fonction du couplage direct.

Chaque modèle de l'instrument comporte au moins une sonde de température par carte (DPU, DC/DC, RF). La Figure 2.19 montre des données acquises en chambre anéchoïde avec l'EM. Nous pouvons suivre la température pour chacune des cartes par mesure réalisée. Nous constatons que la température (Figure 2.19a) augmente avec le numéro des mesures et donc avec le temps d'opération.

Nous pouvons distinguer deux régimes : une montée rapide en température puis une augmentation plus lente qui tend vers une température limite. Sur la Figure 2.19b nous observons l'amplitude du couplage direct en fonction du numéro de mesure. Cette amplitude diminue et, comme pour la température, nous remarquons deux régimes. La variation d'amplitude est d'environ 4% pour une température de la carte radio-fréquence comprise entre 26 et 46°C. L'amplitude du couplage direct en fonction de la température laisse peu de doute sur l'origine de la diminution de l'amplitude et donc de la puissance émise par l'instrument. Il y a une relation linéaire entre l'amplitude et la température de la carte RF (Figure 2.19c). Dans les conditions de pression température ($P = 1$ bar, $T = 25^\circ\text{C}$) de la chambre anéchoïde, la montée en température de l'instrument est rapide (au bout de seulement 6 mesures, l'amplitude tend vers une constante) et la diminution de l'amplitude peut être considérée comme faible (proche de 4%). La diminution de la puissance du radar en fonction de la température pose un problème de reproductibilité de la mesure. Au cours de cette thèse, nous avons travaillé principalement sur des données acquises par le prototype. Regardons si ce phénomène est présent sur ce modèle ainsi que sur le PFM.

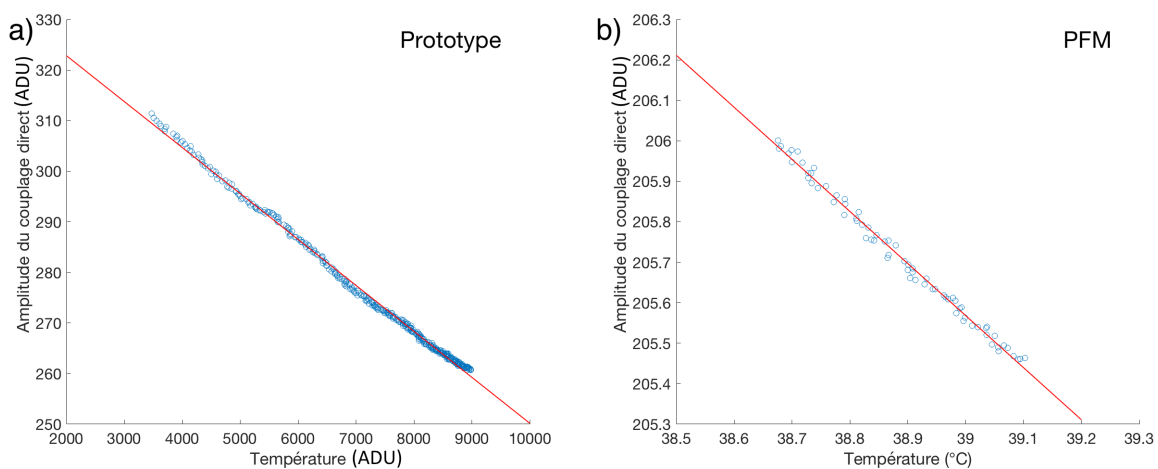


FIGURE 2.20 – Amplitude du couplage direct (en ADU) en fonction de la température (en $^\circ\text{C}$) a) pour le prototype (BB), b) pour le modèle de vol (PFM).

La Figure 2.20 montre la variation d'amplitude du couplage direct en fonction de la température pour le prototype et le modèle de vol. Dans un premier temps nous remarquons que la relation entre la température et le couplage direct est linéaire pour tous les modèles : l'augmentation de la température des cartes se traduit par une diminution de l'amplitude liée à une baisse de la puissance émise. La température convertie en unité physique n'est pas disponible ce qui limite la comparaison entre les modèles. De plus, les mesures ont été réalisées dans des conditions très différentes dues aux contraintes liées à la livraison du modèle de vol.

Le prototype étant la version de WISDOM utilisée lors des campagnes de mesures, il est nécessaire de caractériser cette baisse de puissance. Etant donné qu'il y a une relation linéaire entre la température et l'amplitude du couplage direct, nous pouvons raisonnablement envisager d'utiliser la température pour corriger les données.

Afin de vérifier cette hypothèse, près de 4475 mesures ont été réalisées sur le sol du laboratoire avec le prototype (Figure 2.21a). Sur la Figure 2.21 nous voyons l'amplitude du couplage direct et de l'écho de sol (Figure 2.21b) ainsi que l'amplitude du module de la réponse fréquentielle (Figure 2.21c) en fonction du numéro de sondage. Les amplitudes diminuent bien en fonction du numéro de mesure c'est-à-dire lorsque la température des cartes augmente (Figure 2.22a).

La Figure 2.22b montre l'amplitude du couplage direct (courbe rouge) et l'amplitude de l'écho de sol (bleu). Notons une diminution d'environ 30% de l'amplitude du couplage direct et de l'écho de sol entre la température à l'allumage et la température d'équilibre. Les amplitudes de l'écho du couplage direct et de l'écho de sol diminuent linéairement avec la température (Figure 2.22c). Nous pouvons

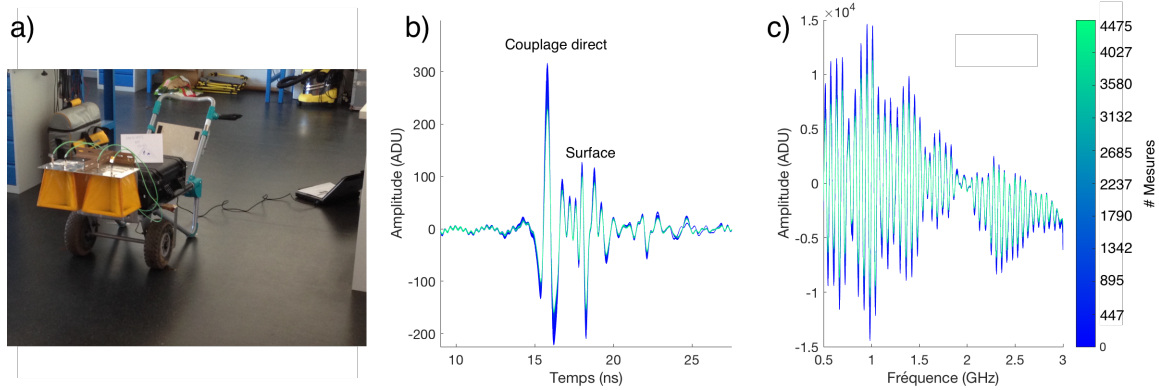


FIGURE 2.21 – a) Photo du dispositif expérimental, b) Amplitude de l'écho de surface et du couplage direct par mesure (code couleur), c) Amplitude du module de la réponse fréquentielle par mesure.

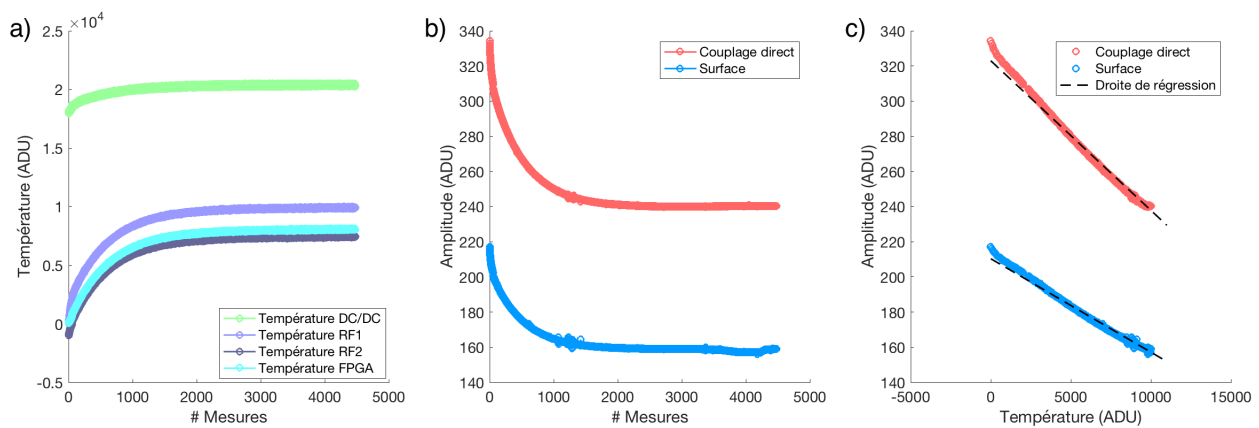


FIGURE 2.22 – a) Température des cartes par numéro de mesure, b) Amplitude de l'écho de surface et du couplage direct par numéro de mesure, c) Amplitude du couplage direct et de l'écho de surface en fonction de la température.

conclure que amplitudes et températures des cartes sont anti-corrélées.

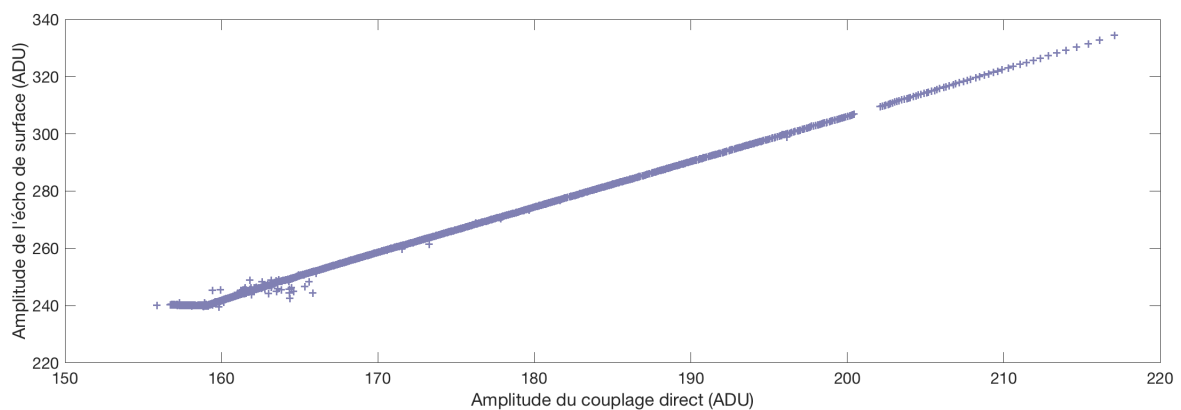


FIGURE 2.23 – Amplitude de l'écho de surface en fonction de l'amplitude du couplage direct

Enfin, nous pouvons vérifier que la relation entre le couplage direct et l'amplitude de l'écho de sol est bien linéaire (Figure 2.23). Notons, tout de même, une légère rupture de pente ainsi qu'une plus grande dispersion des données à hautes températures. Cela est aussi visible sur la Figure 2.22c. Ce comportement se produit alors que la température d'équilibre est atteinte.

Qualification et caractérisation du modèle de vol (PFM) en température

Les contraintes d'une mission spatiale imposent aux instruments de résister à des conditions extrêmes. Lors de son périple vers Mars, WISDOM rencontrera des températures pouvant aller de -40°C à $+60^{\circ}\text{C}$. Afin de contrôler le bon fonctionnement de l'instrument dans cette large gamme de températures, nous l'avons soumis à de multiples cycles de chauffage et de refroidissement sous atmosphère martienne ($P \simeq 7$ mbar). L'atmosphère martienne est ténue ce qui ne facilite pas les processus de convection permettant à l'instrument, au contact de l'air ambiant, de dissiper sa chaleur. Lors de ces tests, le modèle de vol était installé dans une cuve dont la pression et la température étaient régulées (Figure 2.24). Pendant les cycles thermiques, l'instrument a effectué des mesures rebouclées que nous allons analyser dans cette section.

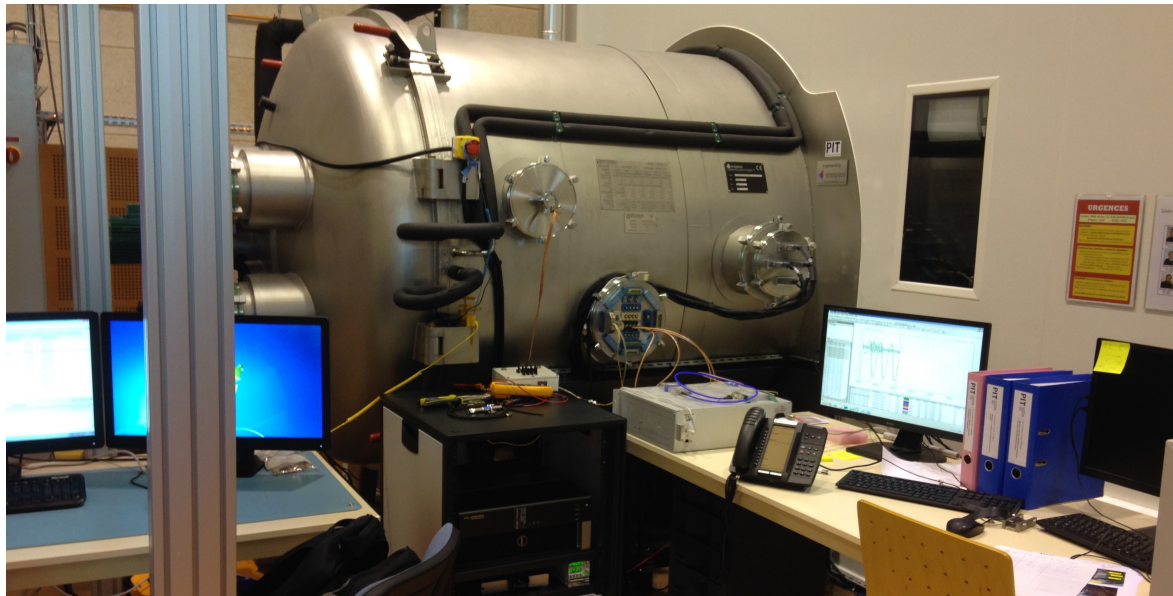


FIGURE 2.24 – Cuve dans laquelle les tests thermiques du modèle de vol ont été réalisés (PIT OVSQ)

La Figure 2.25b montre l'amplitude de l'écho de la mesure rebouclée en fonction de la température de la carte radio-fréquence. Nous faisons ici figurer trois cycles de température. Sur la Figure 2.25b nous retrouvons bien un comportement linéaire entre l'amplitude de l'écho et la température. Nous constatons également une excellente reproductibilité de la mesure : la même amplitude est associée à une température donnée. De plus, entre 25 et 50°C nous observons une chute de 25% de l'amplitude de l'écho, ce qui est comparable à la perte observée avec le prototype. En plus de l'analyse des données, une fois la campagne de qualification terminée, les cartes seront inspectées puis passées aux rayons X afin de s'assurer qu'elles ont résisté aux cyclages thermiques.

En conclusion, l'élévation de la température de l'instrument entraîne une baisse de la puissance émise sur tous les modèles de WISDOM. Ce constat est plus marqué sur le prototype que sur l'EM ou le PFM. Dans tous les cas, la relation entre l'amplitude du couplage direct et la température est linéaire ce qui permet de corriger l'effet de la température sur les mesures. Nous reviendrons sur ce point dans le Chapitre 5 qui est dédié à l'étude de l'écho de sol et dont l'objectif principal est d'estimer la constante diélectrique du sol.

2.3.6 Mesures en espace libre

La mesure en espace libre, c'est-à-dire sans cible, permet de rendre compte de certains défauts du radar ; en particulier la présence d'un couplage interne et de réflexions parasites. Cette mesure est aussi une mesure de référence, elle est la signature du radar et est utile dans l'interprétation fine des données (on verra dans le Chapitre 3 que la présence systématique de réflexions est à prendre en

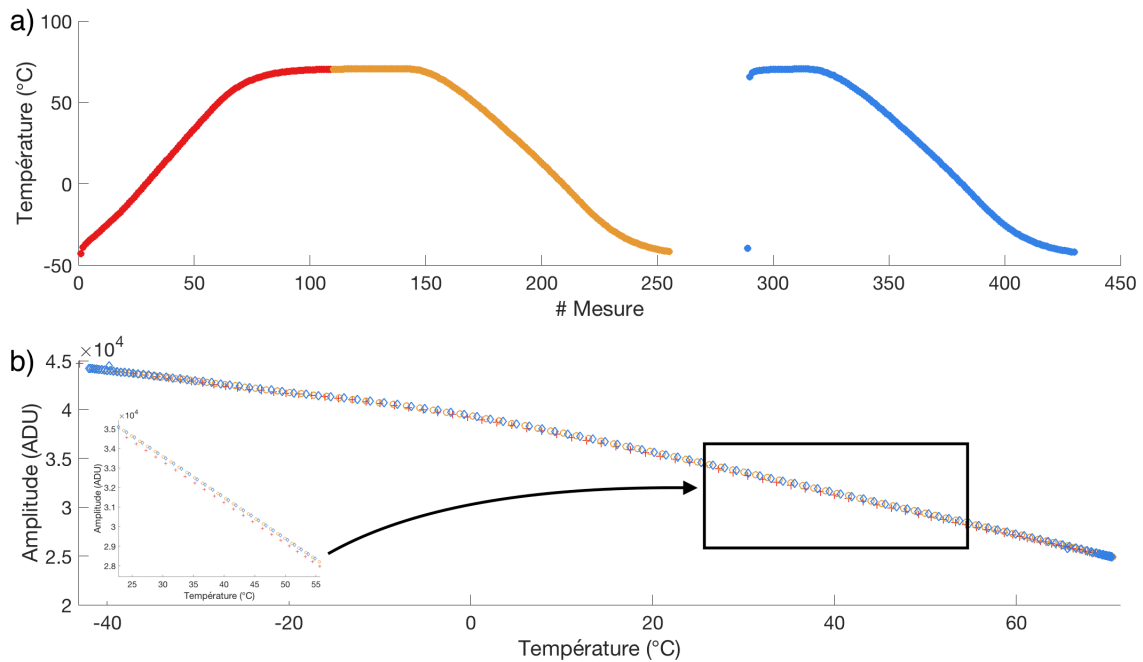


FIGURE 2.25 – a) Température de la cuve où ont été effectués les tests de qualification du PFM en fonction du numéro de mesure, b) Amplitude des mesures rebouclées en fonction de la température.

considération lors de l'interprétation des données). Nous avons réalisé des mesures en espace libre avec les trois modèles de WISDOM.

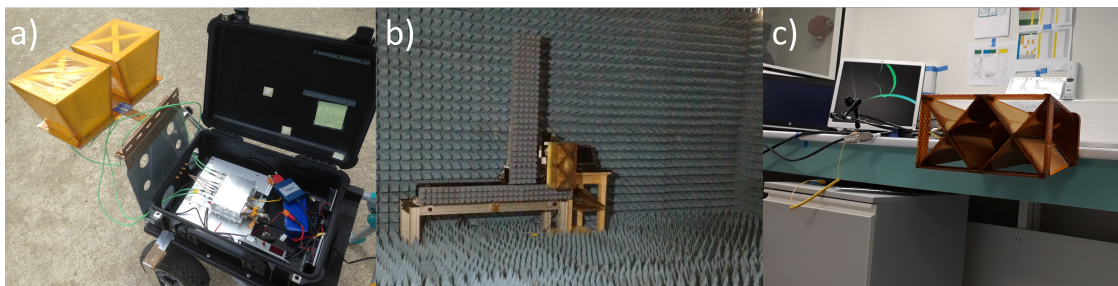


FIGURE 2.26 – Mesures en espace libre : a) En extérieur avec le prototype, b) En chambre anéchoïde avec l'EM, c) En salle blanche avec le PFM.

Comme pour la mesure sur plaque, les mesures en espace libre n'ont pas pu être réalisées dans les mêmes conditions pour les différents modèles du radar. La mesure avec le prototype a été obtenue en extérieur (antennes dirigées vers le ciel Figure 2.26a), la mesure avec l'EM en chambre anéchoïde (Figure 2.26b) et enfin la mesure avec le PFM en salle blanche (Figure 2.26c). Cette dernière mesure n'a donc pas été réalisée dans des conditions optimales (présence de multiples cibles comme le mur, le plafond et des armoires métalliques) et nous resterons, par conséquent, prudents lors de son étude.

La Figure 2.27a montre les mesures en espace libres réalisées avec le PFM, l'EM et le prototype. Le pic le plus fort (situé à 12 ns) correspond au couplage entre les antennes. Nous remarquons que l'amplitude de la mesure en espace libre du PFM est plus élevée que celles des autres (EM et prototype), ceci est dû aux réflexions sur les parois de la salle blanche (plafond, mur ...). Nous notons également de nombreux pics pour chaque mesure. La Figure 2.27b montre la mesure en espace libre réalisée avec le prototype convertie en radargramme. Nous y voyons une succession de lignes horizontales, qui sont dues à des réflexions internes à l'instrument mais aussi à de multiples réflexions entre les antennes. Ces parasites contaminent systématiquement les mesures WISDOM et les mesures en espace libre peuvent

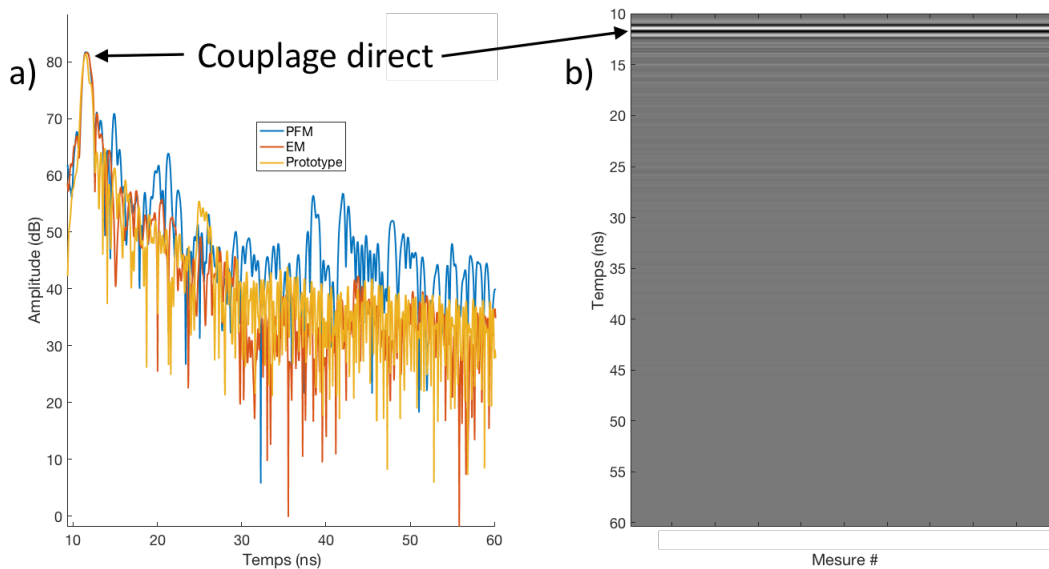


FIGURE 2.27 – Mesure en espace libre : a) Mesures en espace libre (PFM, EM et prototype), b) Radargramme de la mesure en espace libre du prototype.

donc être utilisées pour soustraire aux radargrammes ces signaux indésirables. Le traitement ainsi que les méthodes de suppression des parasites seront l’objet du prochain chapitre (Chapitre 3).

2.3.7 Mesures sur plaque métallique

La mesure sur plaque métallique est une mesure de référence au même titre que la mesure en espace libre ; elle est nécessaire au traitement mais aussi à l’interprétation future des données. Nous avons vu dans la section 2.3.2 que la mesure sur plaque permet de remonter à la forme de l’écho émis. Elle nous a aussi permis de dresser le bilan de liaison de WISDOM dans la section 2.3.3. Ici nous nous servons de cette mesure pour estimer le temps d’origine des mesures WISDOM et étudier l’influence de la position des antennes. Nous verrons dans le Chapitre 5 comment la mesure sur plaque métallique peut nous permettre de remonter à la constante diélectrique du sol au-dessus duquel opère WISDOM.

Calcul du temps de propagation

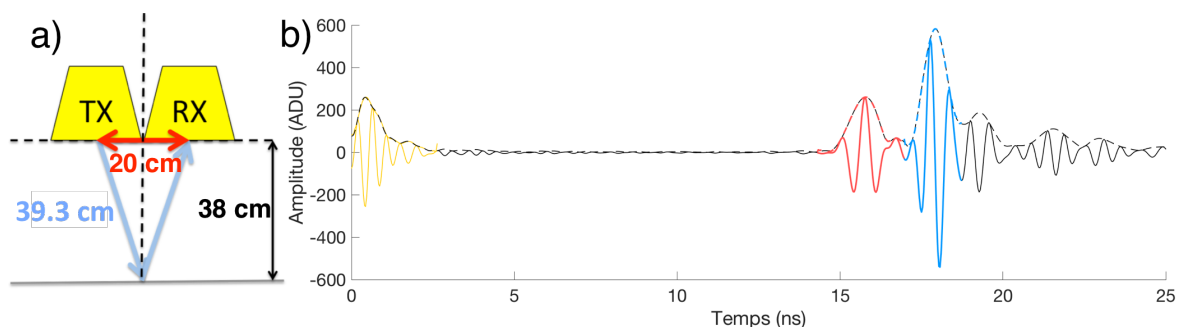


FIGURE 2.28 – Mesure sur une plaque métallique située à 38 cm des antennes : a) Configuration de la mesure sur plaque métallique, b) Réponse de l’électronique (jaune), couplage direct (rouge) et écho de surface (bleu).

La Figure 2.28 montre une mesure sur plaque effectuée avec le prototype de WISDOM ; la plaque était alors disposée à 38 cm des antennes. Nous pouvons distinguer sur le profil résultant de cette

mesure trois échos : le couplage interne, le couplage direct et l'écho de surface. Ces trois échos figurent systématiquement sur les sondages de WISDOM.

Le couplage direct (ou *crosstalk*) correspond à l'onde transmise entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice dans l'air (flèche rouge sur la Figure 2.28a). Il arrive à un temps t_{CD} égal à 15.8 ns qui doit correspondre au temps de propagation des ondes dans l'électronique, les câbles coaxiaux, les antennes et entre les antennes. Pour mémoire, la longueur des câbles est de 1 m, la taille des antennes de 17 cm et la distance entre les antennes émettrice et réceptrice en co-polarisation est de 20 cm. Des mesures rebouclées (sans antenne) avec des longueurs de câbles variables permettent d'estimer le temps de propagation de l'onde dans l'électronique et dans les câbles ($t_{electronique} = 2.34$ ns et $t_{cable (1m)} = 4.44$ ns). Le temps de propagation dans l'électronique et dans les câbles d'émission et de réception est donc de 11.2 ns. Nous pouvons en déduire que le temps de propagation dans les antennes est de $t_{Antennes} = t_{CD} - t_{electronique+cables} = 4.6$ ns. Ce temps de propagation $t_{Antennes}$ correspond à 70 cm dans l'air. En retranchant la distance de 20 cm entre les deux antennes, nous pouvons affiner notre estimation du temps de propagation dans les antennes : $t_{Antennes} = 3.93$ ns. En considérant que la constante diélectrique des antennes est égale à celle des câbles ($\epsilon'_r \approx 2$), le temps de propagation dans les antennes n'est pas compatible avec des antennes de 17 cm de largeur. Cette différence peut s'expliquer par la configuration du système d'antennes ; en effet le temps de propagation dépend aussi du temps passé dans le diviseur de Wilkinson. On retiendra que le temps de propagation dans l'électronique, les câbles et les antennes est de 15.13 ns.

L'écho de sol intervient à 17.9 ns, soit 2.77 ns après le couplage direct ce qui signifie que l'écho de sol a parcouru environ 41 cm dans l'air. Par une simple approche d'optique géométrique (chemin bleu, Figure 2.28a), nous trouvons que la distance parcourue par l'écho de sol doit être 39.3 cm ce qui est proche de 41 cm. Cependant, nous avons remarqué que le filtrage par bande de fréquences a pour effet de modifier le temps d'arrivée de l'écho de la plaque métallique : il y a un écart de 0.23 ns entre le temps d'arrivée l'écho de sol après un filtrage passe-haut et après un filtrage passe-bas. Cet écart représente 3.45 cm dans l'air et 2.44 cm dans un milieu dont la constante diélectrique est égale à 2. Nous pouvons donc résolument faire l'hypothèse que la position du point d'où semble émaner les ondes électromagnétiques, aussi appelé "centre de phase", n'est pas stable ; il dépend de la fréquence. La légère différence entre le temps théorique de 41 cm et le temps estimé à partir de la distance réelle entre le pied de l'antenne et la plaque (39.3 cm) peut donc s'expliquer par l'incertitude sur la position du centre de phase. Le point d'émission reste néanmoins très proche du pied des antennes.

À la lumière de ces résultats, nous définissons le temps d'origine t_0 comme le temps correspondant à la propagation dans l'électronique, dans les câbles et dans et entre les antennes soit 15.13 ns. Cette définition nous sera utile lors de la mise en place d'un code de lancer de rayons mais aussi dans l'estimation de la distance antennes/sol.

Influence de l'inclinaison des antennes

Les antennes de WISDOM seront inclinées une fois intégrées au Rover de façon à limiter les interactions avec la structure du Rover. L'inclinaison nominale des antennes sera de 7° mais elle évoluera en fonction de la topographie. Il est donc important d'étudier l'influence de cette inclinaison sur l'amplitude de l'écho de sol.

Pour ce faire, nous avons effectué une mesure sur plaque métallique pour plusieurs inclinaisons d'antennes comprises entre 3° et 32° (Figure 2.29a). La Figure 2.29b montre l'amplitude de l'écho sur la plaque métallique en fonction de l'angle d'inclinaison des antennes. Cette amplitude est normalisée par rapport à la première mesure (obtenue pour $\theta = 3^\circ$). Nous remarquons qu'une inclinaison des antennes supérieure à 10° entraîne une perte du signal supérieure à 30%. Cela est loin d'être négligeable et devra être pris en compte lors de l'interprétation quantitatives des données. En effet, nous verrons dans le Chapitre 5 qui décrit les méthodes d'évaluation de la constante diélectrique du sol qu'une mesure de référence sur plaque métallique est nécessaire.

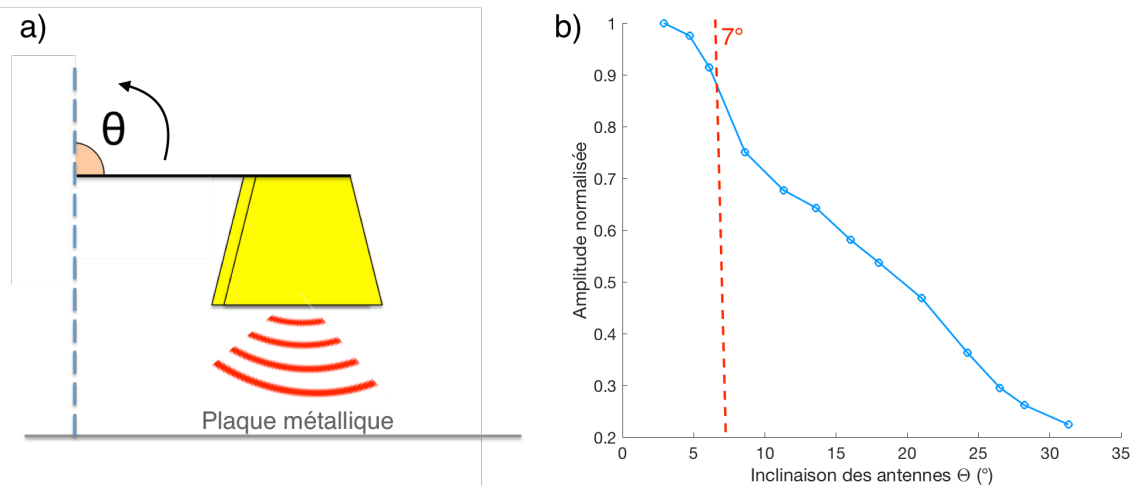


FIGURE 2.29 – Amplitude de l'écho sur la plaque en fonction de l'inclinaison θ des antennes

2.3.8 Mesures sur cibles

Enfin, nous avons fait des mesures sur une sphère métallique de 10 cm de diamètre, ce qui correspond à la plus petite longueur d'onde émise dans le vide. L'objectif était de vérifier que l'on retrouvait bien la signature de ce réflecteur dans l'air avec les différents modèles de WISDOM. Pour obtenir un radargramme, les antennes - ou la cible dans le cas de l'EM et du PFM- ont été décalées de 10 cm à chaque mesure.

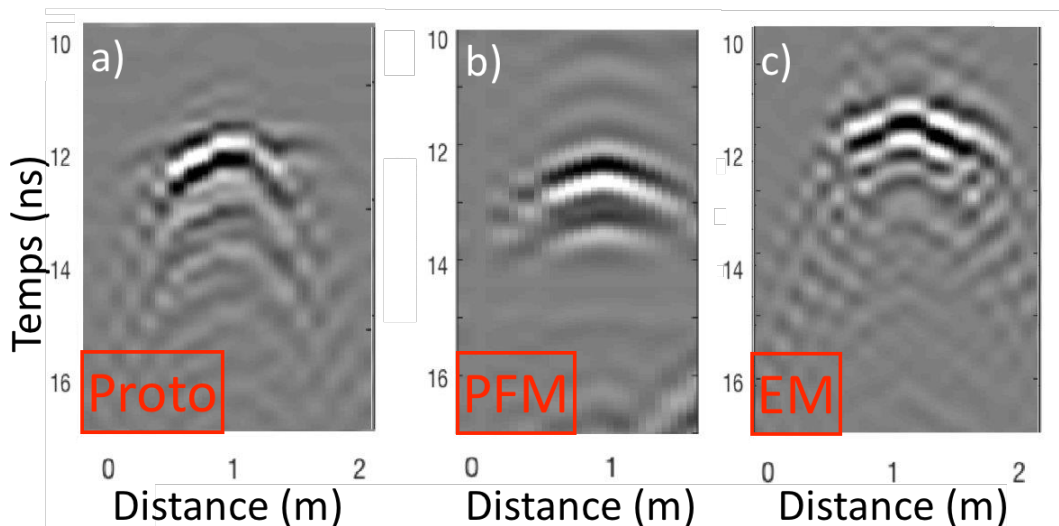


FIGURE 2.30 – Mesures sur sphère métallique avec a) le prototype, b) le modèle de vol (PFM), c) l'EM.

La Figure 2.30 montre les radargrammes obtenus sur la sphère métallique pour chaque modèle. Il est à noter que la Figure 2.30b est le premier radargramme obtenu avec le modèle de vol qui opérera sur le sol martien à partir de printemps 2021. Nous remarquons que la signature de la cible est une hyperbole; les deux branches sont clairement discernables. Nous verrons comment nous pouvons nous servir de la signature radar des réflecteurs enfouis (roches) afin d'estimer la constante diélectrique du sol dans le Chapitre 5. Ces mesures pourront aussi servir au bilan de liaison de l'instrument.

2.4 Techniques d'acquisition

Pour finir, nous évaluons ici l'apport des additions cohérentes et de la technique du "gating" pour les performances du radar WISDOM.

2.4.1 Additions cohérentes

A la réception, les échos enregistrés sont entachés de bruit. Les additions cohérentes, aussi appelées intégrations cohérentes, aident à réduire le bruit d'origine aléatoire. WISDOM peut effectuer deux types d'additions cohérentes : des additions de plusieurs échantillons sur un même pas en fréquence et des additions des mêmes fréquences de rampes successives. Le rapport signal à bruit s'en trouve amélioré comme l'atteste la Figure 2.31. Théoriquement, à chaque puissance de 2 additions, le SNR gagne $10 \log(2) \approx 3$ dB. En pratique, la Figure 2.31 montre aussi qu'au delà ≈ 10 additions, l'efficacité des additions sur le signal de WISDOM est réduite. Ces dernières augmentant le temps de mesure, on limitera donc leur nombre à 10.

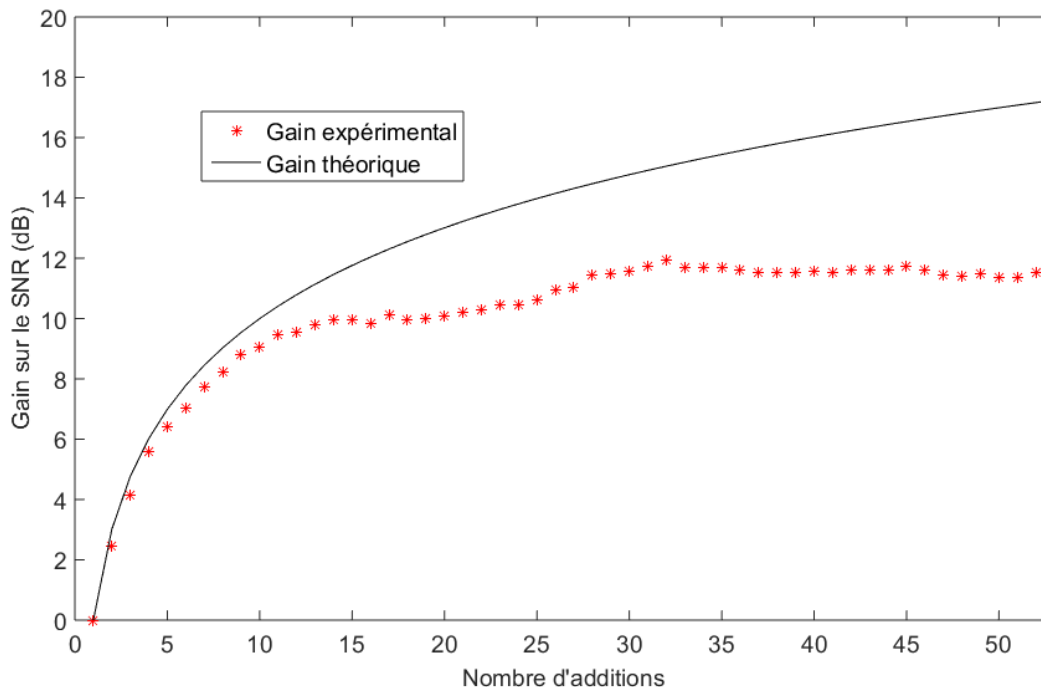


FIGURE 2.31 – Effet théorique et observé des additions cohérentes sur le rapport signal sur bruit (SNR). Ces résultats ont été obtenus à partir de mesures rebouclées faites avec le PFM.

2.4.2 Technique du gating

Le signal associé au couplage direct entre les antennes et l'écho de surface seront toujours nettement plus puissants que les échos provenant du sous-sol. Cet état de fait réduit la dynamique effective de l'instrument et peut même être cause de saturation. Pour pallier ce problème, il est possible de faire du "gating" (de "porte" en anglais) c'est-à-dire d'atténuer de façon contrôlée les premiers échos de grande amplitude.

Le principe du gating est simple : les chaînes de transmission et réception sont équipées de commutateurs qui permettent d'ajuster indépendamment la fenêtre temporelle d'émission (TxGat) et celle de réception des signaux (RxGat) (voir la Figure 2.32). La Figure 2.33 montre que la technique du gating appliquée à WISDOM apporte effectivement une augmentation de la dynamique de l'instrument et garantit donc une meilleure détection des échos de faible amplitude.

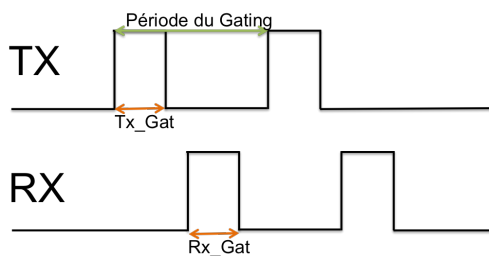


FIGURE 2.32 – Principe du gating

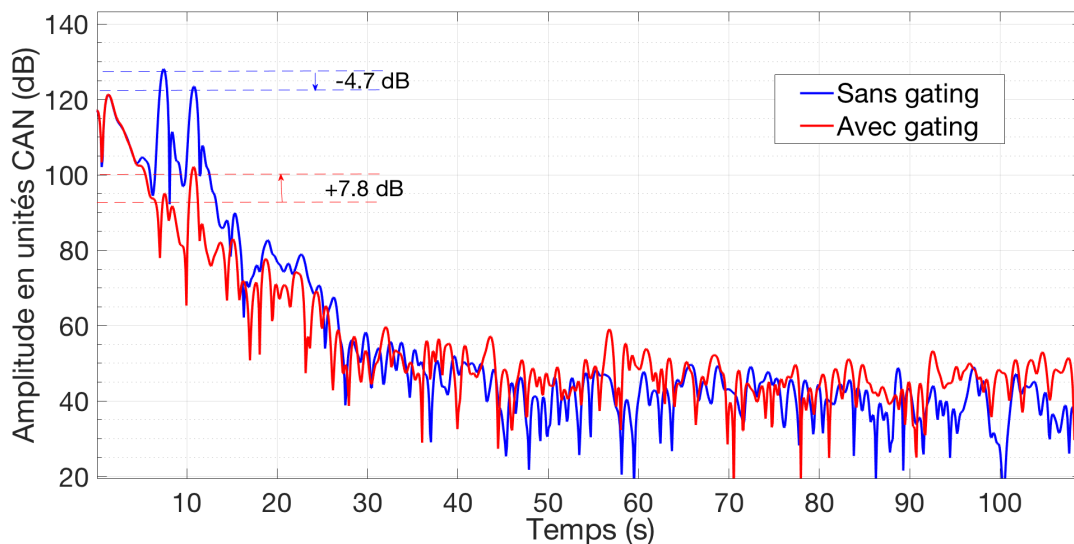


FIGURE 2.33 – Mesures rebouclées (avec des câbles de longueur différente) effectuées avec le PFM avec et sans gating. Sans gating, l’amplitude du second écho (vers 11 ns) est inférieure de 4.7 dB à l’amplitude du premier (vers 8 ns). Avec gating, le second écho domine le premier de 7.8 dB.

2.5 WISDOM en campagnes

La préparation de la mission ExoMars nécessite d’avoir des données dans des environnements variés, afin de pouvoir tester les performances de l’instrument dans des environnements naturels mais aussi d’adapter la chaîne de traitement à tout type de sol (glace d’eau, milieux stratifiés, milieux hétérogènes ...).

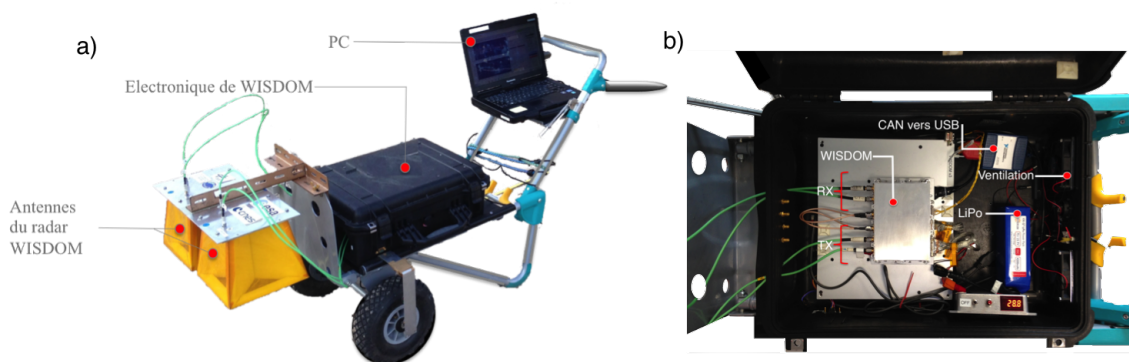


FIGURE 2.34 – Prototype de l’instrument WISDOM monté sur un chariot adapté.

Pour faire des mesures avec le prototype en extérieur, une structure mobile adaptée a été conçue

(Figure 2.34a). Comme pour la mission ExoMars, le pied des antennes se situe à 38 cm du sol. La structure permet de modifier l'inclinaison des antennes afin de se retrouver dans les conditions les plus proches possibles de celles de la mission. Pour des raisons de stabilité, lors de mesures sur un sol en pente, la solution d'un chariot sur deux roues a été préférée. Une mallette contient l'électronique de l'instrument, un système de ventilation et une batterie (Figure 2.34b). L'instrument fonctionne sur une plage de tension comprise entre 26 et 30 V. Pour les campagnes et les mesures à l'extérieur, le choix du type de batterie s'est porté sur une batterie LiPo (*Lithium Polymère Batterie*) composée de 7 cellules pour une tension de sortie de 29.4 V. Les batteries LiPo offrent le meilleur ratio masse/capacité ainsi qu'une plus grande durée de vie par rapport aux batteries plomb ou NiMH. Elles demandent, en contrepartie, un entretien particulier : elles sont fragiles, ne doivent pas descendre sous une tension de 2.5 V par élément et doivent rester sous surveillance lors de la charge. Elles présentent, en effet, un risque accru d'inflammation lors de la charge. Enfin, l'instrument est piloté sur Labview par un ordinateur portable. La liaison avec l'instrument est assurée par une interface CAN-Bus vers USB.

2.5.1 Campagne sur le mont Etna (Italie)

La campagne sur le mont Etna, situé à l'est de Sicile, est la première campagne de mesures effectuée avec le prototype de WISDOM. Le mont Etna est un volcan toujours actif qui culmine à 3300 m d'altitude et s'étend sur une surface de 1200 km². La nature volcanique de ce site a motivé son choix. Mars ayant eu une activité volcanique, ce site représente un potentiel bon analogue.

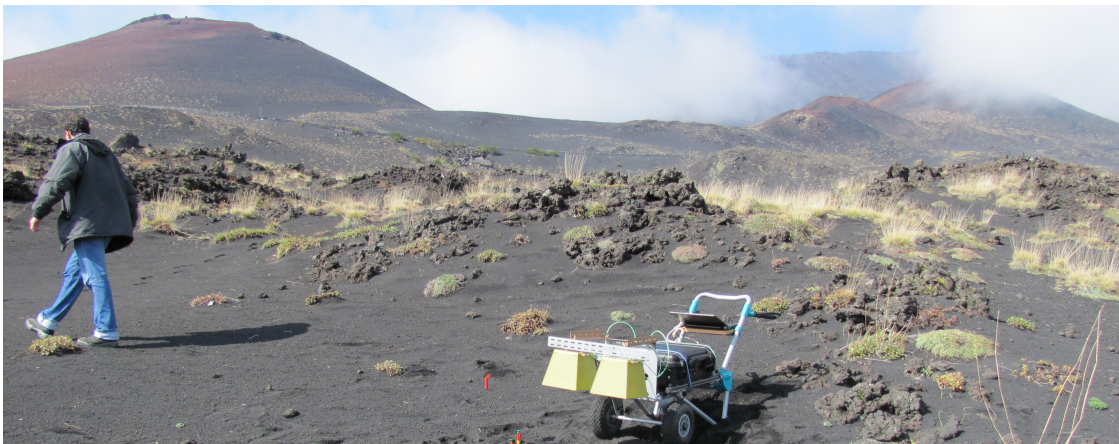


FIGURE 2.35 – Campagne de mesures sur le mont Etna (Italie)-10/2010. Crédit : WISDOM team

Malgré un sol détrempé, les données recueillies lors de cette campagne ont permis d'identifier des couches de dépôts pyroclastiques déposés lors d'au moins deux événements volcaniques. Ces données ont donc permis de confirmer l'apport de WISDOM dans la caractérisation et la compréhension du passé géologique d'un site.

2.5.2 Grottes glacées du Dachstein (Autriche)

L'équipe WISDOM a participé en 2013 à la *Dachstein Mars Simulation* organisée par l'*Austrian Space Forum* dans les grottes glacées du massif du Dachstein [Dorizon et al., 2016]. Bien que la glace ne soit pas un analogue martien, c'est un milieu très favorable à la pénétration des ondes électromagnétiques. Cette campagne fut l'occasion d'élaborer des méthodes de reconstruction 3D (C-scan) du sous-sol mais aussi de tester les performances de l'instrument dans un environnement favorable [Dorizon, 2016]. Les données acquises montrent plusieurs couches de glace reposant sur un socle rocheux.



FIGURE 2.36 – Campagne de mesures dans les grottes glacées du Dachstein (Autriche)-10/2013. Crédit : WISDOM team

2.5.3 La campagne SAFER (Chili/Angleterre)

La campagne SAFER (*Sample Acquisition Field Experiment with a Rover*) fut une campagne de simulation d'opérations organisée dans le but de préparer la mission ExoMars 2020. Elle s'est déroulée en octobre 2013 dans le désert d'Atacama près de l'*European Southern Observatory* (ESO) au Chili [Dorizon, 2016]. Pour l'occasion, un prototype de Rover a été fourni par Astrium. Trois prototypes d'instruments ont participé à cette campagne : PanCam, WISDOM et CLUPI. Afin de simuler les conditions de la mission et notamment le temps de latence entre la prise de décision des opérateurs, la réalisation effective des opérations par le Rover et l'interprétation des résultats, le Rover était piloté depuis un centre de contrôle établi à Harwell, en Angleterre. Les objectifs de cette campagne étaient d'étudier la synergie entre les instruments, de mettre en place les procédures d'opérations et de rendre compte de l'efficacité de la charge instrumentale à caractériser le proche sous-sol.



FIGURE 2.37 – Rover "Bridget" sur lequel est monté le prototype de WISDOM dans le désert de l'Atacama (Chili)-10/2013. Crédit : Rafik Hassen-Khodja

2.5.4 Campagne dans le sud de la France

La recherche d'un terrain sec, dépourvu de végétation et simple d'accès nous a naturellement conduit à prospecter dans le sud la France. Nous avons retenu deux sites distants d'une centaine de kilomètres : Rustrel dans le "Colorado Provençal" (Vaucluse) et le bassin de Lodève (Hérault).

Les deux sites présentent des caractéristiques intéressantes pour la préparation de l'interprétation des données de la mission ExoMars. Le "Colorado Provençal" présente de nombreux affleurements, il peut donc nous permettre de tester la capacité de WISDOM à suivre des socles rocheux en sous-sol [Hervé et al., 2017] [Hervé et al., 2018]. Les sites sélectionnés sur le bassin de Lodève possèdent une



FIGURE 2.38 – Campagne de mesures dans le "Colorado Provençal" (Rustrel, France)-07/2017. Crédit : WISDOM team

stratification apparente et se trouvent sur des sites géologiquement intéressants, en particulier, sur des lits de rivières asséchées avec des dépôts argileux. Outre WISDOM, nous avons apporté un géoradar (GPR) de la marque GSSI (SIR-4000) afin d'effectuer une comparaison entre le radar WISDOM conçu pour le spatial et un radar commercial, utilisé aussi bien dans le bâtiment et la chaussée que dans le cadre de campagnes de géologie.

2.5.5 Campagne à Pérouze (Italie)

Cette campagne s'est déroulée à Pérouze (Italie) dans une carrière. Bien que ce type de site ne représente pas un bon analogue martien en terme de composition (présence de roches calcaires), des roches affleurent à la surface et laissent deviner des structures en profondeur, notamment un milieu stratifié calcaire recouvert par du gravier. Dans la foulée des mesures WISDOM, des échantillons ont été prélevés afin de déterminer les propriétés électriques et la composition (mesure de la constante diélectrique et analyse par spectroscopie) des sols sondés.

L'objectif principal de cette campagne était d'étudier la synergie entre WISDOM et MA_MISS et de préparer la collaboration future entre ces instruments dans le cadre de la mission ExoMars 2020 [Frigeri et al., 2018].



FIGURE 2.39 – Campagne à Pérouze (Italie)-06/2018. Crédit : Alessandro Frigeri

2.5.6 Terrain d'expérimentation (France)

Pour les besoins de cette thèse et la préparation à l'interprétation des données de WISDOM, nous avons construit un terrain d'expérimentation sur le site de Guyancourt du LATMOS. Ce terrain fait 1.4 m de profondeur et couvre une surface de 4×3 m. Il se compose d'une couche de 1 m 30 de sable reposant sur une couche de gravier de 10 cm d'épaisseur. Les graviers assurent le drainage du sous-sol et forment une interface entre le sable et la terre. Lors de la construction du terrain, 20 cibles

ont été déposées à 60 et 120 cm de profondeur. Leurs positions ont été relevées pour les identifier sur les radargrammes. Ce terrain n'est pas un analogue martien, il a été pensé pour tester l'instrument dans un environnement semi-controlé. Le choix de cibles métalliques, est particulièrement favorable à leur détection. La Figure-2.40d montre un radargramme acquis par WISDOM sur ce terrain. Nous utiliserons, dans la suite de ce chapitre, ce radargramme pour illustrer les différentes étapes de traitement.

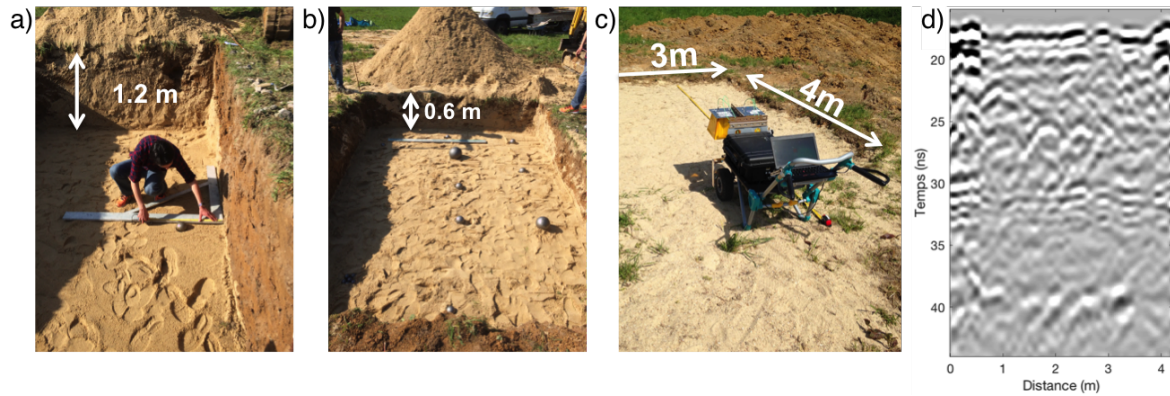


FIGURE 2.40 – Terrain aménagé sur le site de Guyancourt du LATMOS pour tester le radar WISDOM, d) Radargramme acquis par WISDOM sur ce terrain test

2.5.7 Bilan de campagnes

Les campagnes de test à l'extérieur feront par la suite l'objet d'une description plus détaillée. Le chapitre 5 est en partie dédié à l'application des méthodes de traitement et d'analyse développées pour aider à l'interprétation des données acquises sur deux analogues martiens : les données de la campagne SAFER au Chili et celles de la campagne dans le Colorado Provençal.

Le Tableau 2.5 récapitule les données de campagnes utilisées dans ce manuscrit.

Au total, le prototype de WISDOM a effectué 18845 sondages. En comptant les fichiers de calibration et en tenant compte d'un pas de 10 cm entre chaque mesure, WISDOM a sondé sur une distance de 1.88 km (soit 470 m par polarisation).

Entre les grottes glacées de l'Autriche, le désert de l'Atacama, les terrains ôcres du Sud de la France et la région parisienne ; WISDOM a voyagé sur près de 15500 km. Ce parcours honorable représente seulement 0.2 ‰ de la distance que le modèle de vol devra parcourir entre la Terre et Mars !

Nom	Lieu	Date	Observations	# sondages
Etna	Italie	10/2010	Milieu stratifié, présence de dépôts pyroclastiques, provenant de multiples événements volcaniques	1950
Dachstein	Autriche	04/2012	Sondage dans de la glace, identification d'un milieu stratifié avec présence de socles rocheux	3993
SAFER	Chili	10/2013	Présence de couches, de milieux avec différents degrés d'hétérogénéités	3644
Terrain d'expérimentation	France	04/2017	Présence de réflecteurs métalliques	1961
Sud de la France	France	07/2017	Présence de milieux stratifiés et de socles rocheux	6055
Pérouze	Italie	06/2018	Présence d'un milieu stratifié	1242

TABLE 2.5 – Principales campagnes de mesures avec le prototype de WISDOM

2.6 Conclusion

Le radar à pénétration de sol WISDOM est un radar conçu pour la mission ExoMars 2020 ; son objectif principal est la caractérisation du proche sous-sol martien. L'électronique de l'instrument a été principalement développée au LATMOS, et les antennes à l'Université Technique de Dresden (TUD). Le développement d'un instrument pour le spatial est rigoureusement encadré ; de la conception au modèle de vol, des prototypes et des modèles de qualification sont nécessaires pour valider étape par étape le design de l'instrument et son adéquation avec les contraintes d'une mission spatiale.

Nous avons rappelé brièvement ici les principaux tests effectués sur les différents modèles de WISDOM et apporté une première caractérisation de l'instrument. Cette caractérisation est indispensable à l'étalonnage et à l'interprétation future des données. Des mesures complémentaires, notamment avec le modèle de vol intégré au Rover, suivront.

Enfin nous avons présenté les campagnes de mesures dont les données seront utilisées tout au long de ce manuscrit.

Dans le chapitre suivant nous décrivons la chaîne de traitement des données de WISDOM mise en place pour la préparation du retour scientifique de la mission ExoMars 2020.

Chapitre 3

Traitement des données du radar à pénétration de sol WISDOM/ExoMars 2020

Ce chapitre porte sur la chaîne de traitement des données du radar à pénétration de sol WISDOM [Ciarletti et al., 2011][Ciarletti et al., 2017a].

Au cours de cette thèse, chaque étape du traitement a été étudiée afin de sélectionner les techniques et les méthodes permettant de répondre au mieux aux objectifs de la mission. En effet, chaque étape du traitement influe sur le résultat final et donc sur l'interprétation possible des données.

Les données brutes de WISDOM sont des données fréquentielles, la chaîne de traitement consiste donc, en premier lieu, à les convertir dans le domaine temporel afin de pouvoir construire un radar-gramme interprétable. Nous verrons les limites de chacune des méthodes proposées ainsi que les choix retenus pour un traitement des données par défaut.

Comme pour tous les radars à pénétration de sol, les données de WISDOM sont entachées de signaux parasites provoqués par des réflexions indésirables. Durant cette thèse, des méthodes ont été développées afin de limiter, voire de supprimer, ces parasites. Ces méthodes, qui intègrent la chaîne de traitement, ont été évaluées sur des données synthétiques, des données obtenues en milieu contrôlé et enfin sur des données acquises sur des milieux naturels.

Dans une première partie, nous ferons la description de la chaîne de traitement des données du radar WISDOM, puis nous proposerons, dans une seconde partie, des méthodes d'atténuation des parasites.

3.1 Traitement des données WISDOM

3.1.1 Principe des radars à sauts de fréquences

Le radar WISDOM est un radar qui fonctionne sur le principe des sauts de fréquence (*Step-Frequency*) et opère donc dans le domaine fréquentiel.

En effet, si on s'intéresse à la forme des signaux utilisés pour sonder le sous-sol, on classe les GPR en deux grandes familles :

- Les radars impulsionsnels qui opèrent dans le domaine temporel et fournissent une estimation directe de la réponse impulsionsnelle. Ces radars émettent une impulsion courte. Chaque écho se traduit par la réception d'une impulsion caractérisée par un retard et une amplitude porteurs d'informations sur le milieu sondé. La forme de l'impulsion sera modifiée dans le cas d'un milieu dispersif en fréquence ou à pertes. Plus l'impulsion est courte, meilleure est la résolution. Une des difficultés de mise en oeuvre des radars impulsionsnels est liée au fait qu'il est difficile de transmettre une énergie importante sur une impulsion très courte.
- Les radars qui opèrent dans le domaine fréquentiel. Parmi ces derniers, on compte les radars à modulation de fréquence (FMCW) qui émettent un signal dont la fréquence augmente continûment sur la plage de fréquences à balayer et les radars à sauts de fréquences pour lesquels la fréquence du signal émis décrit la bande de fréquences totale B (2.5 GHz dans le cas de WISDOM) par paliers.

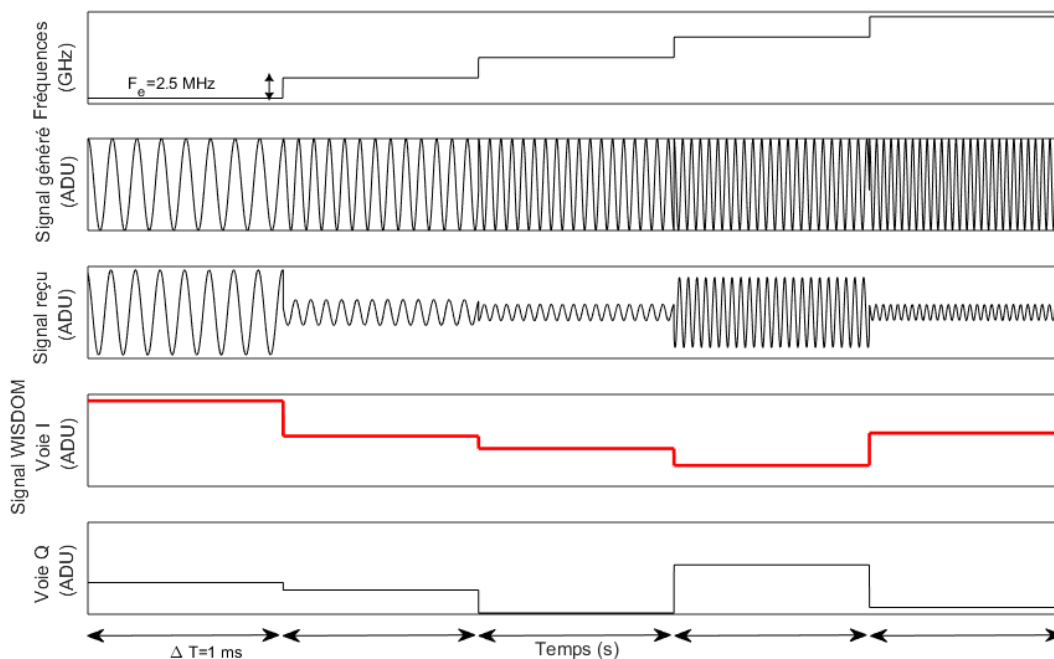


FIGURE 3.1 – Principe du radar à sauts de fréquences. Deux courbes du haut : Signal émis dans les domaines fréquentiel et temporel. WISDOM émet typiquement 1001 fréquences sur une bande de fréquences de 2.5 GHz donc avec un pas en fréquence $F_e = 2.5$ MHz. Courbe du milieu : signal reçu dans le domaine fréquentiel. WISDOM ne permet que l'acquisition de la partie réelle de ce signal dans le domaine fréquentiel c'est-à-dire de la voie I (avant dernière courbe). La courbe du bas montre la partie imaginaire du signal reçu dans le domaine fréquentiel (c'est-à-dire la voie Q). L'information contenue dans cette dernière peut être en grande partie reconstruite grâce à une transformée de Hilbert.

La Figure 3.1 décrit le principe d'un radar à sauts de fréquences et donc de WISDOM. La réponse du milieu sondé est mesurée de façon discrète dans le domaine fréquentiel. Pour chaque fréquence, les

différents échos interfèrent et forment un signal à la même fréquence, caractérisé par une amplitude $A(f)$ et une phase $\Phi(f)$. Répétant, cette opération sur l'ensemble des fréquences dans la bande de fréquences totale B , on échantillonne la réponse fréquentielle $S(f)$ sur la bande B avec un pas F_e . La partie réelle de S est notée "I" et sa partie imaginaire "Q". Au niveau du récepteur, le signal reçu est multiplié par le signal émis à la même fréquence et un filtre passe-bas permet d'éliminer les variations temporelles pour obtenir la quantité complexe $S(f) = A(f)\exp(i\Phi(f))$ (deux courbes du bas sur la Figure 3.1). La réponse temporelle est alors obtenue par transformée de Fourier inverse de $S(f)$ (voir ce qui suit).

Dans le cas de WISDOM, les données acquises correspondent à la voie I uniquement, c'est-à-dire à la partie réelle de $S(f)$, soit $A(f)\cos\Phi(f)$. Nous verrons par la suite que l'information manquante n'affecte que très peu la reconstitution dans le domaine temporel.

3.1.2 Transformée de Fourier inverse

La transformée de Fourier permet de passer du domaine du signal au domaine spectral, autrement dit du domaine temporel au domaine fréquentiel, selon la formule suivante :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (3.1)$$

Cette formule est valable dans le cas d'un signal réel continu. Cependant dans le cadre de l'analyse de données, le signal acquis n'est pas continu, il est discret avec un pas d'échantillonnage T_e qui dépend des modalités d'acquisition. Ainsi, pour obtenir le spectre d'un signal discret nous devons utiliser une transformée de Fourier discrète (TFD) :

$$S(f) = \sum_{n=0}^{N-1} s(nT_e)e^{-2i\pi f \frac{nT_e}{N}} \quad (3.2)$$

Afin d'éviter toute perte d'information en passant d'un signal continu à un signal discret ainsi que tout repliement du spectre le signal doit respecter le théorème de Shannon-Nyquist qui stipule que la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure ou égale à deux fois la fréquence maximale du spectre $F_e > 2F_{max}$. Pour pouvoir traiter les données de l'instrument dans le domaine temporel nous devons donc utiliser une transformée de Fourier discrète inverse :

$$s(kT_e) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S(nF_e)e^{2i\pi kT_e \frac{nF_e}{N}} \quad (3.3)$$

où N correspond au nombre de fréquences (typiquement $N=1001$ fréquences pour WISDOM) et F_e est la fréquence d'échantillonnage ($F_e = 2.5$ MHz). Il existe des algorithmes dit de transformée de Fourier rapide (*Fast Fourier Transform*) qui permettent un important gain de temps. La chaîne de traitement des données WISDOM utilise une transformée de Fourier rapide [Cochran et al., 1967] reposant sur l'algorithme de Cooley-Tukey [Cooley and Tukey, 1965]. Afin de reconstruire un signal temporel avec une précision satisfaisante, nous effectuerons une interpolation s'appuyant sur la technique de complétion par zéro (ou *zero-padding*). La complétion par zéro consiste à ajouter des zéros à la fin du spectre pour augmenter le nombre de points d'étude [Seyfried and Schoebel, 2015]. Le résultat est un signal interpolé. La complétion par zéro permet de gagner en précision sans ajouter d'information, la précision étant définie comme l'écart entre le retard estimé par TFD et le retard réel. Il n'y a donc pas de gain en résolution en utilisant cette technique. Nous reviendrons par la suite sur la méthode du *zero-padding* dans la sous-partie dédiée à l'interpolation.

3.1.3 Fenêtre d'apodisation

La réponse fréquentielle des sols sondés par l'instrument WISDOM est bornée entre 0.5 et 3 GHz ce qui correspond au produit d'une réponse fréquentielle infinie par une fonction porte Π sur l'intervalle

[0.5-3] GHz. La transformée de Fourier d'une fonction porte est un sinus cardinal comme l'illustre la Figure 3.2. Nous remarquons un pic central suivi de rebonds appelés lobes secondaires. Ces lobes, ainsi que la largeur du pic central, ont une influence sur la transformée de Fourier du signal. En effet, la transformée de Fourier du produit de deux fonctions dans le domaine fréquentiel est égale au produit de convolution dans le domaine temporel.

$$IFFT(I(f).W(f)) = (I \otimes W)(t) \quad (3.4)$$

où $I(f)$ est la réponse fréquentielle et $W(f)$ la fenêtre d'apodisation (c'est-à-dire une fenêtre de taille finie sur laquelle on observe la réponse fréquentielle). Dans le cas où $W(f)$ est une fonction porte $\Pi(f)$, la transformée de Fourier inverse correspond donc au produit de convolution entre la réponse temporelle du sol et un sinus cardinal ce qui induit des lobes secondaires importants (Figure 3.2b). Afin de minimiser l'effet des lobes secondaires de la fonction porte, on peut avoir recours à d'autres fenêtres d'apodisation W présentant des transitions douces [Seyfried and Schoebel, 2015][Harris, 1978]. La Figure 3.2b montre la réponse temporelle des fenêtres listées dans le Tableau 3.1. Les paramètres à prendre en compte pour chaque fenêtre sont : le niveau des lobes secondaires et la largeur du pic principal dans le domaine temporel. Plus une fenêtre est étroite dans le domaine fréquentiel (Figure 3.2a), plus le lobe principal est large dans le domaine temporel et le niveau des lobes secondaires est faible. La fenêtre choisie influe sur la résolution et sur la présence de réflexions dont l'amplitude est proche du niveau des lobes secondaires introduits par les fenêtres d'apodisation.

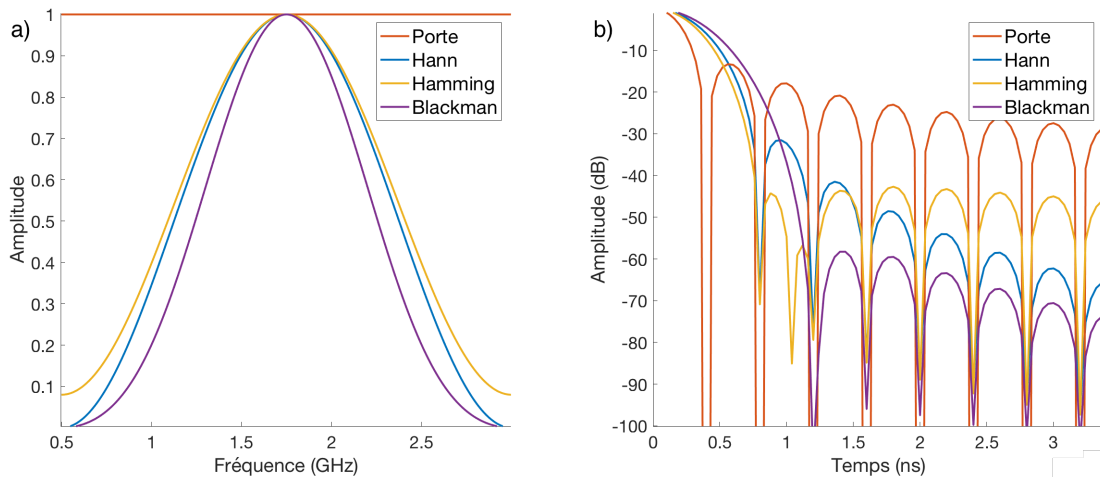


FIGURE 3.2 – a) Différents types de fenêtres d'apodisation, b) Réponses temporelles des fenêtres d'apodisation

Il faudra donc choisir, en fonction du sous-sol sondé, la fenêtre optimale. Par exemple, utiliser la fenêtre d'apodisation qui apporte la meilleure résolution pour un milieu stratifié homogène afin d'identifier des couches enfouies ou préférer une fenêtre qui va réduire l'amplitude des lobes secondaires pour faire ressortir une structure dans un milieu très hétérogène.

Afin d'illustrer l'effet des fenêtres d'apodisation sur le signal restitué, nous avons effectué près de 300 mesures sur plaques métalliques, ensuite ces données ont été traitées avec les fenêtres d'apodisation présentées ci-avant. La Figure 3.3 montre la largeur à mi-hauteur de l'écho réfléchi par la plaque métallique ainsi que son enveloppe (Figure 3.3b).

La résolution dépend directement de la largeur à mi-hauteur de l'écho, plus celle-ci est large plus la résolution est dégradée. La fonction porte offre la meilleure résolution (plus faible largeur à mi-hauteur), nous observons cependant l'apparition de lobes secondaires qui pourraient être interprétés à tort comme des échos additionnels (Figure 3.3b). Regardons maintenant l'influence des fenêtres d'apodisation sur un radargramme.

La Figure 3.4 montre une comparaison entre un radargramme traité avec une fonction porte et un radargramme traité avec une fenêtre de Hamming [Blackman and Tukey, 1958]. Nous observons

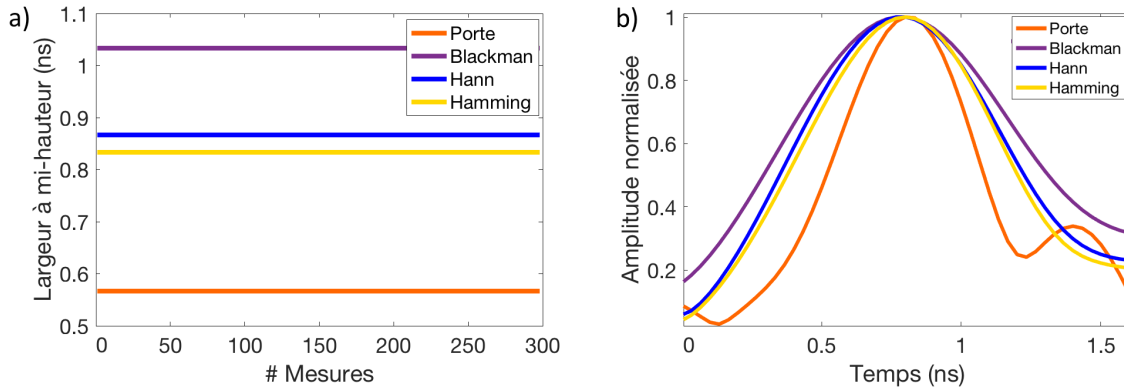


FIGURE 3.3 – a) Largeur à mi-hauteur de l’écho sur plaque métallique en fonction des fenêtres d’apodisation, b) Enveloppe de l’écho sur plaque métallique

des lobes secondaires assez marqués sur le radargramme traité avec une fonction porte (Figure 3.4a) alors que le radargramme traité avec une fonction de Hamming (Figure 3.4b) présente moins de signaux parasites. Dans ce dernier, les lobes ont disparu, et des branches d’hyperbole apparaissent. Le radargramme offre une meilleure lisibilité et son interprétation en est facilitée.

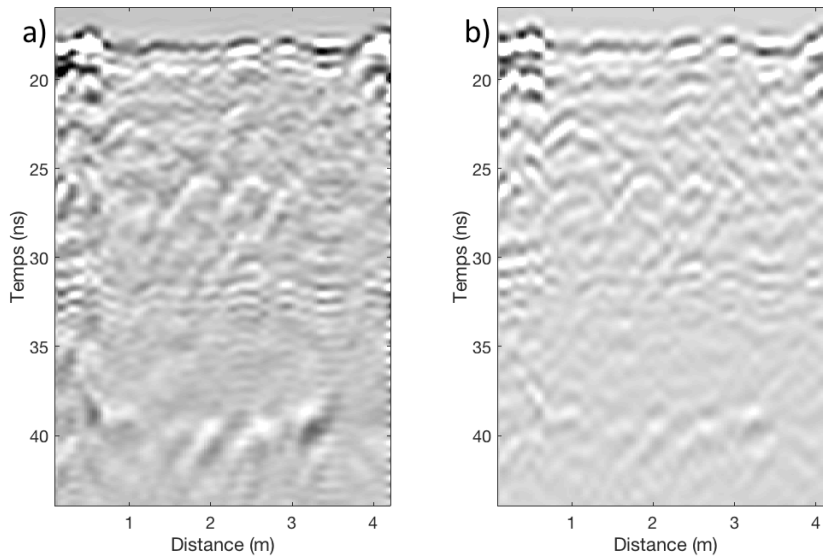


FIGURE 3.4 – Radargramme acquis par WISDOM : a) traité avec une fonction porte Π , b) traité avec une fenêtre de Hamming

Fenêtre d’apodisation	Expression de la fenêtre $W(f)$ pour $f \in [0.5, 3.0 \text{ GHz}]$ ($W(f) = 0$ pour $f \in [-\infty, 0.5 \text{ GHz}[$ et $f \in]3 \text{ GHz}, +\infty]$)	Niveau du premier lobe (dB)	Largeur du pic central à -20 dB (ns)
Porte	1	-13	0.72
Hann	$\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos(2\pi\frac{t}{T})$	-32	1.36
Hamming	$0.54 - 0.46\cos(2\pi\frac{t}{T})$	-44	1.60
Blackman	$0.42 - 0.5\cos(2\pi\frac{t}{T}) + 0.08\cos(4\pi\frac{t}{T})$	-58	1.80

TABLE 3.1 – Fenêtres d’apodisation

Le choix de la fenêtre dépendra de la structure du sous-sol ainsi que des informations recherchées. Par défaut, nous utiliserons la fenêtre de Hamming car elle offre un bon compromis en termes d’am-

plitude des lobes secondaires (-44 dB) et de largeur du pic principal (1.60 ns).

3.1.4 Transformée de Hilbert

Une spécificité du radar WISDOM est de ne mesurer que la partie réelle $I(f)$ de la réponse fréquentielle, traditionnellement appelée voie “I” (In-phase) contrairement aux radars plus classiques qui mesurent la voie “I” et également la voie dite “Q” (Quadrature-phase), partie imaginaire $Q(f)$ de la réponse en fréquence. Cette particularité de WISDOM s’explique par les contraintes de la mission sur les ressources en masse et en volume de données. Au niveau de l’instrument, il aurait été nécessaire de doubler une partie du circuit de génération des signaux et de réception. En ce qui concerne les données, le volume aurait été double. Cependant, demeure le fait qu’une partie de l’information est manquante. En effet, nous avons rappelé précédemment que la transformée de Fourier d’un signal réel est, dans le cas général, complexe et donc, ses parties réelles et imaginaires sont nécessaires à l’obtention du signal réel qui nous intéresse. Mais WISDOM est un radar très large bande (2.5 GHz), ce qui permet de compenser la part de la partie imaginaire.

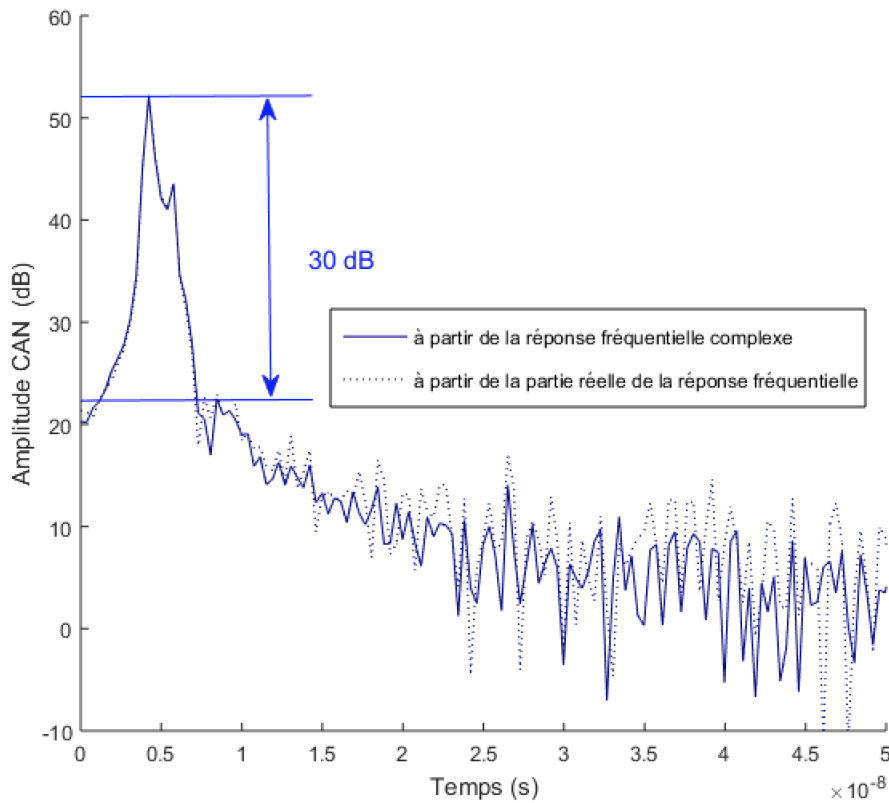


FIGURE 3.5 – Signaux temporels obtenus avec WISDOM reconstruits à partir des parties réelle et imaginaire (trait plein) ou seulement à partir de la partie réelle via une transformée de Hilbert (traits pointillés).

En théorie, si un signal est réel et causal, on montre que, dans ce cas, la partie imaginaire $Q(f)$ de sa transformée de Fourier est la transformée de Hilbert de sa partie réelle $I(f)$.

$$Q(f) = \frac{1}{\pi} VP \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{I(f-f')}{f'} df' \right) \quad (3.5)$$

où VP désigne la valeur principale de Cauchy qui permet de donner un sens à une intégrale qui pourrait diverger du fait du comportement en $f' = 0$. Il ne serait donc pas, en théorie, utile de mesurer

la partie imaginaire. Cependant la formule de reconstitution par transformée de Hilbert repose sur la connaissance de $I(f)$ pour toute fréquence, ce qui n'est pas le cas en pratique.

WISDOM, grâce à sa bande de fréquences très large, permet cependant une reconstitution très acceptable de la partie imaginaire manquante. L'impact de cette approximation a été étudié sur le modèle de vol de l'instrument avant assemblage. Les chaînes de transmission et de réception avec leurs amplificateurs, atténuateurs et commutateurs ont été caractérisées par leur fonction de transfert mesurées à l'analyseur de réseau, qui donne accès à la réponse complexe en fréquence. La gamme complète des atténuateurs des deux chaînes a été utilisée afin de mesurer des signaux d'amplitude variable (sur une plage de 120 dB). Au total, une centaine de configurations ont été caractérisées. Les cent signaux temporels reconstitués à partir de $I(f)$ uniquement via une transformée de Hilbert ont été comparés aux cent signaux obtenus à partir de la mesure complexe complète $I(f) + jQ(f)$. La Figure 3.5 montre un exemple des deux signaux temporels à comparer pour une configuration donnée. La Figure 3.6 présente l'ensemble des résultats obtenus. Dans l'image du haut, sont représentés tous les points des cent réponses enregistrées. Dans l'image du bas, pour chacune des cent réponses, ne sont représentés que les points qui correspondent au pic de la réponse temporelle sur une dynamique de 30 dB. L'image du bas montre que l'écart entre les deux signaux reconstruits est faible : il est de 4 %. L'erreur est de 1% si on ne considère que les points sur une dynamique de 3 dB autour du maximum du pic et de 2% pour 10 dB. En conclusion, nous pouvons considérer que l'amplitude du pic et sa forme jusqu'à 30 dB sont reconstituées de façon satisfaisante en utilisant une transformée de Hilbert effectuée sur le signal mesuré par WISDOM. C'est ce qui sera fait automatiquement dans la chaîne de traitement.

3.1.5 Filtrage

Il peut être utile d'utiliser un filtre en fréquences afin de ne garder que la sous-bande de fréquences souhaitée. L'intérêt de ce type de filtres est de pouvoir s'adapter aux particularités des milieux sondés. Par exemple, dans les milieux hétérogènes, les ondes subissent de nombreuses réflexions qui sont dues à des changements locaux de structure et/ou de composition. Les hétérogénéités de petite taille par rapport à la longueur d'onde centrale interagissent avec les fréquences les plus hautes. Afin d'atténuer les contributions liées aux hétérogénéités qui pourraient masquer des structures intéressantes, un filtre basse fréquence peut être utilisé.

La Figure 3.7 montre un radargramme filtré sous trois bandes de fréquences croissantes. Sur le premier radargramme (Figure 3.7a), seules les plus basses fréquences ont été conservées. Nous distinguons alors clairement trois types de structures : la surface, trois hyperboles à 25 ns et une interface à 40 ns. En prenant une bande de fréquence un peu plus élevée, tout en éliminant les hautes fréquences (Figure 3.7b), nous voyons apparaître plus de détails et les structures sont toujours visibles. Le radargramme est, cependant, plus confus. Enfin, en prenant toute la bande de fréquences (Figure 3.7c), l'identification des trois hyperboles à 25 ns est plus incertaine ; le radargramme est beaucoup plus perturbé. Cet exemple illustre bien l'apport du filtrage en fréquence. Notons cependant que ce filtrage réduit la bande de fréquence et, par conséquent, dégrade la résolution. Il n'est donc pas adapté à des milieux qui exigent d'être observés avec une bonne résolution. C'est le cas des milieux stratifiés, pour lesquels toute la bande de fréquences est requise. Les enjeux autour de la résolution seront abordés au chapitre 4 qui est dédié aux algorithmes de haute-résolution.

3.1.6 Construction d'un radargramme

WISDOM est un radar bi-statique : il dispose d'une antenne émettrice séparée de l'antenne réceptrice. Les deux éléments sont fixés à une plaque en aluminium ; la position d'une antenne par rapport à l'autre est donc toujours la même. Le mode d'acquisition des données du radar est dit à "offset constant" (la distance entre l'émetteur et le récepteur ne varie pas). Il est à noter que les deux antennes sont très proches l'une de l'autre et sont toutes deux dirigées vers le sol. En conséquence, en première approximation, WISDOM mesure le signal rétro-diffusé par le sol et le sous-sol. Nous ap-

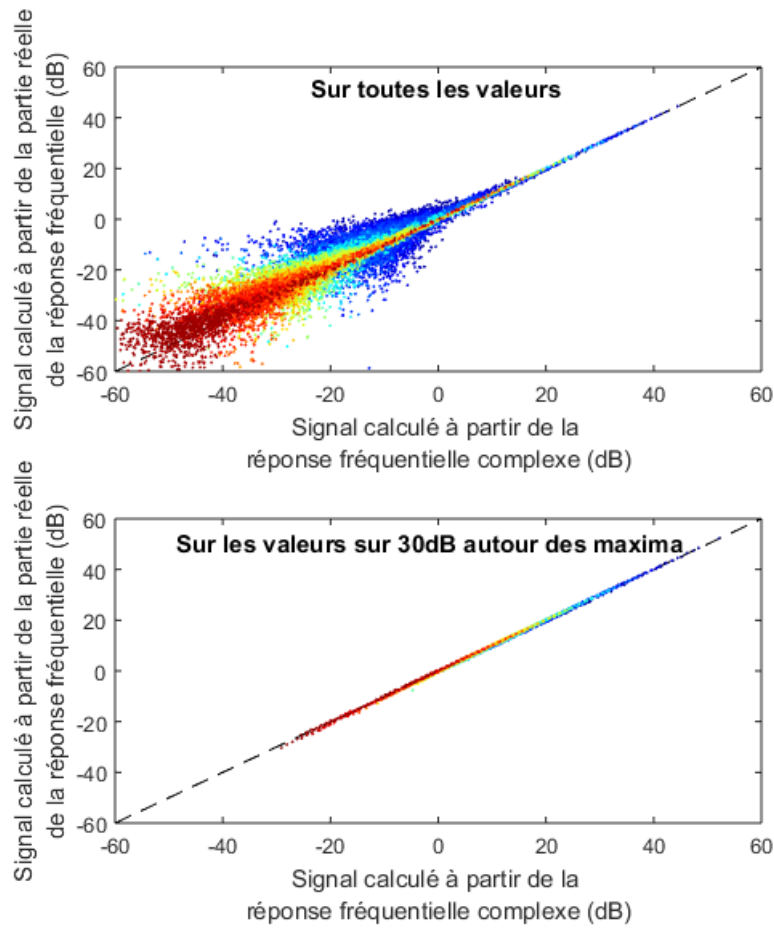


FIGURE 3.6 – Haut : comparaison de l’amplitude de 100 signaux temporels obtenus avec WISDOM reconstruits à partir des parties réelle et imaginaire ou seulement à partir de la partie réelle via une transformée de Hilbert. Les couleurs indiquent différents niveaux d’atténuation dans les chaînes d’émission et de réception. Bas : Idem qu’en haut mais en ne gardant que les points correspondant au pic de la réponse temporelle sur une dynamique de 30 dB (voir Figure 3.5).

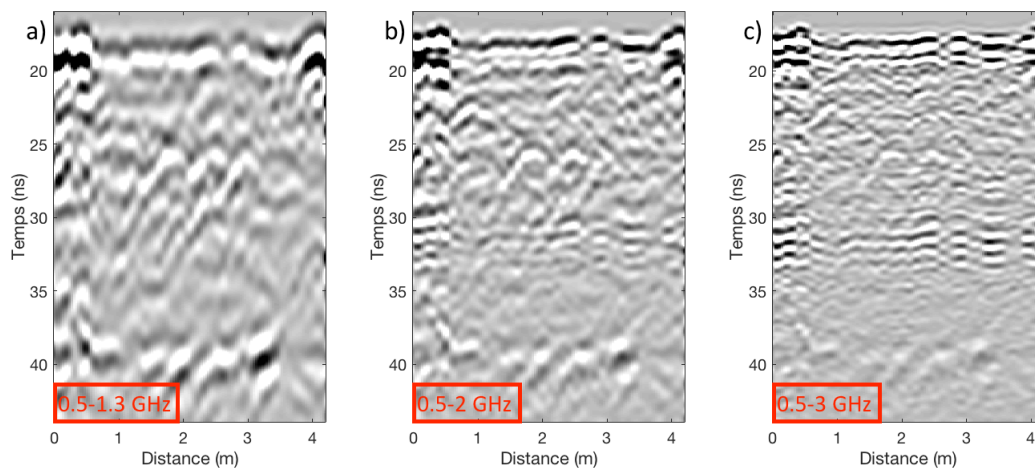


FIGURE 3.7 – Radargramme acquis par WISDOM filtré par bande de fréquences, a) 0.5-1.3 GHz, b) 0.5-2.0 GHz, c) 0.5-3.0 GHz

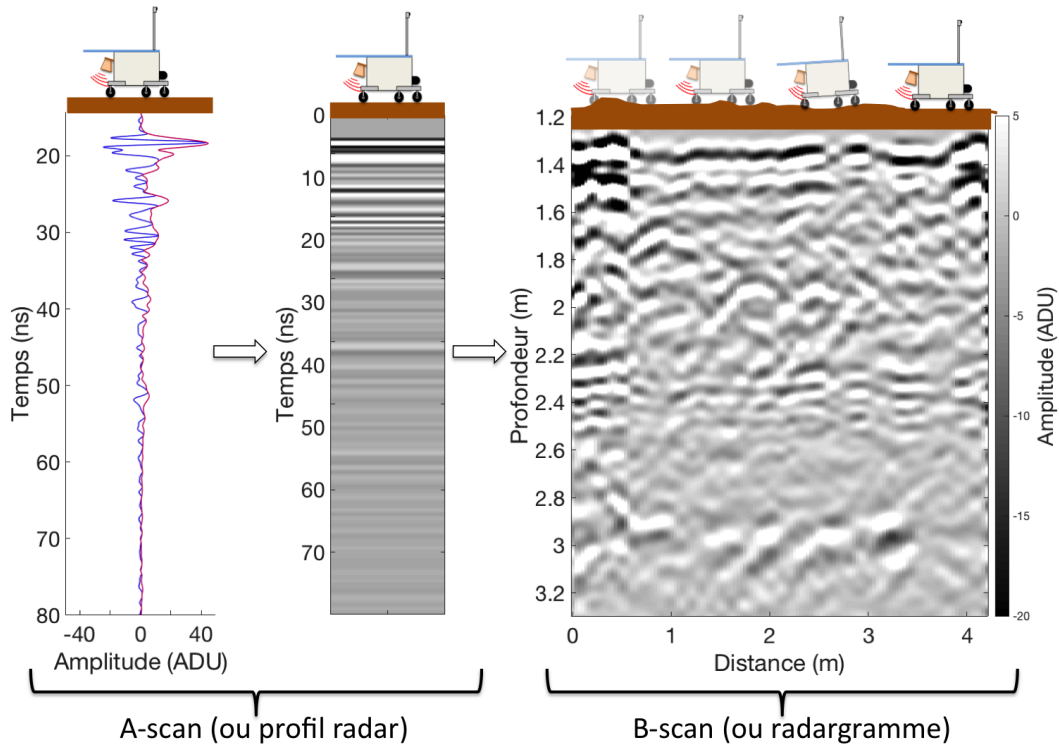


FIGURE 3.8 – Construction d'un radargramme : a) A-scan ou profil radar b) image d'un A-scan c) B-scan ou radargramme

pellérons profil radar ou A-scan un sondage [D.J.Daniels, 1996]. Le profil radar donne l'amplitude du signal en fonction du temps de propagation (Figure-3.8a). Afin de visualiser les variations d'amplitude, le profil radar peut être converti en image (Figure-3.8b) : les amplitudes sont encodées en niveaux de gris (64 niveaux). La juxtaposition des A-scan conformément à la position des sondages permet de construire une image du sous-sol appelé B-scan ou radargramme (Figure-3.8c). En réalité, étant donné la directivité des antennes, il s'agit, d'une projection du sous-sol sur un plan. Après un premier traitement appliqué à chaque profil radar (transformée de Fourier inverse, filtrage en fréquence ...), les suivants s'appliqueront sur des radargrammes.

3.1.7 Atténuation des réflexions parasites

La prochaine étape consiste à atténuer les réflexions parasites. Nous appelons réflexions parasites la somme des réflexions indésirables qui viennent perturber la lecture du radargramme. Ces parasites proviennent de couplages interne et externe entre les voies d'émission et de réception ainsi que des réflexions multiples entre les antennes et le milieu sondé. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer ces parasites et les réduire. Par défaut, nous formulons l'hypothèse que les parasites sont constants en temps d'arrivée et en amplitude d'une mesure à l'autre. Nous pouvons donc les évaluer en calculant la moyenne du radargramme X_{ij} (X désigne le radargramme, i le temps et j le numéro de la mesure) sur les N mesures. Le radargramme traité Y_{ij} est défini par :

$$Y_{ij} = X_{ij} - \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij}}_{\text{Parasites}} \quad (3.6)$$

Les réflexions parasites sont atténuées par la soustraction d'une moyenne calculée sur tous les A-scans [Benedetto et al., 2017] [Tjora et al., 2004].

La Figure 3.9 montre un radargramme avant et après soustraction des parasites. Si la méthode

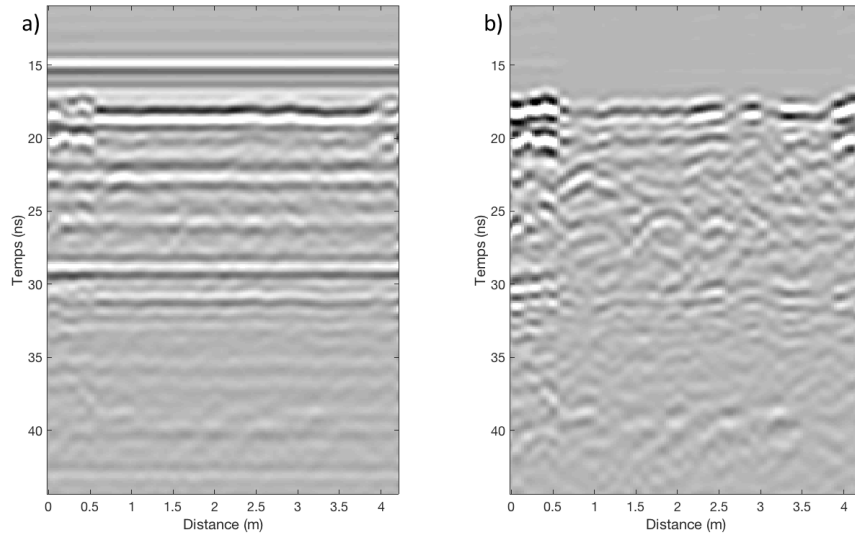


FIGURE 3.9 – Radargrammes acquis par WISDOM. a) Radargramme brut, b) Radargramme traité avec soustraction de la moyenne

est efficace, elle déforme néanmoins l'écho de surface. Sur le radargramme traité (Figure 3.9b), nous pouvons voir que le temps d'arrivée de l'écho de surface qui est quasiment constant sur le radargramme brut, ne l'est plus sur le radargramme traité. De plus, vers 30 ns nous identifions une réflexion multiple provenant de la surface qui n'a pas disparu avec la soustraction. D'autres méthodes existent pour se débarrasser de ces signaux parasites. Par exemple, retirer la médiane ou une moyenne glissante. Des techniques reposant sur la décomposition du radargramme, comme la décomposition en valeurs singulières, permettent d'atténuer ces réflexions non désirées. Ces méthodes seront développées et évaluées dans la deuxième partie de ce chapitre.

3.1.8 Interpolation en temps et distance

Le signal étant échantillonné, il contient un nombre N fini de points. L'interpolation en temps permet d'augmenter le nombre de points afin de lisser les courbes. Il faut garder à l'esprit que l'interpolation n'ajoute pas d'information mais améliore néanmoins la lisibilité des radargrammes en adoucissant les variations entre chaque points expérimentaux.

Interpolation en temps

Parmi les méthodes classiques, deux approches ont été choisies pour interpoler le signal en provenance de WISDOM. La première consiste à utiliser la méthode de la complétion par zéros (*zero-padding*) [Seyfried and Schoebel, 2015], la seconde à interpoler le signal par l'utilisation de polynômes. Nous allons appliquer ces deux méthodes puis comparer leurs résultats.

La Figure 3.10 montre un profil acquis avec WISDOM interpolé par *zero-padding* et par la méthode des splines cubiques. La forme obtenue avec *zero-padding* est très éloignée de celle obtenue par splines cubiques. Les amplitudes et les temps de retards sont également différents. La méthode d'interpolation employée a donc une grande importance pour l'interprétation des données. Nous avons donc évalué ces deux méthodes d'interpolation afin de déterminer laquelle est la plus adaptée aux données de WISDOM.

Pour reconstituer la forme des échos et la comparer à celle des profils interpolés, nous allons utiliser une méthode que nous appellerons "méthode stroboscopique". Cette méthode consiste à augmenter avec un pas régulier le temps d'arrivée d'un écho correspondant à une réflexion sur une plaque métallique en reculant progressivement le radar. Si le pas utilisé est inférieur au pas d'échantillonnage (0.4 ns), alors l'écho sera, à chaque mesure, caractérisé par différents points d'échantillonnage. En corrigeant de

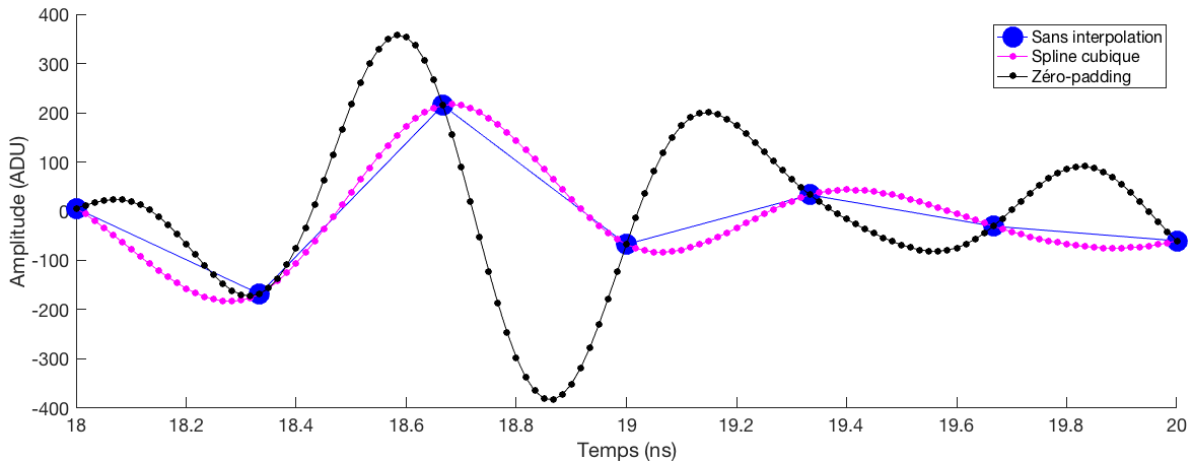


FIGURE 3.10 – Interpolation en temps d'un profil radar mesuré par WISDOM

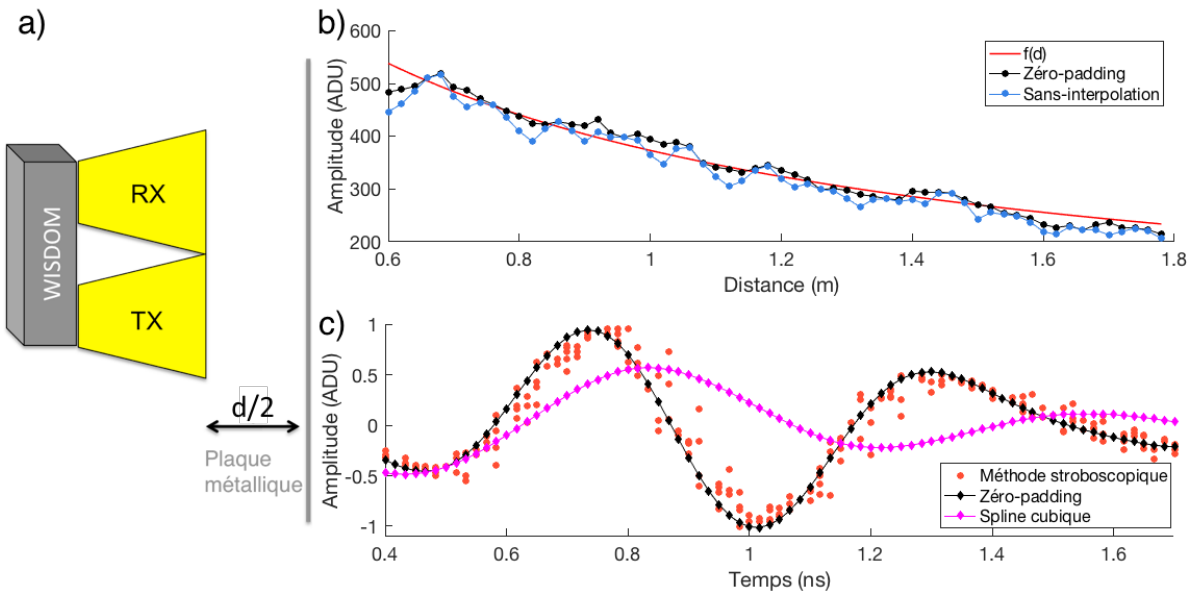


FIGURE 3.11 – a) Schéma du dispositif expérimental, b) Amplitude de l'écho en fonction de la distance antenne-mur, c) Reconstitution de l'écho par méthode stroboscopique et *zero-padding*

l'amplitude et du retard, la superposition des multiples échos collectés permet de reconstituer la forme de l'écho et ainsi de la comparer à celle des profils interpolés.

La Figure 3.11 a) illustre le procédé. Nous avons effectué des mesures sur une plaque métallique placée à une distance d du radar comprise entre 30 et 90 cm avec un pas de 1 cm. La Figure 3.11 b) montre l'amplitude de l'écho reçu en fonction de la distance antenne-mur. L'amplitude décroît comme l'inverse de la distance, elle peut être approchée par une fonction $f(d)$ de la forme :

$$f(d) = \frac{a}{d-b} \quad (3.7)$$

où a et b sont des constantes réelles. La courbe bleue (Figure 3.11b) correspond aux mesures sans interpolation : nous remarquons la présence d'oscillations, dont la période spatiale est liée au pas d'échantillonnage. Cela signifie que sans interpolation nous n'avons pas accès au maximum de l'amplitude de l'écho. La courbe noire correspond aux mesures interpolées par *zero-padding* ; il n'y a pas d'oscillation et les écarts par rapport $f(d)$ peuvent s'expliquer par les conditions de mesure.

La Figure 3.11 c) superpose l'écho obtenu par *zero-padding* et par splines cubiques à l'écho re-

constitué par la "méthode stroboscopique" en utilisant les 60 mesures sur la plaque métallique. L'écho interpolé par *zero-padding* est semblable en amplitude, forme et retard à l'écho reconstitué par la "méthode stroboscopique".

L'interpolation par *zero-padding* reconstitue donc fidèlement l'écho contrairement à l'interpolation par splines cubiques. Le *zero-padding* nous permet de gagner en précision, en effet il reconstitue le sommet de l'écho qui donne le retard. Sans interpolation, le retard est évalué à un pas d'échantillonnage près (soit 0.4 ns près). Le *zero-padding*, en reconstituant la forme l'écho permet de réduire l'incertitude autour de la mesure du retard. Dorénavant, nous utiliserons donc le *zero-padding* pour faire de l'interpolation en temps.

Interpolation selon la distance

Pour interpoler le radargramme selon l'axe de déplacement du radar, nous utilisons un algorithme d'interpolation reposant sur la méthode des splines cubiques.

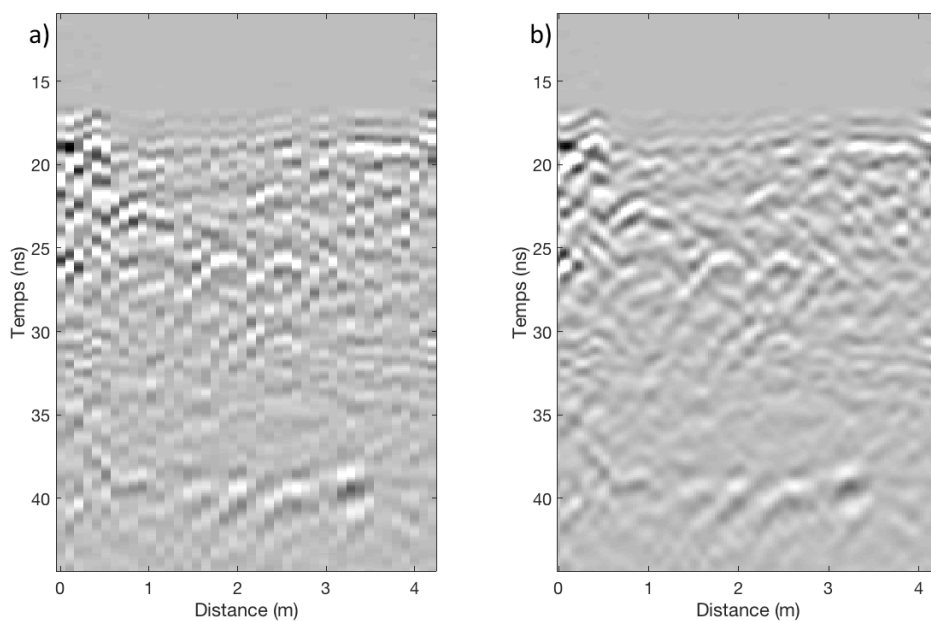


FIGURE 3.12 – Radargramme acquis par WISDOM a) sans interpolation selon la distance, b) avec interpolation selon la distance

La Figure 3.12 montre le radargramme avant et après interpolation. Nous pouvons notamment observer que le radargramme interpolé permet de distinguer nettement plus clairement les branches d'hyperboles. Les discontinuités entre chaque profil sont diminuées, ce qui permet une plus grande lisibilité du radargramme. Nous utilisons systématiquement cette méthode d'interpolation dans la chaîne de traitement des données.

3.1.9 Application d'un gain

La puissance du signal décroît avec la profondeur du fait de la dispersion géométrique [Cassidy et al., 2009] mais aussi des pertes dans le milieu [A.P. Annan, 2009]. En effet, comme abordé dans le Chapitre 1, les ondes électromagnétiques transmises dans le sous-sol subissent des pertes par absorption et par diffusion plus ou moins importantes en fonction du milieu sondé. L'application d'un gain permet de relever le niveau du signal, ce qui va révéler les structures les plus profondes en contrepartie d'un bruit amplifié. L'ajout d'un gain consiste à multiplier le profil radar par une fonction mathématique croissante avec le temps, afin de rehausser le signal en profondeur. Ces techniques sont aussi couramment utilisées dans le traitement de données pour les radars à pénétration de sol [Benedetto et al., 2017] que dans le traitement des données sismiques [Ô. Yilmaz, 2001]. Nous avons privilégié une fonction

exponentielle afin de compenser la décroissance du signal elle-même exponentielle lorsque les pertes sont par absorption. Cependant, dans un second temps, pour les structures les plus atténuées, nous utilisons un gain dont le but est de relever le signal localement dans une fenêtre glissante en temps et en distance.

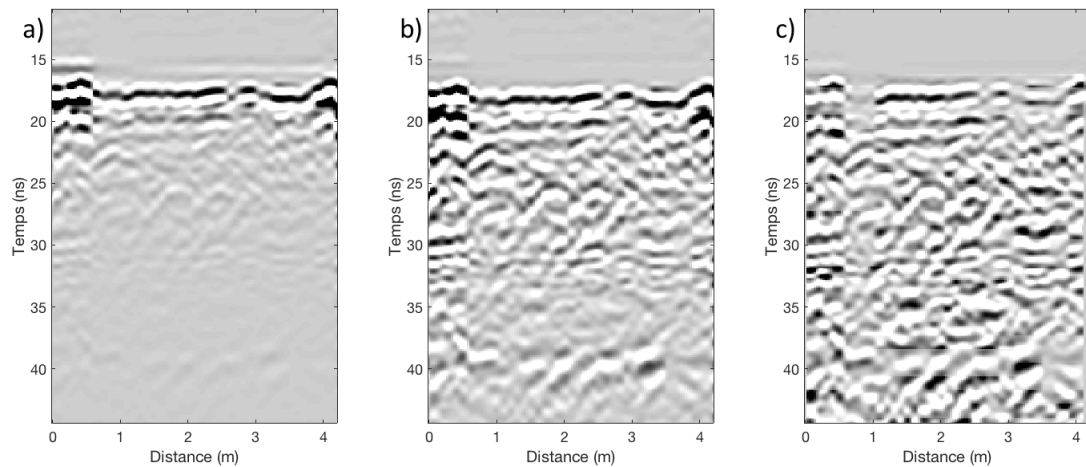


FIGURE 3.13 – Comparaison des méthodes d’application de gain sur un radargramme acquis par WISDOM. a) sans gain, b) avec gain exponentiel, c) gain appliqué sur une fenêtre glissante

La Figure 3.13 présente un radargramme traité par les deux types de gains. Le radargramme traité par un gain exponentiel permet de rehausser le signal en profondeur. Sur cet exemple, le gain permet d’identifier une interface à 40 ns ce qui correspond ici à une profondeur de 1 m 40. Le radargramme traité avec un gain local fait apparaître des formes hyperboliques supplémentaires. Cependant il est plus difficile de distinguer l’interface à 1 m 40 de profondeur du reste du radargramme. La plus-value de ce gain dépend de la taille de la fenêtre glissante utilisée ; il peut être particulièrement utile pour des milieux stratifiés. Néanmoins, il efface l’information apportée par l’amplitude et doit donc être utilisé avec précaution.

3.1.10 Conclusion

Le traitement des données peut être résumé par le diagramme de la Figure 3.33. Les données dans le domaine fréquentiel sont d’abord pondérées par une fenêtre d’apodisation afin de diminuer l’amplitude des lobes secondaires et complétées par des zéros. Ces données sont ensuite converties dans le domaine temporel par une transformée de Fourier inverse. Une moyenne glissante est par la suite retirée afin d’atténuer les réflexions dues au *ringing*. Une interpolation en temps et selon l’axe du déplacement du radar permet de rendre le radargramme lisible et d’en faciliter l’interprétation. Enfin, un gain est appliqué pour rehausser le signal venant des profondeurs du sous-sol. En fonction du sous-sol sondé, des variantes à ce traitement de base peuvent être utilisées comme l’utilisation de l’analyse en composante principale ou la décomposition en valeur singulière afin de retirer le *ringing* et les réflexions multiples sur la surface. Ceci sera l’objet du chapitre suivant.

3.2 Méthodes de réduction des réflexions parasites appliquées aux données du GPR WISDOM

3.2.1 Position du problème

La deuxième partie de ce chapitre a pour objectif de proposer un post-traitement des données WISDOM capable d'atténuer les réflexions parasites mentionnées dans la section 3.1.7 tout en conservant un maximum d'informations sur la structure du sous-sol. Dans la première partie de ce chapitre nous avons apporté une première solution en retirant une moyenne calculée sur tout le radargramme. Cette solution de première intention permet d'obtenir un radargramme interprétable en supprimant les réponses constantes (en retard et en amplitude). Efficace et peu coûteuse en temps de calcul elle ne supprime cependant pas complètement les réflexions parasites. Pour cela, nous devons mettre en place des solutions qui prennent en compte les caractéristiques propres et les origines de ces réflexions. Sur la Figure 3.14 nous avons représenté les sources potentielles de ces réflexions indésirables.

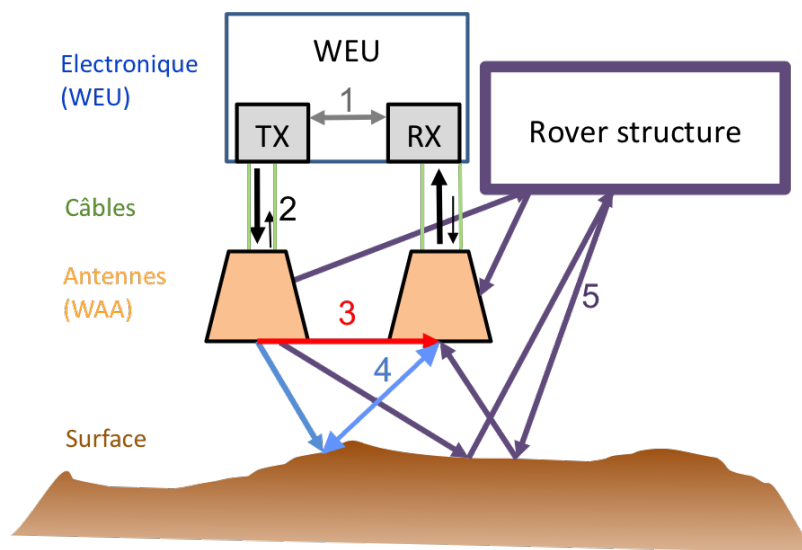


FIGURE 3.14 – Schéma représentant les origines possibles des réflexions parasites : 1) couplage interne de l'électronique, 2) réflexions internes dans l'instrument (*ringing*), 3) couplage direct entre les antennes, 4) réflexions multiples entre les antennes et la surface, 5) réflexions entre les antennes, le corps du Rover et la surface (*clutter*)

Ces sources n'ont pas toutes la même nature, nous pouvons en effet les classer en deux groupes : les réflexions parasites internes (sources n°1 et 2) parfois qualifiées de *ringing* et les réflexions parasites externes parfois appelées *clutter* (sources n°3, 4 et 5).

Les réflexions internes proviennent d'un couplage à l'intérieur de l'électronique entre les voies d'émission et de réception (source n°1) ; elles sont amplifiées par l'environnement de l'électronique (la mécanique qui contient l'instrument est un bon réflecteur). Afin de diminuer ces réflexions, un absorbant a été ajouté sur la face interne du capot du boîtier qui contient l'électronique (ce capot fait face à la carte RF). À ces réflexions internes s'ajoutent les réflexions multiples dans l'instrument (source n°2) qui se produisent entre des milieux d'impédances différentes (réflexions aux interfaces électronique/câbles et câbles/antennes).

Les réflexions externes ont autant de sources que de réflecteurs en surface. Nous différencions cependant bien sur les radargrammes de WISDOM, le couplage direct (source n°3) qui provient de l'onde dans l'air, des réflexions multiples (source n°4) entre les antennes et la surface et des réflexions entre le sol et le corps du Rover (source n°5). Plus précisément, la distance entre les antennes, ainsi que la distance entre les antennes et le Rover restent les mêmes d'une mesure à l'autre ; les réflexions parasites provenant des sources n°3 et 5 se manifestent donc par des lignes horizontales sur le radargramme (le

temps d'arrivée de l'écho ainsi que son amplitude sont constants avec la position des antennes). En revanche, les réflexions parasites ayant pour origine des réflexions multiples entre les antennes et la surface se traduisent par plusieurs répétitions de l'écho de sol (dont le temps d'arrivée est variable en fonction de la topographie, sauf si le sol est parfaitement lisse et homogène) sur le radargramme. Les stratégies pour retirer ces réflexions parasites peuvent donc différer, d'où l'importance de bien identifier leur source et d'y apporter une réponse spécifique.

Dans la littérature, on désigne souvent par les termes *ringing* les réflexions internes et *clutter* les réflexions indésirables provenant de l'environnement (corps du Rover et réflecteurs en surface). Il est important de préciser que l'écho de sol n'est bien évidemment pas un écho parasite ; il donne une information sur la nature du sol (rugosité, composition) et nous verrons comment l'exploiter dans le chapitre 5 dédié à son étude. Ses multiples réflexions peuvent cependant masquer de l'information et sont, bien que provenant indirectement de la surface, considérés comme parasites.

Les réflexions parasites affectent les mesures de tous les radars à pénétration de sol mais leurs origines varient avec l'instrument et les configurations de mesures. Les antennes de WISDOM présentent la particularité de se situer à 38 cm du sol (Chapitre 2). Cette singularité permet une étude approfondie de l'écho de surface mais est aussi source de réflexions parasites. De plus, la conception de l'électronique a été dictée par les contraintes d'une mission spatiale et de l'environnement martien : l'électronique doit être compacte et les matériaux doivent faire partie des matériaux autorisés pour ce type de missions. Cela restreint le choix d'absorbants radio-fréquence et limite leurs épaisseurs, ainsi que le recours à des solutions techniques impliquant une modification du design et par extension de la taille de l'électronique (l'isolation des voies émettrices et réceptrices au sein de l'électronique, par exemple, demanderait un volume du boîtier plus important).

Nous devons donc mettre en place des solutions de réduction des réflexions parasites dans la chaîne de traitement des données de WISDOM. Ces méthodes ont été développées pour le prototype de WISDOM et testées sur des données acquises lors de campagnes de mesures (Chapitre 2). Dans ce contexte, la source n°5 correspond donc aux réflexions entre les antennes, le corps du chariot et la surface. Les méthodes mises en place pourront aisément être incluses dans la chaîne de traitement des données du modèle de vol de WISDOM (PFM). Elles sont décrites ci-après et s'appuient sur l'étude spécifique de l'écho de sol et du couplage direct (section 3.3.1) ainsi que sur la décomposition en valeurs singulières des radargrammes (section 3.4). Nous prendrons soin d'évaluer l'apport de chacune de ces techniques ainsi que leurs potentiels inconvénients.

3.2.2 Premier traitement

Dans ce paragraphe nous proposons un premier traitement destiné à supprimer une partie des réflexions parasites.

Nous avons identifié plusieurs sources de parasites, notamment des signaux provenant du couplage interne de l'électronique (source n°1) et du couplage entre antennes (source n°3). Regardons séparément l'influence de ces signaux sur la mesure. Pour ce faire, des mesures sur charges et des mesures en espace libre ont été effectuées. Les mesures sur charges sont des mesures sans antenne ; les charges (appelées aussi bouchons) de 50Ω permettent de ne pas laisser des circuits ouverts et par conséquent évitent une interface électronique/air qui engendrerait une forte réflexion dans la chaîne d'émission. Ces mesures permettent d'isoler le couplage interne de l'électronique alors que les mesures en espace libre permettent de visualiser aussi les contributions du couplage entre antennes. La Figure 3.15a montre en dB les amplitudes du couplage de l'électronique (courbe bleue), du couplage entre les antennes (courbe verte) et d'un profil acquis sur le "Mars Yard" du LATMOS (courbe rouge).

Le couplage interne et le couplage entre les antennes ne présentent aucun intérêt pour l'interprétation scientifique des radargrammes (même si en toute rigueur, on note une faible variation du couplage direct avec la nature du milieu). Par conséquent, il est important de supprimer ces contributions. La Figure 3.15a montre que le niveau de la réponse de l'électronique (couplage interne) est bien plus faible que la mesure sur sol ; l'écart en amplitude est supérieur à 5 dB à partir d'un temps de propagation de 12 ns. Cet écart dépend des atténuateurs utilisés. En effet, le couplage interne de l'électronique ne passe

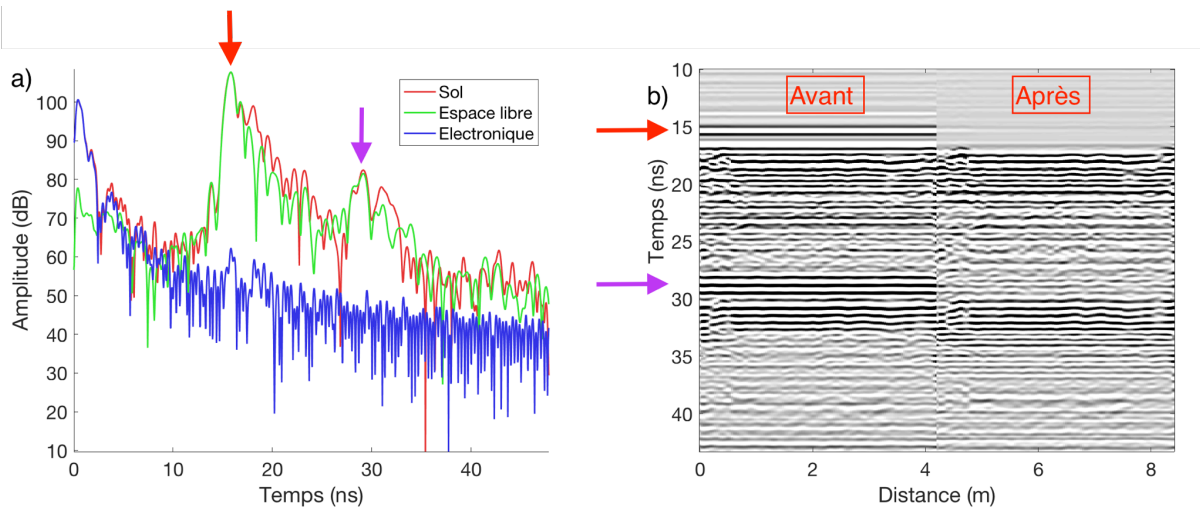


FIGURE 3.15 – a) Amplitude en dB des contributions à la mesure, b) Radargrammes obtenus sur le terrain d'expérimentation "Mars yard" avant et après avoir soustrait la mesure en espace libre

pas par les atténuateurs d'émission et de réception contrairement à la mesure ; l'amplitude du couplage interne (source n°1) est donc toujours la même. La mesure sur sol à été réalisée (Figure 3.15a) avec un total de 51 dB d'atténuation, le maximum d'atténuation possible étant de 62 dB. Dans un cas où nous devrions utiliser une atténuation maximum, le couplage de l'électronique pourrait interférer avec la réponse du sous-sol à partir d'un temps de propagation de 35 ns. La contribution de l'électronique n'interfère donc pas ici avec la réponse du sol qui commence à 17.5 ns (pour une distance antenne-sol de 38 cm). Bien entendu, ces conclusions préliminaires dépendent de la nature du sol (diffusion et atténuation dans le sous-sol) ; elles nous permettent néanmoins d'évaluer l'importance du couplage de l'électronique dans la perturbation de la mesure. Le couplage de l'électronique interfère avec les mesures uniquement dans un cas où une atténuation maximum est utilisée (ce qui dans la pratique est rarement le cas et n'arrive que sur des sols très réfléchissants) et, même dans cette configuration, la réponse du premier mètre du sous-sol n'est pas parasitée.

Au contraire de la mesure de l'électronique, la mesure en espace libre atteint un niveau proche et même supérieur par endroits à l'amplitude de la mesure sur sol. Cela signifie que l'amplitude du couplage entre antennes et de ses répétitions dans la chaîne d'acquisition interfèrent avec la réponse du sous-sol. Nous remarquons une répétition du couplage direct (flèche violette, Figure 3.15) retardée de 13.45 ns et atténuée de 26.2 dB par rapport au couplage direct (flèche rouge, Figure 3.15).

La première stratégie envisagée est de retirer ces contributions indésirables en soustrayant aux données brutes la mesure acquise en espace libre (Figure 3.15b) ainsi que la mesure du couplage de l'électronique. Cette première tentative permet d'efficacement retirer le couplage direct, ce qui aura son importance dans la détection et l'analyse de l'écho de surface. Nous remarquons aussi que les réflexions multiples du couplage direct sont proprement retirées du radargramme traité. Il reste cependant de nombreux traits horizontaux dont la provenance n'est pas déterminée. Cette approche ne permet donc pas de complètement retirer les réflexions parasites et de rendre le radargramme interprétable.

L'analyse du radargramme brut (Figure 3.16b) montre, comme expliqué précédemment, une répétition du couplage direct (en rouge) et de l'écho de surface (en bleu) qui intervient avec environ 13.45 ns de retard. Cette répétition ne concerne donc pas seulement le couplage direct (source n°1) mais est en réalité une répétition de l'ensemble du radargramme. Cela constitue une nouvelle source de réflexions parasites (source n°6). C'est bien tout le radargramme qui est répété avec un décalage de 13.45 ns, même si les répétitions du couplage direct et de la surface sont les plus visibles car leurs amplitudes sont bien plus élevées que la réponse du sous-sol.

L'origine de cette répétition n'est pas certaine ; elle peut-être due à des non-linéarités dans la carte radio-fréquence ou à une re-émission d'une partie du signal reçu. Le délai de 13.45 ns représente

un parcours de 2 mètres dans l'air et de 1.4 mètres dans l'électronique ($\epsilon'_r \approx 2$). Ces longueurs ne permettent pas d'identifier avec certitude l'origine de ces réflexions.

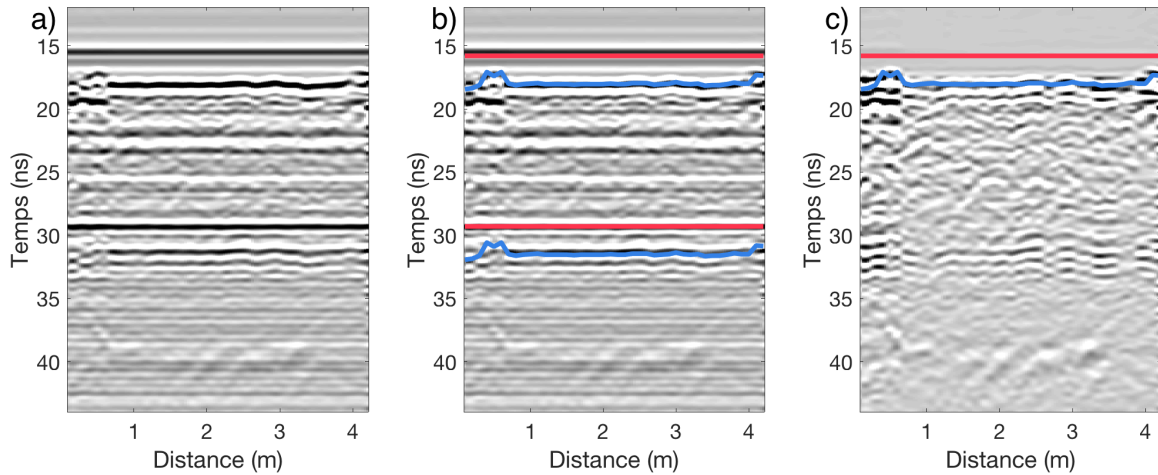


FIGURE 3.16 – Radargramme obtenu sur le terrain d'expérimentation "Mars yard", a) radargramme brut, b) radargramme brut avec, en rouge, le couplage direct et, en bleu, l'écho de surface et leurs répétitions, c) radargramme traité par soustraction de la moyenne.

Dans la chaîne de traitement de données nous atténuons généralement les réflexions parasites en retirant une moyenne calculée sur tous les A-scans (ou profils) du radargramme. Cette solution permet de retirer les lignes horizontales dont notamment les parasites provenant des sources n°1, 2, 3. Nous devons garder à l'esprit que cette méthode retire aussi les réflexions sur des structures horizontales en sous-sol. De plus, la surface n'étant pas parfaitement lisse, sa réponse radar n'est pas horizontale (constante en fonction de la position de la mesure). Par conséquent la réduction des parasites par soustraction de la moyenne ne retire pas complètement les réflexions indésirables n°4, 5 et 6; nous voyons en particulier apparaître un résidu parasitique à des temps de propagation compris entre 30 et 35 ns (Figure 3.16c); ce résidu masque une partie du signal utile.

Nous allons donc évaluer l'efficacité de plusieurs méthodes dans le retrait de ces réflexions parasites, notamment celles provenant des répétitions d'une partie du radargramme (source n°6).

3.2.3 Filtrage en fréquence

Les réflexions parasites décrites précédemment masquent une partie du signal; regardons si nous retrouvons ces réflexions après un filtrage en fréquence. Pour cela nous avons filtré les hautes et basses fréquences du radargramme de la Figure 3.17a puis nous avons retiré une moyenne calculée sur tous les profils (A-scans).

Le filtrage en basses fréquences (Figure 3.17b) permet de complètement retirer les réflexions parasites; nous identifions alors aisément une hyperbole (rectangle rouge) auparavant masquée par le résidu des réflexions parasites. L'identification de cette hyperbole sera donc un critère pour évaluer les méthodes d'atténuation des réflexions parasites (source n°6). Les basses fréquences interagissent moins avec la surface et pénètrent bien plus profondément que les hautes fréquences. Cela explique pourquoi nous voyons sur le radargramme traité avec un filtre passe-haut des répétitions de l'écho de sol et aussi pourquoi elles sont moins présentes sur le radargramme en basses fréquences. En basses fréquences la répétition du radargramme est toujours présente (source n°6) elle est cependant plus efficacement retirée par la moyenne. Dans cette sous-bande, la bande de fréquences est réduite, cela entraîne un élargissement des échos; la variation du temps d'arrivée de l'écho de sol reste la même qu'avec toutes les bandes de fréquences, cependant elle devient petite devant la largeur de l'écho de sol. En première approximation le temps d'arrivée de l'écho de sol devient donc constant et est plus efficacement retiré par la soustraction d'une moyenne.

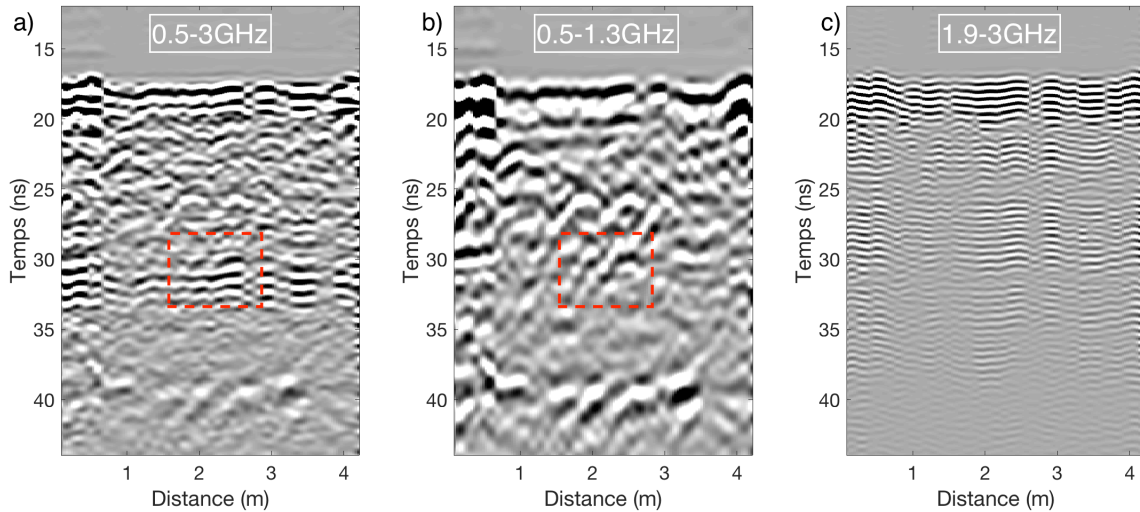


FIGURE 3.17 – Radargramme WISDOM après soustraction de la moyenne, a) avec toutes les fréquences, b) avec les basses fréquences, c) avec les hautes fréquences

Bien que le filtrage, combiné à la soustraction de la moyenne du radargramme, permette de supprimer les réflexions parasites (source n°6) et de révéler des structures masquées, cette technique entraîne une dégradation de la résolution. Nous allons donc explorer d'autres méthodes de retrait des réflexions parasites.

3.2.4 Moyenne glissante

La méthode de soustraction par une moyenne sur tous les A-scans ne peut retirer correctement que des signaux constants en amplitude et en temps d'arrivée (sources n°1, 2, 3, 5). Elle ne peut donc pas retirer efficacement les répétitions de l'écho de la surface (sources n°4 et 6) à partir du moment où celle-ci n'est pas parfaitement lisse et homogène. Cela n'est pas satisfaisant car ces réflexions parasites rendent le radar "aveugle" sur une fenêtre de 3 ns ce qui correspond à 22.5 cm dans un milieu de constante diélectrique égale à 4! Pour tenir compte de la surface mais aussi des variations locales d'amplitude et de temps d'arrivée de l'écho, nous pouvons retirer une moyenne glissante calculée sur N points.

La Figure 3.18 montre le radargramme (de taille $N_f = 125$ ce qui correspond au nombre de colonnes du B-scan après interpolation et représente 4.2 m) de la Figure 3.15a où une moyenne glissante calculée sur N ($N = 10, 25, 50, 75, 100$ et 125) points a été retirée.

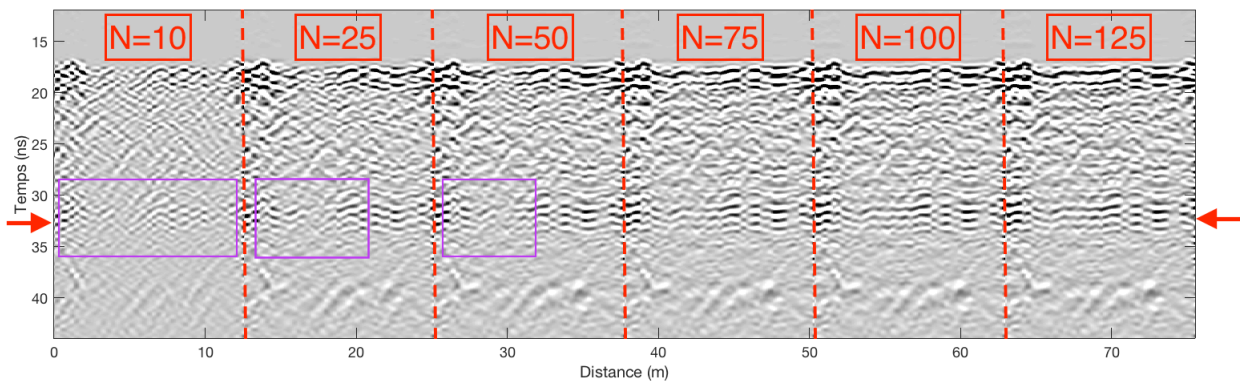


FIGURE 3.18 – Radargrammes WISDOM après soustraction d'une moyenne glissante calculée pour différentes valeurs de N

Sur les premiers radargrammes ($N = 10, 25$ et 50), nous remarquons que la réflexion parasite

(source n°6) est atténuée (cadre violet). Pour $N = 10$ nous voyons plusieurs hyperboles à l'endroit où nous nous attendons à en voir une (identifiée à l'aide d'un filtrage basses fréquences, Figure 3.17b). Malgré une réduction des réflexions parasites, l'aspect général du radargramme est altéré. À partir de $N = 75$ points (soit 2.5 m) les radargrammes sont semblables et nous perdons le bénéfice de l'utilisation de la moyenne glissante par rapport à une moyenne classique. L'utilisation d'une moyenne glissante calculée sur un petit nombre de points permet d'atténuer la réflexion parasite provenant indirectement de la surface (sources n° 4 et 6). Cette méthode ne permet néanmoins pas d'atténuer suffisamment ces réflexions parasites pour voir ce qu'elles dissimulent. De plus, pour un trop petit nombre de points, elle entraîne une dégradation de l'aspect général du radargramme ($N = 10$).

Les méthodes par soustraction d'une moyenne glissante (des variantes existent comme l'utilisation d'une médiane) sont simples et rapides à mettre en place. Elles sont donc préconisées dans le cadre d'un traitement rapide et automatisé, destiné à la prise de décision (pour guider le foret ou bien même le Rover). Elles sont cependant limitées dans leur capacité à atténuer les réflexions parasites (sources n°4 et 6).

Dans un second temps il faudra faire appel à des méthodes plus sophistiquées mais aussi plus gourmandes en ressources et en temps de calcul pour éliminer les réflexions parasites dues aux imperfections du radar WISDOM.

3.3 Méthodes par identification

Il s'agit ici de mettre en place des méthodes spécifiques pour l'atténuation des réflexions parasites, en s'appuyant sur la compréhension de leurs origines. Des méthodes ont été développées notamment pour la suppression des réflexions parasites provenant des trajets multiples entre la surface et les antennes (source n°4) et la suppression de la répétition du radargramme (source n°6). Dans cette partie nous présentons deux méthodes qui s'appuient sur l'identification d'un élément du radargramme (ex : l'écho de la surface, la répétition d'une partie du radargramme) et sa soustraction avec ses répétitions.

3.3.1 Réduction des parasites par analyse de l'écho de sol (AES)

Les méthodes de réduction des réflexions parasites par soustraction de la moyenne trouvent leurs limites dans l'élimination des répétitions de l'écho de sol, dont l'amplitude et le temps de retard varient en fonction de la position de la mesure. Bien que l'utilisation d'une moyenne glissante soit efficace, elle dégrade l'aspect général du radargramme pour un petit nombre de points. Nous proposons ici une méthode de réduction des réflexions parasites reposant sur l'analyse spécifique de l'écho de sol (AES) ainsi que de ses multiples réflexions afin de soustraire les répétitions de l'écho de sol au radargramme.

Principe de la méthode

La méthode s'appuie sur la détection automatique de l'écho de sol. Une fois l'écho de sol, sur le radargramme, identifié et caractérisé, un coefficient de corrélation est calculé entre l'écho de sol et une fenêtre glissante parcourant de haut en bas le radargramme. Le coefficient de corrélation donne les positions des réflexions multiples de l'écho de sol. Il suffit ensuite de soustraire l'écho aux positions identifiées. La même opération est effectuée pour les réflexions multiples du couplage direct.

Application de la méthode sur les données WISDOM

Nous avons appliqué cette méthode sur le radargramme acquis sur le "Mars Yard". La Figure 3.19 montre le radargramme traité par soustraction de la moyenne (M) et le radargramme traité par l'analyse du couplage direct et de l'écho de sol (AES). Au niveau de la répétition du couplage direct et de l'écho de sol (flèche rouge), nous remarquons que la méthode par soustraction de l'écho de sol l'efface plus efficacement ; le niveau du signal est plus faible à cet endroit. De plus, la méthode révèle

clairement l'hyperbole masquée par les parasites ainsi que des structures proches de la surface. Nous voyons apparaître une hyperbole ainsi qu'une petite structure qui ne suit pas la surface (flèches vertes).

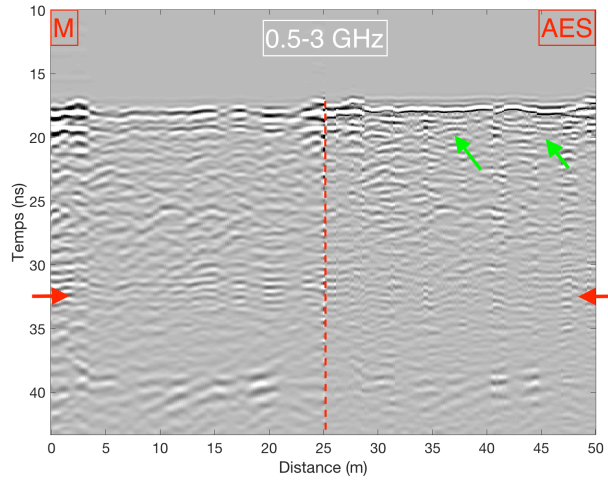


FIGURE 3.19 – Radargramme obtenu sur le terrain d'expérimentation "Mars Yard" traité par soustraction d'une moyenne (gauche), traité par analyse de l'écho de sol (droite).

La réduction des réflexions parasite n'est cependant pas parfaite car des résidus de la répétition de l'écho de sol persistent. Nous devons donc nous pencher sur des méthodes plus complexes.

3.3.2 Méthode de la Soustraction par le Radargramme Décalé par translation temporelle (SRD)

Principe de la méthode

Nous avons mis en évidence en section 3.2.2 une répétition du radargramme qui intervient après 13.45 ns. Cette estimation a été faite à partir de la mesure en espace libre (flèches rouge et violette, Figure 3.15). Il est possible que ces répétitions commencent plus tôt (i.e, avant le couplage direct) mais cela n'a pas d'incidence sur le résultat final car les parasites présents avant le couplage direct sont constants en temps d'arrivée et en amplitude, ils se traduisent donc par des lignes horizontales facilement retirables par une soustraction de la moyenne. La méthode de SRD consiste à décaler le motif répété du temps de retard constaté ($t_d = 13.45 \text{ ns}$) entre le début du radargramme et sa répétition. Nous utilisons pour cela la propriété de translation en temps des transformées de Fourier. Le motif à soustraire est ensuite pondéré par un coefficient d'atténuation (κ_d) calculé à partir de la mesure en espace libre (coefficient calculé entre le couplage direct et sa répétition). Sur la Figure 3.15 nous avons estimé un écart de 26.2 dB entre le couplage direct et sa répétition d'où : $\kappa_d = 10^{-\frac{26.2}{20}}$. Nous soustrayons le motif au radargramme brut puis une moyenne glissante est retirée. L'opération est à effectuer sur chaque A-Scan selon la formule suivante :

$$Y_{ij}(t) = X_{ij}(t) - \kappa_d.TF^{-1}[X_{ij}(f).e^{-2i\pi ft_d}] \quad (3.8)$$

Pour l'utilisation de cette méthode de réduction des parasites provenant de la source n°6, nous avons combiné la soustraction d'un motif retardé et atténué et la soustraction d'une moyenne glissante (calculée sur un nombre de points N qui représente 1.7 m) en accord avec les conclusions de la section 3.2.4.

Application de la méthode sur les données WISDOM

Regardons ce que donne cette nouvelle méthode sur données WISDOM. Nous l'appliquons sur les données acquises sur le "Mars Yard" dans deux configurations (Figure 3.20). D'un côté nous comparons

les données traitées par soustraction d'une moyenne calculée sur tous les radargrammes (M) et par SRD sur toute la bande de fréquences ($B_f = 2.5$ GHz), de l'autre nous comparons les données traitées par soustraction d'une moyenne glissante (MG, $N = 50$) et par SRD après un filtrage en fréquence ($B_f = 2$ GHz).

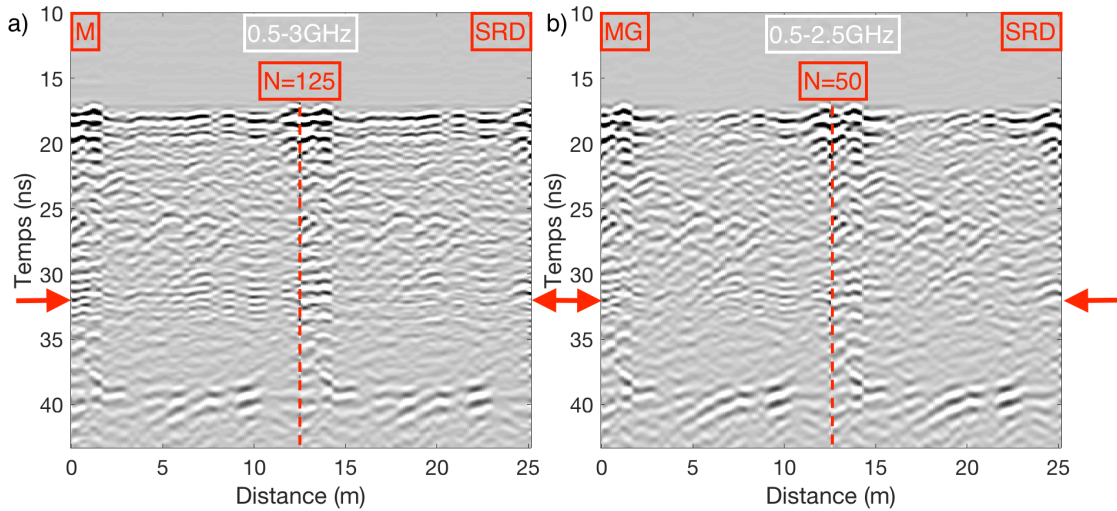


FIGURE 3.20 – Radargramme obtenu du terrain d'expérimentation "Mars Yard" : a) Comparaison des méthodes de soustraction par la moyenne (M) et de SRD sur toute la bande de fréquences, b) Comparaison des méthodes de soustraction par une moyenne glissante (MG) et de SRD avec filtrage en fréquence

En considérant toute bande de fréquences, et après soustraction d'une moyenne (Figure 3.20a), la réflexion parasite autour de 30 ns (flèches rouges) est toujours présente. Elle est cependant mieux atténuée par la méthode SRD que par soustraction de la moyenne. En filtrant une partie des hautes fréquences et en utilisant une moyenne glissante (Figure 3.20b) nous remarquons qu'avec la méthode SRD, la réflexion parasite est entièrement retirée. Nous voyons clairement apparaître les deux hyperboles identifiées en section 3.2.3. En utilisant cette méthode, nous enlevons donc efficacement la réflexion parasite provenant de la source n°6. Pour obtenir ce résultat nous avons dû faire des compromis entre la résolution et le nombre de points à utiliser pour le calcul de la moyenne glissante. Son faible coût en calcul et ses excellents résultats en font une méthode à intégrer par défaut à la chaîne de traitement.

3.4 Décomposition en valeurs singulières (SVD)

Nous avons vu plusieurs méthodes de réduction des parasites qui donnent d'excellents résultats sur les données de WISDOM. Dans la littérature, des méthodes à sous-espaces permettent d'atténuer les réflexions parasites comme la décomposition en valeurs singulières ou SVD (*Singular Value Decomposition*) [Kumlu and Erer, 2017]. Cette méthode est utilisée pour retirer les réflexions parasites et se montre particulièrement efficace sur des données expérimentales provenant de radars à sauts de fréquences : dans [Tjora et al., 2004] la SVD est utilisée pour supprimer les réflexions provenant de multiples de la surface (source n°4) afin de dévoiler un sous-sol naturel avec des structures et dans [Abujarad et al., 2005] la SVD est utilisée pour retirer des réflexions parasites afin d'améliorer la détection de mines enfouies. Dans cette partie nous détaillons la méthode ainsi que son application sur les données de WISDOM. La SVD consiste à décomposer une matrice selon la formule suivante [Verma et al., 2009] :

$$X = U\Sigma V^T \quad (3.9)$$

ce qui est similaire à une décomposition en valeurs propres étendue à des matrices quelconques (non carrées et inversibles). U ($M \times M$) désigne la matrice formée par les vecteurs singuliers gauches U_j et V ($N \times N$) la matrice formée par les vecteurs singuliers droits V_j . Σ ($M \times N$) contient le long de sa diagonale les valeurs singulières notées $\sigma_i : (diag(\Sigma) = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N))$. Ces valeurs singulières sont ordonnées de la plus grande à la plus petite. Les vecteurs singuliers gauches et droits sont respectivement les vecteurs propres du produit XX^T et du produit $X^T X$ [Cagnoli and Ulrych, 2001].

Soit X ($M \times N$) un radargramme avec M échantillons en temps et N mesures. En utilisant une décomposition en valeurs singulières (SVD), le radargramme peut être décomposé comme la somme du produit des valeurs singulières σ_i et des vecteurs singuliers gauches et droites (respectivement U et V). Dans la suite la quantité $\sigma_j U_j V_j^T$ est appelée image propre correspondant à la j ème valeur singulière.

$$X = \sum_{j=1}^N \sigma_j U_j V_j^T \quad (3.10)$$

L'opération permettant la réduction des parasites consiste à décomposer selon (3.9) le radargramme X ($M \times N$) puis à le recomposer en éliminant certaines valeurs singulières. Les parasites correspondent aux premières valeurs singulières, celles qui sont les plus élevées. Le reste des valeurs correspond à la somme des composantes provenant du signal et du bruit. La méthode se résume donc à utiliser un filtre passe-haut sur les valeurs singulières [Kim et al., 2007] [Cagnoli and Ulrych, 2001].

3.4.1 Décomposition d'une image par SVD

Afin d'évaluer l'efficacité des traitements par décomposition de l'image, nous allons les tester sur une photographie. Il est, en effet, difficile de déterminer correctement les effets de ce type de traitements sur des radargrammes. Les radargrammes sont des images contaminées par des parasites, par conséquent il nous est impossible d'avoir accès à l'image décontaminée et donc d'évaluer les avantages et inconvénients du traitement par SVD. Dans une première approche nous travaillerons sur la photographie d'un papillon prise lors de la campagne de mesure dans le sud de la France (Figure 3.21a).

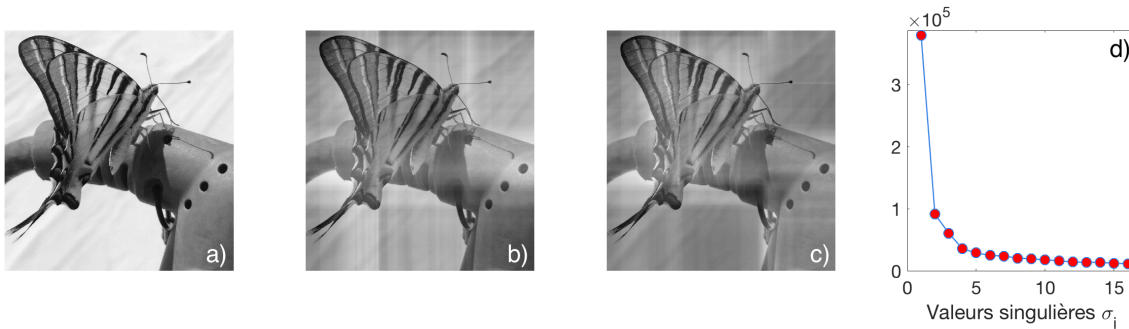


FIGURE 3.21 – Décomposition d'une photographie par décomposition en valeurs singulières : a) Image originale (Crédit : Yann Hervé), b) Image reconstituée après suppression de la première valeur singulière, c) Image reconstituée après suppression des deux premières valeurs singulières, d) Amplitudes des 16 premières valeurs singulières

La Figure 3.21 montre la décomposition en valeurs singulières de la photographie. Sur les photos b) et c) les premières images propres correspondant aux premières valeurs singulières ont été retirées. Dans cet exemple la décomposition altère l'image d'origine.

La décomposition en valeur singulière trouve en effet une application dans la compression d'image [Kahu and Rahate, 2013]. En utilisant un filtre passe-haut sur les valeurs singulières, il est possible de supprimer les valeurs singulières les plus faibles et de diminuer la taille de l'image. Nous ne nous intéresserons dans ce manuscrit à l'utilisation de la SVD que pour "débruiter" les données, notamment pour retirer les réflexions parasites. Afin de tester la SVD, nous avons bruité avec un bruit blanc

gaussien centré la photographie d'origine puis retiré les valeurs singulières. Ainsi donc pouvons-nous comparer l'image débruitée à l'image d'origine pour évaluer la pertinence de l'utilisation de ce type de traitement.

3.4.2 Décomposition d'une image "bruitée" par SVD

Cas d'un signal constant en temps d'arrivée

Dans un premier temps nous avons contaminé l'image d'origine par un sinus amorti. L'objectif ici est de reproduire l'effet des réflexions multiples provenant de la répétition du couplage direct. Le couplage est constant et ses multiples sont amortis en fonction du temps de propagation.

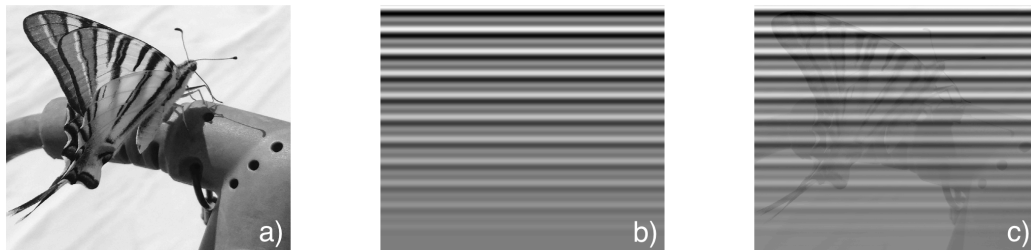


FIGURE 3.22 – a) Image originale, b) Sinus amorti, c) Image bruitée par un sinus amorti

La Figure 3.22c montre l'image d'origine bruitée par un sinus amorti. Après avoir fait une décomposition en valeur singulière de l'image 3.22c), nous appliquons un filtre passe-bas sur les valeurs singulières. En d'autres termes nous supprimons la plus grande valeur singulière pour obtenir la Figure 3.23b). Cette figure débruitée par SVD est néanmoins différente de l'image originale, les niveaux de gris sont altérés et quelques traits horizontaux persistent. La Figure 3.23c) montre le résidu, cette image correspond à la première image propre ; image construite à partir de la première valeur singulière σ_1 . Ce résidu correspond en partie au bruit ajouté (il reste en effet quelques traits horizontaux sur la Figure 3.23b).

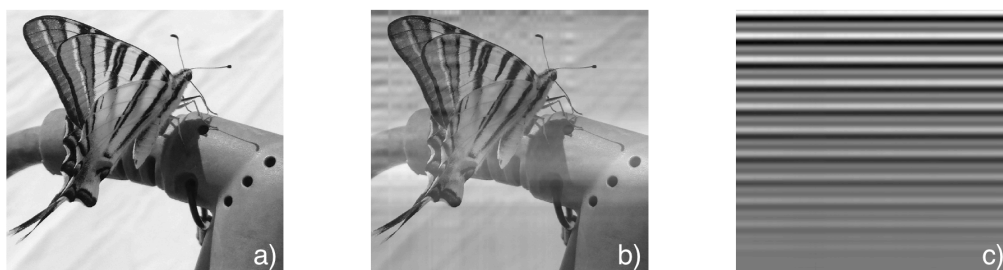


FIGURE 3.23 – a) Image originale, b) Image débruitée par SVD par suppression de la première valeur singulière, c) Résidus

Le coefficient de corrélation (ρ) entre l'image originale et l'image débruitée par retrait des valeurs singulières est maximal ($\rho_{SVD} = 0.86$) après filtrage de la première valeur singulière. La suppression des valeurs suivantes entraîne une dégradation progressive de l'image qui se traduit par la diminution du coefficient de corrélation. Il est intéressant de noter que le coefficient de corrélation après retrait de la première valeur singulière (et pour les valeurs singulières suivantes) est pour l'image originale très proche de celui pour l'image bruitée.

La Figure 3.24b) montre le coefficient de corrélation entre l'image originale et l'image débruitée par la soustraction d'une moyenne glissante calculée sur N points ainsi que le coefficient de corrélation entre l'image originale et l'image originale traitée par la soustraction d'une moyenne glissante calculée sur N points. Plus le nombre de points N est élevé, plus le coefficient de corrélation entre l'image bruitée et

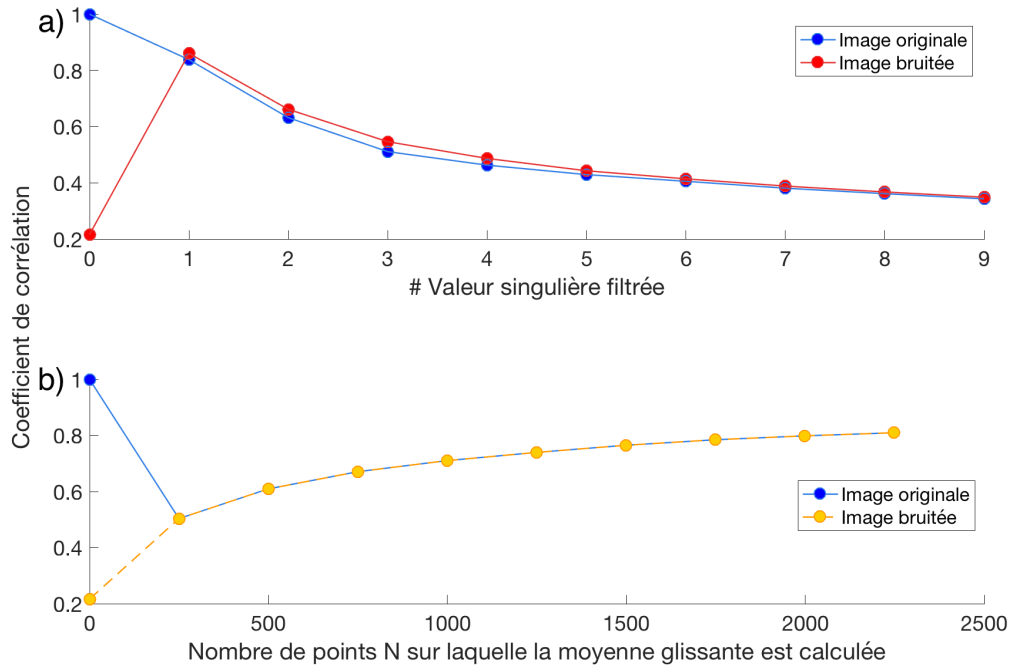


FIGURE 3.24 – a) Coefficient de corrélation entre l’image originale et l’image débruitée par filtrage des valeurs singulières, b) Coefficient de corrélation entre l’image originale et l’image débruitée par soustraction d’une moyenne glissante.

l’image originale est grand pour atteindre $\rho_{moy} = 0.8$. Ce coefficient de corrélation est inférieur à celui maximal calculé pour une image débruitée par filtrage des valeurs singulières ($\rho_{SVD} > \rho_{moy}$). Pour un petit nombre de points le radargramme est dégradé. Comme pour la SVD, une fois la technique utilisée ($N > 0$ et $n_i > 0$ où n_i est le nombre de valeurs singulières retirées), le coefficient de corrélation tend vers la même valeur pour l’image originale et l’image bruitée.

Par comparaison des coefficients de corrélation entre l’image bruitée traitée par filtrage des valeurs singulières mais aussi traitée par soustraction de moyenne glissante avec l’image non bruitée (image originale) sur laquelle ces mêmes traitements ont été appliqués, nous constatons que, malgré la réduction des parasites (sinus amorti), l’image est altérée : le coefficient de corrélation diminue avec la diminution du nombre de points sur laquelle la moyenne glissante est calculée (N) et avec une augmentation du nombre de valeurs singulières retirées. La qualité du débruitage par moyenne glissante ou par filtrage des valeurs singulières va donc dépendre des paramètres n_i et N . À ce stade, en s’appuyant sur le seul coefficient de corrélation nous privilégierons un filtrage restreint aux premières valeurs singulières, et le calcul d’une moyenne glissante sur un grand nombre de points. Ces conclusions préliminaires ne s’imposent que pour des images bruitées par un signal constant. Par rapport à la soustraction d’une moyenne glissante, la décomposition par valeurs singulières semble être une alternative prometteuse.

Cas d’un signal avec parasites variables en temps d’arrivée

Plaçons nous maintenant dans le cas d’un signal parasite non constant en temps d’arrivée. Nous avons contaminé l’image par un signal variable en fonction de sa position sur l’image. L’objectif est de reproduire ici l’effet des réflexions multiples entre les antennes et la surface (source n°4).

La photographie bruitée est ensuite décomposée selon la SVD et reconstituée en supprimant les n_i premières valeurs singulières. Pour $n_i = 15$ (Figure 3.25c) les parasites ne sont pas correctement effacés, nous devons donc retirer un plus grand nombre de valeurs singulières. Pour $n_i = 40$ (Figure 3.25d), les parasites sont davantage atténués. Cependant, les niveaux de gris de l’image sont fortement altérés. Nous remarquons donc sur cet exemple que le filtrage d’un grand nombre de valeurs singulières nous

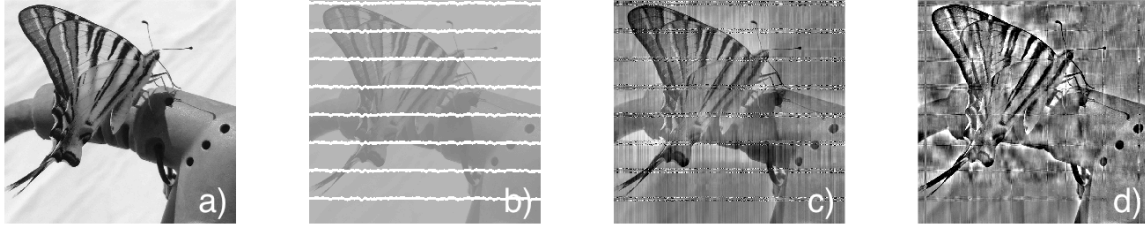


FIGURE 3.25 – a) Image originale, b) Image bruitée c) Image traitée par SVD ($n_i = 15$), d) Image traitée par SVD ($n_i = 40$)

permet d'atténuer les parasites et de retrouver les contours de l'image au détriment d'une altération des niveaux de gris. Or notre objectif est d'utiliser la SVD pour débruiter les données de WISDOM et notamment révéler des structures masquées par des parasites, nous cherchons donc précisément à révéler les contours plutôt qu'à conserver les niveaux du signal sur le radargramme traité. C'est pourquoi nous allons explorer une autre méthode.

3.4.3 Application du filtrage par décomposition en valeurs singulières sur des données simulées

Sur une image bruitée la décomposition en valeurs singulières fonctionne, ce qui valide le principe de la méthode. Afin d'évaluer l'efficacité de cette technique sur des données de radar à pénétration de sol, nous avons, dans un premier temps appliqué la méthode à des données simulées. Nous avons simulé le fonctionnement d'un radar à pénétration de sol à partir du code 3D de simulation électromagnétique TEMSI-FD (Time ElectroMagnetic Simulator - Finite Difference method/Xlim/Limoges). Le milieu modélisé est un sol homogène $\epsilon'_r = 6$ contenant une sphère de permittivité ($\epsilon'_{Sphere} = 8$) enfouie à 40 cm de profondeur (Figure 3.26). Les dimensions du milieu sont de $3\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1.6\text{ m}$, les antennes sont à 38 cm au dessus de la surface, comme le seront celles de WISDOM sur le Rover ExoMars.

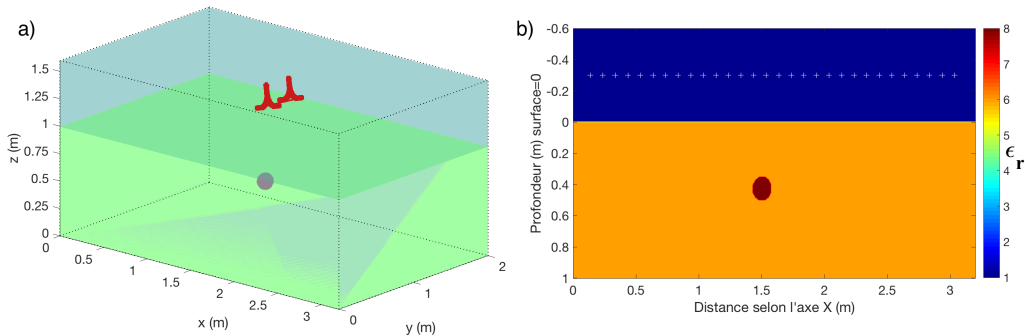


FIGURE 3.26 – Simulation du fonctionnement d'un GPR sous TEMSI-FD : a) Vue 3D de boîte de modélisation montrant les antennes de WISDOM (en rouge) à 38 cm au dessus de la surface (en vert) et une sphère enfouie dans le sol (en bleu), b) Constante diélectrique selon le plan XZ passant par $Y = 1\text{ m}$

Les données synthétiques brutes sont entachées de parasites. Nous constatons, en effet, une succession de traits horizontaux sur le radargramme de la Figure 3.27a). La nature de ce *ringing* est différente de celle de l'instrument WISDOM. Les antennes sont modélisées par le formalisme des fils obliques développé dans [C.Guiffaut, 2010] [Hamadi, 2010] comme une extension des fils de Holland [Holland and Simpson, 1981]. Afin d'éviter le phénomène de réflexion à l'extrémité des fils (*ringing*), des résistances sont ajoutées le long de l'antenne. Ce procédé utilisé par Wu et King [Wu and King, 1965] et Wu et Shen [Wu and Shen, 1967] ne permet cependant pas de totalement supprimer le *ringing*. Le

ringing provient donc ici seulement de réflexions dans l'antenne modélisée ; les réflexions internes de l'électronique de WISDOM ne sont donc pas prises en compte.

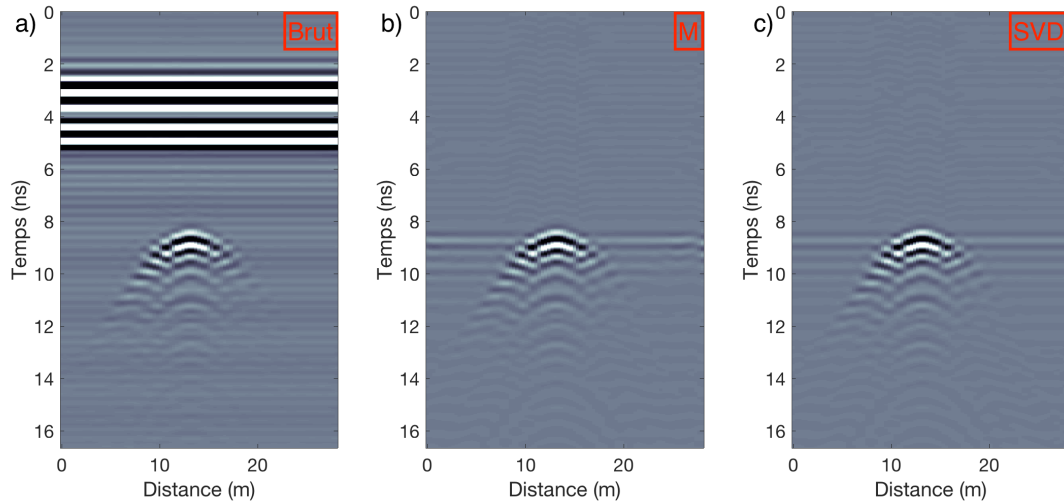


FIGURE 3.27 – Méthodes de réduction du *ringing* appliquées sur données simulées : a) Données synthétiques brutes, b) Données synthétiques traitées par soustraction de la moyenne (M), c) Données traitées par filtrage des valeurs singulières (SVD).

Les Figures 3.27b et 3.27c montrent des radargrammes traités respectivement par soustraction d'une moyenne calculée sur tous les profils radars (A-scans) et par filtrage des valeurs singulières. Seule la première valeur singulière a été supprimée ($j = 1$), le radargramme a donc été reconstitué selon l'équation suivante :

$$Y = \sum_{j=2}^N \sigma_j U_j V_j^T \quad (3.11)$$

Nous constatons que le filtrage des valeurs singulières, tout comme la soustraction de la moyenne, permettent d'atténuer le *ringing*. Sur ces données simulées, nous notons peu de différences entre les deux méthodes, mais pouvons néanmoins valider le procédé de filtrage des valeurs singulières pour l'atténuation du *ringing*. L'étape suivante consistera à valider cette méthode sur des données expérimentales.

3.4.4 Application du filtrage par SVD aux données de WISDOM

L'application de la décomposition en valeurs singulières à une photographie bruitée ainsi que sur des données simulées donne de bons résultats en comparaison d'une moyenne glissante. Nous avons donc appliqué cette méthode sur un radargramme brut acquis sur le "Mars Yard". Comme expliqué plus haut, la méthode consiste à filtrer les plus fortes valeurs singulières puis à reconstituer le radargramme en utilisant les valeurs singulières restantes selon l'Equation (3.11).

La Figure 3.28 montre le radargramme débruité par soustraction d'une moyenne calculée sur l'ensemble du radargramme (Figure 3.28a), le radargramme débruité par filtrage de la première valeur singulière (Figure 3.28b) et le radargramme débruité par le filtrage des deux premières valeurs singulières (Figure 3.28c). La flèche rouge indique le temps d'arrivée de la réflexion parasite de l'ensemble couplage direct et écho de sol.

Sur le radargramme débruité par soustraction de la moyenne nous voyons un résidu qui correspond à la réflexion provenant de l'écho de sol. Cet écho parasite n'est pas correctement retiré car il n'est pas constant (en amplitude et en temps). Nous obtenons un résultat similaire par SVD avec filtrage de la première valeur singulière. En revanche, le radargramme débruité par SVD avec filtrage des deux

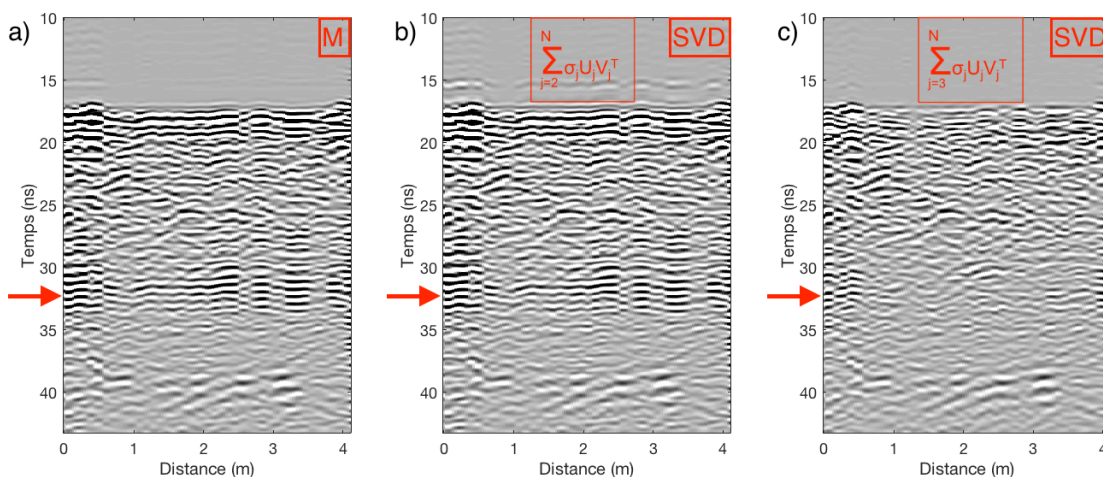


FIGURE 3.28 – Radargramme obtenu sur le "Mars Yard", a) Radargramme débruité par soustraction d'une moyenne, b) Radargramme débruité par SVD après filtrage de la première valeur singulière, c) Radargramme débruité par SVD après filtrage des deux premières valeurs singulières.

premières valeurs singulières ne comporte pas ce résidu ; la réflexion parasite provenant de l'écho de sol est complètement retirée. Nous pouvons d'ailleurs voir apparaître une hyperbole masquée sur le radargramme traité par simple soustraction de la moyenne (voir aussi Figure 3.28a). Cette hyperbole n'est pas un artefact dû à la SVD, elle est aussi détectable après filtrage des hautes fréquences (section 3.2.3). Sa visibilité accrue illustre l'efficacité ainsi que l'utilité de ce type de technique pour le débruitage des radargrammes ; la SVD permet de restaurer une zone qui reste "aveugle" par une simple soustraction de la moyenne.

La méthode fonctionne sur ces données ; regardons maintenant à quoi correspondent les valeurs singulières que nous avons filtrées. Pour ce faire nous allons reconstituer les images propres qui correspondent aux valeurs singulières supprimées, c'est-à-dire aux deux premières valeurs singulières.

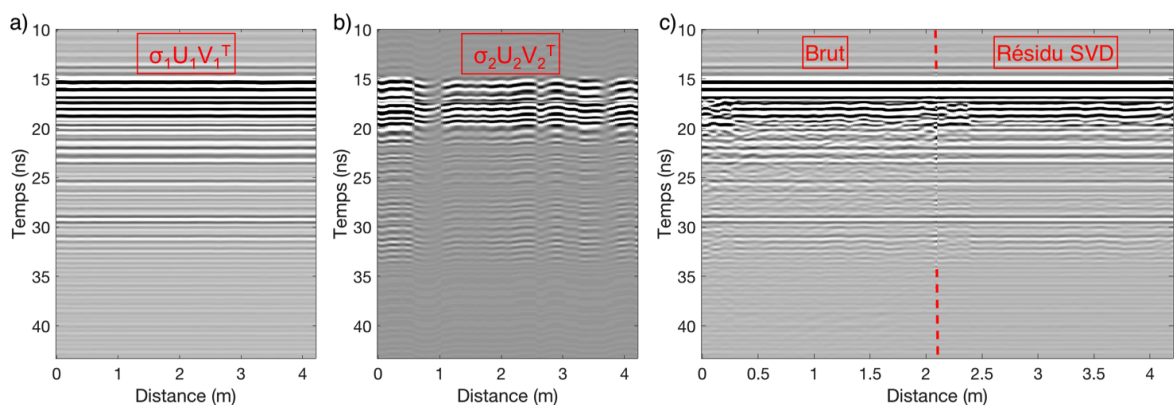


FIGURE 3.29 – Résidu de la méthode de décomposition en valeurs singulières : a) image propre correspondant à la première valeur singulière, b) image propre correspondant à la deuxième valeur singulière, c) comparaison entre le radargramme brut et le résidu (somme des deux premières singulières) obtenu par SVD

La Figure 3.29 montre les images propres reconstituées à partir de la première et de la deuxième valeurs singulières. La première image propre (Figure 3.29a) correspond au couplage direct entre les antennes et à ses multiples. La deuxième image propre (Figure 3.29b) correspond à l'écho sur la surface et à ses réflexions multiples. La somme des deux premières images propres correspond donc à ce que nous avons appelé *ringing*. La Figure 3.29 c) montre côte à côte le radargramme brut et la somme

des deux premières image propres. Nous pouvons y voir la contribution que le filtrage par SVD retire au radargramme brut ; elle correspond bien à des multiples réflexions du couplage direct et de l'écho provenant de la surface.

La décomposition en valeurs singulières du radargramme brut, et plus précisément l'utilisation d'un filtre passe-bas sur les valeurs singulières permet d'atténuer le *ringing*. Nous avons vu que, par rapport aux données simulées, il a suffi de filtrer les deux premières valeurs singulières pour supprimer les réflexions parasites provenant du sol et du couplage direct. En contrepartie d'un temps de calcul plus long, la méthode ne laissant pas de parasites résiduels, est plus efficace que la soustraction d'une moyenne glissante.

Nous avons testé plusieurs méthodes destinées à réduire les parasites sur le radargramme acquis sur le "Mars Yard". La Figure 3.30 montre les radargrammes traités par ces différentes méthodes. La soustraction de la moyenne calculée sur tout le radargramme permet -en comparaison du radargramme brut- d'avoir un radargramme interprétable. Cependant des réflexions parasites persistent, en particulier autour de 30 ns. La soustraction d'une moyenne glissante permet d'atténuer ces parasites résiduels de même que le filtrage des valeurs singulières qui se montre plus efficace et permet de révéler des hyperboles cachées. Les méthodes par identification (AES et SRD) permettent, elles aussi, d'atténuer les parasites résiduels. La SRD est la méthode la plus efficace pour retirer les parasites provenant de la source n°6 en contrepartie d'une légère dégradation de la résolution (due au filtrage en fréquence) alors que l'AES prend l'avantage dans l'atténuation des parasites proches de la surface.

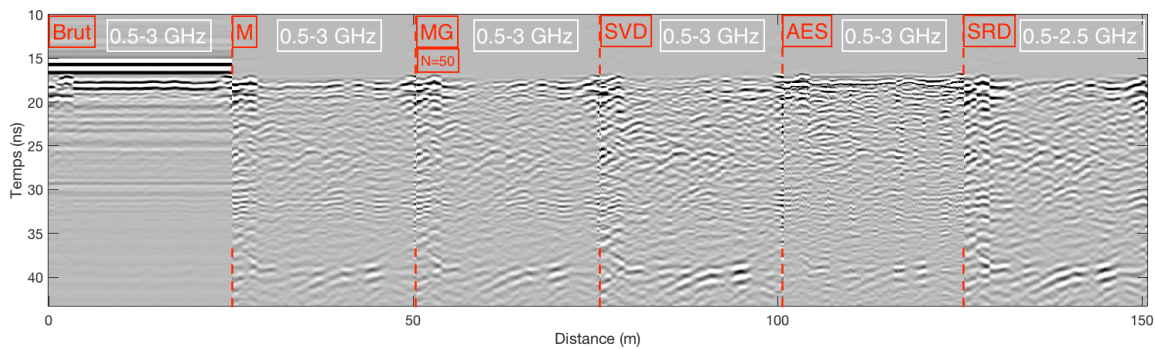


FIGURE 3.30 – Radargramme WISDOM traité par différentes méthodes de réduction de parasites.

La SVD, L'AES et la SRD permettent d'atténuer les parasites persistants après des traitements classiques par soustraction d'une moyenne (M) ou d'une moyenne glissante (MG). Ces méthodes sont complémentaires et ont une efficacité qui dépend de la source de parasites.

3.5 Application des méthodes à des données expérimentales

Les différentes méthodes décrites plus haut ont été appliquées sur des données acquises sur notre terrain d'expérimentation dit "Mars yard". Ces données sont contaminées par des parasites (*ringing* et *clutter*), notamment par une répétition du couplage direct et de l'écho de sol autour d'un temps de propagation de 30 ns (~ 14 ns après l'écho de sol). Les résultats obtenus sur ce terrain sont en faveur de la SVD et de la SRD qui retirent complètement les réflexions parasites contrairement aux autres méthodes (moyenne glissante et méthode par soustraction de l'écho de sol) qui laissent un résidu.

Le terrain d'expérimentation est plat (temps d'arrivée de l'écho de surface peu variable), il est homogène (sable) et il présente peu de structures, ce qui rend le radargramme relativement clair et facilement interprétable. Il s'agit donc d'un cas assez favorable pour évaluer l'apport des méthodes de traitement.

3.5.1 Sélection du jeu de données

Regardons maintenant ce que donnent ces méthodes sur un sol naturel non contrôlé. Pour cela nous avons appliqué les différentes méthodes à l'étude sur des données issues de la campagne de mesures dans le sud de la France au "Colorado Provençal" (Chapitre 2). Nous détaillerons cette campagne ainsi que de ses résultats dans le chapitre 5 dédié aux campagnes de mesures sur des analogues martiens. Les méthodes sont testées sur des radargrammes acquis sur deux sites différents lors de cette campagne. Nous avons choisi de montrer les résultats de nos méthodes de réduction des signaux parasites sur ces deux radargrammes car ils présentent les signaux parasites attendus, ainsi que plusieurs structures d'intérêt géologique. Les radargrammes du site 1 et du site 2 montrent, à divers degrés, des milieux stratifiés (couches de dépôts sédimentaires reposant sur un socle rocheux). Nous voyons donc apparaître sur les radargrammes des couches ainsi que des hyperboles provenant de roches enfouies dans le sous-sol. La stratification est beaucoup plus marquée sur le radargramme du site 2 (Figure 3.32) ; on l'observe sur une distance de 6 mètres pour un temps de propagation de 10 ns ; ce qui représente 0.75 m de profondeur pour un sol de constante diélectrique égale à 4. Cela est deux fois plus profond que la stratification présente sur le radargramme du site 1.

Sur tous nos radargrammes nous constatons une répétition du radargramme à partir d'un temps de propagation de 30 ns (source n°6). Cela se manifeste cependant majoritairement par une répétition de l'écho de sol, qui a une amplitude bien plus élevée que la réponse du sous-sol. C'est le cas sur le radargramme acquis sur le terrain d'expérimentation (Figure 3.16) ainsi que sur le radargramme du site 1 (Figure 3.31). Nous tendons donc vers des solutions capables de retirer des réflexions multiples de la surface (source n°4). Sur le radargramme acquis sur le site 2 (Figure 3.32), la répétition ne se limite pas à l'écho de surface, mais bien à tout le radargramme. Nous voyons en effet, des réflexions parasites provenant de la surface mais aussi du milieu stratifié juste en dessous. La source n°6 de parasites y est donc plus développée.

3.5.2 Résultats

Comme nous avons pu le voir au long de ce chapitre, les méthodes de réduction des parasites sont toutes capables de fournir un radargramme interprétable, c'est-à-dire sur lequel la grande majorité des réflexions parasites a été atténuée. Cependant des parasites résiduels persistent, en particulier après l'utilisation d'une moyenne ou d'une moyenne glissante. Ces résidus se trouvent aux alentours d'un temps de propagation de 30 ns sur tous nos radargrammes (encadré rouge sur les Figures 3.31 et 3.32).

Site 1

Sur le site 1, les parasites se limitent à une répétition de l'écho de sol. Nous avons appliqué les méthodes expérimentées et développées dans ce chapitre. Les radargrammes traités par soustraction de la moyenne (M) et soustraction d'une moyenne glissante (MG) sont similaires et, comme évoqué plus haut, la répétition de l'écho de sol est toujours présente. La soustraction de la moyenne du radargramme permet tout de même d'efficacement retirer les parasites issus des sources n° 1, 2, 3 et 5 qui sont constants en temps et en amplitude. Par rapport au radargramme brut, les méthodes de soustraction d'une moyenne (M et MG) améliorent considérablement la lisibilité des données. Les traitements par SVD, AES et SRD permettent de fortement atténuer les parasites restant après traitement par soustraction de la moyenne (M et MG). Ces trois méthodes sont donc efficaces pour retirer des parasites des sources n°1, 2, 3, 4 et 5. Nous voyons tout de même des différences dans le résultat obtenu par AES et SVD, et celui obtenu par SRD. La SRD révèle une structure (encadré vert, Figure 3.31f) ainsi qu'un groupe d'hyperboles (ellipse bleue, Figure 3.31f) qui ne sont pas clairement identifiables sur les radargrammes traités par SVD et AES. Notons aussi que la méthode SRD comporte un filtrage en fréquence (filtre passe-bas entre 0.5 et 2.8 GHz), ce qui lui confère un aspect moins détaillé. En effet, le filtrage en fréquence réduit la bande de fréquence et par conséquent élargit les échos. Les radargrammes traités par SRD ont donc une moins bonne résolution.

Site 2

Sur les radargrammes du site 2 (Figure 3.32) traités par soustraction d’une moyenne (M et MG), nous remarquons une répétition du radargramme qui va au-delà de la répétition de l’écho de surface. Nous constatons, en effet, une répétition des couches du milieu stratifié pour un temps de propagation compris entre 30 et 40 ns (encadré rouge). Ce parasite, qui provient de la source n°6, est beaucoup plus étendu que ce que nous avons observé avec les radargrammes précédents. Les traitements par SVD et AES n’arrivent pas à le retirer (encadré orange). Nous remarquons tout de même que ces techniques permettent de supprimer la répétition de l’écho de surface (dans l’encadré rouge). Cela confirme que ces méthodes sont efficaces pour retirer les échos multiples de l’écho de sol, cependant seule la SRD arrive à entièrement retirer les parasites de la source n°6.

Méthode	Temps de calcul (s) ¹	Source n°	Type de parasites retirés
Moyenne (M)	0.16	1,2,3 et 5	Constant
Moyenne Glissante (MG)	0.16	1,2,3,4 et 5	Constant
Filtrage des valeurs singulières (SVD)	17	1,2,3,4 et 5	Constant + multiples de l’écho de sol
Analyse de l’Écho de Sol (AES)	14.3	1,2,3,4 et 5	Constant + multiples de l’écho de sol
Soustraction du Radargramme Décalé par translation temporelle (SRD)	1.2	1,2,3,4,5 et 6	Constant + multiples de l’écho de sol + répétition du radargramme

TABLE 3.2 – Méthodes de réduction des parasites

Le tableau ci-avant liste les différentes méthodes proposées et développées au cours de cette thèse, ainsi que leur coût en temps de calcul et les types de parasites pour lesquelles elles sont les plus efficaces. Le filtrage des valeurs singulières et l’analyse de l’écho de sol sont les méthodes les plus gourmandes en temps de calcul. Elles seront donc utilisées en seconde intention et ne feront pas partie du traitement par défaut. L’AES permet notamment de révéler des structures proches de la surface, et la SVD permet de fortement atténuer les parasites provenant de la source n°6. Ces méthodes seront donc intégrées à la palette d’outils de traitement des données de WISDOM, à utiliser en fonction des sous-sols sondés.

La soustraction d’une moyenne ou d’une moyenne glissante et la SRD sont les méthodes les plus rapides à exécuter (de l’ordre de la seconde), la SRD permet néanmoins de retirer proprement un plus grand nombre de parasites en comparaison d’une moyenne ou d’une moyenne glissante. La méthode dégrade légèrement la résolution du radargramme mais permet de retirer complètement les parasites provenant de la source n°6 ainsi que les parasites provenant des autres sources (la méthode utilise un filtrage en fréquence et la soustraction d’une moyenne glissante). La SRD sera donc intégrée à la chaîne de traitement automatique (par défaut) des données de WISDOM.

1. Calculé sur un I7 2.5 GHz, 16 Go de ram pour un radargramme de taille 12100x125

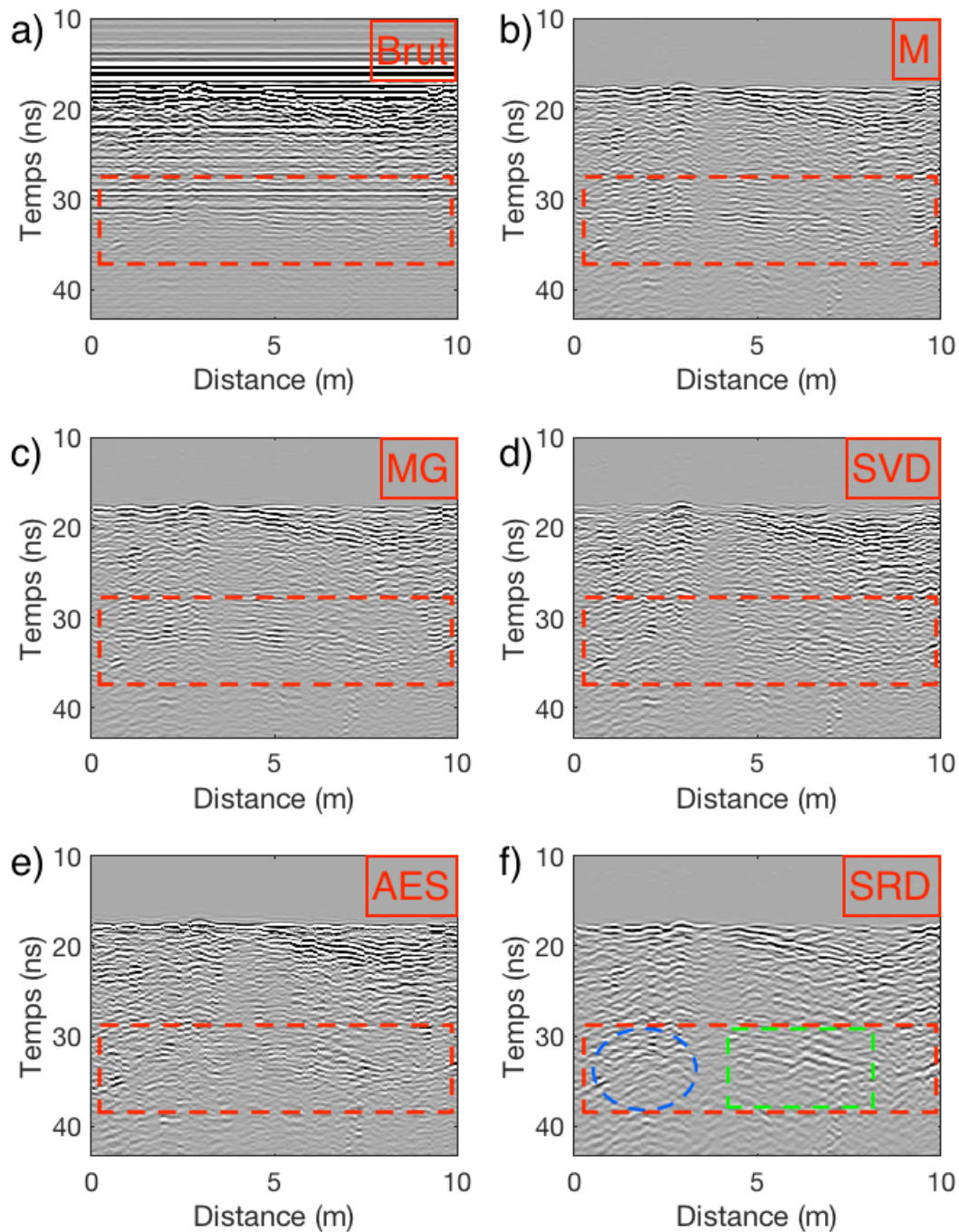


FIGURE 3.31 – Application des méthodes de réduction des parasites sur le site 1 de la campagne de mesures dans le "Colorado Provençal" : a) Données brutes, b) Radargramme traité par soustraction de la moyenne (M), c) Radargramme traité par soustraction d'une moyenne glissante (MG), $N = 50$ soit 1.7 m, d) Radargramme traité par filtrage des valeurs singulières (SVD), e) Radargramme traité par analyse de l'écho de sol (AES), f) Radargramme traité par soustraction par le radargramme décalé par translation temporelle (SRD)

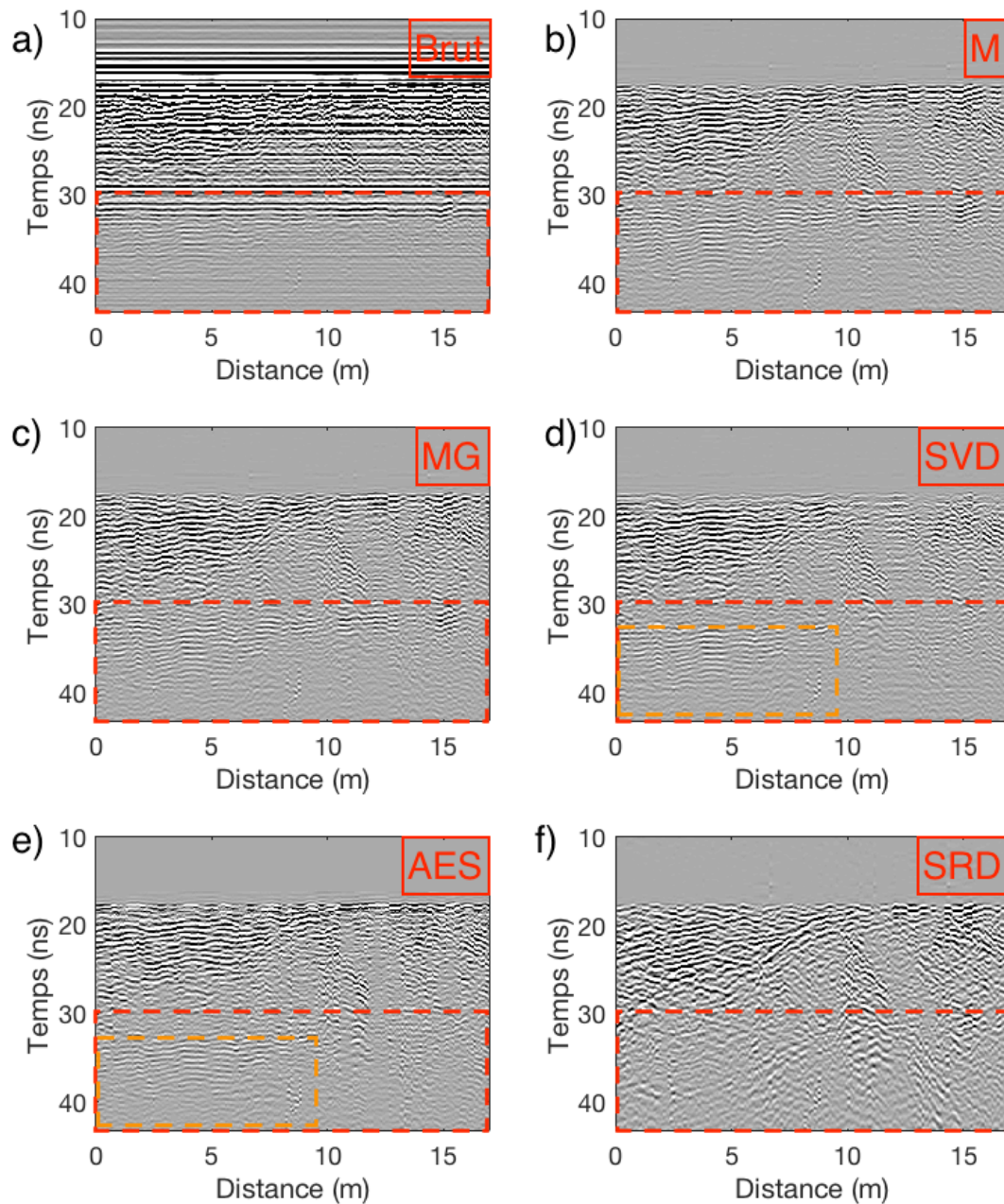


FIGURE 3.32 – Application des méthodes de réduction des parasites sur le site 2 de la campagne de mesures dans le "Colorado Provençal" : a) Données brutes, b) Radargramme traité par soustraction de la moyenne (M), c) Radargramme traité par soustraction d'une moyenne glissante (MG), $N = 50$ soit 1.7 m, d) Radargramme traité par filtrage des valeurs singulières (SVD) , e) Radargramme traité par analyse de l'écho de sol (AES), f) Radargramme traité par soustraction par le radargramme décalé par translation temporelle (SRD)

3.6 Conclusion

Nous avons vu dans la première partie de ce chapitre que les données brutes étaient contaminées par des signaux parasites qui nuisent à la lisibilité des radargrammes. Ces parasites se manifestent par des traits horizontaux lorsqu'il s'agit de répétitions du couplage direct. On appelle souvent *ringing* les réflexions internes dans l'instrument (multiples réflexions dans les antennes et l'électronique) et le *clutter* les parasites provenant de réflexions en surface. La première solution apportée pour supprimer ces parasites fut de retirer une moyenne calculée sur tout le radargramme. Cette solution, bien qu'efficace, laisse des parasites autour de 30 ns. Ces parasites créent une zone "aveugle" de 3 ns soit 22.5 cm dans un milieu de permittivité 4.

Dans la seconde partie, nous avons proposé et testé des méthodes plus sophistiquées afin d'atténuer les effets des parasites. Ces méthodes, en l'occurrence le retrait d'une moyenne glissante (MG), l'analyse de l'écho de sol (AES), le filtrage des valeurs singulières (SVD) et la Soustraction du Radargramme Décalé par translation temporelle (SRD) montrent de bons résultats par rapport à la méthode par soustraction de la moyenne. En particulier la SVD, l'AES et la SRD arrivent à complètement retirer la répétition de l'écho de sol et du couplage direct. Ces méthodes seront donc intégrées par la suite à la chaîne de traitement des données du radar à pénétration WISDOM qu'illustre la Figure 3.33. Dans ce chapitre nous avons exploré de nombreuses méthodes afin de réduire les réflexions parasites, chacune des méthodes arbore de bons résultats en fonction de la source des parasites. D'autres méthodes reposant sur les méthodes à sous-espaces n'ont pas été expérimentées ici comme l'analyse en composante principale (PCA) et l'analyse en composante indépendante (ICA) [Vuksanovic et al., 2013]; elles feront l'objet d'un futur travail.

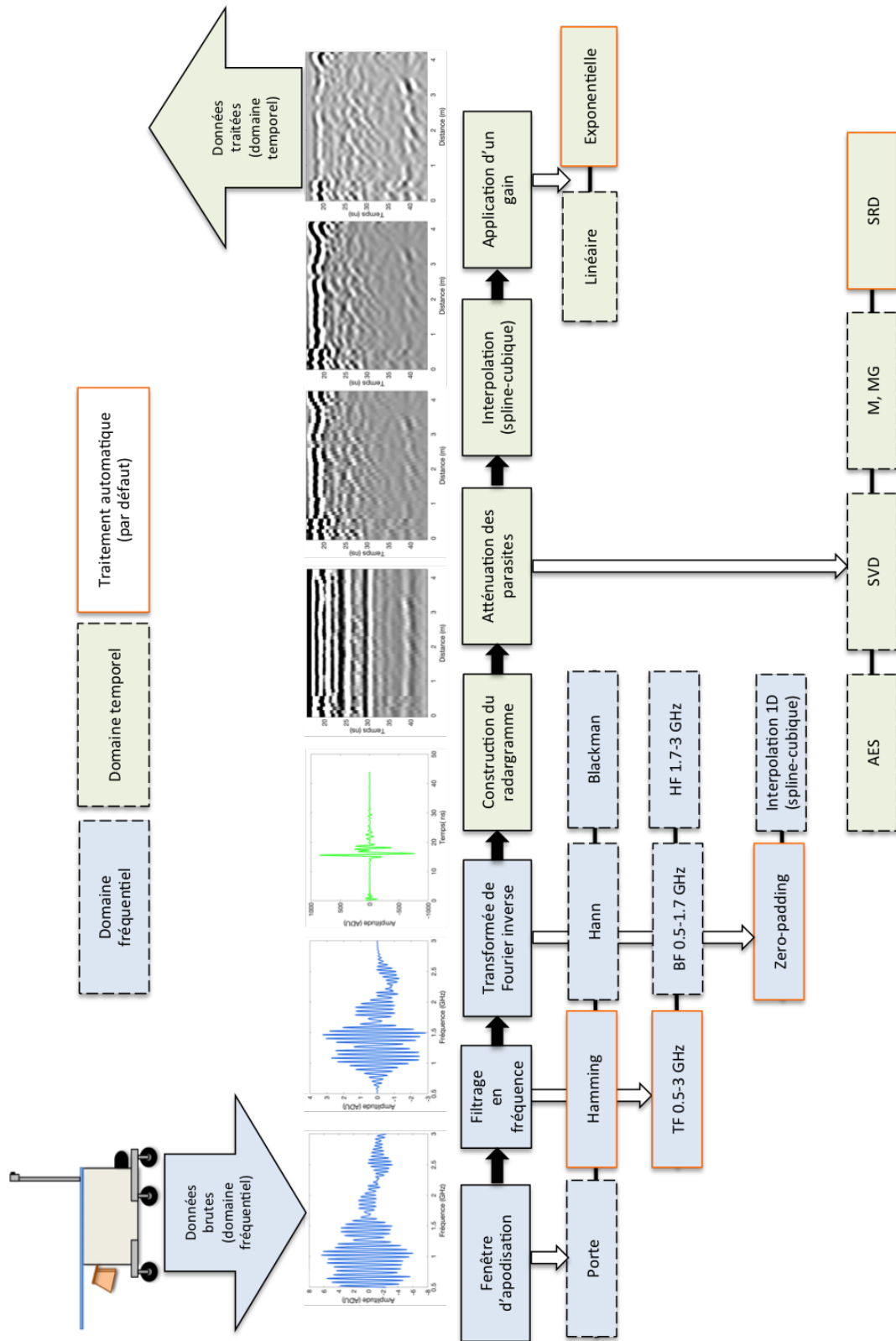


FIGURE 3.33 – Chaîne de traitement des données du radar à pénétration de sol WISDOM

Chapitre 4

Evaluation de l'algorithme haute résolution MUSIC pour le traitement des données de WISDOM / ExoMars 2020

La résolution se définit comme la distance minimale entre deux cibles "séparables" sur des observations. Les méthodes pouvant apporter un gain en terme de résolution sont nombreuses ; citons la déconvolution et les algorithmes de haute et de super-résolution. Les domaines d'application de ces méthodes sont multiples. [Le Bastard, 2007] utilise et développe des algorithmes super et haute résolution pour le génie civil, notamment pour l'identification de couches minces dans la chaussée. Dans un cadre militaire, [Shrestha et al., 2004] et [Shrestha and Arai, 2003] s'intéressent aux algorithmes haute résolution dans le but de détecter des mines enfouies. Les algorithmes haute résolution sont également fréquemment utilisés pour augmenter les performances des géoradars dans la caractérisation des sous-sols [Tang et al., 2017][Sun et al., 2016].

Ce chapitre s'intéresse aux méthodes capables d'améliorer la résolution verticale des observations du radar à pénétration de sol WISDOM/ExoMars 2020. Il étudie notamment le potentiel de l'algorithme de haute-résolution MUSIC (*MUltiple SIgnal Classification*) et, en particulier, sa pertinence pour l'identification de couches fines dans des milieux naturels.

4.1 Position du problème et définition

La résolution verticale en distance R_v d'un radar à pénétration de sol dépend de sa bande de fréquences B et de la constante diélectrique du milieu ϵ'_r et peut être définie selon la formule suivante :

$$R_v \simeq \frac{c}{2B\sqrt{\epsilon'_r}} \quad (4.1)$$

où c désigne la vitesse des ondes EM dans le vide.

La résolution verticale souhaitée est donc un critère important à prendre en considération lors de la conception d'un radar ; comme évoqué dans le chapitre précédent un compromis entre résolution et profondeur de pénétration doit être trouvé afin de répondre au mieux aux objectifs scientifiques.

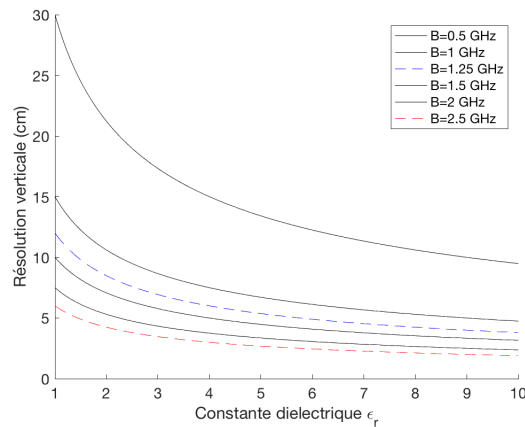


FIGURE 4.1 – Résolution verticale d'un GPR en fonction de sa bande de fréquences et de la constante diélectrique d'un sol considéré comme homogène.

La Figure 4.1 montre la résolution théorique en fonction de la bande de fréquences et de la constante diélectrique du milieu. Les courbes rouge et bleu représentent respectivement la bande de fréquences de WISDOM (2.5 GHz) et la demi-bande de fréquences utilisée lors des filtrages passe-bas (entre 0.5 GHz et 1.75 GHz) et passe-haut (entre 1.75 GHz et 3 GHz). Pour un sol composé de glace d'eau ($\epsilon'_r \approx 3$), WISDOM devrait théoriquement atteindre une résolution de 4 cm. Plus la constante diélectrique du milieu est élevée plus la résolution en distance de l'instrument s'affine. Pour des milieux lithiques avec une constante diélectrique comprise entre 4 et 8, la résolution verticale de WISDOM devrait être inférieure à 3 cm.

Nous parlons ici de résolution théorique ; dans la pratique d'autres paramètres peuvent dégrader la capacité d'un radar à discriminer deux discontinuités diélectriques. En effet, la résolution ne dépend pas seulement du signal émis mais aussi du signal reçu dont la bande de fréquences effective est plus réduite que la bande de fréquences du radar du fait de la rugosité, des hétérogénéités et des pertes dans le milieu sondé. Les radargrammes de WISDOM montrent d'ailleurs un élargissement progressif du signal avec la profondeur. En effet, les basses fréquences pénètrent plus en profondeur que les hautes fréquences, par conséquent les signaux provenant des zones les plus profondes ont un spectre plus étroit, et donc une étendue temporelle plus large.

En fonction de la résolution de l'instrument et de la nature du milieu, différentes structures vont se révéler. La Figure 4.2 illustre bien cette idée ; elle montre des radargrammes de WISDOM acquis sur un sol naturel où l'on distingue des couches de 5 à 10 cm d'épaisseur. Le radargramme de gauche a subi un filtrage basse fréquence ; sa bande de fréquences est réduite ($B = 1.2$ GHz) par rapport au radargramme du centre qui n'a subi aucun filtrage ($B = 2.5$ GHz). La Figure 4.2, à droite, superpose deux profils radar issus des radargrammes évoqués précédemment. Le profil correspondant à la bande de fréquences la plus large (en bleu) donne clairement accès à un niveau de stratification plus fin et

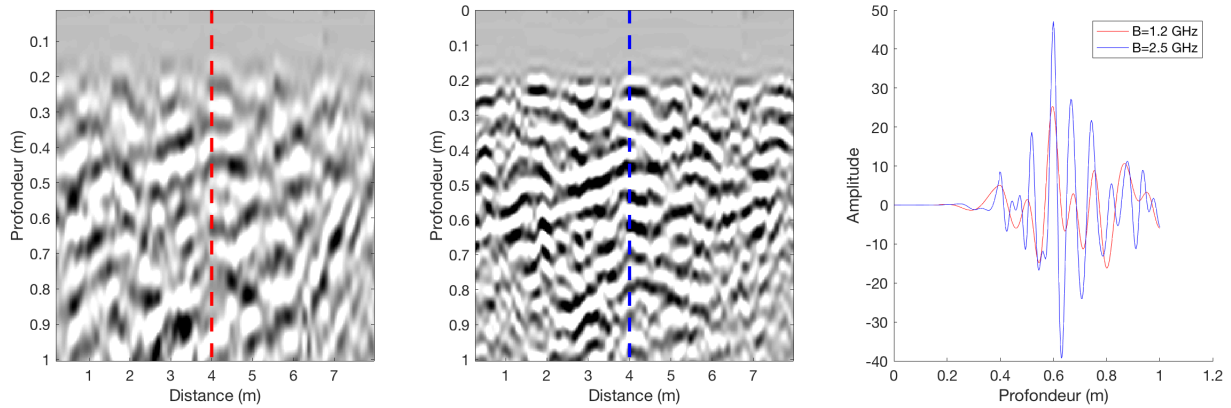


FIGURE 4.2 – Radargrammes acquis par WISDOM sur un sol stratifié naturel : (à gauche) radargramme filtré aux basses fréquences ($B = 1.2$ GHz), (au centre) radargramme sur toute la bande de fréquences ($B = 2.5$ GHz), (à droite) Profil radar à la distance marquée par des pointillés sur les radargrammes.

montre l'importance de la résolution dans la caractérisation d'un milieu. Cette résolution peut être améliorée, dans une certaine mesure, par la mise en place de techniques appropriées.

Il existe plusieurs familles de techniques permettant l'amélioration de la résolution des radars sondeurs. On citera notamment les méthodes dites de haute et de super-résolution. Les techniques de super-résolution reposent sur l'extrapolation de la bande de fréquences [Cuomo, 1992] [Borison et al., 1992] alors que les techniques de haute résolution s'appuient sur la décomposition de la matrice de covariance des données [Schmidt, 1986] [Roy and Kailath, 1989] [Le Bastard, 2007]. Ce sont des méthodes dites à sous-espace qui passent par une étude des vecteurs propres formant les sous-espaces signal et bruit.

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux méthodes de haute résolution dans le cas de milieux stratifiés. Nous étudierons l'apport ainsi que les limites de ces techniques sur des données simulées avant de les tester sur des données acquises avec différentes versions de l'instrument WISDOM.

4.2 Modèle du signal

Les techniques de haute résolution nécessitent un modèle de signal reçu. Nous nous sommes appuyés ici sur un modèle de signal couramment utilisé dans la littérature dans le cas de milieux stratifiés homogènes avec faibles pertes en considérant que le signal reçu est la somme d'échos retardés et pondérés par un coefficient de réflexion pour chaque interface :

$$r(t) = \sum_{k=1}^d S_k e^{i2\pi f_i t_k} + n(t) \quad (4.2)$$

où d désigne le nombre d'échos reçus, S_k les coefficients de réflexion, $e(t)$ l'impulsion du radar et n un bruit blanc Gaussien de moyenne nulle. Soulignons que ce simple modèle à une dimension ne prend pas en compte les échos provenant de réflexions multiples entre les couches ni les pertes susceptibles de déformer l'impulsion émise.

Les algorithmes haute résolution s'appliquant dans le domaine fréquentiel, re-écrivons l'équation (4.2) selon :

$$r(f_i) = e(f_i) \sum_{k=1}^d S_k e^{-i2\pi f_i t_k} + n(f_i) \quad (4.3)$$

Nous pouvons aisément reconnaître dans l'équation (4.3) le terme de translation temporelle $e^{-i2\pi f_i t_k}$ où f_i désigne les fréquences entre f_1 et f_{max} .

En reformulant l'équation (4.3) sous forme matricielle, il vient alors :

$$r = \Lambda AS + n \quad (4.4)$$

$$\begin{pmatrix} r(f_1) \\ r(f_2) \\ \vdots \\ r(f_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e(f_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e(f_2) & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & e(f_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-2i\pi f_1 t_1} & e^{-2i\pi f_1 t_2} & \dots & e^{-2i\pi f_1 t_d} \\ e^{-2i\pi f_2 t_1} & e^{-2i\pi f_2 t_2} & \dots & e^{-2i\pi f_2 t_d} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ e^{-2i\pi f_n t_1} & e^{-2i\pi f_n t_2} & \dots & e^{-2i\pi f_n t_d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n(f_1) \\ n(f_2) \\ \vdots \\ n(f_d) \end{pmatrix}$$

où r représente le vecteur d'observation contenant une réponse par fréquence, Λ la matrice diagonale contenant la transformée de Fourier de l'impulsion radar, A la matrice mode qui contient les retards des d échos, s le vecteur contenant les coefficients de réflexion des d échos et enfin n le vecteur bruit blanc Gaussien.

C'est cette forme d'expression du signal que nous allons utiliser pour mettre en place l'algorithme MUSIC.

4.3 L'algorithme MUSIC (Multiple Signal Classification)

L'algorithme *MUltiple SIgnal Classification* ou MUSIC [Schmidt, 1986] fut développé en 1977 par Ralph O. Schmidt. Il est communément utilisé pour l'estimation des directions d'arrivée d'ondes planes reçues par un réseau de capteurs [Schmidt, 1986] [Khairy et al., 2013] [Mohanna et al., 2013]. De nombreux travaux recourent aussi à MUSIC afin d'estimer des temps d'arrivée [Zhou et al., 2010] [Le Bastard et al., 2007] [Sun et al., 2017]. C'est pour cette dernière application que nous allons mettre en place l'algorithme.

MUSIC exploite l'orthogonalité des sous-espaces signal et bruit. Plus exactement, il décompose la matrice de covariance R_{xx} d'un profil radar en vecteurs propres afin de déterminer les sous-espaces signal et bruit. La première étape consiste donc à évaluer R_{xx} .

Pour un signal $x(f)$ la matrice de covariance est définie par la formule suivante :

$$R_{xx} = E(x(f)x(f)^H) \quad (4.5)$$

où E désigne l'espérance mathématique et H le conjugué Hermitien. L'estimation de cette matrice à partir de plusieurs réalisations indépendantes (c'est-à-dire de plusieurs mesures au même endroit) est déterminante pour les performances de l'algorithme. Cependant ces réalisations multiples ne sont pas toujours disponibles et nous verrons par la suite qu'il est possible de déterminer la matrice de covariance à partir d'une seule réalisation en utilisant des méthodes de décorrélation de la matrice de covariance [Ren and Willis, 1997].

Il s'agit ensuite de déterminer les valeurs propres κ_i et les vecteurs propres Ψ_i de la matrice de covariance R_{xx} . Les valeurs propres appariées aux vecteurs propres sont définies selon l'équation suivante :

$$R_{xx}\Psi_i = \kappa_i\Psi_i \quad (4.6)$$

Elles correspondent aux racines du polynôme caractéristique de la matrice R_{xx} . Une fois déterminées, les vecteurs propres associés se déduisent de la relation $(R_{xx} - \kappa_i I_n)\Psi_i = 0$, où I_n désigne la matrice identité de taille $n \times n$.

Les vecteurs propres sont alors triés en fonction de leur valeurs propres rangées dans l'ordre décroissant. Les plus grandes valeurs propres appartiennent à l'espace signal et les plus petites à l'espace bruit. Ce tri permet donc de rassembler les vecteurs propres formant respectivement les sous-espaces signal et bruit.

Notons que, pour être mis en oeuvre, MUSIC - ainsi que plus généralement les algorithmes haute résolution - a besoin d'une information *a priori* sur le nombre de sources de réflexion. Or il n'est bien entendu pas possible de connaître, avant sondage, le nombre de réflecteurs enfouis ; nous ne pouvons donc qu'estimer ce nombre M . Plusieurs travaux s'efforcent de résoudre cette question en s'appuyant sur l'analyse des valeurs propres [Xu et al., 1994] [Jiang and Ingram, 2004] [Zhang and Ng, 2010].

Après avoir estimé un nombre M de sources, les vecteurs propres signal et les vecteurs propres bruit peuvent être séparés : les vecteurs propres associés aux M premières valeurs propres constituent les vecteurs propres signal, et ceux restant les vecteurs propres bruit. Les projecteurs des sous-espaces propres signal et bruit sont définis alors respectivement par :

$$P_{signal} = \Psi_{signal}\Psi_{signal}^H \quad P_{bruit} = \Psi_{bruit}\Psi_{bruit}^H \quad (4.7)$$

et les temps d'arrivée des échos se déduisent du "pseudo-spectre" f_{MUSIC} défini par :

$$f_{MUSIC}(t) = \frac{1}{a(t)^H P_{bruit} a(t)} \quad (4.8)$$

où $a(t)$ correspond au vecteur de direction $a(t) = e^{-2i\pi ft}$ construit à partir du vecteur temps t des retards. Pour chaque temps t égal à un temps de retard, le produit du vecteur de direction conjugué $a(t)^H$ avec le produit entre le projecteur bruit P_{bruit} et le vecteur de direction $a(t)$ tend vers zéro car les espaces signaux et bruit sont orthogonaux ce qui se traduit par un pic dans la courbe de la fonction $f_{MUSIC}(t)$.

La Figure 4.3 montre le résultat de MUSIC sur un signal simulé bruité. Ce résultat est comparé à celui d'une transformée de Fourier inverse. MUSIC estime parfaitement les temps d'arrivée des échos malgré un niveau de bruit non négligeable. En revanche, il est important de noter que l'application de MUSIC, ainsi que des algorithmes à sous-espaces, entraîne une perte de l'information sur l'amplitude des échos.

4.4 Méthodes de décorrélation

Les algorithmes de haute résolution ne sont pas capables de détecter plusieurs échos si ces derniers sont corrélés. Plusieurs techniques ont donc été développées afin de décorréler les échos et de restaurer les performances des algorithmes haute résolution. Ces techniques, dénommées SSP (*Spatial Smoothing Preprocessing*) et MSSP (*Modified Spatial Smoothing Preprocessing*), consistent à lisser, dans le domaine fréquentiel, la matrice de covariance. Elles reviennent, en réalité, à augmenter artificiellement le nombre de réalisations par fréquence [Ren and Willis, 1997]. L'application de ces méthodes est un préalable essentiel à l'application des algorithmes de haute résolution.

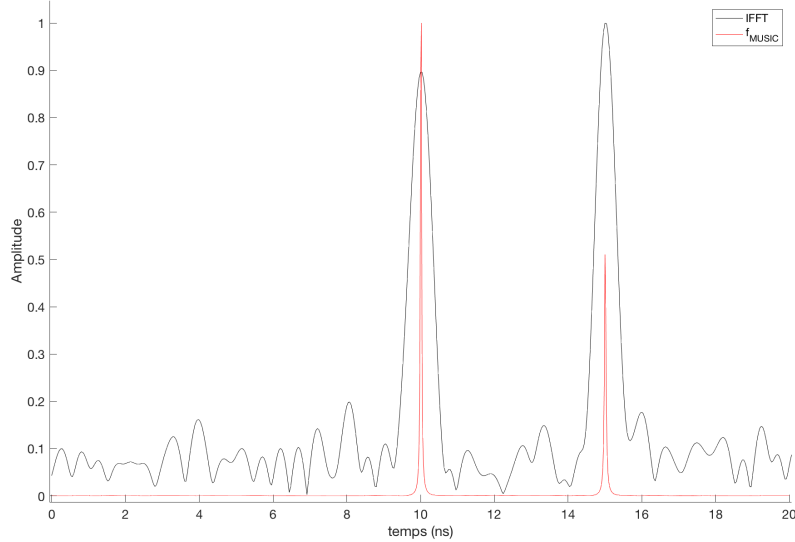


FIGURE 4.3 – Pseudo-spectre MUSIC d'un signal simulé présentant deux échos dont les retards sont 10 et 15 ns. Le SNR des échos est de 20 dB.

4.4.1 Méthode du *Spatial Smoothing Preprocessing*

La méthode du SSP [Yamada et al., 1991][Shan et al., 1985] est couramment utilisée pour décorréler des signaux fortement corrélés. Elle consiste en un moyennage par sous-bandes de fréquences.

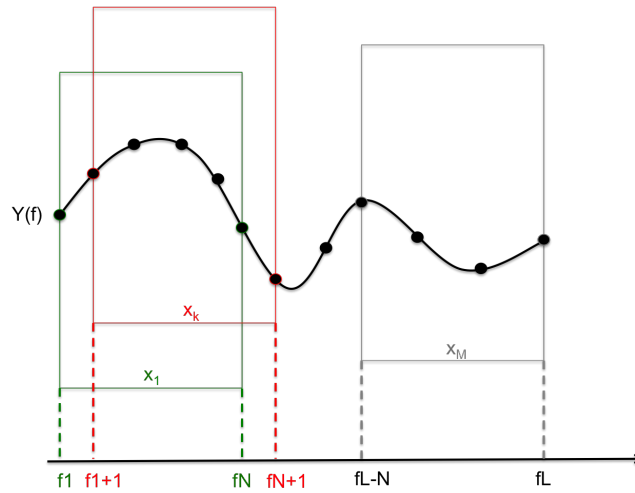


FIGURE 4.4 – Principe du moyennage en sous-bandes de fréquences

La Figure 4.4 illustre le procédé du moyennage en sous-bandes de fréquences, pour un signal composé de L fréquences. Les sous-matrices de covariance sont égales aux produits des sous vecteurs d'observation x_k par leur transposés conjuguées :

$$S_k = x_k x_k^* \quad (4.9)$$

La nouvelle matrice de covariance lissée S_{SSP} est égale à la somme des sous-matrices de covariance S_k divisées par le nombre d'additions réalisées (M). Cela revient à faire la moyenne des sous-matrices de covariance de taille $N \times N$ le long de la diagonale de la matrice de covariance R_{xx} .

$$S_{SSP} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M S_k \quad (4.10)$$

Le nombre de fréquences du signal L , le nombre d'additions M et la taille des sous-vecteurs d'observation N sont reliés par la formule suivante :

$$L = N + M - 1 \quad (4.11)$$

Notons que la taille des sous-vecteurs d'observation N détermine la bande effective (B_{eff}) du signal traité. D'après la formule (4.11), le nombre d'additions M est contraint par la taille N des vecteurs d'observation x_k . Il y a donc un compromis à trouver entre décorrélation du signal et résolution. Plus la taille N des sous-vecteurs est réduite plus la bande effective de fréquences est étroite et, par conséquent, plus la résolution est grossière. La méthode SSP de décorrélation du signal permet donc d'optimiser les algorithmes à sous-espaces en contrepartie d'une réduction de la bande de fréquences et donc d'une dégradation de la résolution théoriquement atteignable.

4.4.2 Méthode du *Modified Spatial Smoothing Preprocessing*

La méthode dite du MSSP [Yamada et al., 1991] [Williams et al., 1988] propose un moyennage direct inverse de la matrice de covariance selon la formule :

$$S_{MSSP} = \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^M (S_k + IS_k^*I) \quad (4.12)$$

La méthode *MSSP* diffère de la méthode *SSP* par l'ajout du terme IS_k^*I qui correspond à une rotation complète de la sous-matrice de covariance S_k , ce qui signifie que la méthode *MSSP* permet d'effectuer un moyennage supplémentaire dans le sens rétrograde et donc de doubler le nombre de sommations tout en gardant la même bande effective de fréquences.

$$IS_k^*I = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \underbrace{\begin{pmatrix} a & b & c \\ b & d & f \\ c & f & e \end{pmatrix}}_{S_k^*} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e & f & c \\ f & d & b \\ c & b & a \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

4.4.3 Evaluation des méthodes de décorrélation

Afin de comparer les méthodes *SSP* et *MSSP* nous avons effectué plusieurs simulations à partir du modèle de signal décrit dans le chapitre précédent. Le signal simulé est composé de deux échos de mêmes amplitudes, bruités par un bruit gaussien et espacés d'un temps Δt . Trois écarts en temps ont été considérés : 0.25, 0.35 et 0.5 ns ce qui représente un produit $B\Delta t$ respectivement égal à 0.675, 0.875 et 1.25 ($B\Delta t = 1$ correspondant à la résolution théorique optimale). Ces données synthétiques ont ensuite été soumises à la méthode *MUSIC* et l'écart entre les 2 échos estimé à partir des pseudo-spectres résultant de plusieurs moyennages en sous-bandes.

La Figure 4.5 (gauche) montre l'écart en temps estimé par *MUSIC* en fonction du pourcentage de la bande de fréquences utilisée (c'est-à-dire de la bande de fréquences effective B_{eff}) dans les techniques de moyennage en sous-bandes de fréquences. Cet écart en temps est estimé à partir de 50 réalisations indépendantes. Nous pouvons immédiatement constater une importante variation de l'écart en temps estimé en fonction de la bande de fréquences effective. Pour chaque écart en temps, il existe une zone où le pourcentage de la bande de fréquences est suffisant pour distinguer les deux échos. En dessous de cette zone, en particulier sous 25% de la bande de fréquences, l'écart en temps n'est plus correctement estimé. Entre 90 et 100% de la bande de fréquences, les écarts en temps estimés sont supérieurs aux écarts en entrée de la simulation.

La méthode *MSSP* (en pointillés) semble un préalable à l'application de l'algorithme de *MUSIC* plus efficace que la *SSP* ; la gamme de bande de fréquences effective capable de correctement estimer l'écart entre les deux échos est plus large qu'avec la méthode *SSP* (traits pleins). De plus, pour l'écart le plus faible (0.25 ns soit $B\Delta t = 0.67$), la méthode *MSSP* aboutit à une estimation correcte de l'écart

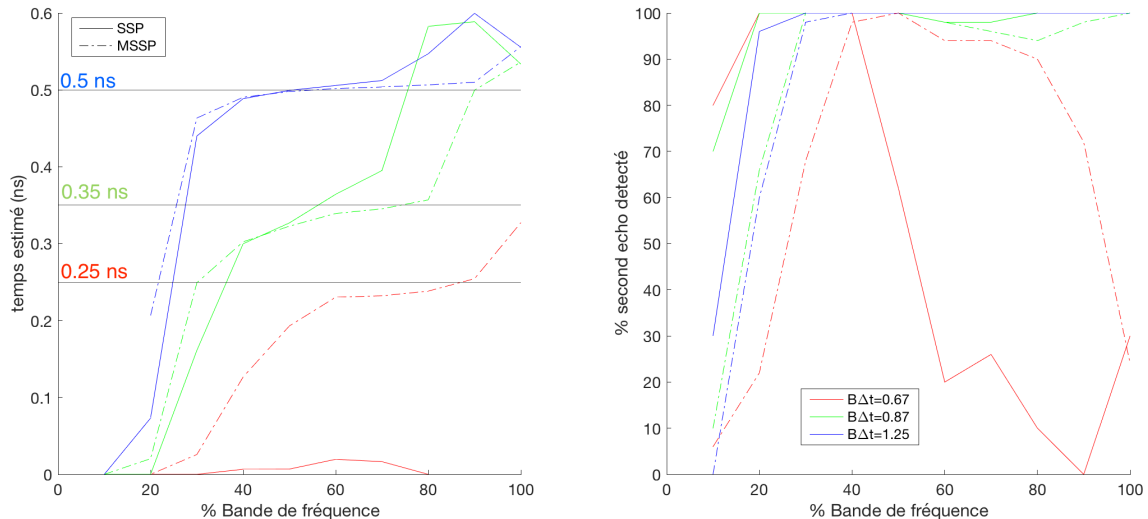


FIGURE 4.5 – Ecart en temps estimé avec MUSIC et la MSSP ou la SSP en fonction de la bande de fréquences effective (à gauche) et pourcentage de second écho résolu (à droite)

en temps pour une bande de fréquences effective comprise entre 60% et 90% de la bande de fréquences alors que la méthode SSP en est incapable.

La Figure 4.5 (droite) montre le pourcentage de réalisations pour lesquelles les deux échos sont résolus en fonction de la bande de fréquences effective et de la technique de moyennage en sous bandes utilisée. Pour le plus petit produit $B\Delta t = 0.67$, on constate une importante différence entre les méthodes SSP et MSSP. En effet la méthode SSP ne permet pas de résoudre les deux échos sur près d'une réalisation sur deux entre 50 et 100 % de la bande de fréquences alors qu'avec la méthode MSSP le nombre de réalisations pour lesquelles les deux échos sont résolus est élevé (entre 90 et 100% pour une bande de fréquences comprise entre 40 et 85%) .

La méthode MSSP est donc un préalable à MUSIC plus efficace que la SSP pour résoudre des échos avec une bande effective plus large, et obtenir une estimation de l'écart en temps plus fiable. Plus généralement ces simulations nous permettent de rendre compte de l'efficacité et des limites des méthodes de moyennage en sous-bandes. L'utilisation de ces méthodes nécessite un compromis entre précision souhaitée et résolution. La Figure 4.5 illustre bien ce compromis : pour une bande de fréquences effective trop étroite la perte de résolution ne permet plus d'estimer avec une bonne précision l'écart entre les deux échos, voire même de distinguer ces deux échos.

La Figure 4.6 montre, pour un signal bruité composé de deux échos distants de 0.3 ns ($B\Delta t = 0.75$), la réponse obtenue en utilisant une transformée de Fourier inverse (IFFT), MUSIC avec la méthode SSP et MUSIC avec la méthode MSSP. Cette figure illustre l'efficacité des méthodes haute résolution par rapport à une transformée de Fourier conventionnelle; les deux échos ne sont pas séparables par IFFT. Comme souligné précédemment, MUSIC associée à la MSSP s'avère la méthode la plus efficace.

En conclusion, les méthodes de décorrélation sont un complément essentiel dans le pré-traitement des données avant utilisation des algorithmes de haute résolution. Par la suite nous utiliserons exclusivement la méthode MSSP, avec des bandes de fréquences effectives comprises entre 50 et 90 % de la bande de fréquences.

4.5 Evaluation des performances de l'algorithme MUSIC

L'objet de cette section est d'évaluer l'algorithme de haute résolution MUSIC. En particulier, nous avons étudié ses performances en fonction du niveau de rapport signal sur bruit (en supposant le bruit gaussien) et sur des données synthétiques. Nous comparerons les résultats obtenus avec MUSIC à ceux d'une transformée de Fourier inverse classique afin d'évaluer la pertinence de l'implémentation de cet

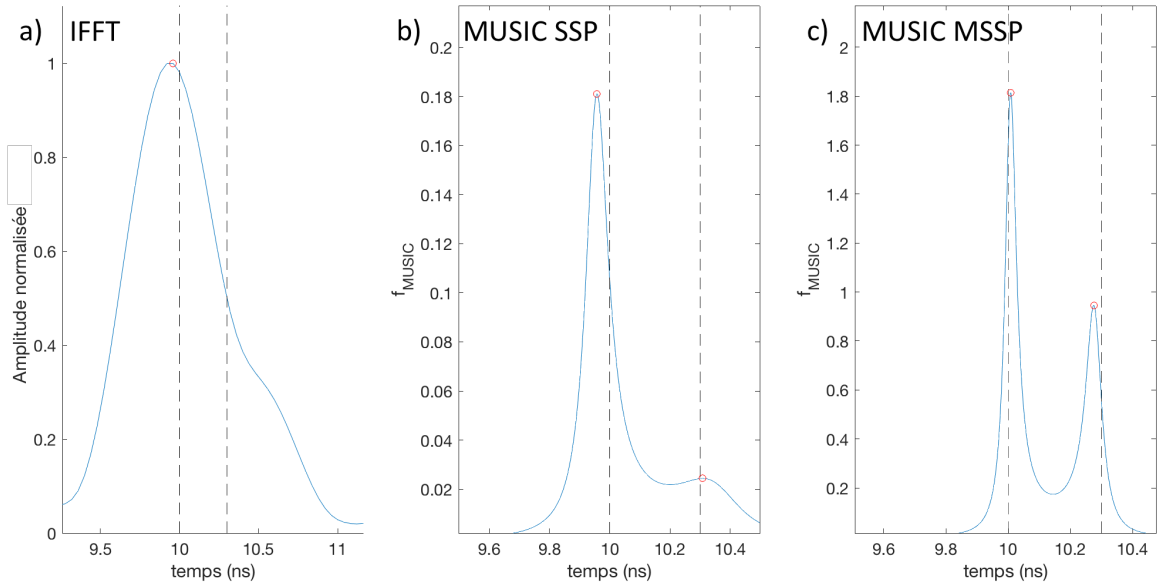


FIGURE 4.6 – De gauche à droite : signal obtenu avec une IFFT , pseudo-spectre MUSIC obtenu avec la méthode SSP, pseudo-spectre MUSIC obtenu avec la méthode MSSP

algorithme, plus gourmand en ressources informatiques, dans la chaîne de traitement de données de l'instrument WISDOM.

4.5.1 Evaluation des performances de MUSIC en fonction du SNR

Considérons un signal bruité composé de deux échos. Les échos ont la forme d'impulsions sino-gaussiennes comme décrit dans le Chapitre 2. La méthode de décorrélation MSSP est ici utilisée avec des bandes de fréquences effective de 50 et 70% en accord avec les conclusions de la section précédente. La qualité de l'estimation est évaluée par le rapport R entre l'écart en temps entre les deux échos estimé et l'écart en temps réel :

$$R = \frac{\Delta t_{\text{estime}}}{\Delta t_{\text{reel}}}$$

Par définition, l'écart entre les deux échos est parfaitement restitué pour une valeur de R égale à 1. Cette même valeur tend vers zéro lorsque les deux échos ne sont pas séparables par l'algorithme.

Sur la Figure 4.7, nous pouvons constater que la transformée de Fourier inverse (en pointillés) est incapable de résoudre les deux échos séparés d'un temps compris entre 0.1 et 0.35 ns (ce qui correspond respectivement aux produits $B\Delta t = 0.25$ et $B\Delta t = 0.87$). En revanche, avec une bande effective supérieure ou égale à 70% de la bande de fréquences, MUSIC distingue les deux échos quelque soit le SNR (pour les valeurs testées, c'est-à-dire entre 11 et 24 dB) et estime correctement leur écart en temps. Avec une bande fréquences effective de 50%, MUSIC fonctionne correctement tant que l'écart en temps est supérieur à 0.1 ns ($B\Delta t > 0.25$) et que le SNR reste relativement élevé (> 16 dB).

Notons également que plus la bande effective est réduite, plus il difficile pour l'algorithme MUSIC de distinguer les deux échos mais, en même temps, plus l'écart en temps est correctement évalué. Pour de forts SNR (entre 17 et 24 dB), l'écart en temps estimé est, en effet, plus précis (autrement dit, R est plus proche de 1) pour $B_{\text{eff}} = 0.5B$ que pour $B_{\text{eff}} = 0.7B$. Dans tous les cas, les performances de MUSIC sont supérieures à celles d'une transformée de Fourier inverse.

4.5.2 Evaluation des performances de MUSIC sur des modèles de sol stratifiés

Afin de poursuivre l'évaluation des performances de MUSIC nous avons appliqué l'algorithme à des données synthétiques obtenues pour des modèles de sols et des configurations d'opérations relativement

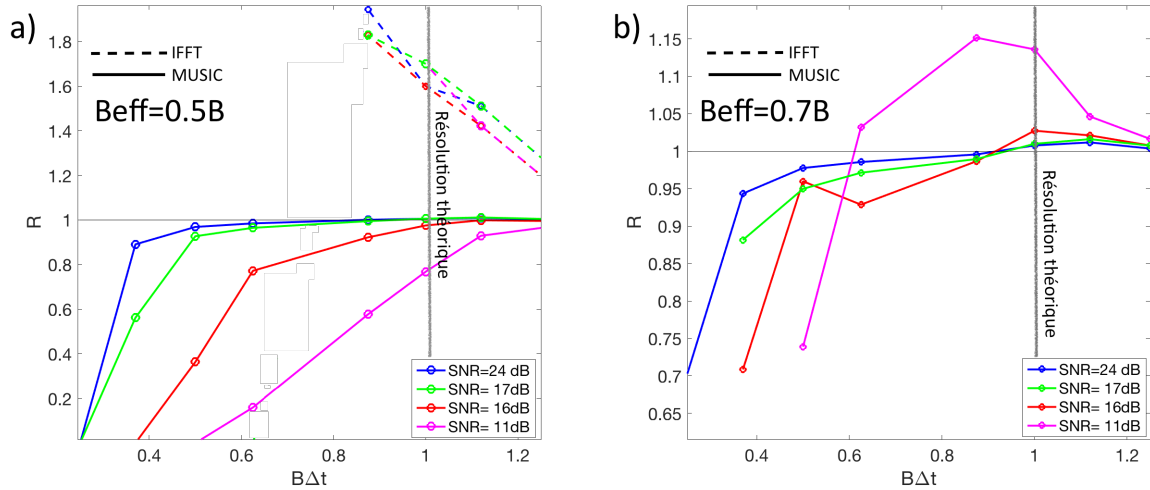


FIGURE 4.7 – R en fonction du produit $B\Delta t$ pour a) $B_{eff} = 0.5B$, b) $B_{eff} = 0.7B$.

réalistes. Plus précisément, nous avons eu recours au code numérique TEMSI-FD (Time ElectroMagnetic SIMulator - Finite Difference method/Xlim/Limoges) pour simuler le fonctionnement de WISDOM au-dessus de sols stratifiés (le code TEMSI-FD sera décrit en détail dans le Chapitre 5). Ces simulations sont en 3 dimensions et prennent en compte le diagramme de rayonnement des antennes Vivaldi de WISDOM ainsi que la forme de l'onde émise par le radar telle qu'elle a été caractérisée dans le Chapitre 2. Deux types de sols stratifiés ont été considérés : un sol composé de deux couches homogènes puis un sol dont les couches présentent des hétérogénéités. La surface et l'interface entre les deux couches sont lisses.

Modèle à deux couches homogènes

Dans un premier temps nous avons donc modélisé un sol à deux couches homogènes. Le contraste diélectrique entre les couches a été fixé à $\Delta\epsilon = 3$. Ce cas d'étude pourrait correspondre à celui d'un sol rocheux consolidé ($\epsilon'_r \simeq 6-7$) ou basaltique ($\epsilon'_r \simeq 6-12$) recouvert d'un matériau poreux (par exemple des dépôts éoliens ou des cendres volcaniques, avec $\epsilon'_r \simeq 3-4$). Les constantes diélectriques choisies s'appuient sur des mesures de caractérisation en laboratoire d'analogues martiens et sur des résultats des radar SHARAD et MARSIS (voir le Chapitre 1). Les pertes par absorption dans les couches sont négligées.

Dans le volume de calcul, les antennes du radar ont été disposées à 38 cm du sol ($d_0 = 0.38$ m) comme cela sera le cas à la surface de Mars et l'épaisseur de la couche supérieure est variable, entre 1 et 10 cm. Cette gamme d'épaisseurs n'a pas été choisie par hasard ; si la constante diélectrique de la couche supérieure ϵ'_r est égale à 3, elles correspondent à des temps de propagation compris entre 0.15 et 1.50 ns soit des produits $B\Delta t$ entre 0.29 et 2.9. Ces épaisseurs permettent donc de tester la limite de résolution théorique ($B\Delta t = 1$).

La Figure 4.9 montre les profils radar obtenus grâce au code de simulations TEMSI-FD pour différentes épaisseurs de la couche supérieure. Les deux pics, lorsqu'ils existent, correspondent à la réflexion à la surface et à l'interface entre les deux couches. Dans un premier temps, nous n'avons pas ajouté de bruit à ces profils. La Figure 4.9 (gauche) montre les profils radar pour chaque épaisseur de couche après transformée de Fourier inverse. Pour une meilleure compréhension l'axe des abscisses en temps a été converti en profondeur à partir de la constante diélectrique de la couche supérieure ($\epsilon'_r = 3$). Nous remarquons que si la couche supérieure est d'épaisseur inférieure à 5 cm ($B\Delta t \approx 1.4$), nous atteignons la limite de résolution de cette méthode : seul un pic est observable par transformée de Fourier inverse. Avec cette méthode nous ne sommes donc pas capables de détecter une interface située à moins de 5 cm de profondeur de la surface.

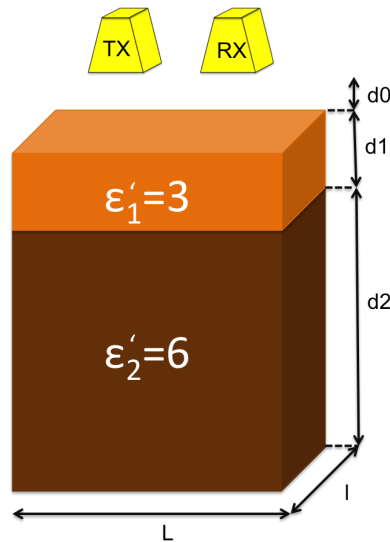


FIGURE 4.8 – Antennes de WISDOM au-dessus d'un sol stratifié à deux couches homogènes.

Les résultats obtenus avec MUSIC (Figure 4.9 (centre)) démontrent la supériorité de cet algorithme haute résolution par rapport à un traitement conventionnel. En effet, MUSIC est capable de détecter la couche supérieure et d'estimer correctement son épaisseur jusqu'à une épaisseur de 1 cm. Même dans le cas d'une couche de 1 cm d'épaisseur, la forme du pseudo-spectre suggère l'existence d'un second pic mais sa position n'est pas précisément déterminée. Le contraste saisissant entre IFFT et MUSIC est illustré par la Figure 4.9 (droite) qui fait apparaître la réponse temporelle et le pseudo-spectre MUSIC pour une couche d'épaisseur de 5 cm, c'est-à-dire dans le cas à la limite de résolution de l'IFFT.

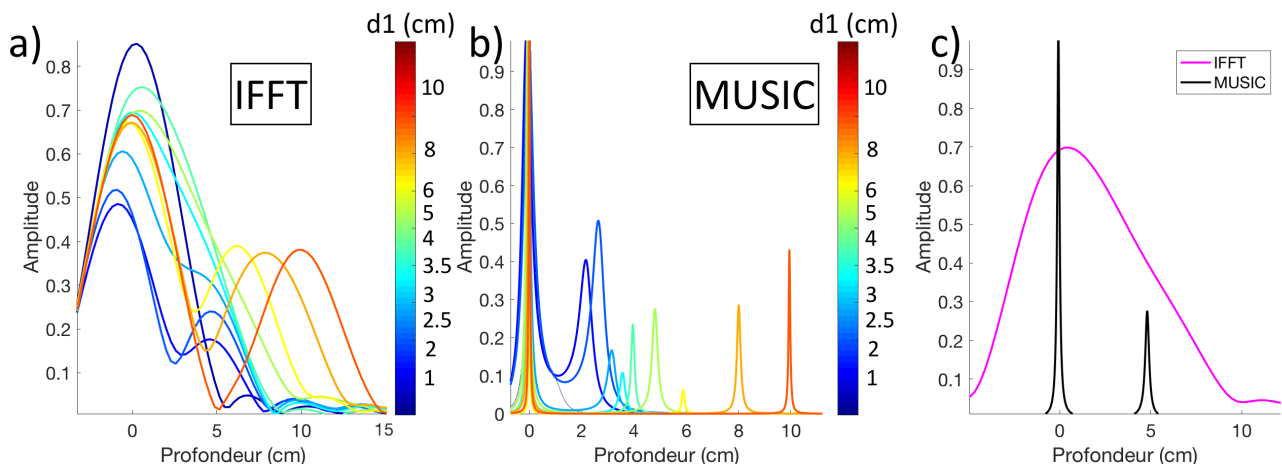


FIGURE 4.9 – Epaisseur estimée par transformée de Fourier inverse (gauche) et par MUSIC (centre). Comparaison IFFT/MUSIC (droite).

Ces premiers résultats de simulation montrent la nette supériorité de l'algorithme MUSIC par rapport à la transformée de Fourier. Cependant nous sommes dans un cas particulièrement favorable : pas de bruit, couches homogènes et interfaces lisses. Dans un second temps, nous avons donc ajouté un bruit gaussien, de moyenne nulle, afin d'étudier le comportement de l'algorithme en fonction du rapport signal sur bruit. Cinq rapports signal sur bruit (SNR) ont été considérés : 33 dB, 27 dB, 23 dB, 18 dB, 17 dB. Ces SNR ne sont pas particulièrement faibles mais sont représentatifs des SNR attendus (et observés) pour l'écho de sol et un écho venant d'une interface peu profonde. Les épaisseurs sont estimées à partir de 25 réalisations indépendantes. Pour chaque simulation nous avons estimé l'épaisseur de la

couche et mesuré l'erreur relative ainsi définie :

$$\Delta\tau = \frac{|\delta t_{\text{estime}} - \delta t_{\text{theorique}}|}{\delta t_{\text{theorique}}} \quad (4.14)$$

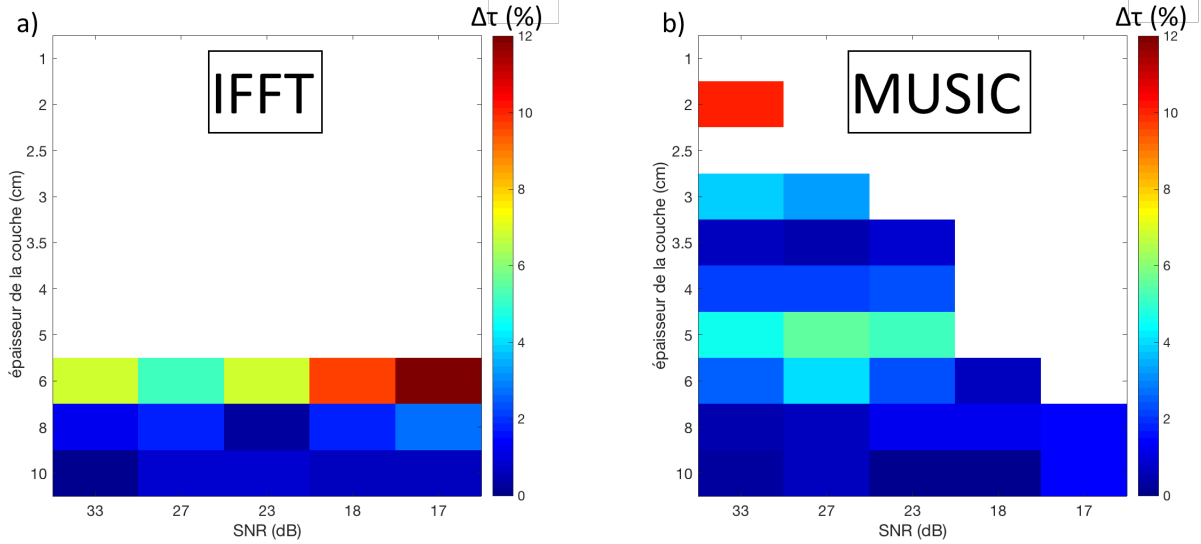


FIGURE 4.10 – Erreur relative sur l'estimation de l'épaisseur de la couche supérieure en fonction du SNR et de l'épaisseur de cette couche a) avec une IFFT, b) avec MUSIC.

La Figure 4.10 présente l'erreur relative $\Delta\tau$ en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure et du rapport signal sur bruit. Les zones blanches représentent les zones où les deux échos ne sont plus résolus. Sans surprise nous remarquons que MUSIC résout les échos sur une gamme d'épaisseurs plus large que celle de la transformée de Fourier inverse. Cependant lorsque le SNR décroît, les performances de l'algorithme se dégradent pour tendre vers celles d'une transformée de Fourier.

Modèle à deux couches avec hétérogénéités

Les sol naturels sont généralement hétérogènes. La constante diélectrique peut varier au sein d'une même couche du fait de mélanges, de la présence d'inclusions, de divers degrés d'humidité ou de changements de structure locale. Le code numérique TEMSI-FD permet de modéliser un sol hétérogène via un modèle de sol fractal généré par la méthode dite "diamant-carré" (cette méthode sera détaillée dans le Chapitre 5).

Nous avons considéré un milieu à deux couches dont la couche supérieure, d'une épaisseur $d_1 = 5$ cm, comporte des hétérogénéités de différentes tailles caractéristiques (Figure 4.11a). D'après la section précédente, l'épaisseur choisie garantit la séparation des deux échos avec MUSIC mais pas avec une IFFT. Pour chacune des tailles d'hétérogénéités ($L = 1.5, 4.5$ et 8.5 cm) nous avons réalisé des simulations avec les trois distributions de constante diélectrique présentées sur la Figure 4.11b. Ces distributions ont une valeur moyenne de 3 et des écart-types (std) variables. Au total, les opérations de WISDOM ont donc été simulées au dessus de 9 milieux différents et la méthode MUSIC a été appliquées aux données synthétiques en découlant afin de tester ses performances sur des milieux proches de milieux réalistes.

La Figure 4.12 montre les radargrammes construits après application de la IFFT et de MUSIC aux données simulées pour milieu avec des hétérogénéités présentant les caractéristiques suivantes : $L = 1.5$ cm et $std = 0.15$. La transformée de Fourier inverse ne résout pas les deux échos contrairement à l'algorithme MUSIC qui conserve donc son caractère haute résolution sur un milieu légèrement hétérogène. Regardons comment évolue les performances de MUSIC avec les caractéristiques des hétérogénéités.

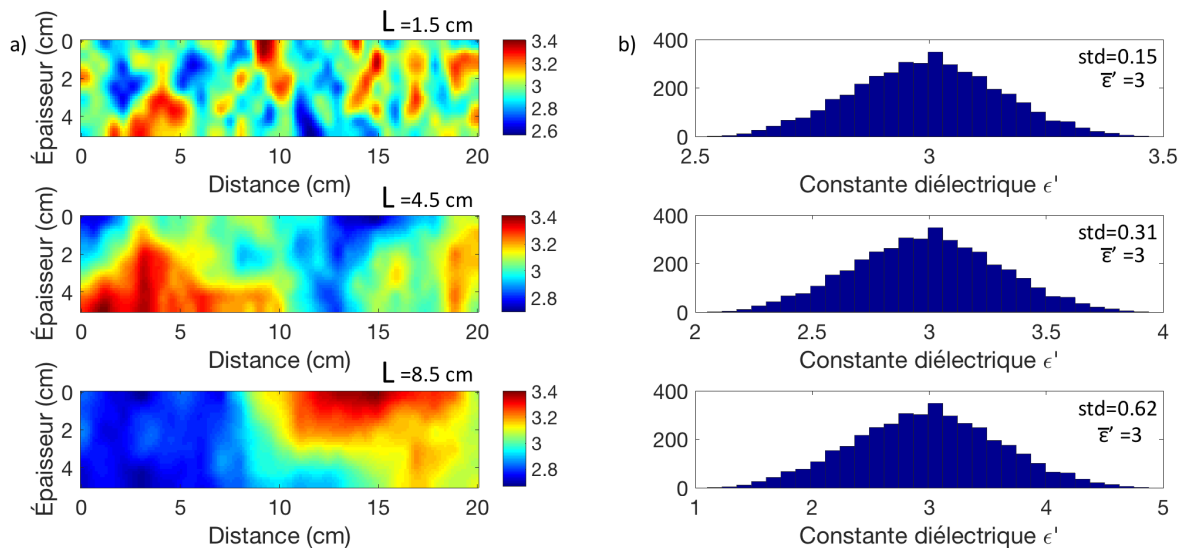


FIGURE 4.11 – Caractéristique de la couche avec hétérogénéités : a) Coupe de la couche supérieure montrant l'échelle des hétérogénéités, b) Distribution des constantes diélectriques au sein de la couche supérieure.

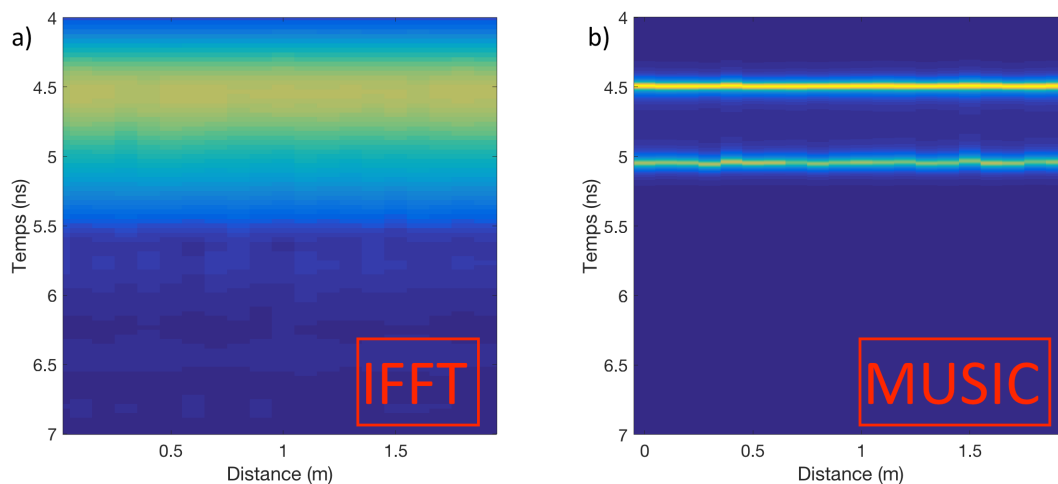


FIGURE 4.12 – Radargramme simulé pour une couche supérieure présentant des hétérogénéités de petite taille ($L = 1.5$ cm) et de faibles variations de constante diélectrique ($std = 0.15$) a) obtenu avec une transformée de Fourier inverse IFFT, b) obtenu avec MUSIC.

La Figure 4.13a montre l'erreur relative sur l'épaisseur estimée de la couche supérieure en fonction de son hétérogénéité; nous constatons que plus les hétérogénéités sont grandes et plus les variations de constante diélectrique sont importantes, plus l'erreur est significative. Cependant cette erreur ne dépasse pas les 8% et nous pouvons donc raisonnablement considérer que, malgré les hétérogénéités, l'algorithme MUSIC estime correctement l'épaisseur de la couche. La variabilité de l'estimation du temps d'arrivée de l'écho provenant de l'interface entre les deux couches en sous-sol (Figure 4.13b) augmente aussi avec la taille des hétérogénéités et l'amplitude des variations de la constante diélectrique dans le milieu. Ces variations ne traduisent cependant pas que des variations dans les performances de MUSIC; au premier ordre elles sont simplement dues aux hétérogénéités du milieu qui font varier le temps d'arrivée de l'écho d'un point à l'autre du radargramme. En effet, même si l'interface entre les deux couches est lisse, les ondes électromagnétiques n'ont pas traversé exactement le même milieu et donc ne se sont pas propagées à la même vitesse en fonction de la position du radar le long du profil

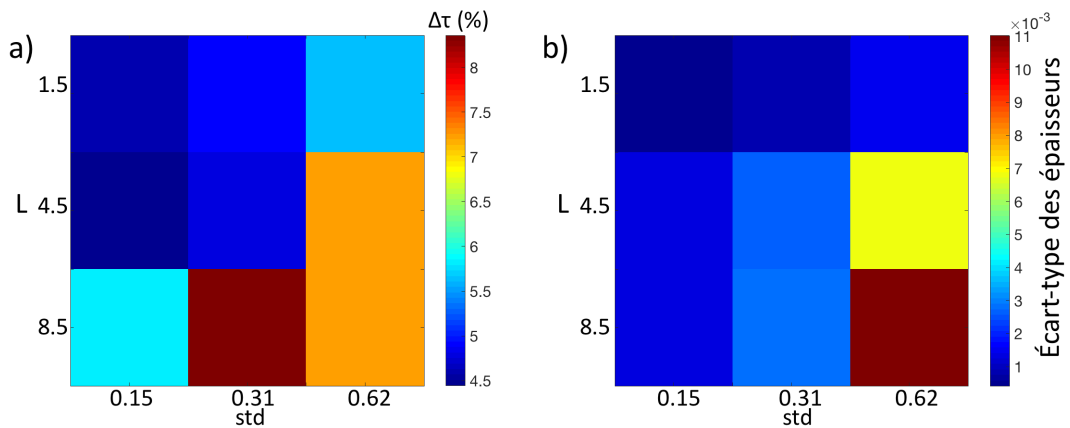


FIGURE 4.13 – Performances de MUSIC en fonction de l'hétérogénéité du milieu : a) Erreur relative sur l'estimation de la constante diélectrique en fonction de la taille des hétérogénéités (L) et de l'écart type des variations de constante diélectrique (std), b) Erreur relative sur l'épaisseur de la couche supérieure (en mètre) en fonction de la taille des hétérogénéités (L) et de l'écart type des variations de constante diélectrique (std).

de sondage.

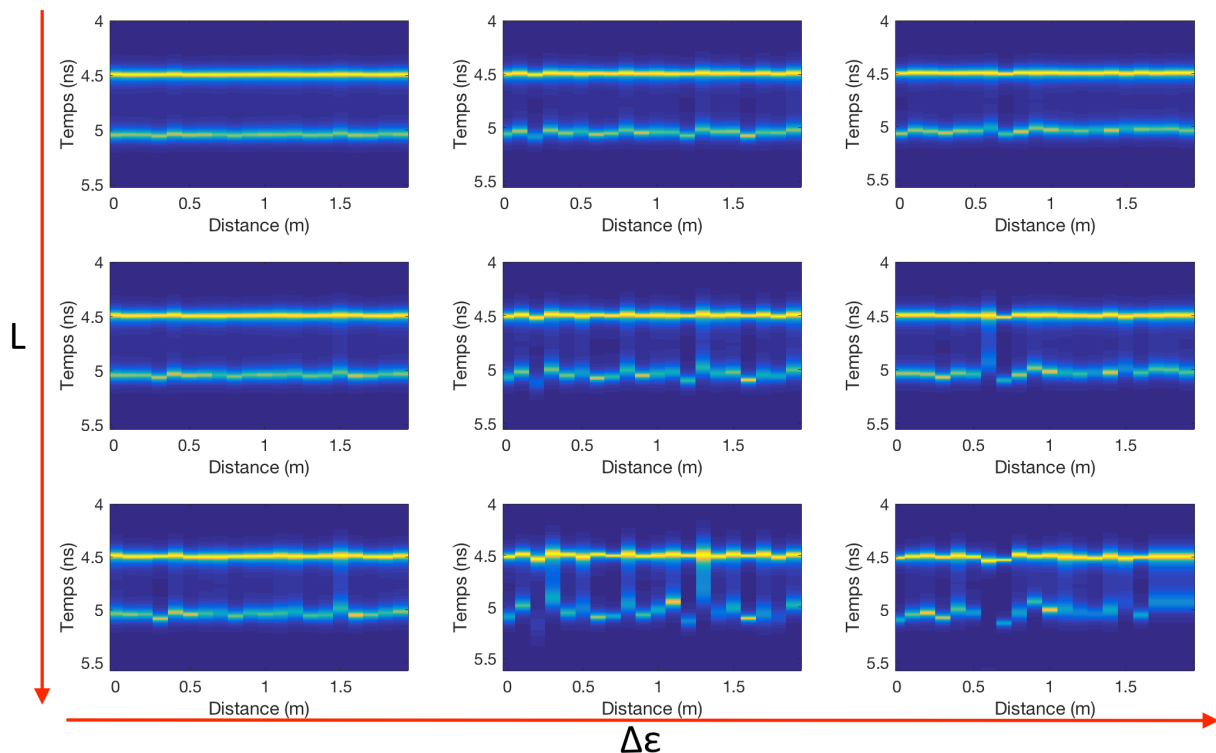


FIGURE 4.14 – Radargrammes construits à partir de l'algorithme MUSIC sur les données simulées présentées dans cette section

La Figure 4.14 montre les radargrammes construits à partir des pseudo-spectres de MUSIC pour les milieux hétérogènes modélisés dans cette section. Ces radargrammes révèlent un élargissement des pics correspondant aux échos lorsque la taille des hétérogénéités et l'amplitude des variations de constante diélectrique dans la couche supérieure augmentent. Malgré de bons résultats (erreur relative inférieure à 8%), les radargrammes montrent donc une dégradation des pseudo-spectres avec le degré

d'hétérogénéité du sol qui peut, à terme, nuire à leur lisibilité.

S'il faut garder en tête cette limite, l'intérêt théorique de la méthode MUSIC dans le traitement des données WISDOM et sa supériorité en comparaison à une méthode de IFFT classique sont établis et il ne reste plus qu'à tester cet algorithme sur des données réelles de l'instrument.

4.6 Application de l'algorithme MUSIC aux données WISDOM/ExoMars 2020

Après avoir testé l'algorithme de MUSIC sur des données synthétiques obtenues pour des milieux et dans des configurations de mesures de complexité croissante (couches homogènes, hétérogènes, bruit...), nous l'avons testé sur des données expérimentales acquises avec l'EM (Engineering Model) et le prototype de WISDOM.

4.6.1 Evaluation de MUSIC sur des données de l'EM de WISDOM

Afin d'évaluer la portabilité de l'algorithme dans la chaîne de traitement des données de WISDOM, nous avons, dans un premier temps, évalué les performances de l'algorithme sur des acquisitions radar sans antenne. Ces mesures ont été effectuées avec la version EM de l'instrument.

Comme décrit dans le Chapitre 2, l'électronique du radar comporte une voie d'émission (TX) et une voie de réception (RX), chacune de ces voies ayant deux entrées et deux sorties (0 et 1) permettant d'effectuer des mesures polarimétriques. Pour effectuer les mesures, la sortie TX₀ a été reliée à un diviseur de puissance afin de générer deux échos. Le diviseur de puissance est lui-même relié à un combineur de puissance par deux câbles. A chaque câble correspond un écho et la différence de longueur entre les deux câbles contrôle le temps de retard entre ces échos. Enfin, le combineur de puissance est connecté à l'entrée RX₀ de l'instrument. La Figure 4.15 montre le schéma du montage de cette mesure.

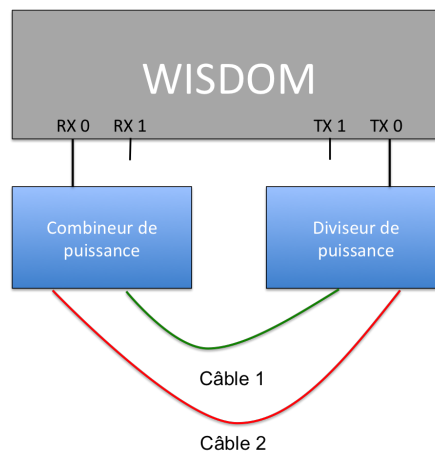


FIGURE 4.15 – Schéma du montage pour l'acquisition de mesures avec l'EM (sans antenne)

Plusieurs associations de câbles ont été utilisées afin de tester plusieurs écarts en temps entre les échos. Les temps de propagation pour chaque câble ont été mesurés avec un analyseur de réseau ce qui donne une mesure de l'écart en temps théorique entre les deux échos obtenus à comparer à l'écart obtenu avec MUSIC. Au passage, on a vérifié que la constante diélectrique des câbles était proche de 2.

Le Tableau 4.1 récapitule les écarts estimés entre les deux échos à partir de l'estimation du temps de propagation dans les câbles mesurés à l'analyseur de réseaux. Afin de rendre compte des performances de l'algorithme MUSIC rapport à une IFFT sur des données expérimentales, nous allons évaluer, pour chaque méthode, l'erreur relative $\Delta\tau$ (voir la section 5.2.1) commise lors de l'estimation de l'écart en temps entre les deux échos.

Mesure	Câble 1 (cm)	Câble 2 (cm)	écart théorique $\delta t_{théorique}$ (ns)
1	10.5	30.0	0.95
2	10.5	25.5	0.70
3	10.5	21.5	0.45
4	21.5	30.0	0.45
5	25.5	30.0	0.20

TABLE 4.1 – Ecarts théorique estimés $\delta t_{théorique}$ à partir de la mesure du temps de propagation dans chaque câble à l'analyseur de réseaux

Mesure	IFFT		MUSIC	
	$\delta t_{estime}(ns)$	$\Delta\tau(\%)$	$\delta t_{estime}(ns)$	$\Delta\tau(\%)$
1	0.87	8.4	0.92	3.15
2	0.7	0	0.68	2.85
3	0.47	4.5	0.47	4.5
4	0.5	11.1	0.46	2.22
5	0.44	120	0.27	35

TABLE 4.2 – Ecarts en temps estimés par IFFT et MUSIC.

Le Tableau 4.2 montre l'erreur relative commise dans l'évaluation de l'écart en temps entre les deux échos avec la méthode haute résolution MUSIC et la transformée de Fourier inverse (IFFT). Nous vérifions bien que les écarts estimés par MUSIC sont plus proches que ceux estimés par IFFT de leurs valeurs théoriques y compris près de la limite théorique de résolution (mesures 4 & 5). MUSIC estime même avec une plus grande précision que l'IFFT l'écart en temps de la mesure 1, pour laquelle l'écart est élevé et bien au-dessus de la limite de résolution théorique des deux méthodes. Cela s'explique par une meilleure résistance au bruit de l'algorithme ainsi que par un pseudo-spectre beaucoup plus étroit.

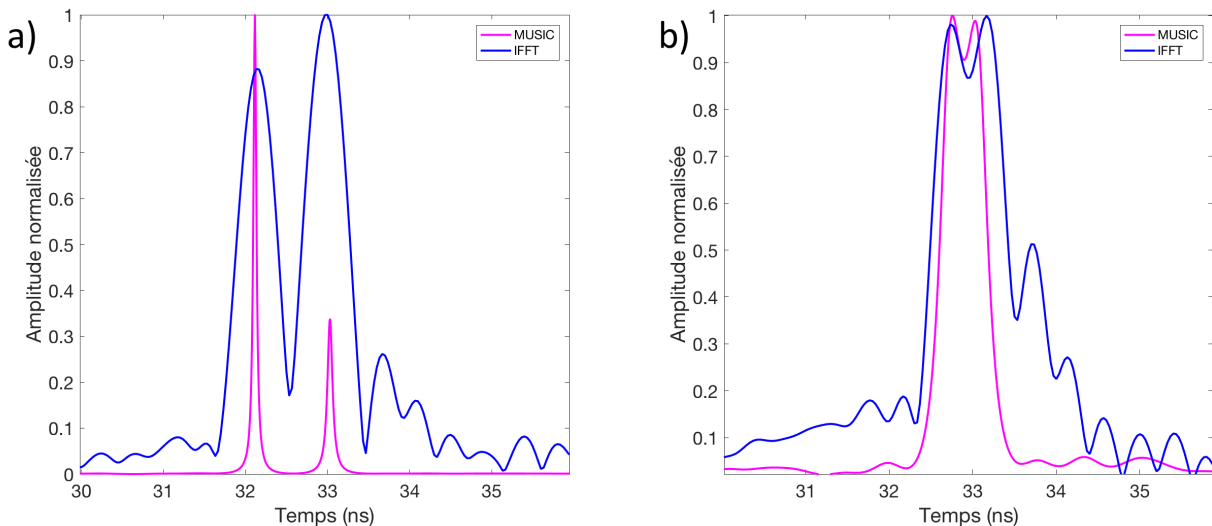


FIGURE 4.16 – Pseudo-spectre MUSIC et réponse temporelle (IFFT) a) de la mesure 1, b) de la mesure 5.

La Figure 4.16 illustre les deux cas extrêmes de cette étude, c'est-à-dire la réponse temporelle et le pseudo-spectre pour des écarts en temps de 0.95 ns ($B\Delta t = 2.37$) et de 0.2 ns ($B\Delta t = 0.5$). Elle montre nettement qu'au-dessus de la limite de résolution (cas $B\Delta t = 2.37$) la réponse temporelle obtenue avec MUSIC est plus propre, plus piquée (c'est-à-dire plus proche d'un Dirac) et moins perturbée par des lobes parasites. En-dessous de la limite de résolution (cas $B\Delta t = 0.5$), MUSIC commet une erreur plus

faible que la IFFT sur l'estimation de l'écart en temps.

L'algorithme haute résolution estime avec une plus grande précision que la transformée de Fourier inverse les écarts en temps. Il faut cependant garder à l'esprit que cette première validation expérimentale a été faite sur des données obtenues à partir de mesures n'intégrant pas les antennes de WISDOM et, par conséquent, un environnement extérieur. Les données sont donc peu bruitées et les échos sont très peu déformés (c'est-à-dire très proches du modèle de signal émis décrit dans le Chapitre 2). En conclusion, cette première application de l'algorithme MUSIC à des données expérimentales est encourageante.

4.6.2 Evaluation de MUSIC sur des données du prototype de WISDOM

Enfin, nous avons testé l'algorithme MUSIC sur des données du prototype acquises dans le cadre d'une campagne de mesures sur plaque métallique (voir le Chapitre 2). Ces mesures ont été effectuées en éloignant le radar de la plaque d'une distance de 30 cm à une distance de 90 cm avec un pas de 1 cm.

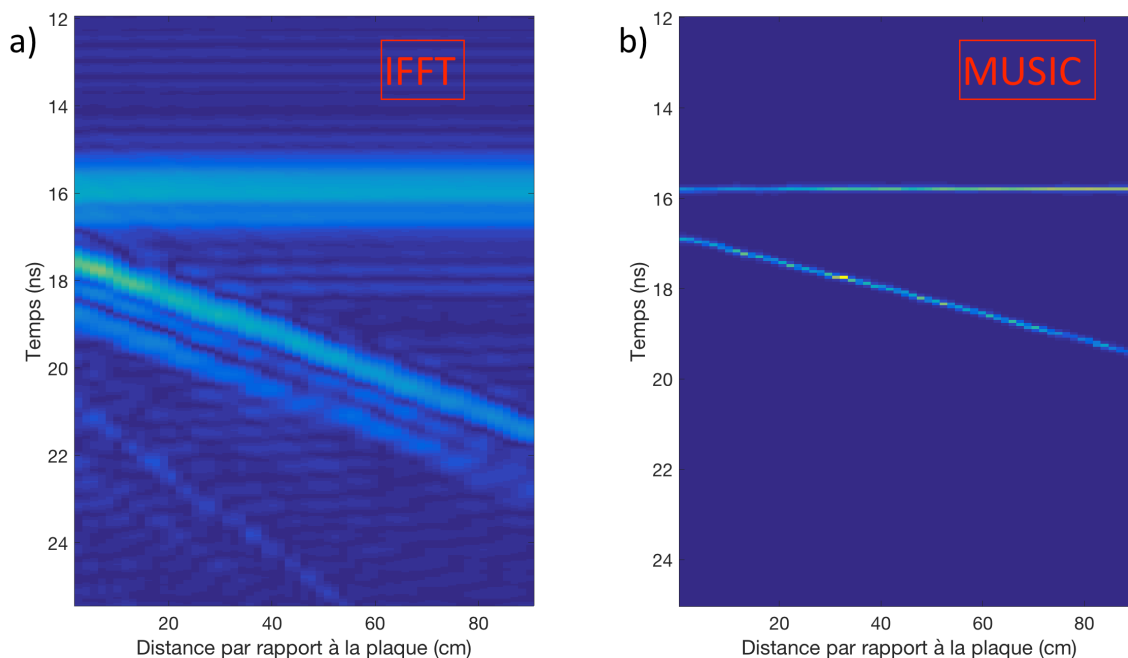


FIGURE 4.17 – Mesures sur plaque métallique : a) Radargramme obtenu avec une IFFT, b) Radargramme obtenu avec MUSIC.

La Figure 4.17 montre les radargrammes obtenus avec une IFFT et MUSIC. Dans les deux cas, les échos associés au couplage direct à 15.8 ns et à la réflexion sur la plaque métallique sont clairement identifiables. Le traitement MUSIC apporte beaucoup plus de précision ; les échos sont plus étroits que ceux observée avec la IFFT. De plus, nous ne voyons pas apparaître de parasites ni de phénomène de "ringing" (voir Chapitre 3). En effet, la sélection du nombre de sources que nécessite la mise en oeuvre de MUSIC a permis de filtrer le radargramme et de ne garder que le couplage et la réflexion sur la plaque.

Cependant, si MUSIC permet sans contexte de gagner en précision sur le traitement de données expérimentales, il ne semble pas apporter un gain significatif en terme de résolution. En effet, la capacité de l'algorithme à séparer deux échos proches semble être peu différente de celle d'une IFFT. Une étude approfondie permettra de confirmer ou d'infirmer ce premier constat. Une des raisons de la perte du caractère haute résolution de MUSIC sur des données réelles pourrait être une mauvaise estimation du nombre de sources ; [Xu et al., 1994] [Jiang and Ingram, 2004] [Zhang and Ng, 2010] proposent des

méthodes afin de mieux estimer ce nombre à partir de l'étude des valeurs propres.

4.7 Conclusion

WISDOM est un radar à pénétration de sol dont la très large bande de fréquences doit garantir une résolution de quelques centimètres dans un sol lithique sec. WISDOM pourra ainsi guider la foreuse d'ExoMars 2020 et dévoiler des structures dans le sous-sol martien. Dans ce chapitre nous avons évalué l'intérêt d'implémenter l'algorithme de haute résolution MUSIC dans la chaîne de traitement des données de WISDOM. Nous avons testé les performances de cet algorithme d'abord sur un modèle de signal simple bruité, puis sur des données synthétiques obtenues à l'aide d'un code de simulation numérique sophistiqué, et enfin sur des données expérimentales.

MUSIC apporte un gain significatif par rapport à une transformée de Fourier inverse classique en terme de précision dans l'estimation des temps d'arrivée des échos. Le gain en résolution est aussi certain sur des données synthétiques. En revanche, à ce jour, il n'a pas été démontré sur des données expérimentales. Cette étude mérite d'être poursuivie. Dans ce cadre, les performances d'autres algorithmes haute résolution tels que ESPRIT [Roy and Kailath, 1989] ou root-MUSIC [Barabell, 1983] pourront être explorées. Ces algorithmes présentent l'avantage de ne pas nécessiter la construction de pseudo-spectres pour déduire les temps d'arrivée des échos. Ils sont donc théoriquement plus rapides ce qui est particulièrement intéressant dans la perspective de mise en oeuvre de méthodes de détection automatique.

Chapitre 5

Méthodes de détection et de caractérisation des structures du sous-sol à partir des données de WISDOM

Ce chapitre présente les outils qui ont été développés afin de répondre à l'objectif de caractérisation du proche sous-sol martien par WISDOM. Jusqu'ici ce manuscrit s'est attardé sur la mise en place d'une chaîne de traitement des données qui prend en compte les caractéristiques techniques de l'instrument. Ici, nous nous intéresserons à l'élaboration d'outils et de méthodes d'interprétation des données. Dans un premier temps, nous nous intéressons aux méthodes d'évaluation de la constante diélectrique, qui, comme évoqué au chapitre 1, permet de contraindre la composition des matériaux. Dans une deuxième partie, nous cherchons à mettre en place des outils de détection automatique et d'interprétation reposant sur des critères objectifs. Ces méthodes de détection automatique auront pour objectifs la détection, localisation et caractérisation des roches en sous-sol ainsi que des structures d'intérêts. Pour cela, nous avons développés des méthodes spécifiques qui seront évaluées sur des données simulées puis sur des données expérimentales.

5.1 Détection et interprétation de signatures simulées associées à des configurations géologiques d'intérêt

La modélisation est un outil précieux pour dimensionner un instrument et pour en établir les performances, mais également essentiel pour l'interprétation des données. Nous avons vu précédemment que de puissants outils de modélisation sont, par exemple, utilisés par les équipes des radar sondeurs MARSIS et SHARAD pour simuler la réponse radar de la surface martienne et ainsi éviter des interprétations erronées des radargrammes expérimentaux. Dans le cadre de ce travail, la modélisation électromagnétique nous permet de générer des données simulées qui serviront à reconnaître et comprendre les signatures radars de structures ou de configurations particulières enfouies, et aussi de mettre en place des outils de traitement ou d'interprétation en phase avec les caractéristiques techniques du radar. Certaines méthodes analytiques exactes ou approchées peuvent simuler des phénomènes limités d'interaction d'une onde électromagnétique avec un milieu (diffusion par une surface rugueuse, diffraction par un volume simple,..) et permettre des analyses fines de ces mécanismes particuliers. Cependant, notre objectif ici est de modéliser, avec le même code, le fonctionnement des antennes de WISDOM (en émission et réception) et la propagation des ondes dans des environnements réalistes. Nous avons donc choisi d'utiliser le code 3D de simulation numérique TEMSI-FD (Time ElectroMagnetic Simulator - Finite Difference method) développé au laboratoire XLIM de Limoges qui permet en effet d'implémenter efficacement des surfaces rugueuses et d'introduire des milieux hétérogènes. Toutes les données simulées qui ont été présentées dans les parties précédentes du manuscrit ont été obtenues avec ce code de calcul.

5.1.1 La méthode des différences finies FDTD

La FDTD (*Finite Difference in Time Domain*) repose sur l'algorithme de Yee [Yee, 1966] qui calcule la propagation d'une onde électromagnétique à partir d'équations de Maxwell discrétisées. Le volume de calcul est discrétisé en cellules de calcul (les cellules de Yee) de tailles $(\Delta x, \Delta y$ et $\Delta z)$. À chaque pas de temps, le champ magnétique situé au centre des faces des cellules est calculé au temps $(n + 1/2)\Delta t$ à partir du champ électrique situé sur le milieu des arêtes de la cellule (calculé lui-même au temps $n\Delta t$). Les 6 composantes du champ sont donc décalées d'une demi-maille ainsi que l'illustre la Figure 5.1, ce qui rend le code plus efficace. Chaque cellule du volume de calcul est définie par les valeurs de sa constante diélectrique ϵ_r , sa conductivité σ et sa perméabilité magnétique μ . Le volume de calcul est limité par les ressources informatiques disponibles (mémoire et temps de calcul). En pratique, on se limite à des volumes qui sont approximativement de $2m \times 2m \times 2m$, ce qui correspond à 64 millions de cellules de 5 mm de côté. La durée de simulation correspondant est de 8 minutes sur un ordinateur récent à 8 coeurs (I7 2015).

Cette méthode permet progressivement de calculer le champ électromagnétique dans tout le volume de calcul. Développée à la fin des années 60, elle s'est considérablement développée et s'est imposée au côté des modèles analytiques grâce à la puissance de calcul des machines actuelles. Si aucune approximation physique ne limite en théorie le domaine de validité des résultats obtenus, il convient, pour éviter la dispersion numérique, de prendre un pas de discrétisation inférieur à la plus petite longueur d'onde dans le milieu divisé par 10. Ainsi pour un milieu de constante diélectrique égale à 3 et aux fréquences de WISDOM, le pas doit être au maximum de 5 mm. Afin de satisfaire le critère de stabilité de Friedrichs-Levy, le pas temporel doit être inférieur au temps de propagation dans la cellule, soit :

$$\Delta t < \frac{1}{v_{max} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} = \Delta t_c \quad (5.1)$$

où v_{max} est la vitesse maximum (atteinte dans les zones où la permittivité est la plus faible). Dans le cas de la modélisation de WISDOM, ce milieu est toujours l'air (les antennes étant positionnées à 38 cm du sol). Lors de nos simulations, nous prenons systématiquement $\Delta t = 0.95\Delta t_c$.

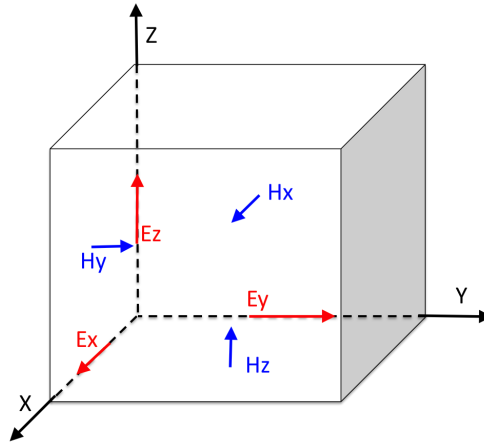


FIGURE 5.1 – Cellule de Yee, les composantes du champ électrique sont calculées sur le milieu des arêtes et les composantes du champ magnétique sur le milieu des faces

La principale difficulté d'un code FDTD est peut-être liée au fait que le volume de calcul est fini par construction, alors qu'expérimentalement, les ondes électromagnétiques utilisées pour un sondage par GPR se propagent bien au delà de la zone ciblée. Afin de reproduire les conditions d'un milieu infini et d'éviter des réflexions indésirables sur les bords du volume de calcul, ce dernier est entouré par des PML (*Perfect Match Layers*) [Berenger, 1994]. Ces couches permettent d'absorber les ondes aux limites du volume de calcul. Par défaut, TEMSI-FD entoure le volume de calcul de 10 couches de PML, ce qui a un coût en temps de calcul non négligeable. Au prix d'une efficacité d'absorption moindre, il est possible de réduire ce nombre ou d'appliquer des PML uniquement sur certaines faces du volume. Enfin, les PML ne sont pas théoriquement conçues pour des milieux hétérogènes. Afin de maintenir l'efficacité des PML, les milieux hétérogènes devront donc être enveloppés d'une fine couche homogène, dont la constante diélectrique est égale à la moyenne de celle du milieu hétérogène.

5.1.2 Modélisation électromagnétique du radar

La modélisation du radar repose essentiellement sur la modélisation de ses antennes Vivaldi d'émission et de réception. Deux stratégies ont été envisagées pour modéliser les antennes de WISDOM. La première modélise fidèlement l'élément conducteur de l'antenne et son substrat. Ce modèle a permis de mettre en évidence le fait que seul le bord découpé de l'antenne participe à la formation de l'onde électromagnétique. Il nécessite cependant un maillage très fin de 1 mm imposé par l'épaisseur de la plaque, ce qui limite les dimensions de l'environnement à modéliser. En conséquence, le choix final s'est porté sur un second modèle d'antenne. Les antennes du radar ont été modélisées par des fils obliques [C.Guiffaut, 2010][Hamadi, 2010][Ciarletti et al., 2015], dérivés des fils de Holland [Holland and Simpson, 1981], qui épousent la forme de la fente des antennes Vivaldi, qui se trouve être la zone préférentielle où les courants circulent. La méthode développée par [Wu and King, 1965][Wu and Shen, 1967] est, en suite, utilisée pour réduire le phénomène de ringing, c'est-à-dire de réflexion en bout d'antenne. Cette méthode consiste à ajouter un profil résistif à l'antenne afin d'atténuer progressivement les courants. C'est ce dernier modèle d'antenne, dont les caractéristiques de rayonnement sont très voisines de celles de l'antenne réelle en termes de polarisation de l'onde émise et de diagramme de rayonnement, qui a été utilisé dans les simulations présentées dans ce manuscrit. Cette décision est motivée par le gain en temps de calcul apporté par le modèle filaire. En effet, le code TEMSI-FD peut prendre en compte des éléments filaires indépendamment du maillage du volume de calcul en cellules alors que le modèle d'antenne sur plaque imposerait des cellules de calcul de dimensions inférieures à 1 mm. Il faut également garder à l'esprit le fait que les antennes de WISDOM sont orientées à 45° par rapport à la direction de déplacement du rover ; le code TEMSI-FD permet, dans sa version actuelle, d'introduire des fils obliques et donc de modéliser aisément les antennes avec

leur orientation réelle, ce qui est très difficile pour des structures non filaires. Une nouvelle méthode est en cours de développement en collaboration avec XLIM ; elle consiste à importer directement le diagramme de rayonnement de l'antenne mesuré (voir Chapitre 2) en chambre anéchoïque.

Pour les simulations, l'antenne filaire est reliée à un générateur capable de transmettre un signal pré-défini dans le domaine temporel comme une sino-gaussienne. TEMSI-FD offre toutefois l'opportunité d'importer un fichier qui décrit la forme d'onde dans le domaine temporel, nous avons donc utilisé le signal généré par WISDOM et mesuré expérimentalement (voir Chapitre 2). Pour modéliser le fonctionnement du radar, deux antennes sont en réalité utilisées : une antenne émettrice alimentée par un générateur et une antenne réceptrice qui en est dépourvue. Seul le courant de l'antenne réceptrice est récupéré en sortie de la simulation. Pour chaque environnement, les antennes sont placées à 38 cm du sol, elles sont séparées de 20 cm conformément aux configurations décrites dans le document d'interface de la mission ExoMars. Le système d'antennes et son alimentation sont ensuite placés dans l'environnement dont nous souhaitons modéliser la réponse. WISDOM est un radar polarimétrique : à l'émission comme à la réception, chaque antenne est constituée de deux éléments orthogonaux, l'un des deux est sélectionné à chaque sondage. Au total, une série de 4 sondages différents peut être effectuée à chaque position du rover.

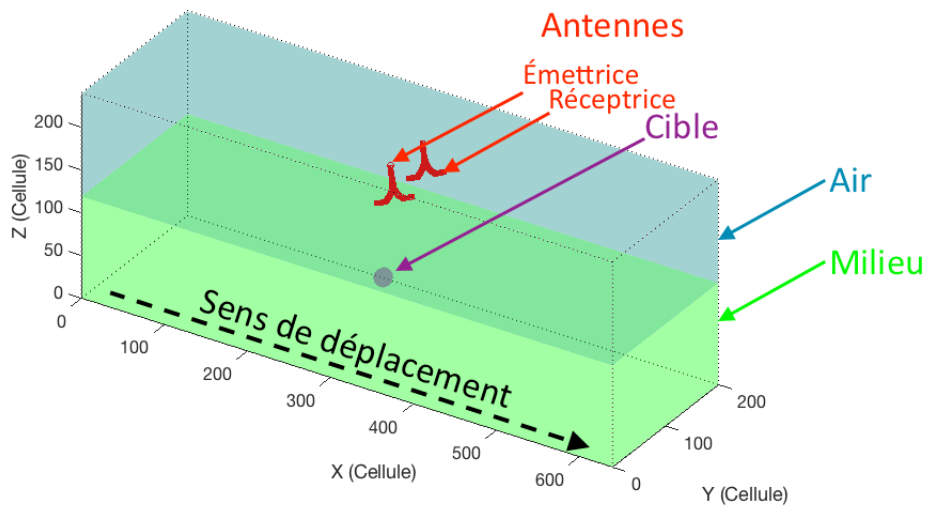


FIGURE 5.2 – Visualisation d'un milieu modélisé sous TEMSI-FD

La Figure 5.2 montre une représentation en 3 dimensions d'une scène modélisée, il s'agit d'un milieu homogène qui contient une sphère en son centre. La scène décrite par la Figure 5.2 est statique, pour acquérir un profil radar nous devons donc simuler le mouvement des antennes du radar par rapport à la cible (dans ce cas : la sphère) ce qui implique de faire une simulation par position d'antenne. Dans le cadre de la mission ExoMars, dans les zones qui seront scrutées intensivement en vue d'effectuer un forage, il est prévu que les sondages radar soient espacés de 10 cm. C'est la configuration que nous avons retenue pour chacun des radargrammes présentés dans ce manuscrit, pour toutes les simulations le même pas a donc été adopté. Cela signifie que pour un profil de 2 m de longueur, 20 sondages sont requis pour construire un radargramme et que, par conséquent, nous devons faire 20 simulations. TEMSI-FD autorise le calcul parallèle, ce qui permet de diviser le temps de calcul par 8.

5.1.3 Génération de surface rugueuse

Les surfaces naturelles sont plus ou moins rugueuses, cela se traduit par des variations locales de hauteur. La rugosité d'une surface affecte l'amplitude de l'onde rétrodiffusée et reçue par le radar ainsi que la distance antenne/sol. Les radars sondeurs SHARAD et MARSIS ; mais aussi WISDOM sont concernés car ils opèrent au-dessus de la surface. Cependant ce que nous appelons rugosité de surface ne signifie pas la même chose pour des radars basse fréquence (MARSIS et SHARAD) et pour un radar

comme WISDOM. Une surface rugueuse pour WISDOM est considérée comme lisse pour SHARAD et MARSIS inversement la rugosité perçue par SHARAD et MARSIS est considérée comme de la topographie pour WISDOM. La rugosité d'une surface dépend en effet de la longueur d'onde à laquelle elle est observée. Une surface est considérée comme rugueuse si ses variations de hauteur induisent une différence de phase $\Delta\phi$ supérieure à $\pi/2$, ce critère est matérialisé par le critère de Rayleigh qui est défini comme :

$$\sigma_h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \quad (5.2)$$

où λ est la longueur d'onde, et θ est l'angle d'incidence et σ_h est l'écart type des hauteurs. En considérant une incidence normale et la fréquence centrale de WISDOM, nous constatons que des variations de quelques centimètres sont perçues par WISDOM comme de la rugosité. En conséquence, nous devons prendre en compte la rugosité de surface, dans la modélisation des sols naturels. Dans la littérature, de nombreux paramètres permettent de décrire une surface rugueuse, nous utiliserons l'écart type des hauteurs σ_h qui rend compte des variations de hauteurs et la longueur de corrélation l_c qui décrit les variations latérales. En science du sol, [Zribi and Dechambre, 2003] propose le paramètre Z_s qui prend en compte les deux paramètres précédents $Z_s = \sigma_h^2/l_c$. Dans le cas d'une surface lisse, la longueur de corrélation tend vers l'infini et le paramètre Z_s lui tend vers zéro. La longueur de corrélation est déterminée à partir de la fonction d'autocorrélation. Pour un cas unidimensionnel et discret (ce qui se présente lors de mesures), la fonction d'autocorrélation ρ et l'écart-type des hauteurs σ_h sont donnés par [Ulaby et al., 2014] :

$$\rho(\xi) = \frac{\sum_{i=1}^{N+1-j} z_i z_{j+i-1}}{\sum_{i=1}^N z_i^2} \quad \sigma_h = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (z_i^2 - \bar{z}^2)}{N-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.3)$$

où $\xi = (j-1)\Delta x$ et j un entier et z_i est la hauteur au point i . La longueur de corrélation est la distance entre deux points de la surface considérés comme décorrélés. Pour une la fonction d'auto-corrélation gaussienne, la longueur de corrélation est classiquement définie comme $\rho(l_c) = 1/e$ [Martinez-Agirre et al., 2016][Ulaby et al., 2014]. Mêmes si d'autres paramètres sont parfois utilisés pour caractériser une surface rugueuse (comme la dimension fractale sur une gamme d'échelles spatiales, par exemple), nous nous limiterons ici à la longueur de corrélation et à l'écart type des hauteurs.

Afin de générer une surface aléatoire avec des valeurs de paramètres imposées qui puisse être utilisée dans le code TEMSI-FD, nous utilisons une méthode reposant sur le filtrage linéaire d'un bruit blanc (ou décorrélé) et gaussien décrite dans [Braham, 2007]. Nous cherchons à générer une surface aléatoire, isotrope, de densité de probabilité des hauteurs gaussienne et de fonction d'auto-corrélation gaussienne, caractérisée par son écart-type σ_h et sa longueur de corrélation l_c . L'expression mathématique de la fonction d'auto-corrélation gaussienne est :

$$R(d) = \sigma_h^2 \exp \left(- \left(\frac{d}{l_c} \right)^2 \right) \quad (5.4)$$

où $d = \sqrt{x^2 + y^2}$ pour une surface en 2 dimensions. Pour une fonction d'auto-corrélation gaussienne, on montre [Braham, 2007] que la forme analytique de la réponse impulsionnelle du filtre doit être :

$$h_f(x, y) = \frac{2}{l_c \sqrt{\pi}} \exp \left(-2 \left(\frac{x^2 + y^2}{l_c} \right)^2 \right) \quad (5.5)$$

La surface rugueuse s'obtient par le produit de convolution entre la réponse impulsionnelle et le bruit blanc gaussien. La Figure 5.3 montre trois surfaces rugueuses qui ne diffèrent que par la valeur de leur longueur de corrélation. Nous voyons que la longueur de corrélation détermine l'échelle horizontale de la rugosité, plus la longueur de corrélation est grande, plus, par définition, la distance qui sépare de points décorrélés s'allonge. Nous le constatons sur la Figure 5.3.

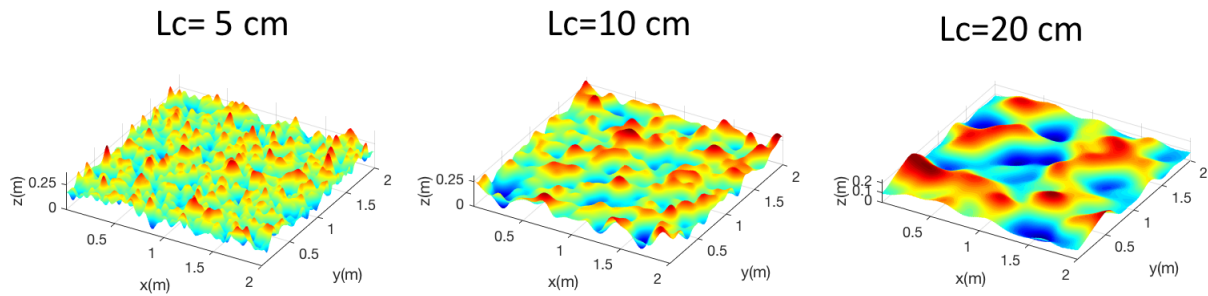


FIGURE 5.3 – Surfaces rugueuses générées pour différentes valeurs de longueur de corrélation l_c (écart type des hauteurs σ_h fixé à 5 cm)

En fonction des valeurs de l'écart-type des hauteurs et de la longueur de corrélation, la rugosité de la surface peut impacter fortement le mécanisme de rétrodiffusion et, par conséquent, le signal reçu par WISDOM en polarisation parallèle et croisée (co- et cross-polarisation). Nous détaillerons par la suite comment à partir du coefficient de réflexion sur une surface lisse, nous pouvons déterminer la constante diélectrique des matériaux qui composent la couche supérieure du sous-sol. Nous verrons que la confiance que nous pouvons avoir en cette estimation de la constante diélectrique dépend de la rugosité de la surface ; il est donc essentiel d'être en mesure de la caractériser.

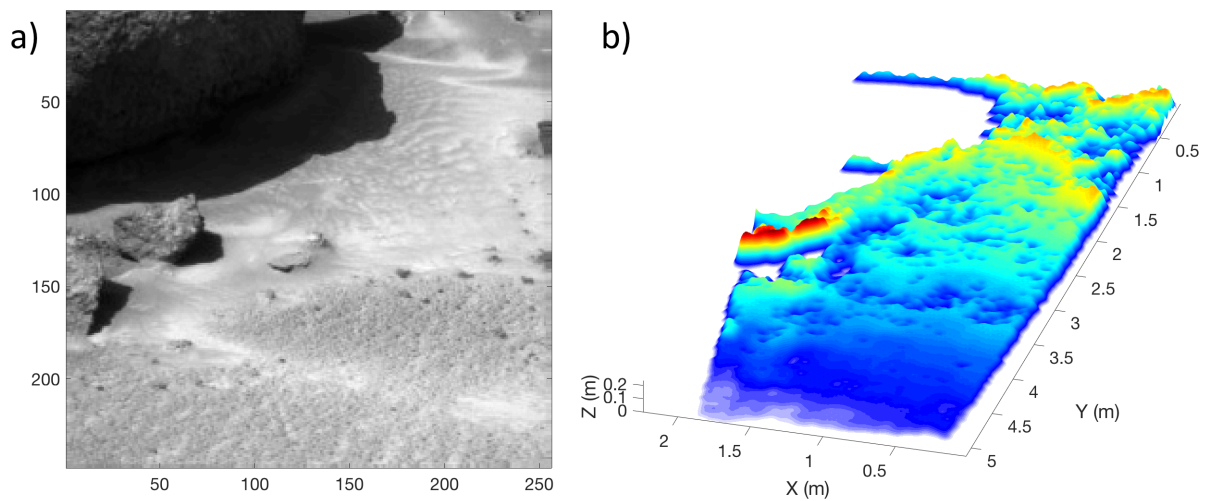


FIGURE 5.4 – Surface rugueuse : a) Photo prise par la caméra de Pathfinder IMP (*Imager for Mars Pathfinder*) b) Reconstitution 3D à partir de la stéréo caméra du lander Pathfinder (IMP)

La Figure 5.4a montre, à gauche, une photographie de la surface martienne acquise par la stereo caméra IMP (*Imager for Mars Pathfinder*). L'image de droite présente une reconstitution en trois dimensions de cette surface effectuée à partir de paires d'images de la caméra, qui permettent de restituer la hauteur en fonction de la position (Figure 5.4b). Dans le cadre de la mission ExoMars 2020, la stéréo-caméra de PanCam sera elle aussi capable de reconstituer la surface des sites en trois dimensions avec une précision millimétrique, ce qui permettra de caractériser la rugosité de surface et, le cas échéant, de simuler avec TEMSI-FD la réponse radar de la surface. L'analyse de cette synergie entre les deux instruments (WISDOM et PanCam) a été initiée et sera développée lors de la très prochaine campagne de simulation d'opérations (ExoFit , octobre 2018)

5.1.4 Génération d'un milieu non homogène

Pour mener à bien les travaux de simulation présentés dans ce manuscrit, nous avons aussi eu besoin de générer des volumes non-homogènes en termes de constante diélectrique ϵ'_r qui présentent des variations spatiales réalistes. L'algorithme utilisé, et implémenté dans le code TEMSI-FD, repose sur la technique de fractionnement dite de Diamond-Square [Miller, 1986]. Il confère aux volumes générés aléatoirement un caractère auto-similaire sur une gamme limitée d'échelles spatiales. Il s'agit d'une méthode très rapide et efficace pour générer un milieu hétérogène sur un grand volume. Habituellement utilisée pour générer une fonction aléatoire de deux variables spatiales, elle a été étendue [Besse, 2004] pour créer des volumes ayant des propriétés électriques hétérogènes. La génération se fait de façon itérative sur une grille cartésienne parfaitement adaptée à la méthode FDTD. Le milieu initial est caractérisé par une valeur de constante diélectrique uniforme sur laquelle se superpose une structure fractale générée par trois paramètres positifs (N, F et H) :

- le nombre d'itérations N définit la taille du modèle initial et donc l'échelle spatiale la plus grande pour les hétérogénéités : $L = \Delta(1 + 2^N)$ où Δ est le pas de discrétisation du milieu .
- le paramètre $H < 1$ règle l'amplitude des variables aléatoires qui sont ajoutées à chaque itération. A la i ème itération, ces valeurs aléatoires $\delta\epsilon_i$ sont réparties uniformément dans l'intervalle $[-FH^i, FH^i]$.
- le paramètre F est un facteur multiplicatif qui s'applique aux variations spatiales générées. Il contrôle l'intervalle de variation de la valeur du paramètre électrique et par conséquent le contraste de permittivité dans le volume.

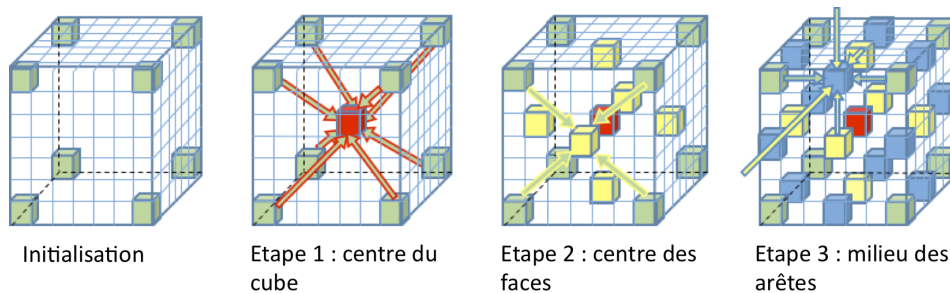


FIGURE 5.5 – Illustration des étapes correspondant à une itération du processus. À chaque itération, 8 nouveaux cubes sont générés par le modèle

Lors de l'initialisation du processus, on définit les valeurs aux sommets de chaque cube de taille L. Ces valeurs initiales sont des valeurs aléatoires réparties uniformément sur l'intervalle $[-F, F]$. A la fin de l'itération (i-1), des valeurs de permittivité ont été affectées aux huit sommets d'un cube (en vert). La mise en oeuvre de l'itération suivante se fait en trois étapes comme suit (voir Figure 5.5). A chacune de ces trois étapes, on assigne à de nouvelles cellules des valeurs de permittivité obtenues à partir d'une moyenne calculée sur des points voisins dont la valeur a été précédemment fixée et on ajoute une valeur aléatoire $\delta\epsilon_i$ uniformément répartie sur la plage $[-FH^i, FH^i]$. A la fin de ces trois étapes et donc de l'itération, 8 nouveaux cubes sont générés à l'intérieur de chaque cube de l'itération précédente. Le processus est poursuivi jusqu'à ce qu'une valeur de permittivité soit affectée à chacune des cellules du volume de calcul. La Figure 5.6 illustre l'effet du paramètre N. Elle représente sept coupes transversales d'un milieu généré sous TEMSI-FD en faisant varier entre 1 et 7 le nombre d'itération N. La couleur correspond à la valeur de la constante diélectrique (ϵ'_r). Dans ce milieu, les valeurs des variables H et F sont constantes et la distribution des valeurs de la constante diélectrique ne varie pas.

La génération de milieux non-homogènes par cette méthode permet de représenter des milieux naturels qui ne sont en règle générale pas homogènes. Les échelles spatiales considérées peuvent aller, dans notre cas, de 0.5 cm (qui est la plus petite échelle imposée par le maillage du code FDTD) jusqu'à quelques mètres (qui correspond à la dimension la plus grande que l'on puisse prendre en compte dans les simulations).

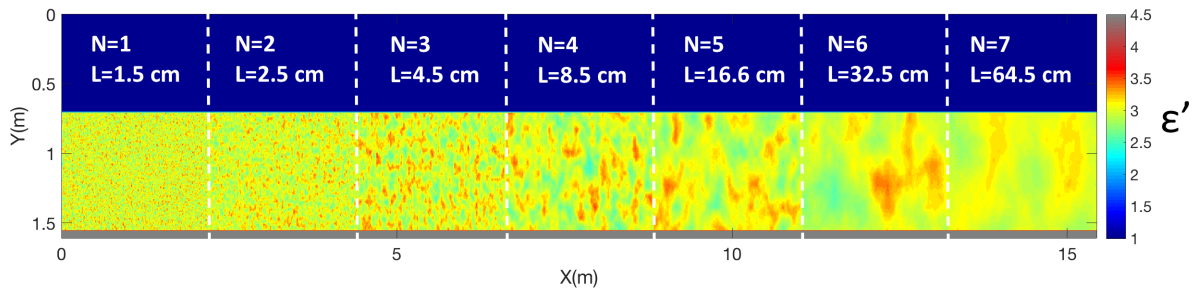


FIGURE 5.6 – Coupe d’un milieu généré par TEMSI-FD à partir de la méthode diamant-carré pour plusieurs valeurs du nombre d’itérations N , (H et F sont fixées)

5.1.5 Modélisation du terrain d’expérimentation

Afin de tester et de valider l’ensemble du code de simulation (qui tient compte de la forme d’onde du signal, du rayonnement des antennes, de la propagation des ondes dans le milieu et de la réception des différentes ondes retro-diffusées), nous avons modélisé notre terrain d’expérimentation (présenté précédemment dans le chapitre 2). Lors de sa construction, les dimensions du volume ainsi que la position et taille de chaque sphère ont été relevées.

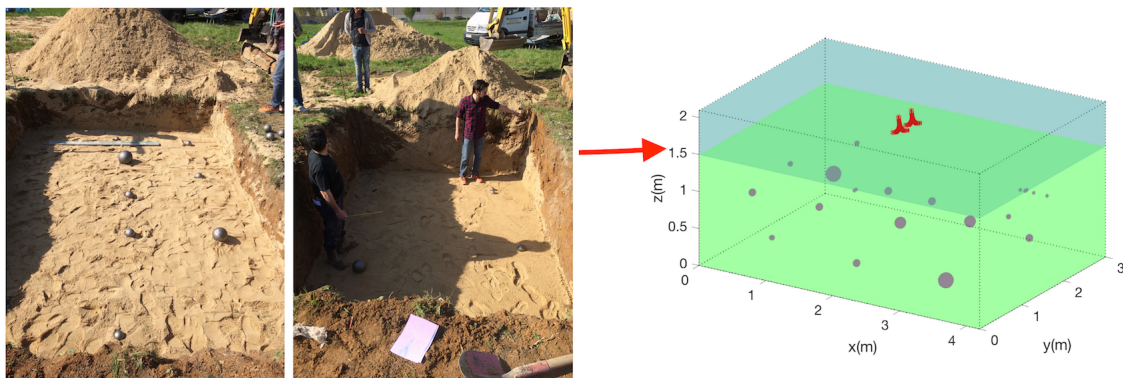


FIGURE 5.7 – Modélisation du terrain d’expérimentation avec TEMSI-FD

Nous considérons un sable sec et homogène ($\epsilon'_r = 3 - 4$) et les sphères métalliques. La couche sur laquelle repose le sable (mélange de sable et de gravier) n’est pas représentée, l’objectif est de ne regarder ici que l’influence des sphères. La Figure 5.7 montre les photos du terrain d’expérimentation pendant sa construction ainsi que la représentation du modèle 3D utilisé sous TEMSI-FD.

Nous avons réalisé des mesures et des simulations selon le profil central décrit par le trait blanc en pointillé sur la Figure 5.8a, le radargramme expérimental obtenu est celui de la Figure 5.8b et le radargramme simulé celui de la Figure 5.8c. Trois sphères (notées 1, 2 et 3) sont clairement identifiables sur le radargramme expérimental et sur le radargramme simulé. Leurs profondeurs calculées à partir du temps de propagation et de la constante diélectrique du sable sec permet d’identifier ces sphères également sur la photo du terrain d’expérimentation 5.8a. La détection des sphères notées 4 et 5 (flèches jaunes) est discutable : elles sont visibles sur la photo 5.8a) et sur le radargramme simulé mais leurs signatures n’est pas claire sur le radargramme expérimental 5.8b), cependant des branches d’hyperboles sont tout de même visibles à l’emplacement attendu. Les flèches rouges correspondent à des hyperboles non identifiées sur le radargramme expérimental. Une hyperbole pourtant bien visible (flèche bleue) du radargramme expérimental ne semble correspondre à la position d’aucune des sphères métalliques. Elle pourrait provenir d’un réflecteur naturel (caillou) présent dans le sable (ce qui semble peu probable) ou, au vu de sa signature claire et forte, être causée par une sphère qui ne serait pas à l’emplacement noté. Il pourrait s’agir de la sphère numéro 6, même si le temps d’arrivée de la signature simulée est plus

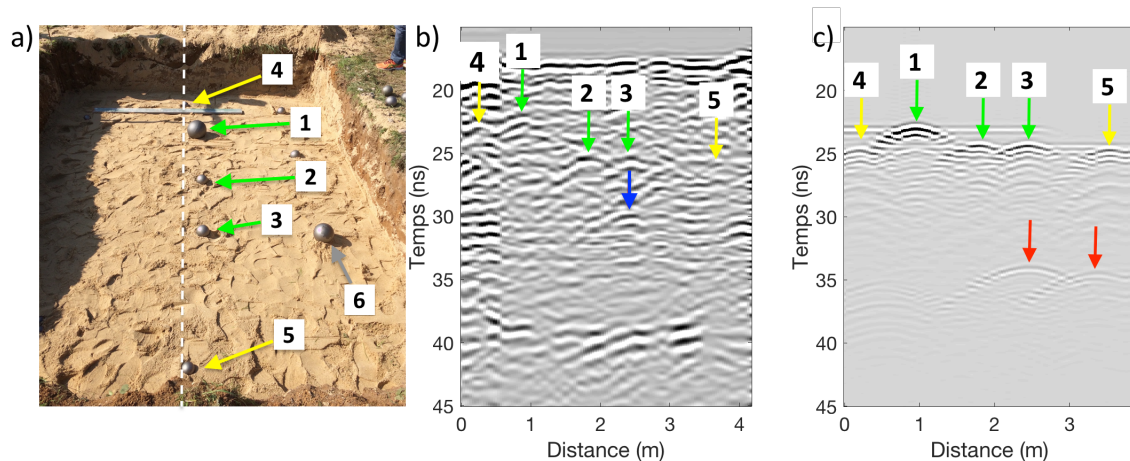


FIGURE 5.8 – Comparaison entre les données expérimentales et les données simulées sous TEMSI-FD sur le terrain d'expérimentation ("Mars Yard") : a) Photo du terrain d'expérimentation, b) Radargramme expérimental, c) Radargramme simulé sous TEMSI-FD

élevé que le temps mesuré expérimentalement. En effet, bien que des précautions aient été prises, il est possible que la sphère n°6 ait bougé lors de son enfouissement et qu'elle se soit rapprochée de la sphère n°3. En conclusion, 6 des signatures hyperboliques sur 7 présentes sur le radargramme simulé sont identifiables sur le radargramme expérimental. Le radargramme simulé ne montre plus de signature hyperbolique à partir d'un temps d'arrivée de 35 ns, ce qui confirme que les signaux intenses observés aux alentours de 40 ns proviennent bien de la couche de graviers qui a été déposée au fond du bac pour assurer le drainage. Les hypothèses d'un tassement du sable, d'un changement d'humidité, de la présence réflecteurs naturels dans le sable ou d'un changement de la position de certaines sphères lors du comblement ne peuvent être écartées et peuvent expliquer les différences observées entre le modèle et la mesure. Ces résultats, obtenus dans une configuration relativement bien connue, valident le modèle de radar implémenté et illustrent l'utilité de la modélisation pour la compréhension et interprétation fine des radargrammes.

Dans le cadre de la mission ExoMars, la vérité terrain n'est pas connue a priori et les radargrammes obtenus peuvent être et seront dans un premier temps interprétés (milieu stratifié, présence de pierres, interface marquée,...) sans apport d'informations extérieures. Cependant, des informations pourront être fournies par les caméras du rover et prises en compte par le biais des simulations. Dans le cas, par exemple, d'affleurements qui dévoilent un milieu stratifié très finement au voisinage de la zone sondée par WISDOM. Cette information a priori sur la nature du sous-sol sera prise en compte en entrée du code de simulation et la confrontation des radargrammes simulés avec les données expérimentales permettra au final d'affiner l'interprétation des structures en sous-sol. Des résultats intéressants sont attendus notamment dans des configurations de milieux présentant des couches fines à la limite de la résolution de WISDOM.

5.1.6 Modélisation de structures analogues martiens

Afin de préparer le retour scientifique de l'instrument WISDOM, nous nous sommes intéressés aux structures que pourrait rencontrer le Rover lors de la mission. Nous avons sélectionné des structures observées sur Mars ou sur des analogues martiens, qui seraient témoins de l'habitabilité passée ou présente de la planète. Nous les avons modélisées sous TEMSI-FD afin d'obtenir leurs signatures radar. L'objectif est de comprendre ces signatures et donc d'en faciliter l'interprétation à terme mais aussi de déterminer ce que nous sommes en capacité de détecter.

Chenal enfoui

Les chenaux enfouis se forment par érosion du fait d'un écoulement d'eau. La Figure 5.9a) montre des dépôts en couche de cendres volcaniques dans le désert de Kau (Hawaii), ces dépôts se sont déposés suite à plusieurs événements volcaniques. Nous pouvons voir sur la photo 5.9a) un chenal, creusé par un cours d'eau, de nouveaux épisodes volcaniques l'ont ensuite enterré. De dimensions décimétrique, ce chenal enfoui est une structure attendue dans le sous-sol martien. Les sites d'Oxia Planum et de Marwth Vallis montrent des figures d'érosion par de l'eau liquide (chenal inversé sur Oxia Planum [Quantin et al., 2016] et réseaux de vallée dans le nord est de Marwth Vallis [Loizeau et al., 2007]), la taille de ces chenaux est de l'ordre de la centaine de mètres, des chenaux plus petits en sous-sol ne sont donc pas à exclure. L'instrument THEMIS/MarsOdyssey a permis de détecter des chenaux remplis par de la poussière et des sédiments et d'ainsi révéler des réseaux de vallées bien plus ramifiés que ceux observés auparavant [Mangold et al., 2004], le radar sondeur SHARAD, a quant à lui permis de détecter un chenal enfoui sous la plaine d'Elysium [Morgan et al., 2013]. Le radar à pénétration de sol WISDOM nous permettra de nous intéresser à des figures d'érosions par de l'eau liquide à une toute autre échelle de l'ordre du mètre.

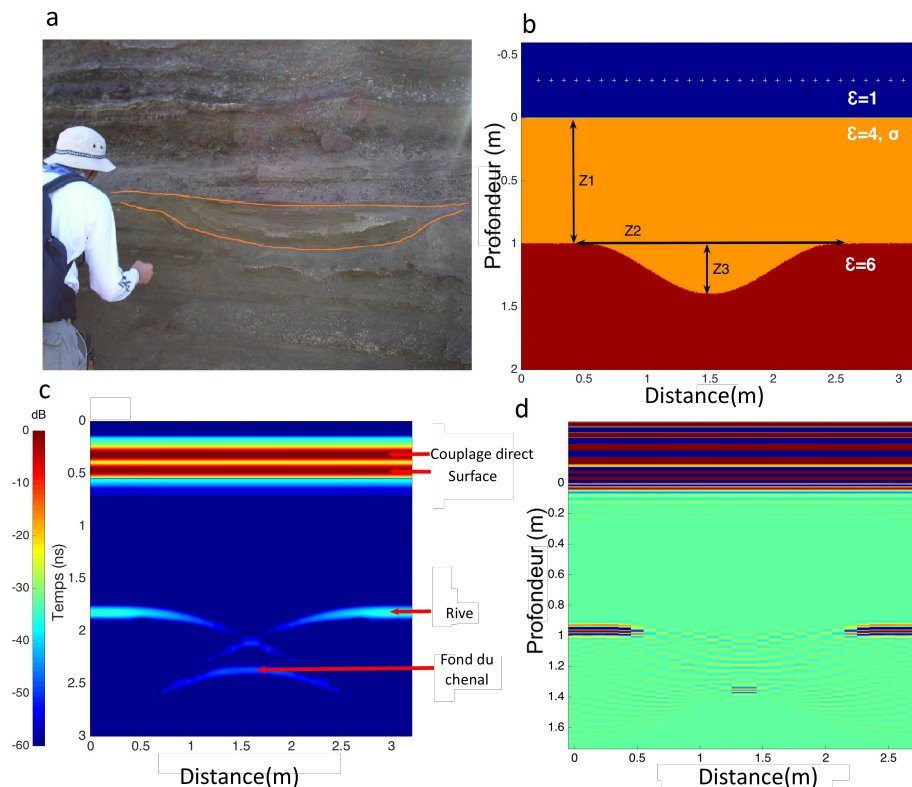


FIGURE 5.9 – Modélisation d'un chenal enfoui sous TEMSI-FD : a) Chenal enfoui dans le désert de Kau, Hawaii, b) modèle géoélectrique du chenal enfoui, c) Radargramme simulé sous TEMSI-FD, il correspond au modèle géoélectrique du sous sol présenté en b), d) Radargramme migré. Extrait de [Ciarletti et al., 2017a]

Afin d'évaluer la capacité de WISDOM à détecter des chenaux de petite taille, nous avons simulé des chenaux enfouis sous TEMSI-FD. Nous supposons un chenal qui aurait érodé un sol (roche consolidée $\epsilon_r = 6$) puis qui aurait été recouvert par des dépôts volcaniques ($\epsilon_r = 4$). Nous considérons plusieurs épaisseur Z_1 (1, 2, 2.5 m) pour la couche de dépôts ainsi que plusieurs conductivités σ ($10^{-4} - 10^{-2}$ S/m). En accord avec l'analogue découvert dans le désert de Kau, nous fixons un rapport hauteur/largeur pour le canal de 0.22 ($Z_2=1.8$ m et $Z_3=0.4$ m).

La Figure 5.9c) montre le radargramme simulé obtenu pour un canal surmonté d'une couche de dépôts de 1m d'épaisseur avec une conductivité de 10^{-2} S/m. Nous voyons des échos provenant des

bords du chenal, ils correspondent à des demi-hyperboles, ainsi qu'un écho provenant du fond du chenal qui crée une hyperbole complète. Les parois du chenal ne sont pas détectées parce que leur pente est trop élevée. Des parois rugueuses pourraient cependant être détectées, ce cas fera l'objet d'une prochaine étude. Pour toutes les simulations ($Z1$ et σ) les signatures provenant des bords du chenal et du fond du chenal pourraient être détectées. La dynamique de l'instrument qui a été estimée à 84 dB est, en effet, supérieure à la différence entre l'amplitude des échos provenant du chenal et l'écho de surface. La Figure 5.9d montre le radargramme après migration, cette technique permet de faire converger les hyperboles en un point ce qui donne la position du réflecteur ponctuel. Ici la migration permet de reconstituer le fond du chenal ainsi que ses bords, ce qui permet d'estimer sa profondeur ($Z3=0.4$ m) ainsi que sa largeur ($Z2=1.8$ m).

Polygones de dessiccation

Les polygones de dessiccation peuvent se former lors du dessèchement de sédiments riches en argiles qui se mettent alors à se fissurer et à craqueler. Sur Mars, les argiles montrent fréquemment des structures polygonales avec des largeurs comprises entre plusieurs centimètres et une dizaine de mètres. Les polygones de dessiccation témoignent par conséquent d'un environnement passé humide. Sur le site d'Oxia Planum, les spectromètres infra-rouges ont révélé des argiles avec des polygones de la taille du mètre. WISDOM pourra potentiellement rencontrer ce type de structure si le site d'Oxia Planum est retenu pour la mission.

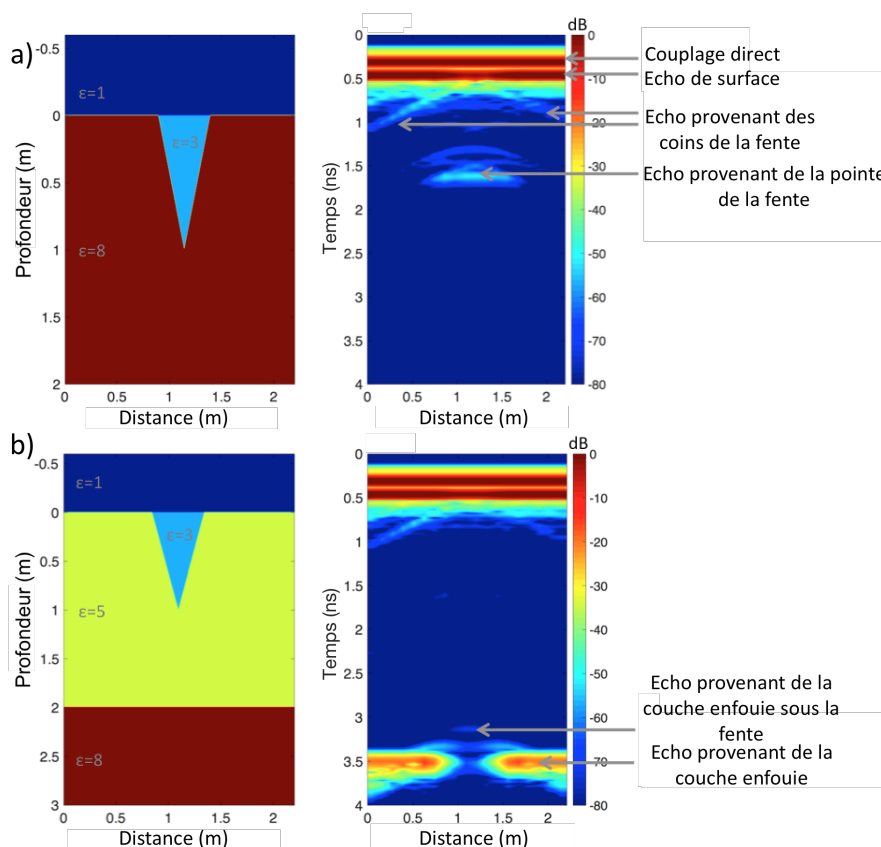


FIGURE 5.10 – Modélisation d'un polygone de dessiccation sous TEMSI-FD : a) Modèle géoélectrique de la fente et son radargramme associé b) Modèle géoélectrique de la fente et d'une deuxième couche avec son radargramme associé. Extrait de [Ciarletti et al., 2017a]

Afin de déterminer la signature radar de ce type de structure, nous avons modélisé l'effet de différentes fentes qui représentent une partie enfouie d'un polygone. Les fentes font 1m de profondeur et 50 cm de large en surface, elles sont remplies de dépôts éoliens ($\epsilon'_r = 3$). La Figure 5.10a) montre

le modèle géoélectrique utilisé, le fort contraste diélectrique entre le contenu de la fente et le sol environnant ($\Delta\epsilon_r = 5$), permet de générer une signature hyperbolique suffisamment forte compatible avec la dynamique de l'instrument et donc être détectable. Nous voyons sur la Figure 5.10a, le radargramme correspondant, nous détectons le fond de la fente ainsi que des coins de la fente qui donnent des branches d'hyperboles provenant de la surface. Le temps d'arrivée de l'écho provenant du fond la fente permet de retrouver sa profondeur (à partir de la valeur de la constante diélectrique estimée à partir de l'amplitude de l'écho de sol). Dans le deuxième cas Figure 5.10b, nous abaissons la constante diélectrique du milieu environnant et nous introduisons une interface en sous-sol sous la fente. Le contraste diélectrique entre le contenu de la fente et le milieu environnant ($\Delta\epsilon = 2$) est trop faible pour permettre la détection du fond de la fente. Cependant, la réflexion au niveau de l'interface profonde est discontinue. En effet, à la verticale de la fente, l'écho provenant de l'interface profonde arrive plus tôt. Nous pouvons à partir de l'écho provenant de l'éventuelle interface située sous la fente contraindre la composition et la taille de la fente elle-même. Ce type de structure (interface discontinue) doit donc nous alerter sur la présence de fentes de dessiccation lors de l'interprétation des radargrammes, cet exemple illustre parfaitement les écarts importants entre la signature radar d'une structure et la géométrie de cette même structure et par conséquent de l'utilité de la modélisation.

Roches enfouies

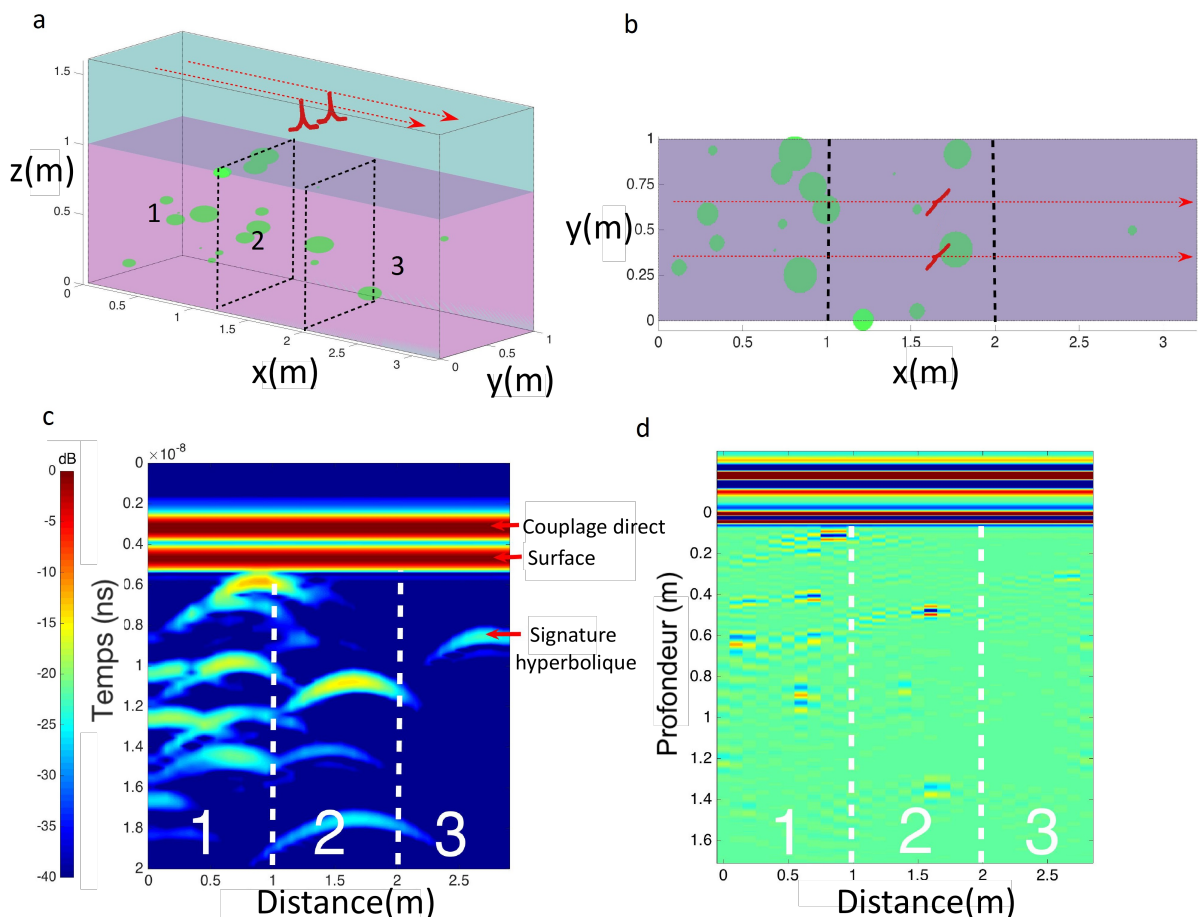


FIGURE 5.11 – a) Vue 3D du volume de calcul où l'on voit les antennes de WISDOM (en rouge) à 38 cm au dessus du sol, qui est divisé en trois zones avec différentes densités de roches (en vert). Les flèches rouges montrent le déplacement des antennes sur 3.3 m, b) vue du dessus du volume de calcul, c) Radargramme simulé, d) Radargramme migré. Extrait de [Ciarletti et al., 2017a]

WISDOM jouera un rôle majeur avec le détecteur à neutron ADRON-RM dans la sélection du

site en sous-sol le plus prometteur pour y prélever un échantillon à l'aide de la foreuse. WISDOM permettra aussi d'écartier les zones qui peuvent représenter un danger pour la foreuse. Les zones avec de nombreux réflecteurs (roches) pourraient en effet endommager la foreuse. Grâce à sa résolution mais aussi sa profondeur de pénétration WISDOM sera capable de détecter les roches en sous-sol et donc d'identifier des zones en sous-sol présentant un danger pour la foreuse.

Pour démontrer et illustrer la capacité de WISDOM à détecter les roches en sous-sol nous avons modélisé sous TEMSI-FD un milieu ($\epsilon'_r = 4$) divisé en trois zones avec des densités de roche différentes. Les roches sont modélisées comme des sphéroïdes avec un demi grand axe (a) compris entre 1 et 10 centimètre et une sphéricité de 0.5. Leur constante diélectrique est fixé à 6, ce qui est compatible avec des analogues martiens [ElShafie and Heggy, 2013]. La Figure 5.11c montre le radargramme obtenu, 16 hyperboles sont identifiées pour 19 roches, les trois plus petites roches ($a=1\text{cm}$) n'ont pas été détectées. L'analyse du radargramme permet d'identifier trois zones en fonction de leur densité en roche. Ici nous pouvons conclure que la zone numéro 3 est celle qui présente le moins de risque pour la foreuse. Nous verrons dans la section 3 comment à partir des mesures polarimétriques nous pouvons contraindre la forme des roches et déterminer précisément leurs positions.

Couche de glace souterraine

Les conditions atmosphériques de Mars ne permettent pas de trouver de l'eau liquide à sa surface, ni de la glace d'eau à des latitudes moyennes. Cependant, les observations effectuées par les radars et par les détecteurs à neutrons montrent qu'il existe de la glace d'eau piégée en sous-sol en dehors des calottes polaires. Les sites d'Oxia Planum et de Mawrth Vallis pressentis pour la mission ExoMars 2020, se situent en-dessous de 25° Nord. A ces latitudes, les détecteurs à neutrons n'ont pas identifié de glace en sous-sol, mais nous savons que leur profondeur d'analyse ne dépasse pas le mètre. Le radar sondeur MARSIS a permis, lui, d'identifier dans le sous-sol profond des volumes de constante diélectrique compatible avec celle de sédiments riches en glace d'eau [Mouginot et al., 2012]. L'hypothèse de l'existence de couches de glace d'eau locales situées à plus de 1 mètre de profondeur n'est pas à exclure. Si de la glace était effectivement présente avec WISDOM, serions nous capables de la détecter et de l'identifier ? .

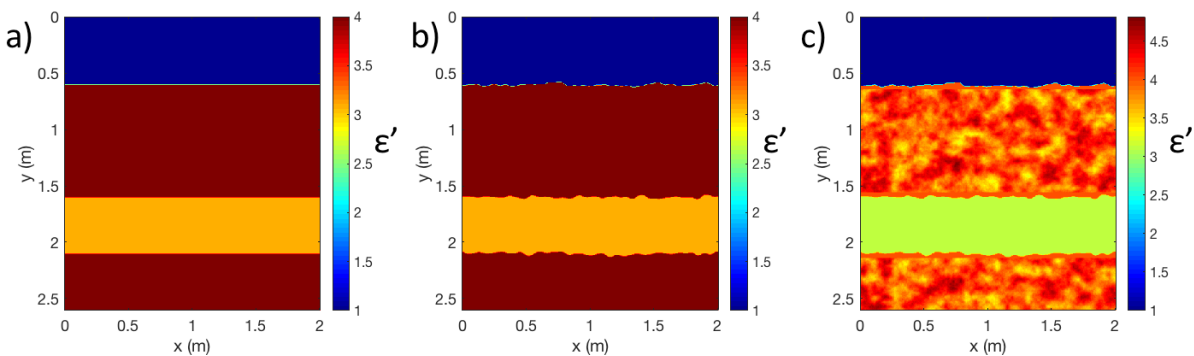


FIGURE 5.12 – Couche de glace souterraine simulée sous TEMSI-FD : a) Milieu homogène, b) Milieu homogène avec interfaces rugueuses, c) Milieu non-homogène avec interfaces rugueuses

Afin de répondre à cette question, nous avons modélisé un milieu, composé de trois couches, la première et la dernière sont de la roche ou du régolithe consolidé. Elles limitent une couche de glace de 50 cm d'épaisseur enfouie à 1m de profondeur. Dans le modèle 1 (Figure 5.12a) les couches sont homogènes et les interfaces sont lisses. Dans le modèle 2, les couches sont homogènes et les interfaces sont rugueuses (Figure 5.12b) et enfin, dans le modèle 3, les couches sont non-homogènes et les interfaces sont rugueuses (Figure 5.12c). En plus de déterminer la réponse radar de ce type de configuration, ces simulations permettent de rendre compte de l'influence de la rugosité et des hétérogénéités sur les données radar.

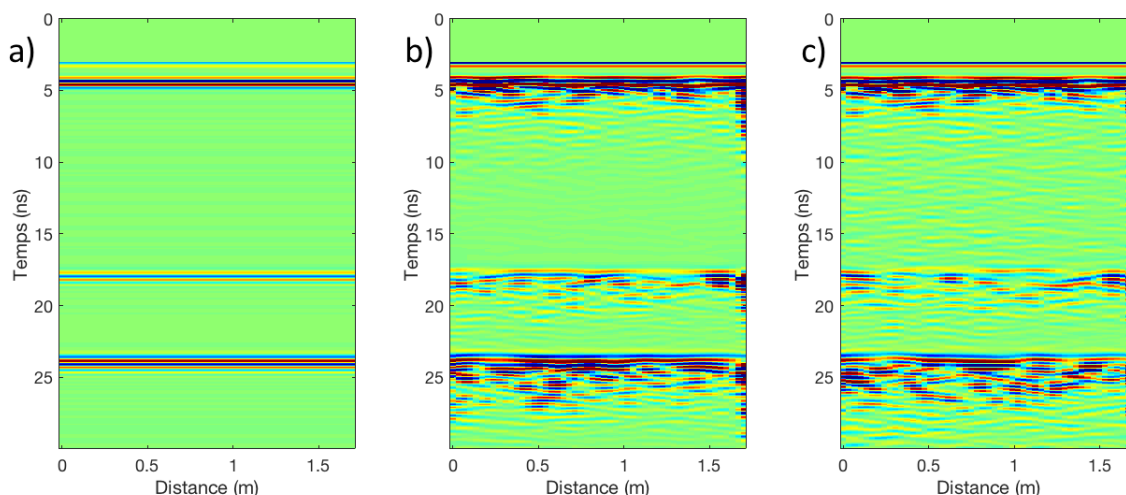


FIGURE 5.13 – Radargrammes obtenus sur les milieux modélisés sous TEMSI-FD présentés sur la Figure 5.12, a) Radargramme d’un milieu homogène avec interface lisse, b) Radargramme d’un milieu homogène avec interfaces rugueuses, c) Radargramme d’un milieu non homogène avec interfaces rugueuses

La Figure 5.13 montre les radargrammes obtenus sur les milieux de la Figure 5.12. Les radargrammes obtenus montre l’influence de la rugosité aux interfaces ainsi que l’effet d’hétérogénéité dans les couches. La réponse radar de la rugosité de surface s’étend sur presque 5 ns, ce qui peut être confondu avec des structures en sous-sol. Nous voyons ici l’importance de pouvoir correctement modéliser la surface afin de savoir ce qui provient du milieu sondé et de la surface.

Sur le radargramme acquis sur un milieu homogène et interface lisse 5.13a), nous remarquons un changement de signe au niveau de l’interface roche/glace, ce phénomène se produit lorsqu’une onde passe d’un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent. Cela peut donc constituer la signature d’une couche de glace (ou d’une cavité). Sur les radargrammes b) et c) cette signature est beaucoup moins claire, elle reste cependant perceptible. L’intensité de la deuxième interface (à 24 ns) comparée à la première (à 17 ns) signifie que l’onde a été peu atténuée par le milieu et que par conséquent ce dernier est à faible perte (comme la glace d’eau). L’inversion du signe de l’écho ainsi que de faibles pertes dans le milieu doit nous permettre d’identifier une couche de glace et cela même dans milieu avec hétérogénéité/rugosité.

La modélisation est un outil précieux pour l’interprétation des radargrammes et la préparation du retour scientifique des données. Les cas du chenal enfoui, des polygones de dessiccation et de la detection de roches enfouies ont fait l’objet d’une publication dans [Ciarletti et al., 2017a]

5.2 Estimation de la constante diélectrique du sous-sol

La caractérisation de la surface et du sous-sol martien fait partie des principaux objectifs de la mission ExoMars 2020. Dans une bande de fréquence donnée, la valeur de la constante diélectrique d'un matériau dépend principalement de sa composition, de son degré de compaction et de sa température. L'estimation de la constante diélectrique permet donc de recueillir des informations sur la composition du sous-sol sondé. Mais, bien plus encore, en ce qui concerne les données recueillies par WISDOM, la valeur de la constante diélectrique permet de convertir les retards mesurés en distances parcourues dans le milieu et donc de pouvoir estimer la profondeur des structures détectées dans le sous-sol. Ce dernier point sera d'importance pour les opérations de forage.

5.2.1 Estimation à partir de l'écho de sol

Traditionnellement, les antennes des GPR sont en contact avec la surface, ceci afin d'optimiser la pénétration des ondes dans le sous-sol. Dans le cas de WISDOM, les contraintes de la mission ont imposé une hauteur de 38 cm par rapport à la surface de Mars. Cette configuration défavorable peut cependant être utilisée pour caractériser la surface puisque nous avons accès au signal qui est rétro-diffusé par cette surface. Dans cette partie, nous allons détailler la méthode d'estimation de la constante diélectrique ([Dorizon et al., 2016][Dorizon, 2016]) des matériaux sondés par WISDOM.

Principe de la méthode

La méthode repose sur la formule de Friis utilisée dans le chapitre 2 pour le bilan de liaison de WISDOM. La Formule de Friis couplée à la théorie des images nous permet d'estimer la puissance reçue P_r par une surface lisse en champ lointain en fonction de la puissance émise P_e selon la relation suivante :

$$P_r = \underbrace{P_e G_r G_t \left(\frac{\lambda}{8\pi d} \right)^2}_K |\Gamma|^2 \quad (5.6)$$

où G_t et G_r sont les gains des antennes dans la direction de la surface, d la distance entre la surface et les antennes et Γ le coefficient de réflexion de la surface. Pour une surface lisse, en incidence normale, en champ lointain, le coefficient de réflexion dépend exclusivement de la constante diélectrique ϵ_r de la surface :

$$\Gamma = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r'}}{1 + \sqrt{\epsilon_r'}} \quad (5.7)$$

Le coefficient de réflexion en amplitude sur une plaque métallique est de -1. Une mesure de référence sur une plaque métallique suffisamment grande permet donc d'obtenir une réflexion totale et d'évaluer K pour une configuration géométrique et du radar donnée.

$$P_{ref} = K \quad \text{avec} \quad K = P_e G_r G_t \left(\frac{\lambda}{8\pi d} \right)^2 \quad (5.8)$$

Le coefficient K prend en compte la puissance fournie à l'antenne d'émission, le gain des antennes, la propagation de l'onde aller et retour entre les antennes et la surface et les imperfections du radar (telles que les pertes dans les chaînes d'émission et de transmission). Pour une distance d fixée, (par exemple les 38 cm qui séparent la surface des antennes de WISDOM), le rapport entre une mesure sur plaque métallique et une mesure sur la surface dont on cherche à évaluer la constante diélectrique permet de relier amplitude reçue et constante diélectrique de la surface.

$$\frac{P_r}{P_{ref}} = |\Gamma|^2 \quad \text{et} \quad \frac{A_r}{A_{ref}} = |\Gamma| \quad (5.9)$$

En utilisant les équations (5.7) et (5.9), nous obtenons :

$$\epsilon'_r = \left(\frac{1 + \frac{A_r}{A_{ref}}}{1 - \frac{A_r}{A_{ref}}} \right)^2 \quad (5.10)$$

À partir d'une mesure de référence sur plaque, il est donc possible d'estimer la constante diélectrique d'un matériau séparé de l'air par une interface lisse et plane, à condition que le milieu sous la surface soit semi-infini et homogène.

Validation sur des données simulées

Afin de valider cette procédure (estimation de la constante diélectrique à partir d'une mesure de référence sur plaque métallique) nous avons eu recours à des simulations numériques faites avec le code TEMSI-FD. Un milieu homogène, séparé du vide par une interface lisse et rendu semi-infini par l'utilisation de PML, a été considéré. Une série de simulations a été effectuée avec des valeurs de constante diélectrique différentes. Nous comparons ensuite les constantes diélectriques en entrée du modèle et celles obtenues par la méthode décrite en 5.2.1. Une simulation sur une plaque métallique de $1.5m \times 1.5m$ est faite pour obtenir une mesure de référence.

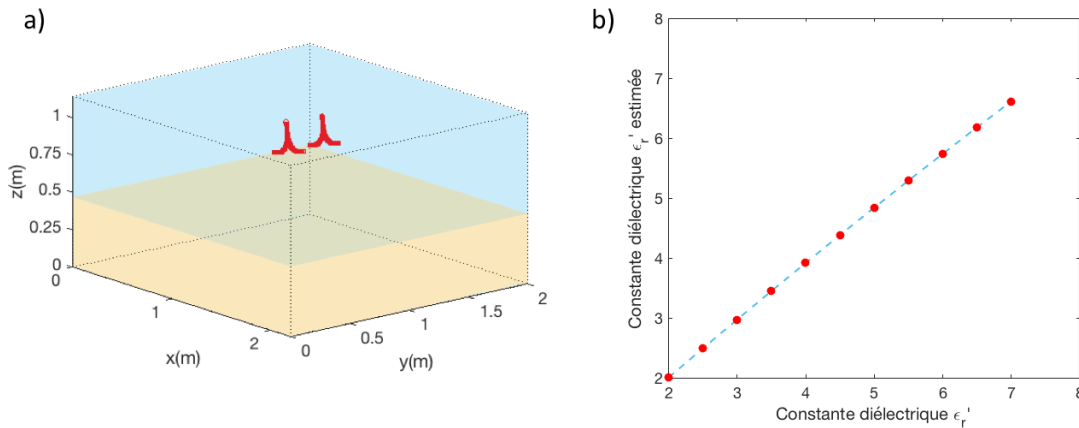


FIGURE 5.14 – Constante diélectrique estimée à partir de la méthode de l'écho de sol sur des données simulées : a) Modèle à une couche modélisé sous TEMSI-FD, b) Comparaison entre la constante diélectrique en entrée du code et celle estimée par la méthode présentée en 5.2.1

En conclusion, l'application de l'équation (5.10) nous permet de retrouver la valeur de la constante diélectrique à partir de l'amplitude de l'écho de sol et de l'amplitude de référence (obtenue sur plaque métallique). Sur la Figure 5.14b, nous constatons une bonne correspondance entre la constante diélectrique estimée et la constante diélectrique en entrée du modèle. Ce résultat, en concordance avec la théorie, valide la méthode et également les dimensions de la plaque métallique à utiliser pour évaluer A_{ref} . Regardons maintenant les résultats de cette méthode sur un milieu semi-contrôlé : le terrain d'expérimentation.

Validation sur des données expérimentales

Afin de valider la méthode présentée ci-dessus, sur des données expérimentales, la constante diélectrique du terrain d'expérimentation a initialement été évaluée indépendamment à l'aide de deux autres méthodes. La première repose sur l'utilisation d'une sonde de permittivité commerciale. Pour la seconde, nous avons utilisé un radar à pénétration de sol, disponible dans le commerce. Le terrain semi-contrôlé étant composé de sable, nous nous attendons à trouver une constante diélectrique de $\epsilon'_{r \text{ sable}} = 3 - 4$ (voir chapitre 1).

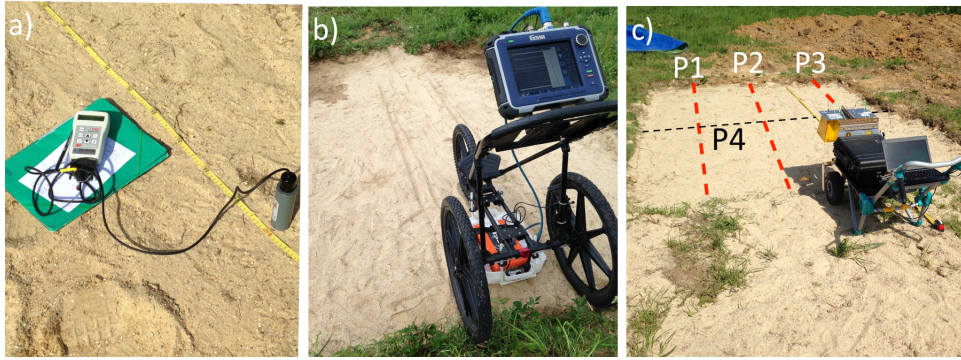


FIGURE 5.15 – Mesures sur le Terrain d'expérimentation : a) avec la sonde ThetaProbe ML2x, b) Le GPR SIR-4000 GSSI, c) Le prototype de WISDOM

La sonde ThetaProbe ML2x La sonde ThetaProbe ML2x est un instrument qui est commercialisé pour mesurer l'humidité d'un sol. Cette mesure se fait par l'intermédiaire d'une estimation de la constante diélectrique. Le principe de fonctionnement est le suivant : la sonde est composée d'un oscillateur, d'une ligne de transmission et d'une tête composées de 4 électrodes qui sont des tiges en métal. L'électrode centrale est entourée de trois électrodes externes, qui sont reliées à la masse de l'instrument. Cette tête se comporte comme une portion de ligne de transmission additionnelle dont l'impédance dépend de la permittivité du milieu placé entre les électrodes. La sonde génère un signal sinusoïdal à 100 MHz, qui se propage dans la ligne de transmission puis la tête de la sonde [Gaskin and Miller, 1996]. La nature du sol, par le biais de ses propriétés électriques, modifie l'impédance vue par la sonde, ce qui cause une désadaptation d'impédance qui entraîne une réflexion du signal sinusoïdal entre la ligne de transmission et le capteur. L'amplitude de la tension dans la ligne de transmission dépend donc de la constante diélectrique du milieu dans un volume de l'ordre du cm^3 . Les données de sortie du capteur sont des tensions, qui permettent de remonter à la constante diélectrique via une loi empirique [ThetaProbe, 1999] :

$$\epsilon'_r = 1.07 + 6.4V - 6.4V^2 + 4.7V^3 \quad (5.11)$$

où V désigne la tension (Volt) de sortie du capteur. Nous avons estimé, à partir des informations fournies par le fabricant, que la précision sur les mesures effectuées dans un milieu homogène de permittivité égale à 4 est proche de 10% et que la reproductibilité des mesures est très bonne avec une variabilité inférieure à 2%. Nous avons utilisé cette sonde pour faire des mesures de permittivité à la surface de notre terrain d'expérimentation. Les mesures ont été effectuées tous les 10 cm selon 4 profils (P1, P2, P3 et P4) qui sont représentés sur la Figure 5.15c.

La Figure 5.16b montre les valeurs de constante diélectrique mesurées le long de quatre profils distants de 50 cm. Nous pouvons noter la variabilité des valeurs obtenues qui oscillent entre 3.5 et 4.5 pour une valeur moyenne de 3.94, ce qui est significatif au regard de la précision des mesures. La valeur moyenne obtenue est cohérente avec la valeur attendue pour du sable sec. La Figure 5.16a montre une carte interpolée obtenue à partir des mesures précédentes, qui permet une analyse de la variabilité observée. Nous voyons que la constante diélectrique est légèrement plus faible au centre que sur les extrémités de la zone, cela peut être dû à l'humidité du terrain environnant. Le sable moins compacté permet, en effet, un meilleur drainage que la terre. Ceci, ajouté au fait que le terrain est protégé par une bâche entre les périodes d'utilisation, explique pourquoi, au centre, le sable est plus sec et, par conséquent, la constante diélectrique est plus faible (puisque l'humidité augmente la valeur de la constante diélectrique).

GPR GSSI Afin de déterminer la valeur de la constante diélectrique du terrain d'expérimentation en profondeur, nous avons utilisé un radar à pénétration de sol commercial le SIR-4000 qui peut fonctionner avec deux antennes différentes autour de 400 et de 900 MHz. Ces antennes rayonnent à

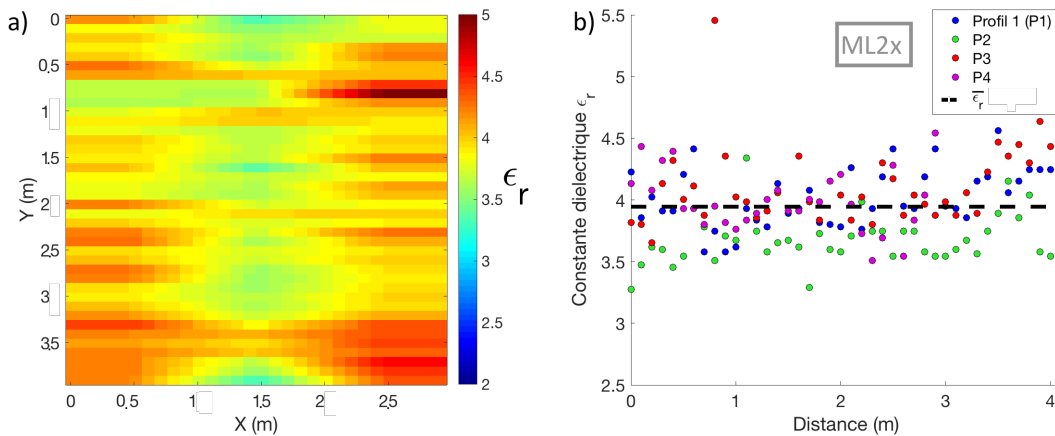


FIGURE 5.16 – Constante diélectrique estimée avec la sonde Thetaprobe : a) Carte de la constante diélectrique du terrain d’experimentation, b) Constante diélectrique estimée sur les profils P1, P2, P3 et P4 (Figure 5.15c)

des fréquences centrales situées dans la bande de fréquence de WISDOM. Comme c’est usuel pour les radars à pénétration développés pour une utilisation terrestre, les antennes sont conçues pour être en contact avec le sol. Cette configuration facilite, d’une part, la pénétration des ondes dans le sous-sol et, d’autre part, le travail d’interprétation des données. Ce radar a été utilisé pour mesurer le temps de propagation entre la surface et le fond du terrain d’expérimentation et, connaissant la profondeur de sable, en déduire, la permittivité moyenne du milieu sondé. La Figure 5.17 montre les radargrammes acquis sur le terrain le long le profil P1 (pointillé rouge Figure 5.17a) avec l’antenne de 900 MHz (Figure 5.17b) et l’antenne de 400MHz (Figure 5.17c).

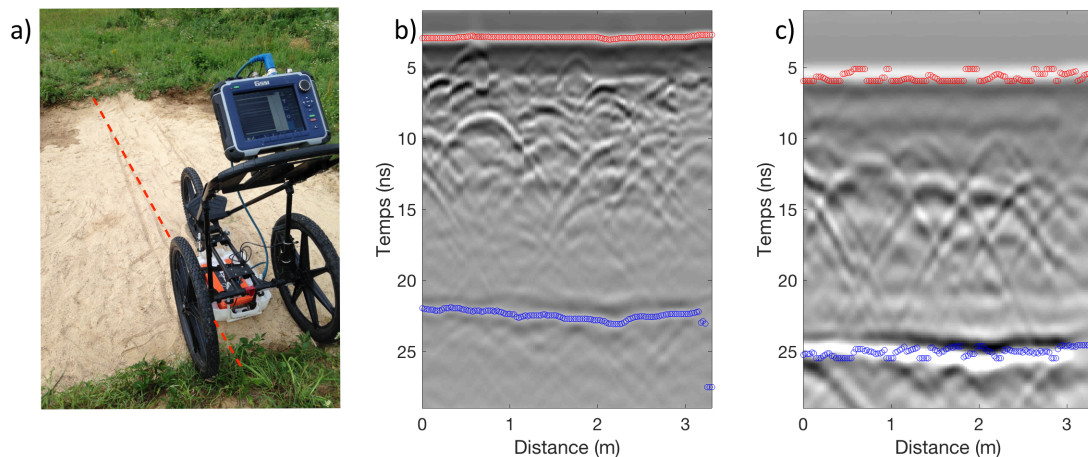


FIGURE 5.17 – Mesures sur le Terrain d’expérimentation : a) Photo du dispositif expérimental, b) Radargramme obtenu avec le SIR 4000, 900 MHz, c) Radargramme obtenu avec le SIR 4000, 400 MHz

La surface et l’interface entre le gravier et le sol naturel sont facilement identifiables. Sur les deux radargrammes, nous les avons surlignés en rouge pour la surface et en bleu pour l’interface gravier/sol naturel (Figure 5.17). L’écart en temps entre la surface et l’interface gravier/sol naturel nous fournit le temps de propagation dans le milieu. La profondeur du Terrain d’expérimentation est de $1m45 \pm 0.1m$, cet environnement contient une couche de 10 cm d’épaisseur de gravier, cela correspond à une couche très poreuse, où le sable s’est engouffré et tassé après comblement. Nous ne voyons qu’une seule interface (en bleu Figure 5.17), avec des hyperboles dues aux gravillons, par conséquent nous ferons l’hypothèse que la hauteur du Mars yard est de 1m45 de sable. De plus nous considérons que la surface et l’interface sont planes et s’inscrivent dans deux plans parallèles. Ces facteurs d’incertitudes rendent

la détermination de la constante diélectrique par cette méthode peu précise. Nous pouvons estimer la constante diélectrique ϵ'_r à l'aide de la formule suivante :

$$\epsilon'_r = \left(\frac{ct}{2d}\right)^2 \quad (5.12)$$

où c est la célérité des ondes électromagnétiques dans le vide, t le temps de propagation dans le milieu et d la distance parcourue par l'onde dans le milieu. L'incertitude de $\pm 0.05m$ sur l'épaisseur de la couche de sable se traduit par une incertitude de ± 0.27 sur la valeur de la constante diélectrique. Gardons à l'esprit que cette méthode fournit une valeur moyenne de la constante diélectrique calculée sur l'épaisseur de la couche et qu'elle n'est pas applicable telle quelle dans un milieu inconnu parce qu'elle nécessite la connaissance de la distance parcourue.

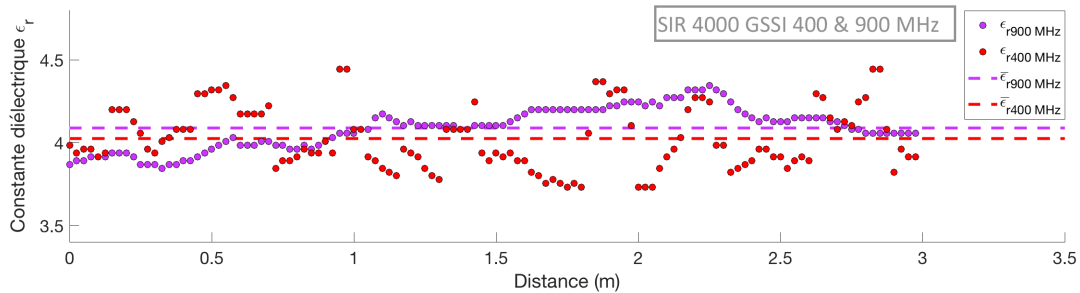


FIGURE 5.18 – Constantes diélectriques estimées à partir des mesures sur le Mars yard avec le SIR-4000 (antennes de 400 et 900 MHz)

La Figure 5.18 montre les valeurs de constante diélectrique estimées à partir de (5.12) pour les antennes de 400 et 900 MHz du radar commercial en considérant une hauteur de sable de 1m45. Nous trouvons une valeur moyenne de $\epsilon'_r = 4.05$ ce qui est très proche de la valeur attendue ($\epsilon'_r = 4$).

Estimation de la constante diélectrique à partir de l'écho de sol (WISDOM) Dans cette partie, nous allons utiliser l'amplitude du signal de WISDOM réfléchi par la surface afin de déterminer une valeur de permittivité. Pour faire une estimation de la constante diélectrique à partir de l'amplitude de l'écho de sol, il est nécessaire que la surface soit plane et lisse, et d'avoir des données calibrées en amplitude. Une mesure de référence doit être réalisée sur une cible dont la réponse est connue. Dans le cas de la configuration de WISDOM, la cible dont la réponse est la plus facile d'utilisation est une plaque parfaitement réfléchissante. Une série de mesures sur plaque métallique a donc été réalisée dans les mêmes conditions que les mesures sur sol (i.e. à 38 cm) pour les 2 configurations de co-polarisation possibles. Les paramètres du radar, tels que les valeurs des atténuateurs des chaînes d'émission et de réception, le nombre d'additions cohérentes, ont des effets connus sur l'amplitude des signaux reçus et leur effet sur l'amplitude pourra être corrigé. En pratique, il est certainement plus prudent de faire la mesure de référence avec les paramètres radar identiques à ceux utilisés sur le sol afin de limiter les éventuels effets non linéaires.

L'amplitude et le temps d'arrivée de l'écho de surface sont automatiquement détectés sur chaque sondage et la valeur de constante diélectrique est évaluée à partir de l'équation 5.10 directement dérivée des coefficients de Fresnel en incidence normale.

La Figure 5.19 montre les valeurs de constante diélectrique estimées à partir de l'écho de surface du terrain d'expérimentation pour les polarisations 00 et 11.

Les valeurs moyennes des constantes diélectriques ($\epsilon'_{00} = 3.92$ et $\epsilon'_{11} = 3.85$) obtenues à partir de l'écho de sol sont proches de la valeur attendue pour le sable ($\epsilon'_{sable} = 3 - 4$) et mesurée par les deux méthodes précédentes. Ce qui s'explique par le fait que le terrain possède une surface plutôt lisse. Nous remarquons, cependant, que les deux polarisations ne donnent pas exactement les mêmes valeurs de constante diélectrique. L'écart observé, qui n'est ni constant ni même systématiquement de même signe, est certainement lié à la variabilité du sol. En effet, puisque les diagrammes de rayonnement des

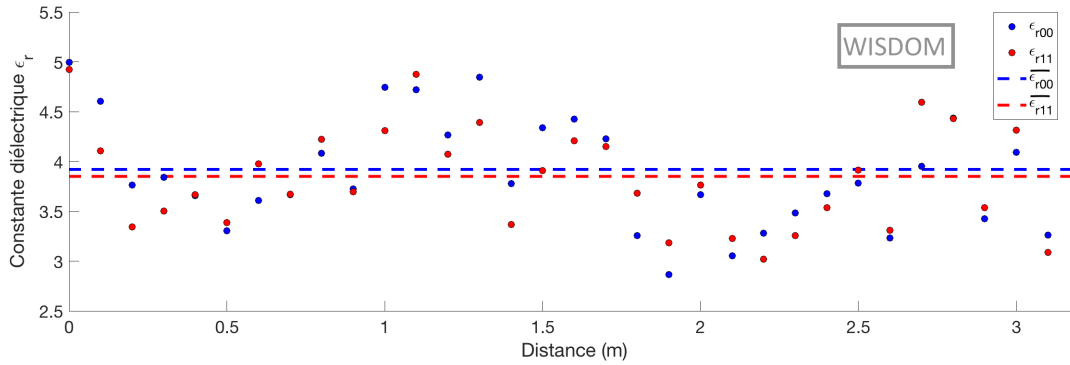


FIGURE 5.19 – Valeurs de la constante diélectrique ϵ'_r estimée à partir de l'écho de surface sur le terrain d'expérimentation pour les deux modes en co-polarisation de WISDOM

antennes ne sont pas omnidirectionnels, pour une position donnée, les polarisations 00 et 11 éclairent des surfaces différentes au sol, des différences locales (humidité, porosité, rugosité,...) peuvent donc expliquer les différences observées. C'est une démarche similaire qui a permis d'estimer la valeur de la constante diélectrique en surface à partir des données orbitales du radar MARSIS. La différence notable est que, dans le cas de WISDOM, il est possible d'étalonner en amplitude les données. Afin d'estimer la précision des valeurs obtenues, une série de mesures sur une plaque métallique et sur une plaque de constante diélectrique proche de 3 ont été effectuées. La variabilité des résultats observée donne une incertitude relative de $\pm 2\%$ sur la valeur de la constante diélectrique estimée dans un cas lisse et homogène. Ce qui en fait une méthode de précision tout à fait acceptable.

Conclusion Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs des constantes diélectriques moyennes estimées pour les trois méthodes utilisées.

Méthode instrument	$\bar{\epsilon}'_r$	$\sigma_{\epsilon}'_r$
Sonde ML2x	3.94	0.31
SIR 4000 GSSI 400 MHz	4.02	0.19
SIR 4000 GSSI 900 MHz	4.09	0.12
WISDOM 00	3.92	0.60
WISDOM 11	3.85	0.52

TABLE 5.1 – Moyenne et écart-type des valeurs de constante diélectrique en fonction des instruments

La variabilité des valeurs obtenues par chaque instrument est plus grande que l'erreur due à la méthode, elle rend compte de la variabilité sur le terrain qui n'est pas un milieu homogène. Les valeurs de constante diélectrique estimées par WISDOM sont compatibles avec celle du sable sec et est bien en accord avec celles obtenues avec la sonde ThetaProbe et avec l'estimation réalisée à partir du GPR commercial et de la connaissance des dimensions du milieu.

5.2.2 Effet de la rugosité de surface

La méthode présentée dans cette section fait l'hypothèse d'une surface lisse, cependant les surfaces naturelles comportent de la rugosité. Regardons sur des données simulées comment évolue l'estimation de la constante diélectrique. Pour cela nous avons modélisé 100 surfaces de $2m^2$ en faisant varier les paramètres d'écart-type des hauteurs σ_h et de longueur de corrélation l_c . Nous choisissons des écarts-types compris entre 5 mm et 5 cm avec des longueurs de corrélation entre 5 et 15 cm. Les surfaces sont modélisées avec un pas de 5 mm afin de respecter les critères de stabilité de la FDTD (pour un modèle de sol avec $\epsilon'_r = 3$). La Figure 5.20 montre les valeurs d'écart-type des hauteurs et de longueur de corrélation calculés sur les surfaces générées. Nous faisons également figurer le paramètre Z_s qui

est construit à partir de l'écart type des hauteurs et de la longueur de corrélation. Ses valeurs élevées caractérisent les sols les plus rugueux (σ_h élevé et l_c faible) et ses valeurs basses les sols les plus lisses (σ_h faible et l_c lisse).

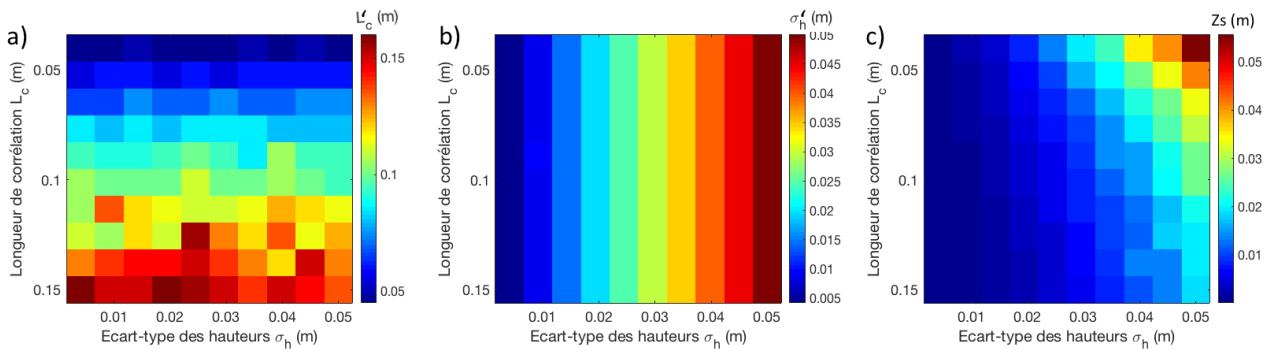


FIGURE 5.20 – Paramètre des surfaces rugueuses générées, σ_h , l_c sont les paramètres d'entrée et σ'_h , l'_c les paramètres calculés sur les surfaces modélisées : a) Longueur de corrélation calculé l'_c sur les surfaces générées en fonction des paramètres d'entrée (σ_h , l_c), b) écart-type des hauteurs σ'_h calculé sur les surfaces générées en fonction des paramètres d'entrée (σ_h , l_c), c) Paramètre Z_s en fonction des paramètres calculés sur surfaces générées en fonction des paramètres d'entrée (σ_h , l_c)

Alors que l'écart-types des hauteurs est parfaitement reproduit, nous remarquons de sensibles différences entre la longueur de corrélation calculée l'_c et la longueur de corrélation en entrée du modèle. Ces surfaces sont en effet générées à partir d'une seule réalisation d'extension horizontale limitée, ce explique en partie ces différences. Après avoir modélisé ces surfaces, nous les avons importées dans le code de simulation TEMSI-FD afin de simuler des opérations radars dessus. L'objectif est d'estimer la constante diélectrique en utilisant la méthode décrite plus haut en fonction de la rugosité des surfaces modélisées. Nous affectons au sol une constante diélectrique de 3. En accord avec les procédures mises en place pour la mission ExoMars qui prévoit une mesure tous les 10 cm, nous avons fait 20 simulations par surface (c'est-à-dire une simulation tous les 10 cm). Les constantes diélectrique estimées à partir de l'écho de sol sur chaque surfaces sont des constantes diélectriques moyennes calculées à partir des 20 simulations effectuées par surface.

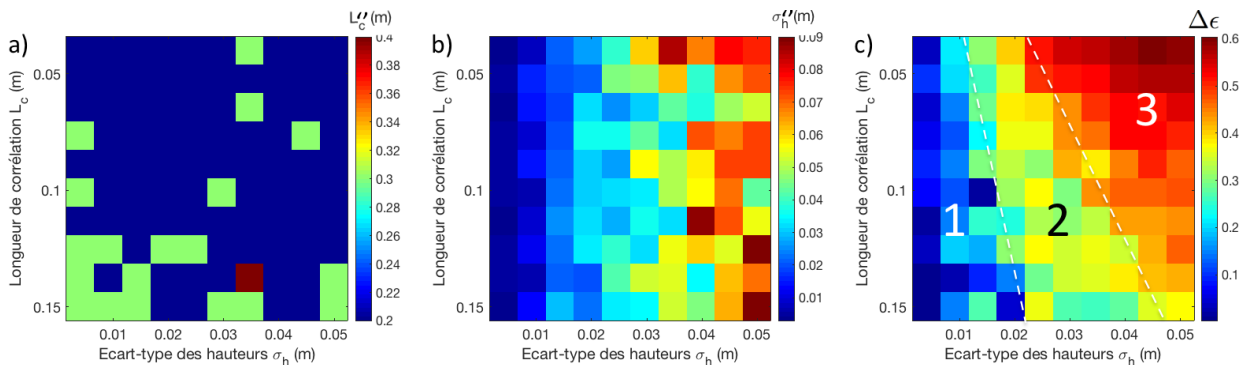


FIGURE 5.21 – Evaluation de la constante diélectrique sur les surfaces rugueuses modélisées : a) Longueur de corrélation estimée l''_c à partir des radargramme obtenus sur les surfaces modélisées en fonction des paramètres d'entrée (σ_h , l_c), b) Ecart-type des hauteurs σ''_h estimé à partir des radargrammes obtenus sur les surfaces modélisés en fonction des paramètres d'entrée (σ_h , l_c), c) Erreur relative sur la constante diélectrique $\Delta\epsilon$ calculée à partir de l'écho de sol en fonction des paramètres calculés sur surfaces modélisés en fonction des paramètres d'entrée (σ_h , l_c)

Nous définissons l'erreur relative sur la constante diélectrique ϵ'_r par :

$$\Delta\epsilon = \frac{|\epsilon'_{estim} - \epsilon'_r|}{\epsilon'_r} \quad (5.13)$$

où ϵ'_r est la constante diélectrique en entrée du modèle ($\epsilon'_r=3$), et ϵ'_{estim} est la constante diélectrique estimée à partir de l'écho de sol.

La Figure 5.21c montre l'erreur relative commise sur la constante diélectrique. Nous remarquons que celle-ci peut atteindre presque 60% pour les surfaces les plus rugueuses ($\sigma_h = 5$ cm et $l_c = 5$ cm). Nous considérons trois régions (notées 1,2 et 3 sur la Figure 5.21c). Dans la première, l'erreur relative est comprise entre 0 et 20%; dans la deuxième, entre 20% et 40% et dans la troisième, entre 40% et 60%. L'augmentation de l'erreur relative est calquée sur l'augmentation de la rugosité (et du paramètre Z_s). Nous considérons que la région 1 qui correspond aux cas lisses, donne une erreur acceptable sur la constante diélectrique du milieu. Les régions 2 et 3 ne permettent plus d'estimer correctement la constante diélectrique. C'est ici qu'intervient la synergie avec l'instrument PanCam, les modèles numériques de terrain (hauteur en fonction de la position) construits à partir de la stéréo-caméra de PanCam nous permettront d'estimer les paramètres de rugosité et donc d'évaluer la robustesse de notre estimation de la constante diélectrique. Nous pouvons essayer de contraindre la rugosité en fonction des paramètres que nous permet de calculer le radargramme. Les Figures 5.21a et 5.21b montrent la longueur de corrélation l''_c et l'écart-type des hauteurs σ_h calculés à partir de l'écho de sol en fonction des longueurs de corrélation et des écart-types des hauteurs de surfaces modélisés. Nous constatons que la longueur de corrélation estimée est très éloignée de celle de la surface, cela peut s'expliquer par le fait que nous n'avons effectué un sondage tous les 10 cm. Ce pas est du même ordre de grandeur que la longueur de corrélation, nous ne sommes donc pas capables de l'estimer. En revanche, nous voyons l'écart-type des hauteurs estimé σ''_h augmenter en fonction de l'écart-type des hauteurs σ_h des surfaces modélisés. Le calcul de l'écart-type à partir de l'écho de sol peut donc servir d'indicateur sur la rugosité de surface, l'écart type estimé σ''_h est cependant presque deux fois plus grand que celui de la surface σ_h pour les valeurs les plus élevées. Ces différences entre l_c, σ_h et l''_c, σ''_h peuvent s'expliquer par le faible nombre de sondages modélisés sur la surface (20 sur une longueur de 2 m), ainsi que par un nombre insuffisant de profils. La tâche au sol dans sa plus grande dimension est de 80 cm, l'instrument fournit des valeurs moyennées sur cette tâche.

Le caractère novateur la mission ExoMars est de pouvoir analyser des échantillons dans le proche sous-sol grâce à une foreuse capable de pénétrer jusqu'à 2 m de profondeur. Lors de la mission, afin de limiter les risques, les premiers sondages seront effectués sur des profondeurs de moins de 50 cm. Regardons en fonction de la rugosité l'erreur commise sur la profondeur calculée à partir de la constante diélectrique estimée sur les surfaces rugueuses. Nous considérons une profondeur typique de 1 m (qui correspond à un temps de propagation de 11.5 ns dans un milieu où la constante diélectrique est égale à 3). À partir de la valeur de constante diélectrique estimée, nous pouvons déduire la profondeur ainsi que l'erreur relative sur cette profondeur. Les résultats sont présentés sur la Figure 5.22.

L'erreur sur la constante diélectrique se répercute sur la profondeur. En affichant les zones définies plus haut, nous commettons une erreur comprise entre 0 et 10% dans la zone 1, 10% et 30% dans la zone 2 et enfin 30 et 60% dans la zone 3. En fonction de la rugosité du sol nous pouvons donc commettre d'importantes erreurs sur la profondeur. Avant forage, la surface devra donc être correctement analysée afin d'en estimer sa rugosité et donc d'évaluer la fiabilité des prédictions en sous-sol. L'estimation de l'écart-type des hauteurs à partir de l'écho de sol recueilli par WISDOM peut-être un premier indicateur de la rugosité de surface et permettre de discriminer du point de vue de WISDOM une surface lisse et une surface rugueuse.

Effet de l'épaisseur de la couche en surface

La méthode de l'estimation de la constante diélectrique à partir de l'écho de sol permet seulement d'estimer une valeur moyenne de constante diélectrique dans la couche supérieure en faisant l'hypothèse implicite que cette couche est homogène. Nous pouvons résolument nous demander quelles sont les

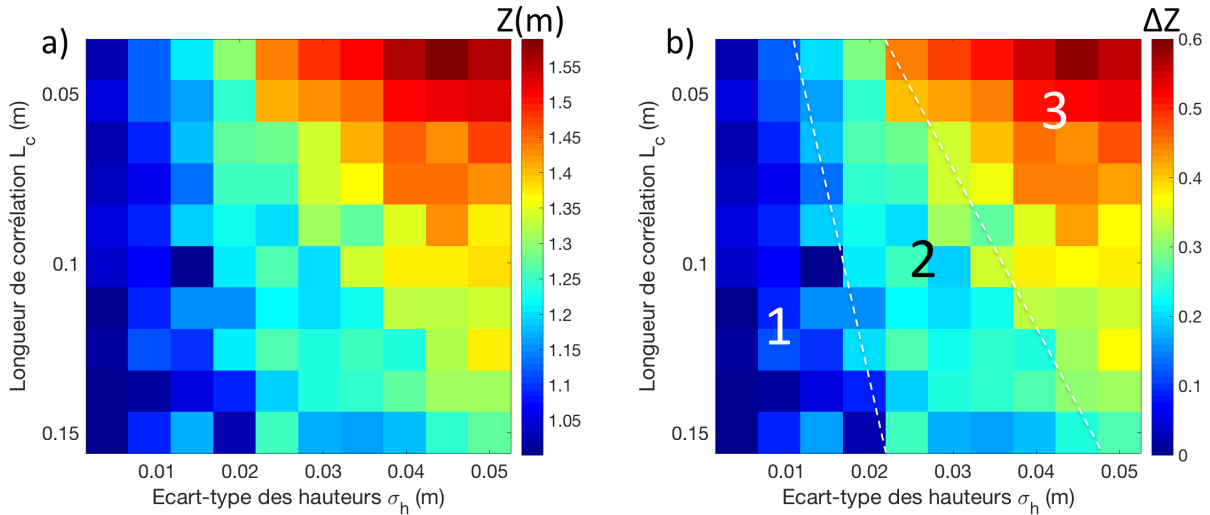


FIGURE 5.22 – Evaluation de l’erreur relative sur la profondeur calculée à partir de la constante diélectrique estimée sur les surface rugueuses (σ_h, l_c) : a) Profondeur estimée $Z(m)$, b) Erreur relative sur la profondeur $\Delta Z(m)$

limites de cette méthode : à partir de quelle épaisseur de couche notre estimation n’est plus correcte et quelle est l’influence des couches inférieures ?

Regardons comment évolue notre estimation de la constante diélectrique en fonction de l’épaisseur de la couche supérieure. Pour cela nous avons modélisé sous TEMSI-FD un milieu stratifié d’une surface de $4m^2$ pour 30 cm de profondeur (Figure 5.23a) puis nous avons estimé la constante diélectrique de la couche supérieure à partir de l’écho de sol. Cette estimation a été faite pour plusieurs épaisseurs de la couche supérieure $d1$ (comprises entre 1 et 30 cm) ainsi que pour plusieurs valeurs de constante diélectrique ($\epsilon_r = 2, 3$ et 4). Pour chaque simulation, nous avons fixé un contraste diélectrique de $\Delta\epsilon = 3$ entre la couche supérieure et celle sous-jacente. Ce modèle s’inspire d’un scénario probable pour la mission ExoMars 2020 : celui d’une couche de dépôts éoliens reposant sur de la roche consolidée. Dans la littérature, les dépôts éoliens poreux ont une constante diélectrique bien inférieure à celle des roches consolidées.

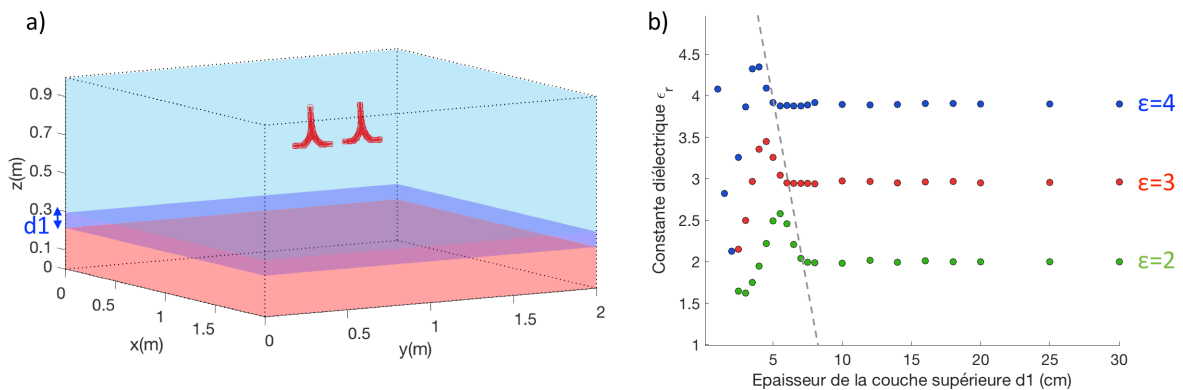


FIGURE 5.23 – a) Milieu simulé sous TEMSI-FD b) Constante diélectrique ϵ_r estimée à partir de l’écho de surface, en fonction de l’épaisseur de la couche supérieure $d1$ et de sa constante diélectrique

La Figure 5.23b montre la constante diélectrique estimée à partir de l’écho de surface en fonction de l’épaisseur et de la constante diélectrique de la couche supérieure. Nous constatons qu’à partir d’une certaine épaisseur (une épaisseur limite), le ϵ_r estimé s’écarte significativement du ϵ_r de la couche. De plus, nous remarquons que cette épaisseur de couche limite dépend de ϵ_r . Plus la constante diélectrique

est faible, plus l'épaisseur limite est élevée (pointillée gris). Cette épaisseur limite correspond en réalité à la résolution verticale R_v dans le milieu. Dans le chapitre précédent, nous avons vu que pour une couche de constante diélectrique égale 3 et d'épaisseur inférieure à 5 cm, nous ne pouvions plus estimer l'épaisseur de la couche avec une précision suffisante. Il en va de même pour la valeur de la constante diélectrique. Ce premier constat montre les limites de la méthode décrite ci-dessus : l'estimation de la constante diélectrique dépend de l'épaisseur de la couche supérieure, si celle-ci est inférieure à la résolution verticale, alors l'estimation de ϵ'_r devient imprécise. Dans le scénario évoqué, une couche trop fine de dépôts éoliens qui recouvre de la roche consolidée ne serait pas résolue et l'estimation de sa constante diélectrique serait faussée par la valeur de ϵ'_r de la couche de roche. En analysant la forme de l'écho, nous devrions cependant être capables d'identifier ce type de scénario. En effet, lorsque nous nous trouvons en dessous de la résolution verticale, l'écho de surface et l'écho à l'interface entre la première et la deuxième couche interfèrent. L'écho reçu est alors la combinaison des deux échos (écho de surface et écho de la première interface) sa forme diffère de celle de l'écho émis, se rapprochant de la dérivée de la forme d'onde émise. Nous avons pu mettre expérimentalement en évidence ce phénomène grâce à une plaque de plexiglass de 1 cm d'épaisseur.

Dans cette partie, nous avons présenté une première méthode d'estimation de la constante diélectrique. Après validation sur simulation, nous l'avons évaluée sur des données expérimentales en comparant les résultats obtenus avec d'autres méthodes. La constante diélectrique estimée repose sur l'hypothèse d'un milieu homogène. Dans le cas d'un milieu stratifié, nous avons vu que l'estimation dépend de l'épaisseur de la couche de surface : cette dernière doit-être supérieure à la résolution de l'instrument. Cette méthode fait également l'hypothèse d'une surface lisse, nous avons donc étudié à partir de simulations l'impact de la rugosité sur l'estimation de la constante diélectrique. Dans le cadre de la mission ExoMars, l'estimation de ϵ'_r nous permettra de contraindre la composition des matériaux en surface mais aussi d'estimer la profondeur de cibles à atteindre avec la foreuse. L'estimation de l'écart-type des hauteurs à partir de l'écho de sol ainsi que la future synergie avec l'instrument Pan-Cam nous permettra de discriminer les cas lisses des cas rugueux et donc d'évaluer la robustesse de nos estimations et des profondeurs qui en découlent.

5.2.3 Estimation à partir des hyperboles

Il est également possible d'estimer la constante diélectrique à partir de la signature de réflecteurs en sous-sol, cette technique est particulièrement utilisée dans le génie civil pour estimer la profondeur de canalisation. Cette méthode suppose la présence de réflecteurs considérés comme ponctuels pour l'instrument. Dans le cadre de la mission ExoMars, le nombre important de roches en surface de tailles intermédiaires (entre 5 et 20 cm de diamètre) vues par les Rovers martiens laisse peu de doute sur la présence de roches similaires en sous-sol. Cette technique devrait donc être utilisable pendant la mission et permettre de contraindre la constante diélectrique du sous-sol.

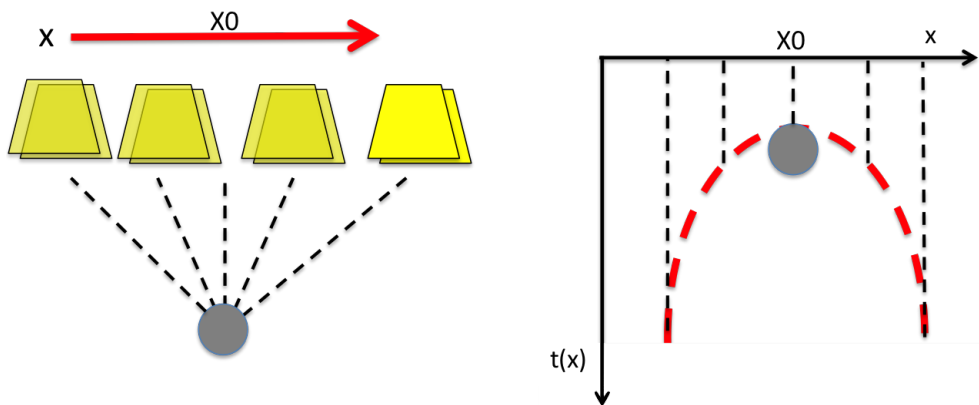


FIGURE 5.24 – Signature radar d'un réflecteur en sous-sol

La Figure 5.24 permet d'illustrer schématiquement, en deux dimensions pour plus de lisibilité, le processus de formation de la signature radar d'un réflecteur. On considère un réflecteur de taille négligeable devant les longueurs d'onde du radar immergé dans un milieu homogène au point de coordonnées x_0 et z_0 , on note x la position des antennes. Le temps de propagation $t(x)$ du trajet aller et retour dans le milieu entre les antennes et le réflecteur se traduit sur le radargramme par une courbe dont la forme est une hyperbole exacte.

La vitesse de propagation de l'onde dans le milieu est donné par :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r'}} = \frac{2\sqrt{(x-x_0)^2 + z_0^2}}{t(x)} \quad (5.14)$$

Il est donc aisé de retrouver la constante diélectrique par ajustement mathématique d'une hyperbole visible sur un radargramme. Afin de vérifier la viabilité de cette méthode, nous avons réalisé des mesures sur de cinq cibles suspendues dans l'air. La description des cibles est faite dans la section 3.

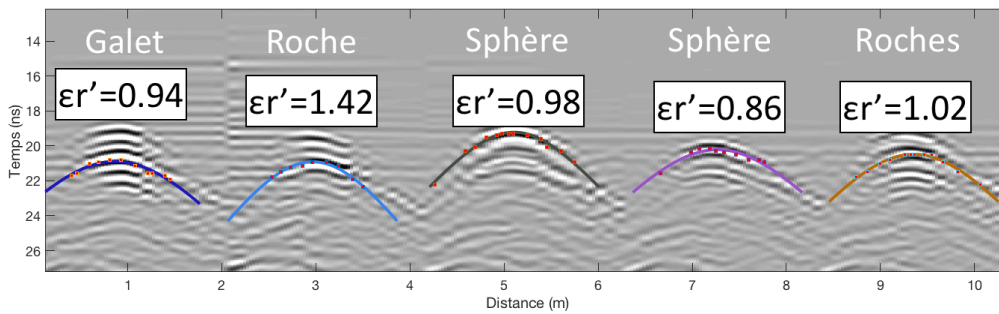


FIGURE 5.25 – Estimation de la constante diélectrique à partir de la signature de réflecteurs dans l'air. Les points rouge représentent les points expérimentaux à partir desquelles l'ajustement est réalisé

La Figure 5.25 montre la constante diélectrique estimée à partir de l'ajustement par une hyperbole mathématique des signatures identifiables sur le radargramme. Nous trouvons des valeurs entre 0.86 et 1.01. Les valeurs inférieures n'ont, bien entendu, pas de sens physique. Elles proviennent de l'ajustement mathématique sans contrainte sur la valeur de ϵ_r' . De façon générale, les valeurs obtenues sont légèrement inférieures à celle du milieu sondée (l'air $\epsilon_{air} = 1$) mais restent dans une fourchette de ± 0.1 (si on exclut la valeur 1.42 qui a été obtenue avec une cible ne pouvant pas être considérée comme ponctuelle) et valident le principe de la méthode.

Cette méthode utilisée dans le génie civil semble donc adaptée à l'estimation des valeurs de constante diélectrique dans le cadre de la mission ExoMars. Cependant, il y a une différence de taille ou plutôt de hauteur : en effet, les antennes de WISDOM sont à 38 cm du sol alors que les antennes des GPR classiques sont plaquées au sol, ce qui fait que les ondes ne se propagent que dans le sous-sol. Dans le cas de WISDOM, on doit donc ajouter au schéma de la Figure 5.24 une interface air/sol. Un phénomène de réfraction à la surface dévie les rayons et allonge par conséquent le temps de propagation des ondes, ce qui fausse l'estimation de la constante diélectrique.

Regardons l'impact de ces 38 cm d'air entre les antennes et le sol. Pour ce faire, nous avons développé un code de lancer de rayons. Le principe repose sur la loi de Snell-Descartes (voir chapitre 1).

Nous considérons un réflecteur ponctuel enfoui dans milieu homogène qui rayonne dans toutes les directions contenues dans le plan d'incidence ($\Phi = [0-180^\circ]$). Nous calculons ensuite pour chaque rayon réfracté intercepté par les antennes, les distances $R1$ et $R2$ (correspondant au rayon réfracté dans l'air et au rayon incident dans le milieu). Cette approche permet un gain de temps considérable par rapport au code de lancer de rayons précédemment développé dans [Dorizon, 2016]. Ce dernier considérait une antenne émettrice, il fallait par conséquent lancer une simulation par position d'antenne contre une seule pour l'ensemble de la trajectoire des antennes dans le code présenté ici. En convertissant les distances $R1$ et $R2$ en temps de propagation et après avoir ajouté un bruit gaussien, nous avons généré des signatures pour des réflecteurs ponctuels situés à plusieurs profondeurs et pour plusieurs

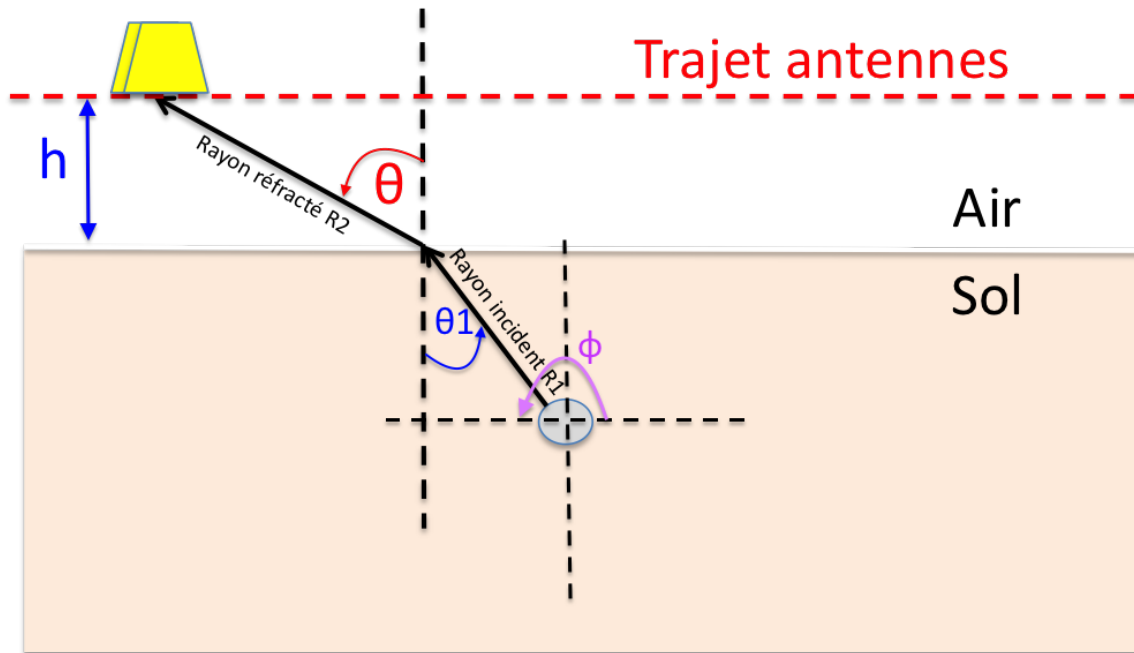


FIGURE 5.26 – Principe du code de lancer de rayon

valeurs de ϵ'_r . La base de données ainsi générée a été utilisée afin de valider la méthode d'ajustement avec une hyperbole mathématique comme fait précédemment pour un milieu homogène et d'estimer l'erreur commise sur les valeurs de ϵ'_r ainsi estimées. Les résultats sont présentés sur la Figure 5.27. La Figure 5.27 montre les valeurs de valeurs de ϵ'_r estimées après ajustement de la signature générée grâce au code de lancer de rayon par une hyperbole mathématique à partir de 61 points (sommet de la signature hyperbolique + branches). Les pointillés autour des courbes décrivent les barres d'erreur dues à l'ajustement. Nous remarquons que plus le réflecteur est enfoui plus l'erreur sur la constante diélectrique diminue. Ce résultat est intuitif : lorsque la profondeur dans le sol est beaucoup plus grande que la distance entre les antennes et la surface alors l'influence des 38 cm d'air diminue et la signature hyperbolique tend vers une hyperbole mathématique. C'est ce que nous constatons à 2.5 m de profondeur, les ϵ'_r estimés sont proches des ϵ'_r mis entrée du modèle. En revanche, pour une profondeur inférieure à 1 m, les valeurs estimées sont très éloignées des valeurs de départ. Le phénomène de réfraction ne permet donc pas pour de faibles profondeurs d'obtenir un ajustement satisfaisant et d'estimer correctement la constante diélectrique.

Nous avons mené la même étude en faisant un ajustement par la même hyperbole mathématique mais cette fois sur un nombre plus limité de points situés aux environs des sommets des signatures simulées (en évitant les points situés sur les branches qui sont le résultat d'une réfraction plus importante). Les résultats obtenus pour 11 points sont présentés sur la Figure 5.27b. Les erreurs sur la constante diélectrique à des profondeurs entre 50 cm et 1 m sont significativement plus faibles que lorsque l'ajustement se fait sur plus de points.

L'ajustement sur les sommets permet donc de correctement estimer la constante diélectrique en utilisant une hyperbole mathématique. Les points du sommet sont en effet ceux qui sont le moins affectés par la réfraction à la surface (θ_2 diminue si θ_1 diminue), ils peuvent être modélisés par une hyperbole mathématique. En contre partie, les barres d'erreurs sont un peu plus importantes que pour 61 points puisque le nombre de points considérés a diminué. L'étude menée montre que l'ajustement sur les 11 points est le meilleur compromis.

Sur les radargrammes obtenus avec WISDOM, nous détectons principalement les sommets des signatures (très peu les branches), la comparaison des signatures obtenues avec WISDOM et le radar commercial GSSI sur le terrain d'expérimentation 5.17 illustre ce fait. Nous pouvons donc utiliser sur les données de WISDOM un ajustement par une hyperbole mathématique afin d'estimer la valeur de la

constante diélectrique dans le sous-sol. Notons que dans le cas d'un milieu non homogène, l'estimation fournit une valeur moyennée sur le trajet des ondes entre les antennes et le réflecteur. Nous montrerons dans la section 5, consacrée à l'exploitation des données recueillies lors d'une campagne de mesure, les résultats obtenus par cette méthode qui seront comparés avec ceux obtenus par la méthode de l'écho de sol.

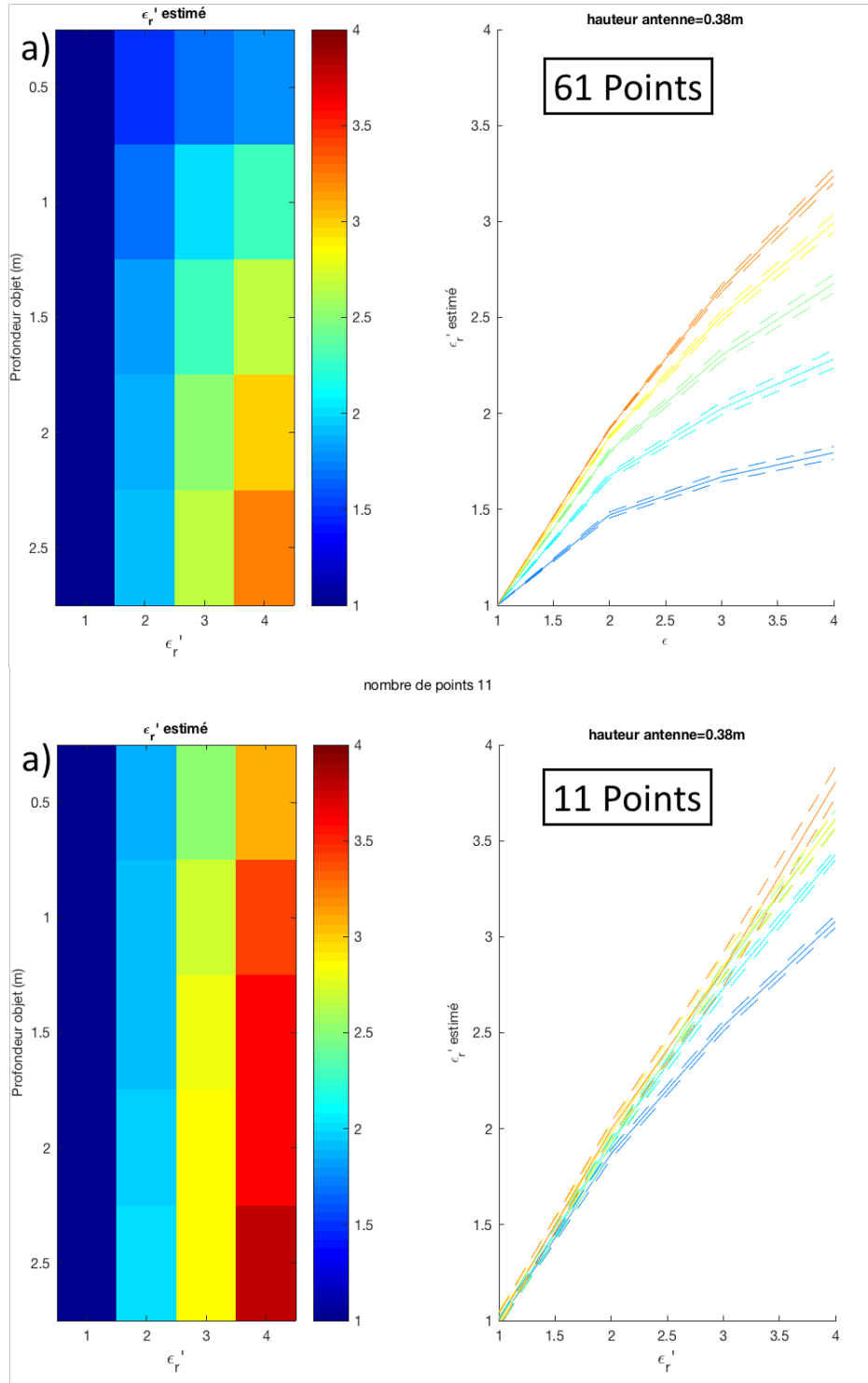


FIGURE 5.27 – Valeurs de ϵ_r^e estimées à partir d'une signature d'un réflecteur enfoui en fonction de sa profondeur et de la permittivité du milieu. a) avec un ajustement fait sur 61 points b) avec un ajustement fait sur 11 points au voisinage du sommet

5.3 Utilisation de la polarimétrie pour la caractérisation des réflecteurs en sous-sol

La polarimétrie est l'étude de l'interaction entre une onde polarisée et une cible. Les antennes Vivaldi de WISDOM émettent un champ électrique polarisé linéairement et leur différentes configurations d'utilisation (parallèles ou croisées) permettent de mesurer la propriété d'un objet à dépolariiser les ondes. Cette propriété dépend de la géométrie c'est-à-dire de la forme de l'objet en question. Dans cette partie nous verrons comment tirer partie des capacités polarimétriques de WISDOM. D'abord nous présenterons comment visualiser des données polarimétriques. Puis nous nous attacherons à démontrer, sur des données expérimentales, la capacité de WISDOM à contraindre la forme de cibles à partir des données polarimétriques. Enfin, nous montrerons comment exploiter le diagramme de rayonnement des antennes de WISDOM pour mieux contraindre la position d'une cible.

5.3.1 Visualisation des données polarimétriques

WISDOM a la particularité d'être un radar polarimétrique ; 4 configurations de mesure sont possibles : 00, 01, 10 et 11. En effet, les dénominations H (horizontale) et V (verticale) couramment utilisées dans la littérature pour désigner les polarisations n'ont pas vraiment de sens physique pour une radar opérant depuis le sol. A la place, les éléments constitutifs des antennes étant repérés par un 0 ou un 1 en fonction de leurs orientations (Figure 5.28a), les quatre configurations de polarisation des mesures sont notées 00, 01, 10 et 11.

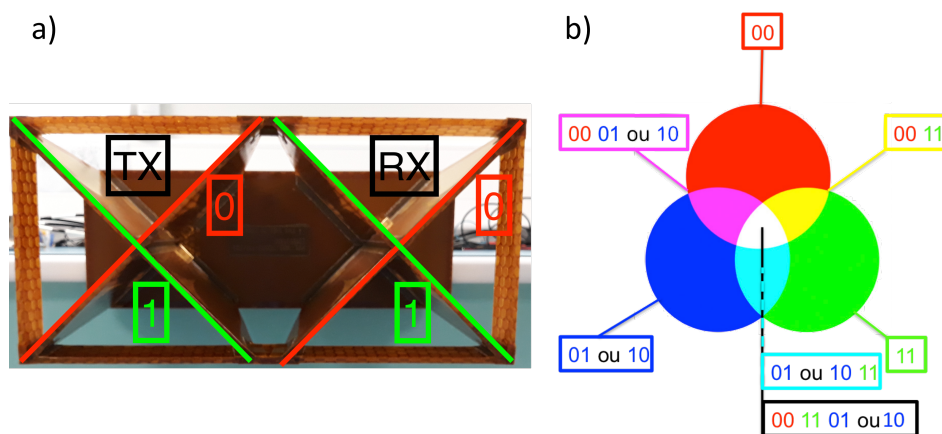


FIGURE 5.28 – a) Antennes de WISDOM (WAA), b) Principe de la synthèse additive (RVB) et application dans la visualisation des données polarimétriques de WISDOM.

Nous visualisons les données polarimétriques de WISDOM en utilisant le système de codage des couleurs RGB (*Red Green Blue*). Ce codage repose sur la synthèse additive des couleurs qui permet d'obtenir une couleur à partir de la combinaison de trois autres (ici rouge, vert et bleu). Une image RGB est donc composée de trois canaux qui décrivent chacun la même scène (en rouge, vert et bleu) mais avec une intensité variable (255 niveaux par canaux) pour composer la bonne couleur. Nous avons affecté, à chaque canal, une polarimétrie. La polarisation 00 est affectée au canal rouge, 11 au canal vert et la polarisation croisée (01 ou 10) au canal bleu. Ainsi, lorsqu'une structure est visible dans les deux polarisations parallèles (00 et 11), apparaît-elle en jaune. Lorsqu'elle est visible dans toutes les polarisations (00, 11 et 01 ou 10) elle apparaît en blanc et lorsqu'elle ne l'est seulement en polarisation croisée (01 ou 10) elle figure en bleu. Le détail des combinaisons possibles est présenté sur la Figure 5.28b. Par la suite nous nous en tiendrons à cette convention (à l'exception de la Figure 5.29 qui explore d'autres combinaisons entre canaux et polarisations).

La Figure 5.29 montre les données polarimétriques acquises avec WISDOM dans les grottes glacées

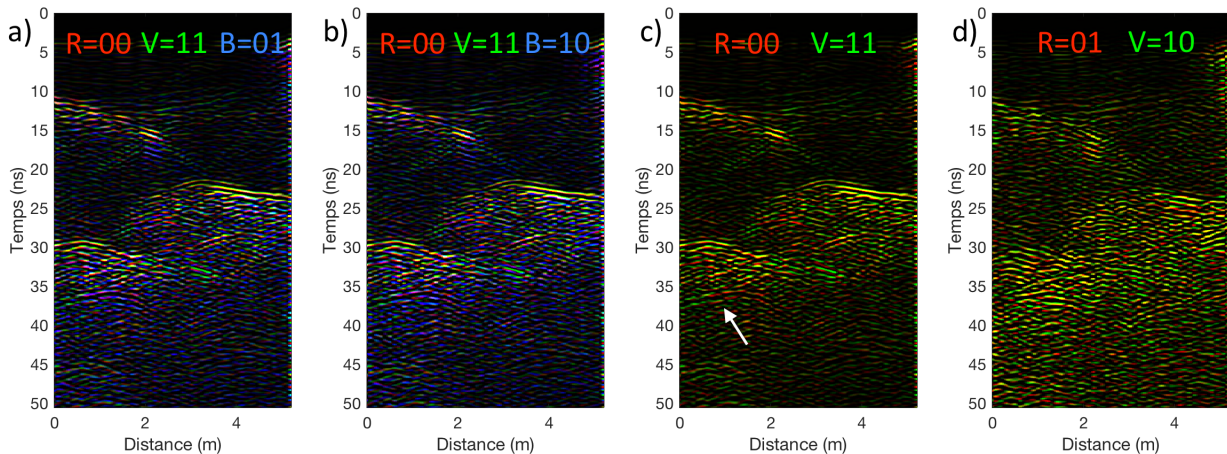


FIGURE 5.29 – Mesures polarimétriques effectuées lors de la campagne de mesures conduite dans les grottes glacées du Dachstein, en Autriche (voir Chapitre 1). Ces mesures sont visualisées par utilisation de la synthèse additive.

du Dachstein, en Autriche [Dorizon et al., 2016]. Ces données révèlent de multiples couches de glaces reposant sur un socle rocheux. Les radargrammes 5.29a et 5.29b sont construits selon la convention que nous avons décrite plus haut ; seule la polarisation croisée (01 et 01) change. Nous remarquons des structures en jaune ; cela signifie qu'elles sont visibles dans les deux polarisations parallèles (00 et 11). Ces structures sont donc peu dépolarisantes (car elles n'apparaissent pas en blanc). À l'inverse, les zones en bleu sous les structures jaunes apparaissent seulement en polarisation croisée ; cela signifie que les ondes y ont été dépolarisées. Ces zones correspondent au socle du glacier qui est composé d'amas de roches qui dépolarisent l'onde incidente.

Sur les radargrammes polarimétriques des Figures 5.29c et 5.29d seuls deux des trois canaux sont utilisés (rouge et vert). Cette nouvelle convention permet de s'intéresser seulement aux différences et aux similarités entre le radargramme en polarisations parallèles (c) et le radargramme en polarisations croisées (d). Par rapport au radargramme de la Figure 5.29a nous voyons sur le radargramme de la Figure 5.29c une hyperbole (flèche blanche) dont la branche de gauche est verte (polarisation 11) et celle de droite rouge (polarisation 00) ; nous verrons dans la section 5.3.3 la signification de ce type de signature.

La synthèse additive par la construction de radargrammes RGB permet donc de visualiser les différentes polarisations sur un seul radargramme. Cette méthode sera très utile pour interpréter rapidement les données polarimétriques lors de la mission ExoMars 2020.

5.3.2 Utilisation de la polarimétrie pour caractériser la forme des réflecteurs

La forme des roches dépend des processus qui les ont modelées. À titre d'exemple, des roches charriées pendant une durée suffisante par un cours d'eau auront une forme ronde avec un aspect lisse alors que des roches formées à la suite d'un impact météoritique violent seront anguleuses. Un site présentant un nombre important de galets (roches lisses) peut indiquer un ancien lit de rivière. La forme des roches peut donc aider à comprendre le contexte géologique d'un site et leur caractérisation a un grand intérêt scientifique.

Dans [Yingst et al., 2007] et [Golombek et al., 2003], un travail de classification des roches présentes sur le site d'atterrissage de la sonde Pathfinder, en fonction de leur forme et de leur taille, a été effectué à partir des images fournies par la caméra IMP (Imager for Pathfinder/NASA). La Figure 5.30 montre le résultat de ce travail ainsi que la répartition des roches autour du Rover. L'analyse de la forme des roches apporte des informations sur le passé géologique du site de Pathfinder. La distribution en sphéricité des roches indique notamment qu'elles partagent la même lithologie (composition et minéralogie). En revanche la distribution bi-modale de leur circularité (*roundness*) soutient l'hypothèse d'au moins deux

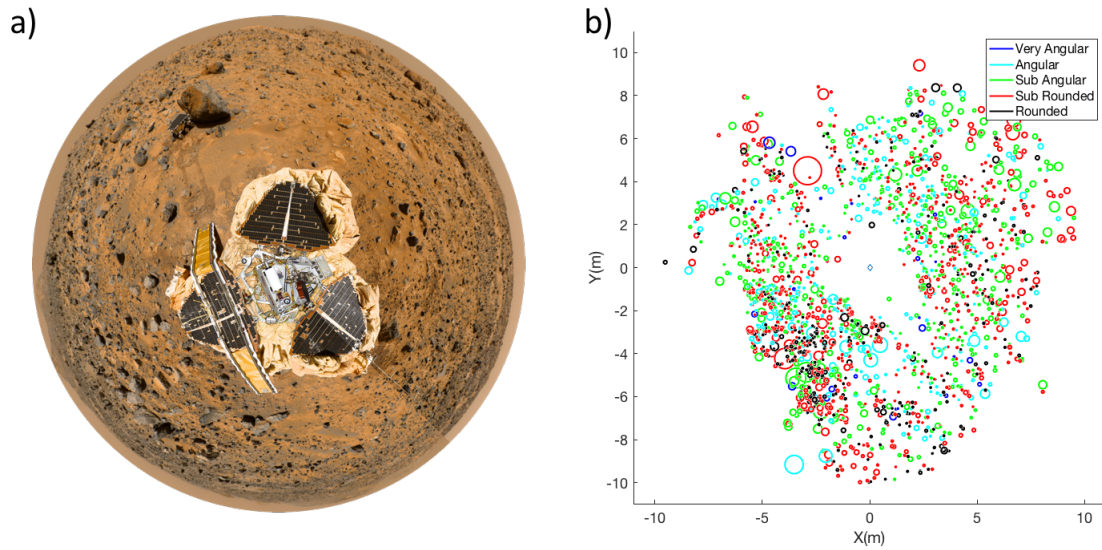


FIGURE 5.30 – a) Photo du site d’atterrissage de Pathfinder prise par la sonde (crédits : NASA), b) Répartition des roches. La taille des cercles indiquent la taille des roches et leur couleur donne une indication sur leur forme [Yingst et al., 2007]

mécanismes de transport [Yingst et al., 2007].

Actuellement, les études morphologiques des roches sont exclusivement réalisées à partir de détections en surface par les caméras à bord des atterrisseurs, rovers et orbiteurs martiens. [Pajola et al., 2017] s’intéressent à la distribution des roches de diamètre supérieur à 1.75 m (*boulders*) sur le site d’Oxia Planum; la densité de ces roches est sept fois plus élevée sur l’unité de dépôts volcaniques (datant de l’Amazonien) que sur la zone riche en argile (datant du Noachien). Les distributions de roches en surface peuvent donc témoigner de processus géologiques complexes.

Dans le cadre de la mission ExoMars 2020, grâce à WISDOM, nous serons également en mesure de fournir des informations sur les roches enfouies sous la surface et, en particulier, sur leur forme. En effet, la capacité des roches à dépolariser les ondes dépend de leur forme. Plus précisément, les roches anguleuses dépolarisent les ondes contrairement aux roches lisses. Nous pouvons donc exploiter les capacités polarimétriques de WISDOM pour contraindre la forme des roches; le signal devrait être plus fort en cross-polarisation (01 et 10) pour une roche anguleuse que pour une roche lisse (toutes choses étant égales par ailleurs).



FIGURE 5.31 – Cibles (de gauche à droite) : sphère métallique de 10 cm de diamètre, galet (roche lisse), roche anguleuse, sphère métallique de 5 cm de diamètre et ensemble de petites (<5 cm) roches.

Afin de valider cette approche, des mesures expérimentales ont été réalisées. L’étude a été menée en espace libre afin de s’affranchir d’effets liés à un environnement non homogène. Des cibles, choisies en fonction de leur forme, ont été suspendues dans l’air, à 60 cm des antennes (Figures 5.31).

La Figure 5.32 montre la signature radar des cibles en polarisation parallèle (co-polar) et en po-

larisation croisée (cross-polar). En polarisation parallèle nous distinguons clairement toutes les cibles ; l'hyperbole correspondant à la sphère métallique de 5 cm de diamètre est cependant moins marquée que les autres du fait de la petite taille de la roche (et donc de sa plus petite section efficace). Pour rappel, les longueurs d'onde de WISDOM dans le vide sont comprises entre 10 et 60 cm. En polarisation croisée deux cibles ont une signature beaucoup plus forte : la roche anguleuse et le sac de petites roches. En effet, les angles de la roche anguleuse ont dépolarisé les ondes incidentes tout comme le sac de petites roches. Les sphères lisses, en revanche, ne présentant pas d'angles, ont une signature cross-polar beaucoup plus faible ; elles ne dépolarisent pas le signal.

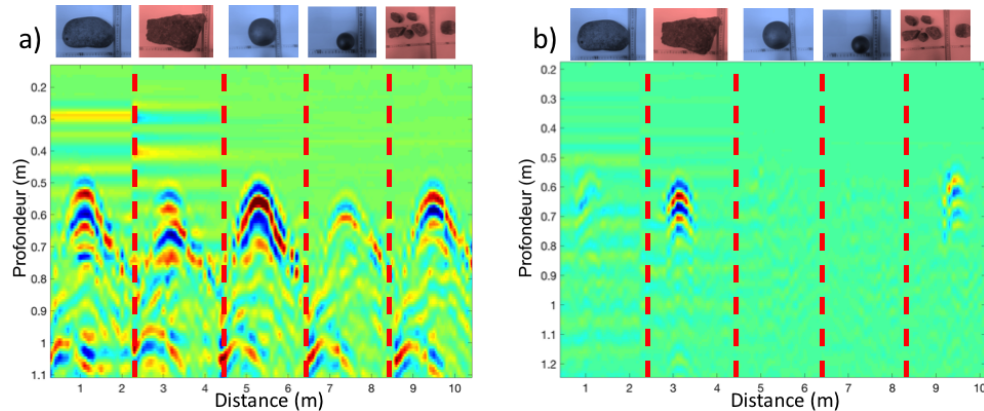


FIGURE 5.32 – Mesures sur cibles suspendues : a) en co-polarisation 00, b) en cross-polarisation 01

5.3.3 Localisation des réflecteurs

La signature radar particulière des roches en sous-sol ne permet néanmoins pas de précisément les localiser. Le sommet de l'hyperbole est l'endroit où le réflecteur est le plus proche des antennes du radar c'est-à-dire là où le temps de propagation des ondes réfléchies est le plus court. A partir de l'estimation de la constante diélectrique du milieu, il est possible de convertir ce temps de propagation en distance mais cette distance ne correspond à la profondeur du réflecteur que si et seulement si celui-ci se trouve en dessous des antennes. Un radargramme n'est pas une image du sous-sol mais une projection des signatures radar des objets en sous-sol sur un plan et il ne nous est donc pas possible de savoir si le réflecteur se trouve en dessous, à gauche ou à droite des antennes.

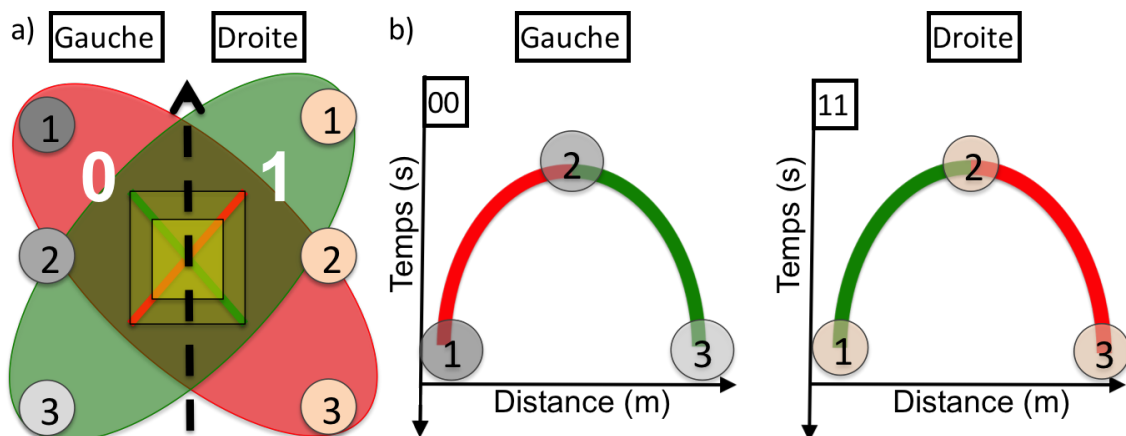


FIGURE 5.33 – Principe de localisation des cibles à partir des données polarimétriques de WISDOM : a) Tâches au sol, b) Signature radar du réflecteur en 00 et 11.

Cependant nous avons développé une méthode s'appuyant sur les données polarimétriques en co-

polarisation de WISDOM pour déterminer précisément la position du réflecteur. En effet la surface éclairée par WISDOM n'est pas la même dans les deux co-polarisation. Comme l'illustre la Figure 5.33a, cette tâche au sol est allongée (sur la figure, l'allongement des tâches au sol a été exagéré); elle ressemble à un ellipsoïde dont l'axe principal est perpendiculaire à l'élément rayonnant. Les zones sondées sont donc différentes dans les deux co-polarisations. Prenons l'exemple de la cible grise sur la Figure 5.33a; les numéros indiquent la position relative entre la cible et l'antenne : 1- la cible est devant l'antenne, 2 - la cible est sous l'antenne et 3 - la cible est derrière l'antenne. Pour rappel, la signature radar d'une cible est une hyperbole. La cible en position 1 est éclairée seulement par l'élément 0 de l'antenne; le commencement de la première branche d'hyperbole est par conséquent visible en 00 mais pas en 11 (Figure 5.33b). En position 2, les deux éléments rayonnants éclairent la cible; le sommet de l'hyperbole est donc visible dans les deux polarisations. Enfin, en position 3, seul l'élément 1 éclaire la cible; la seconde branche de l'hyperbole n'est donc visible qu' en polarisation 11. Le raisonnement est analogue pour la cible orange située à droite de l'antenne (Figure 5.33b). La forme écrasée du lobe principal (voir le Chapitre 2) peut donc nous permettre de déterminer si une cible se trouve à gauche ou à droite des antennes; elle explique aussi pourquoi nous voyons des hyperboles incomplètes (présence d'une branche sur deux) sur les radargrammes.

Mesures sur cibles

Vérifions si le raisonnement décrit ci-dessus se vérifie sur des données expérimentales. Pour cela nous avons, comme dans la section 5.3.2, fait des mesures sur cible suspendue avec une sphère métallique. Trois passages ont été réalisés (à gauche, au centre et à droite de la cible). Lorsqu'elle est sur le coté, la cible se situe à 80 cm de l'axe central des antennes ($d_1 = 0.8$ m) 5.34.

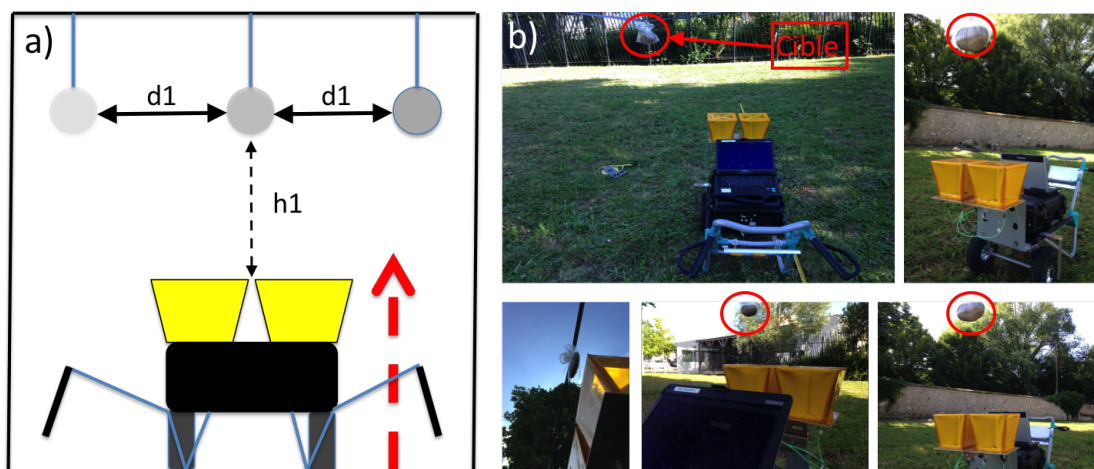


FIGURE 5.34 – Mesures sur une cible suspendue : a) Dispositif expérimental, b) Photo du dispositif expérimental.

La Figure 5.35 montre le radargramme polarimétrique après sondage de la sphère métallique située au centre puis à gauche et enfin à droite des antennes. Lorsque la sphère est au centre du profil, l'hyperbole apparaît en jaune (elle est vue en polarisation parallèle et en polarisation croisée). Lorsque les antennes passent à gauche de la cible la première branche est rouge (les antennes se rapprochent de la cible). Au centre les antennes se trouvent sous la cible; la deuxième branche est verte (les antennes s'éloignent de la cible). Ce comportement est en accord avec le schéma qui décrit le fonctionnement de cette méthode. Nous pouvons donc localiser des réflecteurs en exploitant les mesures polarimétriques et le diagramme de rayonnement des antennes.

En conclusion la polarimétrie nous permet de contraindre la forme des roches, ce qui peut se révéler précieux dans l'interprétation du contexte géologique du site à l'étude. L'utilisation du diagramme de rayonnement des antennes et des données polarimétriques nous permet également de localiser un

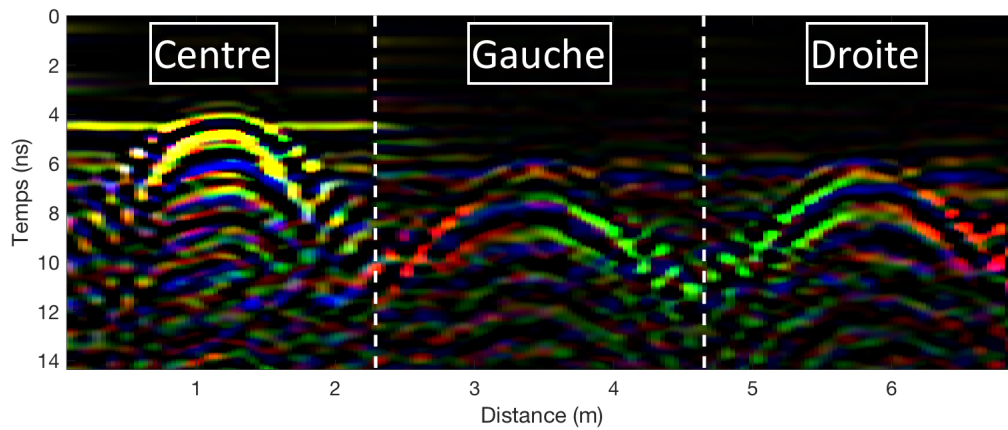


FIGURE 5.35 – Mesures polarimétriques en fonction de la localisation (centre, gauche et droite) de la sphère métallique.

réflecteur et donc de lever l’ambiguïté droite/gauche. La prochaine étape sera de prouver que cette méthode fonctionne sur des cibles enfouies dans le sous-sol à partir de mesures réalisées sur le terrain d’experimentation aménagé au LATMOS (Guyancourt).

5.4 Outils d'interprétation des radargrammes

Dans la section 1, nous avons vu comment déduire la constante diélectrique d'un milieu à partir de la signature hyperbolique d'un réflecteur (roche) en sous-sol mais aussi au travers d'une simulation comment WISDOM permettrait de localiser et donc d'identifier des zones à risque pour le forêt. Dans la section 3, nous avons présenté comment les capacités polarimétriques de WISDOM nous permettaient de localiser et de contraindre la forme des réflecteurs/roches. La distribution et la forme des roches en surface témoignent de la géologie du site, nous pouvons donc faire l'hypothèse qu'il en est de même pour les roches enfouies, les comptabiliser et contraindre leurs formes nous donnerait accès à l'histoire géologique du site sondé. Nous avons mis en place un algorithme de détection automatique de signatures hyperboliques en sous-sol.

5.4.1 Détection automatique des réflecteurs en sous-sol

Plusieurs options ont été envisagées afin de faire de la reconnaissance automatique d'hyperbole, les réseaux de neurones sont notamment utilisés pour faire de la classification et de la détection automatique. Nous avons évalué cette méthode sur des données simulées par TEMSI-FD. Une fenêtre glissante parcourt le radargramme et calcule 5 paramètres statistiques (l'écart-type, l'asymétrie, l'entropie, la moyenne et la médiane), ces paramètres sont ensuite transmis à l'entrée d'un réseau de neurones préalablement entraîné sur un jeu de données simulées. Le réseau de neurones entraîné sur une base de données suffisamment large, est capable de détecter automatiquement des hyperboles. Nous avons ensuite essayé d'utiliser cette méthode sur des données expérimentales, en vain. La raison est certainement que nous n'avons pas une base de données d'hyperbole suffisamment grande pour entraîner efficacement le réseau de neurones. Nous avons donc développé un algorithme spécifiquement pour faire de la détection automatique de signatures hyperboliques de façon déterministe sur les radargrammes de WISDOM.

Algorithme

L'algorithme, que nous avons développé, repose sur l'ajustement des signatures hyperboliques (observables sur les radargrammes) par des hyperboles mathématiques en utilisant la méthode des moindres carrés. La difficulté réside sur la sélection des éléments à ajuster sur le radargramme. Nous présentons ici un algorithme en 5 étapes permettant de détecter automatiquement des signatures hyperboliques sur les radargrammes de WISDOM. La présentation se fait sur un radargramme expérimental (le radargramme sur lequel nous avons validé nos algorithmes de traitement dans le Chapitre 3) acquis par WISDOM sur le terrain d'expérimentation (Figure 5.36a) .

La première étape consiste à faire de la détection de contours sur les radargrammes, deux méthodes peuvent-être employées : l'application d'un seuil sur le radargramme ou la détection de maxima locaux (détection de pics). Nous avons opté pour la seconde option, qui donne de meilleurs résultats. Une fois les maxima détectés, nous remplaçons sur le radargramme toutes les détections de pics par des 1 et le reste par des 0. Nous obtenons un radargramme où seuls figurent les contours (Figure 5.36b). Ce radargramme de contour est ensuite filtré afin de retirer les points isolés et des lignes horizontales qui sont généralement dues à des causes instrumentales, une valeur de 0.5 leur est attribuée. Le contour de potentielles hyperboles fait donc partie des cases de cette matrice (radargramme de contour) de valeur égale à 1. Nous ne pouvons cependant pas effectuer un ajustement par une hyperbole mathématique tout de suite, nous devons d'abord pré-sélectionner les hyperboles potentielles. Certains de ces ensembles de case de valeur égale à 1 appartiennent à une hyperbole et d'autres à du bruit où à d'autres structures (comme des interfaces). Nous nous devons donc de regrouper ces ensembles de points (valeur du radargramme de contour égale à 1) par structures ou plutôt par "classe". Nous empruntons ici le terme de classe au monde de l'apprentissage non supervisé, nous avons par ailleurs expérimenté l'algorithme K-moyenne. Ce dernier permet d'attribuer à des points une classe (k classes) en fonction de leurs distances par rapport à la moyenne des points de sa classe de départ. En s'inspirant de ce

type d'algorithme, nous avons créé le notre. Notre objectif est regrouper les points de valeur 1 sur le radargramme de contour en classes. Chaque classe fera l'objet d'un ajustement par une hyperbole mathématique.

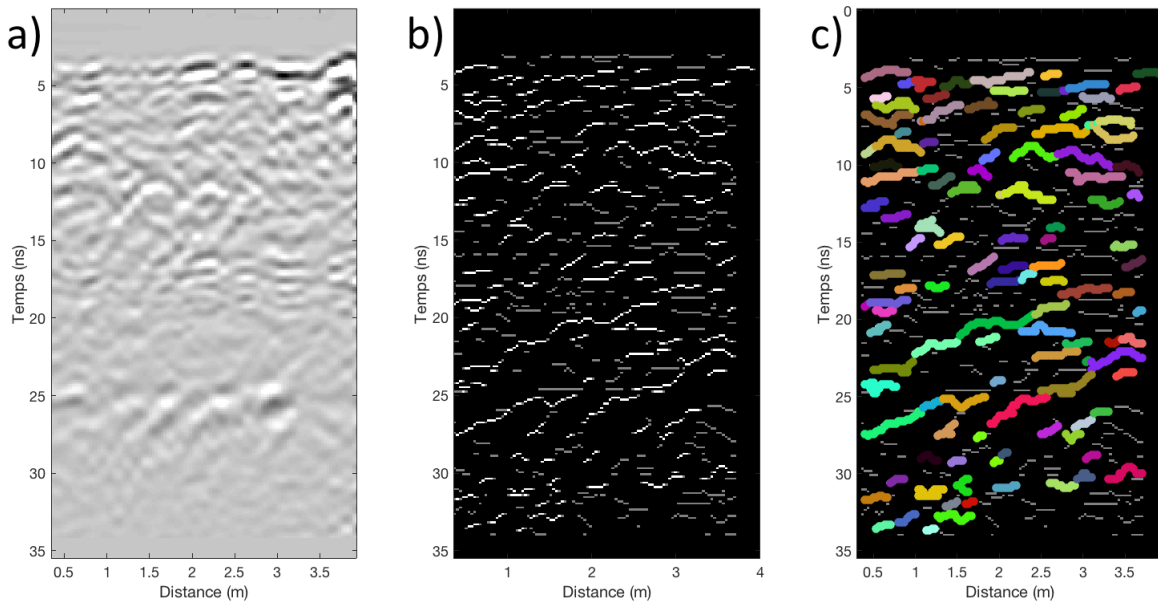


FIGURE 5.36 – a) Radargramme acquis sur le terrain d'experimentation, b) Radargramme de contour, c) Radargramme où chaque classe a une couleur différente

Nous arrivons à la deuxième étape de l'algorithme : nous recherchons un motif sur le radargramme de contour (par corrélation), ce motif constitué de 1 et de 0 (Figure 5.36b) représente le sommet ainsi que le début d'une branche d'hyperbole. Une fois tous les emplacements de ces motifs identifiés dans l'image, nous passons à la 3ème étape. Pour les ensembles de points identiques au motif, une classe leur est attribuée. Ces ensembles de points sont appelés "noyaux", ils sont identiques au motif et appartiennent à une classe. Ils ont deux extrémités (case violette et case rouge). Les noyaux testent les cases voisines du radargramme (ces cases sont en bleues sur la Figure 5.37) si ces cases testées sont de valeur égale à 1, elle rejoignent la classe et forment une nouvelle extrémité. La Figure 5.37 montre les positions testées par chaque noyau.

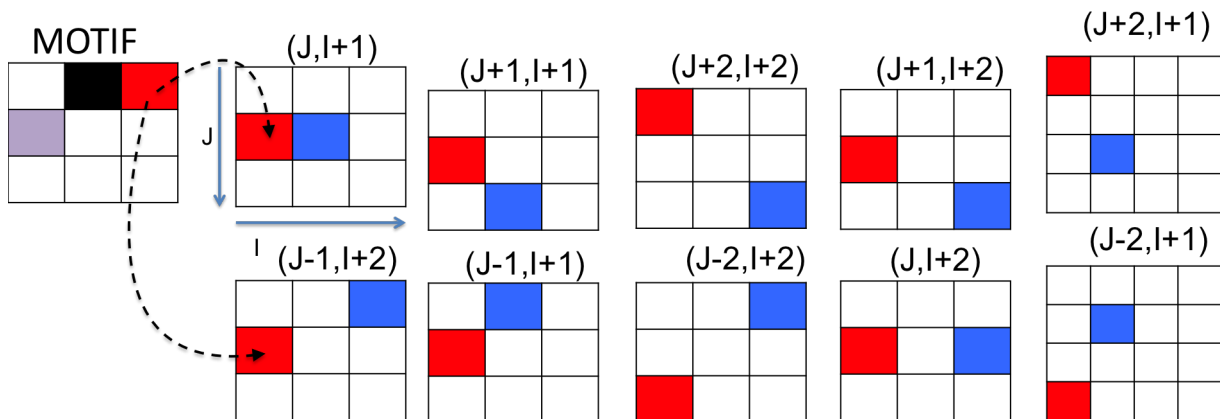


FIGURE 5.37 – Algorithme de détection, condition de formation des classes

Ici seules les identifications de gauche à droite sont montrées, les identifications de droite à gauche se font de manière analogue (extrémité violette du noyau). Une fois que chaque point du radargramme de contour (avec une valeur de 1) est affecté à une classe, l'algorithme s'arrête et passe à l'étape n°4.

Dans cette étape, nous cherchons les signatures hyperboliques probables en fragmentant certaines classes. La fragmentation intervient lorsque la classe est trop longue et qu'elle présente des concavités. Nous utilisons un procédé analogue à [Dou et al., 2017] pour séparer deux hyperboles enchevêtrées.

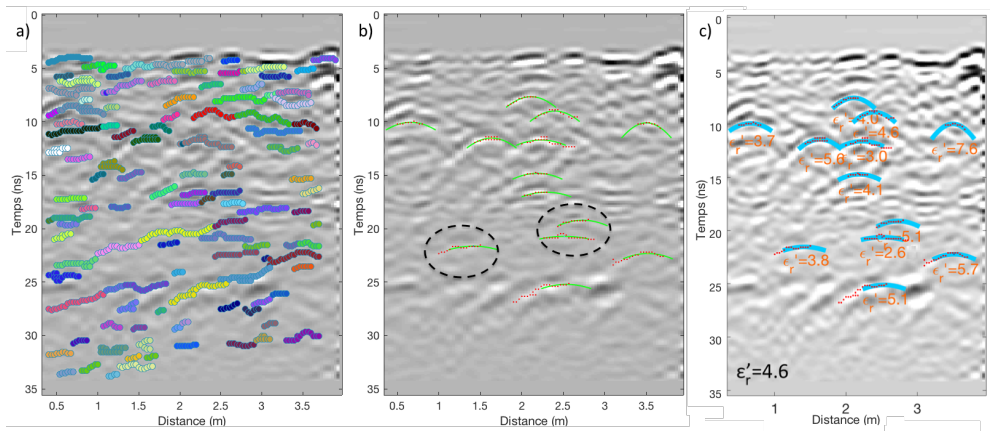


FIGURE 5.38 – Détection automatique de signatures hyperboliques sur le terrain d’expérimentation : Radargramme où figure les différentes classes, b) Détection d’hyperbole sur le radargramme : les points rouges représentent les points sur lesquelles sont réalisés l’ajustement, les pointillés indiquent de fausses détections, c) Estimation de la constante diélectrique à partir des signatures hyperboliques détectées

Une fois cette étape terminée, nous passons à la 5 ème et dernière étape de l’algorithme : l’ajustement des classes par une hyperbole mathématique. Les classes sont ajustées par une hyperbole mathématique en utilisant la méthode des moindres carrés. Seules les hyperboles avec une fonction coût faible mais aussi une constante diélectrique crédible ($\Delta\epsilon'_r = 4$, par rapport à l’estimation moyenne de la constante diélectrique avec l’écho de surface) sont considérées comme des détections. Les résultats sont visibles sur les Figures 5.38a et b. Nous constatons des fausses détections (sélection pointillés noirs). Nous nous efforcerons d’affiner les critères de sélection entre détection et non détection. La Figure 5.38c montre les constantes diélectriques estimées à partir de l’ajustement des classes par une hyperbole mathématique.

5.4.2 Identification des structures, étude des textures

L’algorithme présenté ci-dessus peut aussi être utilisé afin de détecter des structures en sous-sols comme des couches. Il suffit alors de s’arrêter à l’étape n°3. Le calcul des pentes apparentes de couches détectées automatiquement peut alors nous renseigner sur la nature du milieu (Figure 5.45). Lorsque les réflecteurs en sous-sol sont trop nombreux, nous ne pouvons les détecter individuellement. Nous devinons leurs présences à l’aspect ou la texture du radargramme. Une texture peut être définie comme l’arrangement des couleurs et des intensités d’une image. Plusieurs indicateurs statistiques sont capables de rendre compte de la variabilité d’une image. Parmi eux, on compte l’écart-type et l’entropie. Nous montrerons dans la section suivante, comment la valeur d’entropie locale nous permet d’identifier des zones avec différentes textures dans un radargramme (Figure 5.46).

5.5 Vers Mars : Campagne de mesure dans le Colorado provençal

Afin de préparer les opérations vers Mars et de tester les méthodes développées dans ce manuscrit nous avons entrepris une campagne de mesures. Cette campagne a été réalisée du 18 au 22 juillet 2017 en collaboration avec le Laboratoire de Géologie de Lyon, sur différents sites : (i) le Colorado provençal, (ii) le bassin de Lodève près du lac Salagou et (iii) le cirque de Navacelle. Un épisode pluvieux a malheureusement compromis la qualité des mesures effectuées sur les sites (ii) et (iii). Nous avons donc choisi de présenter les résultats obtenus sur le site du "Colorado Provençal" situé dans le sud de la France. Le choix du site est motivé par un sol sec et dépourvu de végétation, et par des affleurements, qui permettent de prédire la présence de structures en sous-sol. Le travail a été mené avec l'accord des responsables du Colorado Provençal.

5.5.1 Le contexte

Le Colorado provençal est un site situé sur le territoire de ville de Rustrel, dans le Vaucluse. Le site est composé d'anciennes carrières d'ocre, il a été creusé par l'homme ainsi que par l'érosion éolienne et aqueuse. Il y a 110 millions d'années, un grès (roche sédimentaire) s'est formé sur près de 30 mètres d'épaisseur. En milieu marin, ces grès contiennent un minéral riche en fer : la glauconie. Exposé en surface quelques millions d'années plus tard, l'atmosphère et les pluies ont altéré la glauconie pour produire des oxydes de fer qui confèrent aujourd'hui la couleur ocre aux paysages. Nous pouvons donc nous attendre à trouver, en plus de la kaolinite, qui forme les sables blancs, des oxydes de fer (hématite, goéthite, limonites ...), qui donnent une couleur rouge aux sables.



FIGURE 5.39 – Position des sites de mesures dans le "Colorado Provençal".Crédit : réalisée à partir de Googlemap

Pour cette campagne de mesure, nous avons utilisé le prototype de WISDOM ainsi qu'un radar à pénétration commerciale : le SIR 4000 GSSI déjà utilisé sur notre terrain d'expérimentation (section 2). Cette approche permet de comparer les radargrammes obtenus, d'une part, avec un radar couramment utilisé en génie civil et en prospection géologique et, d'autre part, avec un radar spécialement conçu pour le spatial avec les contraintes que cela requiert (puissance, bande de fréquences, antennes 38 cm au dessus du sol ...). Pour le radar commercial, nous avons sélectionné trois antennes, fonctionnant à

des fréquences centrales de 400, 900 et 1600 MHz qui recoupent la bande de fréquence de WISDOM. La Figure 5.39 montre les sites où nous avons effectué des mesures. Dans cette section, nous nous intéresserons particulièrement au site n°2, qui intègre les éléments et structures que nous pourrions avoir l'occasion de rencontrer lors de la mission ExoMars 2020.

5.5.2 Résultat sur le site n°2

Nous voyons sur le site 2 (Figure 5.40) la roche exposée à la surface ; elle s'enfonce sous une couche de sable. La configuration du site fait partie des scénarios attendus pour la mission ExoMars 2020 qui va rechercher des affleurements. Le site montre des sols avec deux types de coloration (blanche/jaune ou rouge). Comme expliqué précédemment, la couleur blanche est, en général, attribuée à la kaolinite et la rouge aux oxydes de fer. Si nous faisons l'hypothèse que cette différence de composition se traduit par une différence de valeur de constante diélectrique, alors nous serons en mesure de les différencier à partir des mesures radar, plus particulièrement à partir de l'évaluation de la valeur de la constante diélectrique. Des échantillons de sol prélevés afin de déterminer, en laboratoire, la composition et la constante diélectrique des matériaux présents sur ce site permettront de vérifier cette hypothèse. Nous remarquons, en outre, que le changement de couleur s'observe à la frontière entre le sable et l'affleurement de roches en surface. Puisque la valeur de la constante diélectrique dépend aussi de la compaction/porosité des matériaux, cette différence de porosité aura certainement un impact sur les valeurs de constantes diélectriques, qui s'ajoutera à l'effet potentiel lié à la composition.

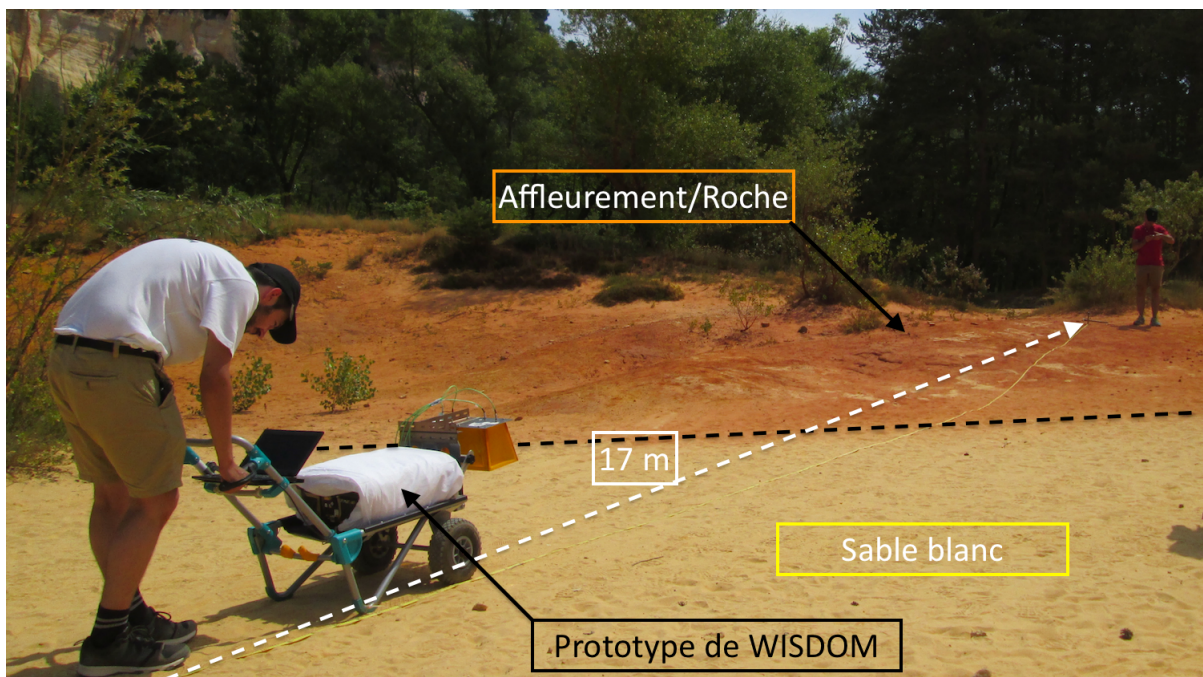


FIGURE 5.40 – Mesures sur le site 2 du Colorado provençal

Dans le cadre de la mission ExoMars, [Vago et al., 2017] introduit une procédure (la RSM ou *Reference surface mission*) pour l'étude étape par étape des sites retenus. La première étape consiste à trouver un site d'intérêt à l'aide des caméras de PanCam et du spectromètre d'ISEM. Une fois un affleurement identifié, le Rover s'en rapproche puis l'analyse avec les imageurs et spectromètre (PanCam, ISEM et CLUPI). Un échantillon est ensuite prélevé en surface et analysé dans l'ALD (le laboratoire embarqué) par MicrOmega, RLS et MOMA afin d'identifier les minéraux en présence et de chercher des molécules organiques. Si l'affleurement montre des signes d'intérêt scientifique (minéralogie témoignant d'activité passée liée à de l'eau ou présence de matière organique même en faible quantité) - à l'image de la récente découverte faite par Curiosity de matière organique complexe sur des échantillons prélevés à 5 cm de profondeur sur de la roche vieille de 3.5 My[Eigenbrode et al., 2018]

- alors l'étude sera poussée plus loin grâce à un forage en profondeur. La surface est, en effet, hostile puisqu'elle est bombardée par des rayonnements énergétiques provenant de l'espace qui détruisent les biomarqueurs et [Kminek and Bada, 2006] recommande d'étudier des échantillons à plus d'un mètre de profondeur pour espérer y trouver des traces de vie qui aient pu être préservées. Il devient donc pertinent de suivre cet affleurement en sous-sol avec WISDOM afin de prélever des échantillons dans cette unité géologique prometteuse à un endroit où elle a été protégée. Le sous-sol environnant sera donc sondé par WISDOM et ADRON afin de reconstruire le contexte géologique du site, d'estimer la quantité intégrée d'eau en sous-sol (sur une profondeur d'un mètre) et de trouver la zone la plus prometteuse pour forage. L'étape suivante consiste à réaliser le forage, analyser le sous-sol pendant le forage par le spectromètre MA_MISS puis l'échantillon collecté en profondeur par CLUPI. Enfin, l'échantillon provenant du sous-sol sera transmis aux instruments de l'ALD pour analyse.

Lors de notre campagne de mesure, bien que n'ayant eu que WISDOM pour l'analyse du site, nous nous sommes inspirés de cette procédure. Nous avons repéré visuellement un affleurement puis nous avons utilisé WISDOM pour sonder les alentours et localiser les structures intéressantes dans le sous-sol.

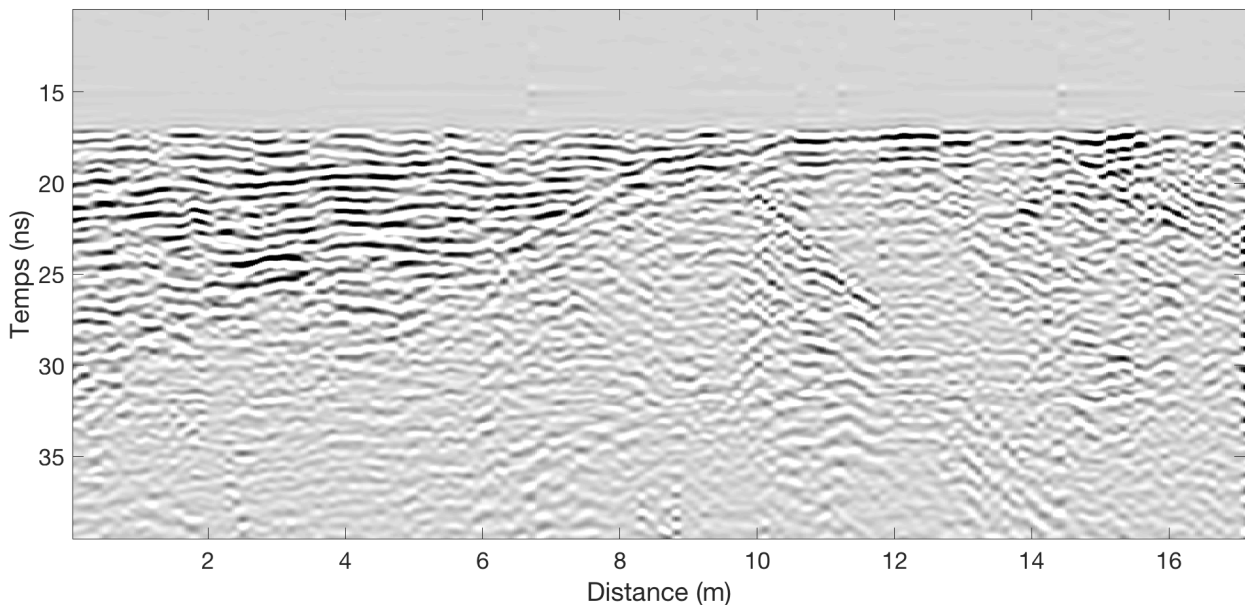


FIGURE 5.41 – Radargramme acquis avec le prototype de WISDOM sur le site 2

Nous avons, donc, au voisinage de l'affleurement, acquis un profil radar (A-scan) sur une longueur totale de 17 m dans la direction indiquée par la flèche blanche sur la Figure 5.40 à la cadence d'un sondage tous les 10 cm (ce qui est en accord avec les configurations d'opérations prévues pour la mission ExoMars). La Figure 5.41 montre le radargramme en question. Ce radargramme a été traité selon la méthode SRD présentée dans le chapitre 3 dédié aux méthodes de suppression des parasites. Sur la Figure 5.42, nous avons indiqué les différents éléments identifiés dans le sous-sol. Nous constatons la présence d'un milieu stratifié et de nombreuses signatures hyperboliques qui traduisent la présence de diffuseurs en sous-sol (roches). Avec WISDOM, nous sommes capables de suivre l'affleurement qui se prolonge dans le sous-sol vers la gauche de l'image. Le sable blanc qui repose sur le socle rocheux forme un milieu stratifié. Comme nous l'avons vu, la présence de couches détectées par le radar correspond à des changements de valeur de constante diélectrique, qui peuvent être dus soit à des variations de composition, soit à des différences de compaction/porosité. Il est possible que la couche de sable meuble en surface repose sur de la roche sédimentaire formée par du sable compact. Dans le cadre de la mission ExoMars, il est préférable de prélever dans de la roche consolidée. En effet, les dépôts éoliens ont été stérilisés par les rayonnements et ne présentent donc aucun intérêt exobiologique. Nous conseillerons donc un prélèvement au niveau de sa limite supérieure du socle rocheux. Bien que la foreuse soit conçue

pour forer dans de la roche sédimentaire, pour des questions de sécurité les forages sur des zones riches en roches de petites tailles seront évités. Après analyse du radargramme, la zone correspondant à des distances comprises entre 0 et 4 mètres (distance Figure 5.42) semble être la plus intéressante pour le forage. À ce stade nous ne disposons pas de l'information de profondeur, mais les valeurs attendues de permittivité indiquent que, dans cette zone, le socle se trouverait à environ 1 mètre de profondeur. En conséquence, si le forage prévu est limité à 50 cm pour des raisons techniques, il faudrait sonder à une distance horizontale d'environ sept mètres pour que la foreuse puisse atteindre l'objectif. L'estimation de la profondeur précise nécessite une étape supplémentaire d'analyse des données.

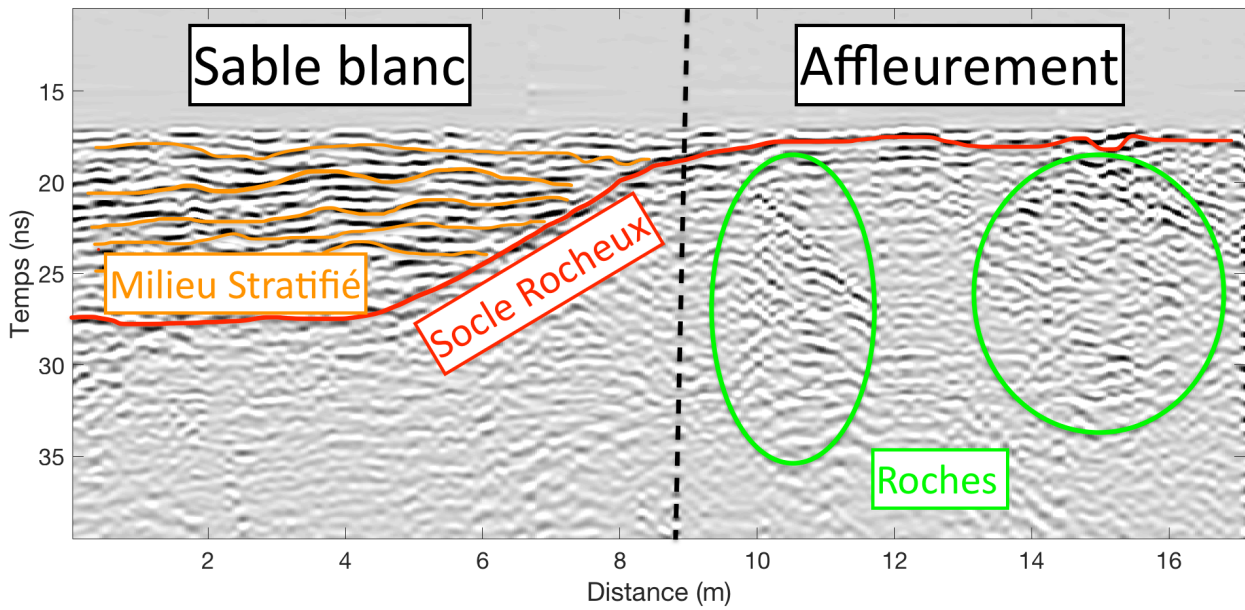


FIGURE 5.42 – Radargramme et son interprétation

Le radargramme obtenu sur le site n°2, en quelques minutes, montre donc comment les données WISDOM peuvent nous aider à comprendre le contexte géologique d'un site mais aussi fournir des informations indispensables aux opérations de forages. Cette première étape de caractérisation ne nécessite pas la conversion des retards mesurés en distance, opération nécessitant l'estimation préalable de la constante diélectrique qui sera décrite plus loin.

Nous avons effectué des mesures complémentaires sur ce même site avec le radar commercial SIR-4000/GSSI. La Figure 5.43 montre les radargrammes acquis avec le radar commercial. L'apport des hautes fréquences (radargramme à 1.6 GHz) permet de résoudre les différentes couches du milieu stratifié mais aussi de détecter de petites roches enfouies. En effet, les flèches vertes indiquent les roches en sous-sol, elles sont aussi présentes sur le radargramme de WISDOM. Cela confirme que les hyperboles observées sur le radargramme de WISDOM proviennent bien du sous-sol et non de la surface (puisque les antennes du radar commercial sont, elles, posées au sol). Nous identifions clairement un milieu stratifié sur les radargrammes effectués à 900 et 1600 MHz (flèches jaunes) comme sur le radargramme de WISDOM. Cependant la transition entre le milieu stratifié et le socle rocheux n'est pas nette. En effet, la profondeur de pénétration de l'antenne de 1.6 GHz semble inférieure au mètre, nous n'atteignons donc peut-être pas le socle rocheux. Les informations obtenues à l'aide de WISDOM en comparaison de celles fournies par le radar commercial démontrent l'efficacité de son concept de WISDOM, qui est bien dimensionné pour l'étude du proche sous-sol.

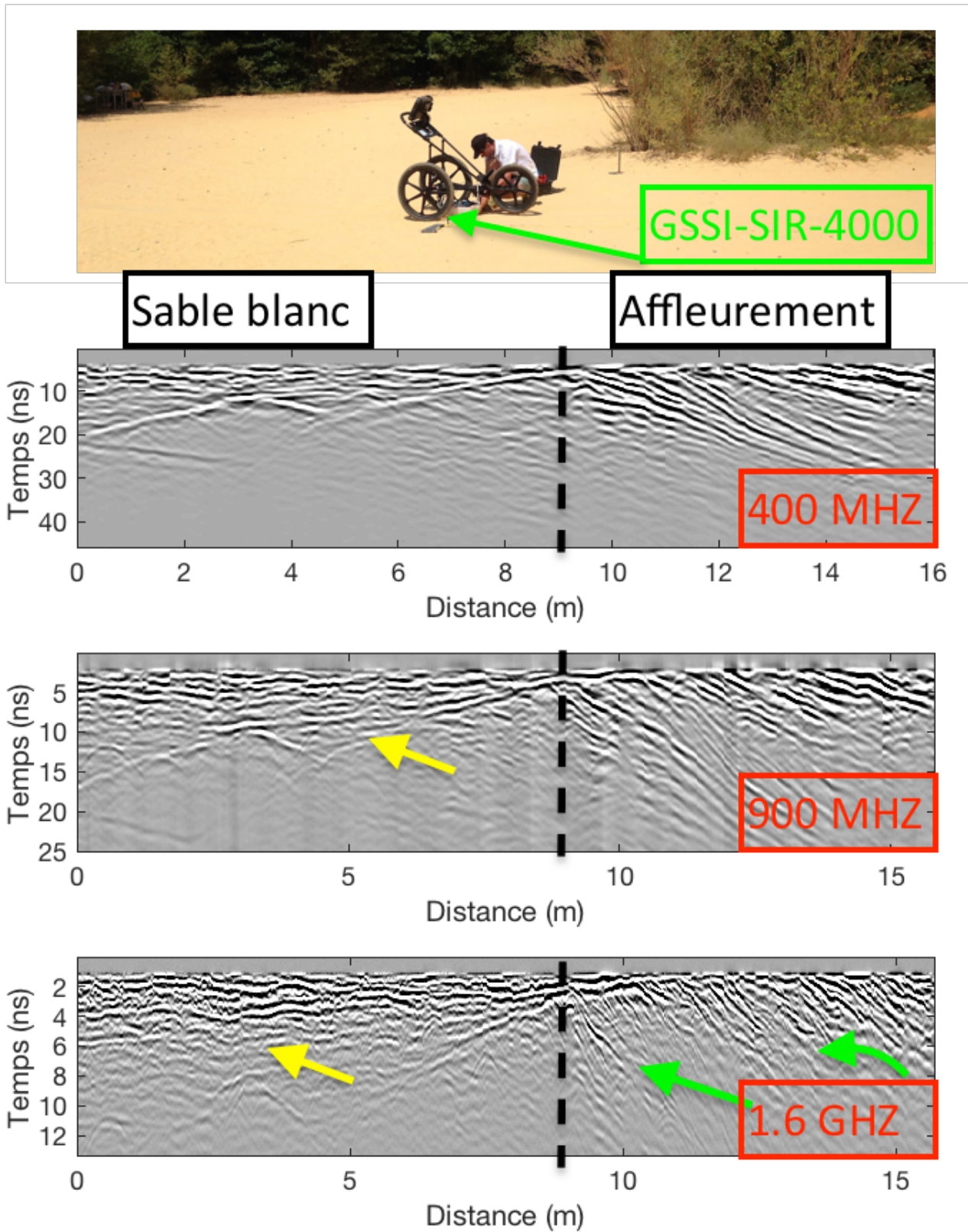


FIGURE 5.43 – Radargrammes acquis sur le site n°2 avec le radar commerciale SIR-4000/GSSI avec des antennes de 400, 900 et 1600 MHz. L'échelle verticale est adaptée à la profondeur de pénétration des fréquences utilisées

5.5.3 Caractérisation automatique des structures détectées dans le sous-sol

Nous avons présenté, dans le Chapitre 3, la chaîne de traitement automatique des radargrammes de WISDOM, qui a été mise au point dans le cadre de cette thèse afin d'aider à l'interprétation rapide des radargrammes. Tout d'abord, nous avons étudié la texture du radargramme acquis sur le site n°2. La Figure 5.44 représente l'entropie calculée sur le radargramme du site n°2. Un filtre a été appliqué afin de de délimiter grossièrement les zones et de procéder à une classification de l'image. Ensuite un deuxième filtre est utilisé afin de déterminer les contours des ces zones.

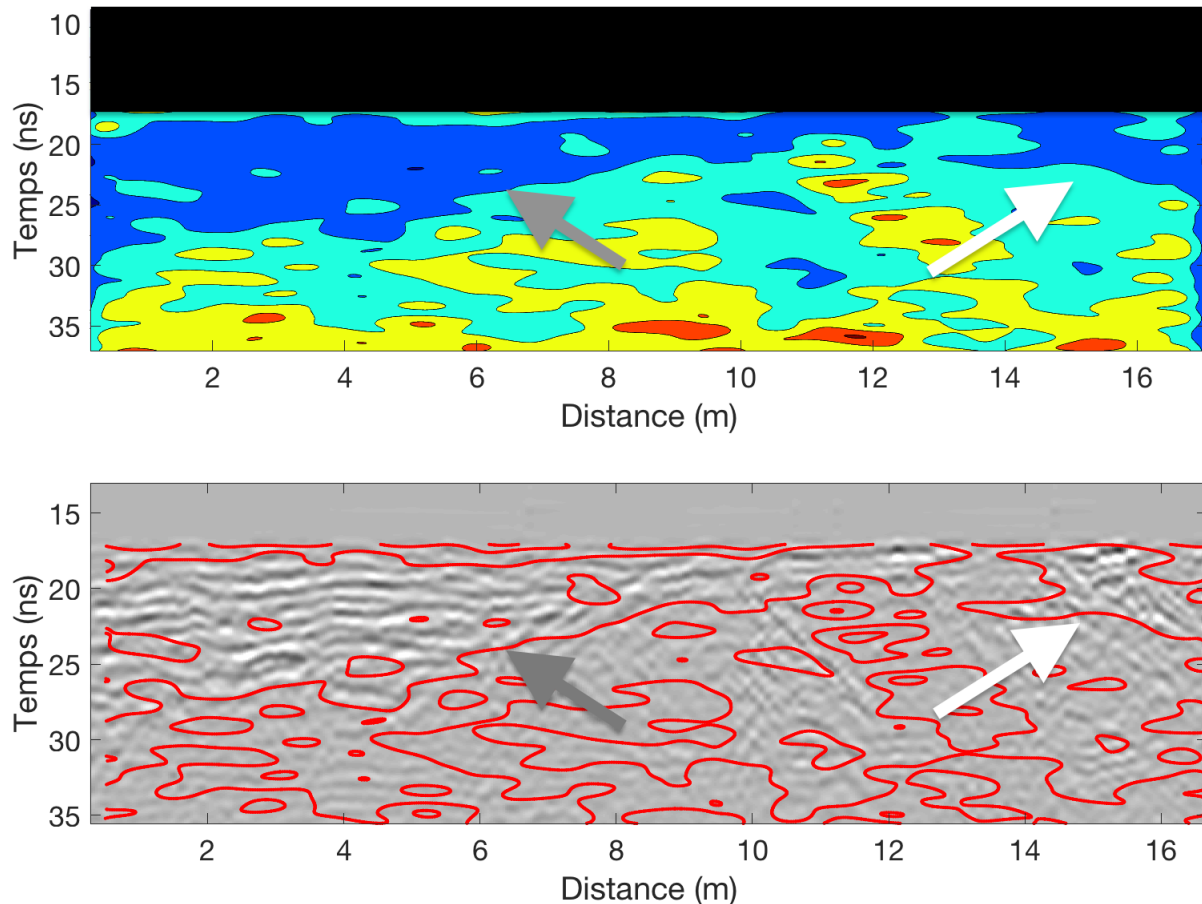


FIGURE 5.44 – Analyse de la texture des radargramme par le calcul de l'entropie a) Entropie du radargramme après filtrage, b) contour qui délimite les différentes textures du radargramme

Nous voyons clairement que la classification proposée, fondée sur l'analyse des textures, permet d'identifier la zone de milieu stratifié (flèche grise). Cette analyse des textures met aussi en avant une région au niveau de l'affleurement (flèche blanche). Elle sera utilisée pour délimiter les zones en fonction de leur structure géométrique.

Dans un second temps, nous avons utilisé le code de détection automatique de structures qui permet de localiser les roches enfouies (dont la signature est proche d'une hyperbole), mais également de détecter des interfaces entre les différentes couches. Nous nous focalisons, dans cette partie, sur cette détection. Seules les classes les plus longues sont conservées et leur pente est calculée. Même si cette pente apparente θ n'est pas la pente réelle de ces éléments en sous-sol à cause de la réfraction (sauf dans le cas d'une interface horizontale), θ donne une indication sur l'inclinaison des structures présentes en sous-sol et fournit ainsi un élément utile à la compréhension des processus de formation du site.

La Figure 5.45a) montre les classes avec les plus faibles pentes apparentes ($\theta < 10^\circ$), ces classes correspondent aux couches en sous-sol et sont principalement situées au niveau du milieu stratifié. Les classes les plus inclinés $\theta > 10^\circ$ se situent principalement au niveau de l'affleurement et sur la limite

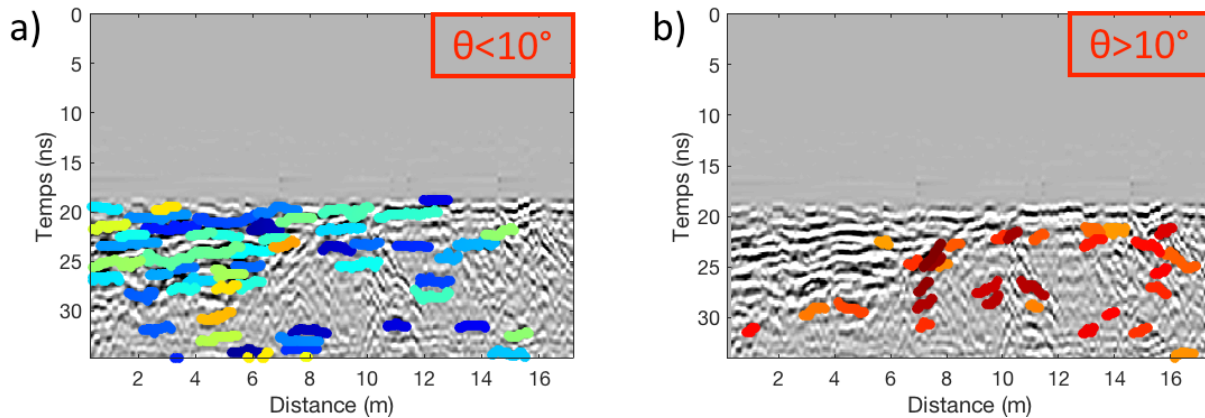


FIGURE 5.45 – Détection des pentes apparentes θ : a) classes avec une pente apparente inférieure à 10° , b) classes avec un pente apparente supérieure à 10°

supérieure du socle rocheux. Ces zones automatiquement détectées, couplées à l’analyse des textures peuvent constituer des éléments objectifs afin de prendre une décision de prélèvement d’échantillons. Nous éviterons en effet de forer sur des zones avec des réflecteurs, l’attention sera plutôt portée sur des couches de sédiments qui ont pu préserver des bio-marqueurs.

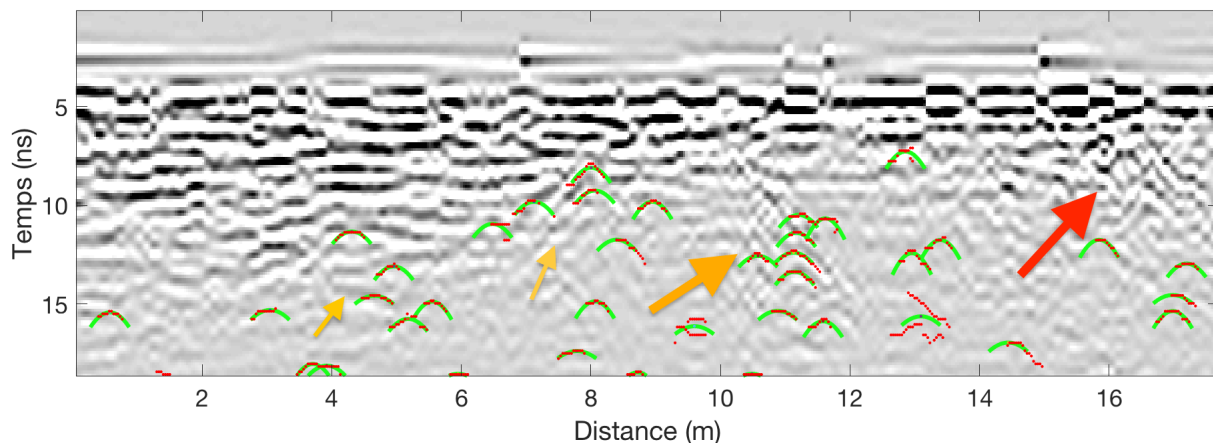


FIGURE 5.46 – Détection automatique d’hyperboles : les hyperboles (vertes) sont des hyperboles mathématiques qui résultent de l’ajustement sur les points expérimentaux (points rouge) par la méthode des moindres carrés

La Figure 5.46 montre, sur le même radargramme, le résultat de la détection automatique de réflecteurs de petite taille (de dimensions comprises approximativement entre 5 et 40 cm), dont la signature radar est proche d’une hyperbole. Nous voyons un grand nombre d’hyperboles (et donc autant de roches) concentrées dans certaines zones (flèche orange) dont l’interface entre le milieu stratifié et le socle rocheux. Nous ne détectons pas d’hyperbole dans le milieu stratifié. Nous constatons quelques fausses détections. Très peu de détections sont faites au niveau de l’affleurement (flèche rouge). Ceci peut être dû à une densité élevée de réflecteurs, dont les branches d’hyperboles sont enchevêtrées, ce qui les rend difficilement identifiables par l’algorithme. Un travail a été initié dans ce sens. À terme la détection automatique d’hyperboles nous permettra de comparer la concentration de roches en sous-sol pour différents sites et d’apporter de nouveaux éléments dans la compréhension de leur formation. L’algorithme actuel a été conçu pour une interpolation temporelle et spatiale fixée qui permet de limiter le temps de calcul nécessaire à cette détection automatique à 5 minutes environ sur un PC de huit coeurs et 16 Gigaoctets de RAM. Le radagramme de la Figure 5.46 utilisé pour cette détection

automatique, a été obtenu avec une utilisation minimale (trois fois moins) de complétion par des zéros qui se traduit par une perte de détails par rapport au radargramme de la figure 5.41.

5.5.4 Caractérisation des matériaux

Nous avons vu dans la première partie de ce manuscrit que les radars sondeurs autour de Mars, MARSIS et SHARAD ont permis d'estimer la constante diélectrique de plusieurs formations comme les calottes polaires ou des formations aux latitudes moyennes. Dans [Mouginot et al., 2010], une carte interpolée de la constante diélectrique est réalisée à partir des données MARSIS. À son tour, WISDOM sera capable, sur des échelles spatiales nettement plus réduites, d'estimer la partie réelle de la permittivité à partir de l'écho de sol mais aussi par l'analyse des signatures liées aux réflecteurs présents en sous-sol.

Constante diélectrique estimée à partir des données de WISDOM

Les méthodes présentées dans la section 2 ont été utilisées afin d'estimer la constante diélectrique sur le site n°2 à partir des données de WISDOM. Nous faisons l'approximation d'un sol lisse, l'écart-type des hauteurs calculée à partir de l'écho de sol est de 1.22 cm. D'après nos simulations de la section 2 nous sommes donc dans un cas lisse (Figure 5.21b).

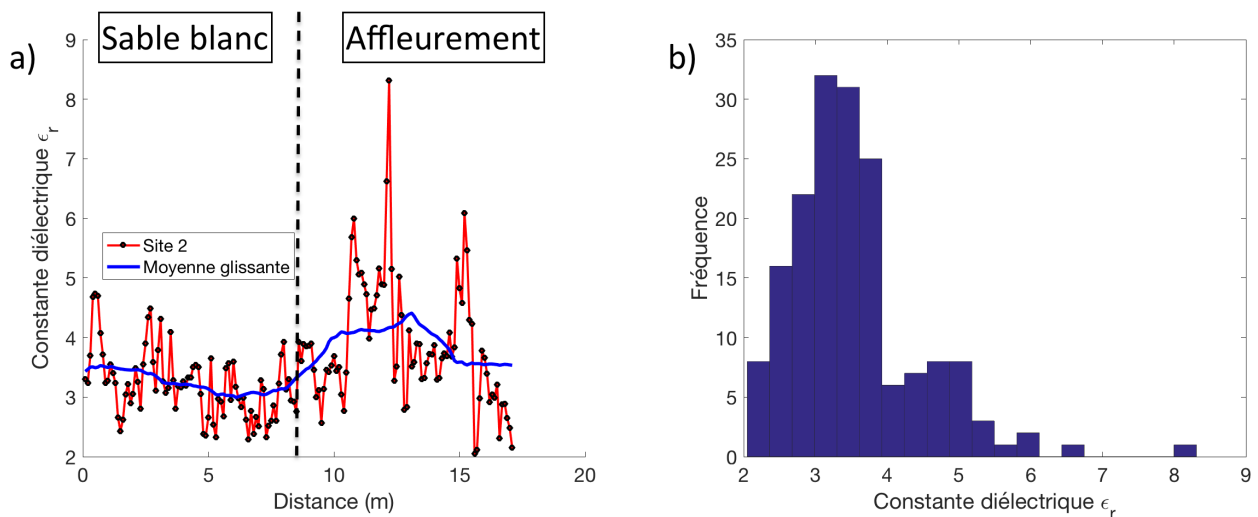


FIGURE 5.47 – Estimation de la constante diélectrique à partir de l'écho de sol sur le site n°2 du Colorado Provençal

La Figure 5.47a) montre les valeurs de constante diélectrique estimées sur le site n°2 du Colorado Provençal le long du trajet à partir de l'amplitude de l'écho de sol. La Figure 5.47b) présente la distribution de ces valeurs. La variabilité des valeurs estimées sur Figure 5.47a) est importante. La courbe noire correspond à une moyenne glissante calculée sur 50 points qui permet de nous affranchir des variations spatiales rapides. Nous remarquons que les valeurs moyennées obtenues sur sable blanc sont plus faibles que celles mesurées sur l'affleurement. Ce comportement est confirmé par la distribution bimodale de la figure 5.47b). Ces deux zones (sable blanc et affleurement) diffèrent par leurs aspects (couleur blanche et rouge) mais aussi par leurs compaction (sable meuble contre roche consolidé). La différence de constante diélectrique dépend donc d'une différence de composition et/ou d'une différence de compaction. Les analyses d'échantillons en laboratoire nous permettront de répondre à cette question. Nous avons en complément utilisé la signature des réflecteurs en sous-sols afin d'estimer la constante diélectrique en profondeur. Nous voyons sur la Figure 5.48 qu'une partie des signatures hyperboliques donnent une valeur de constante diélectrique proche de 1 (en bleu), ces signatures proviennent donc de roches en surface. Les autres hyperboles donnent des valeurs entre 2.0 et 4.1 (en

rouge), compatibles avec les valeurs estimées à partir de l'écho de sol. Ce cas illustre l'importance de cette méthode afin de discriminer les réflecteurs qui proviennent de la surface et ceux qui proviennent du sous-sol.

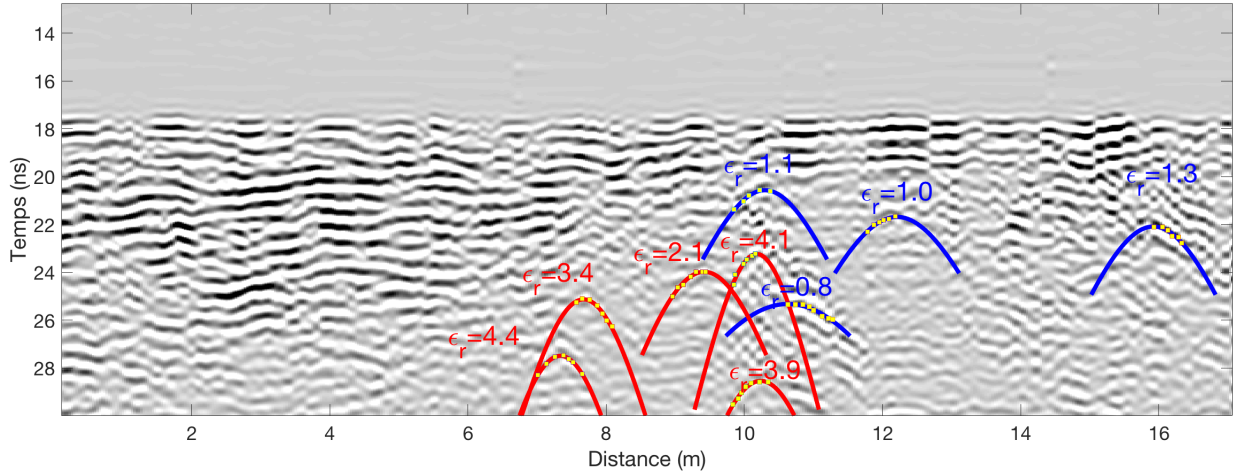


FIGURE 5.48 – Estimation de la constante diélectrique à partir des réflecteurs en sous-sol sur le site n°2 du Colorado Provençal

Contrainte sur la composition du sous-sol à partir des données radar

Comme expliqué dans le chapitre 1, la partie réelle de la permittivité ou constante diélectrique d'un sol dépend en première approximation du degré de compaction pour un matériau sec, même si la nature du matériau va également avoir un impact. D'après [Ulaby et al., 1988], la constante diélectrique pour des matériaux lithiques secs est liée à la masse volumique du matériaux par la relation suivante :

$$\epsilon_r = 1.96^\rho \quad (5.15)$$

où ρ est la masse volumique du matériau. Il est aisé d'inverser cette relation afin d'estimer la masse volumique en fonction de la constante diélectrique. Dans [Carter et al., 2009a], cette relation est utilisée pour déterminer la masse volumique des coulées de lave sur Ascraeus Mons à partir de la constante diélectrique estimée par le radar sondeur SHARAD. Le même procédé est utilisé pour évaluer la masse volumique des dépôts de la MFF (Medusae Fossae Formation) dans [Watters et al., 2007] à partir des données MARSIS.

Une hypothèse d'un mélange entre deux matériaux peut aussi être envisagée, c'est le cas de [Mouginot et al., 2010] qui propose de déterminer le rapport glace/roche à partir de la constante diélectrique ou de [Grima et al., 2009] qui évalue la pureté de la glace. Ces travaux utilisent la loi de Maxwell Garnett. La loi de mélange de Maxwell Garnett permet d'estimer la constante diélectrique d'un mélange de deux matériaux. Elle fait l'hypothèse d'une matrice de constante diélectrique ϵ_e avec des inclusions sphériques de constante diélectrique ϵ_i . Le milieu est considéré comme isotrope. La fraction en volume entre les inclusions et le milieu est notée f . La constante diélectrique effective du mélange est modélisée par la loi :

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_e + 3f\epsilon_e \frac{\epsilon_i - \epsilon_e}{\epsilon_i + 2\epsilon_e - f(\epsilon_i - \epsilon_e)} \quad (5.16)$$

où ϵ_{eff} correspond à la constante diélectrique du mélange, en inversant cette équation nous pouvons donc estimer la fraction volumique entre deux matériaux. Le Colorado provençal est un site sec où il règne une température supérieure à 30°C pendant l'été. Il n'y a donc pas de risque de trouver de la glace d'eau dans le milieu sondé, nous exprimons donc les valeurs de constante diélectrique en terme de porosité et de densité (voir tableau ci-dessous) estimés à partir de la loi de Maxwell Garnett. Pour

la porosité nous considérons un mélange entre une roche sédimentaire $\epsilon_e = 5$ et de l'air et $\epsilon_i = 1$. Dans le cadre de la mission ExoMars, l'hypothèse de sédiments riches en glace d'eau devra être considérée (et confrontée aux données du détecteur à neutrons ADRON-RM), nous fournissons donc ici, à titre indicatif, dans l'hypothèse d'un sol riche en glace d'eau, le pourcentage de glace compatible avec les valeurs de ϵ estimées. Nous considérons, pour cette étude, un mélange d'une roche sédimentaire $\epsilon_e = 5$ avec des inclusions de glace d'eau $\epsilon_i = 3.1$. Les résultats pour l'ensemble des mesures effectuées au Colorado Provençal figurent dans le tableau 5.2.

	$\bar{\epsilon}_r$	σ_{ϵ_r}	porosité (%)	masse volumique ρ ($g.cm^{-3}$)	rapport glace/roche (%) ¹
Site n°1	3.17	0.80	38	1.71	96
Site n°2	3.55	0.91	29	1.88	74
Site n°3	4.46	0.89	11	2.21	27
Site n°4	3.90	1.37	10	2.22	26
Site n°5	4.43	0.92	22	2.02	55

TABLE 5.2 – Moyenne et écart-type des valeurs de constante diélectrique sur les sites de la campagne de mesure Figure 5.39

Les valeurs de constante diélectrique sont comprises entre 3 et 5, ce qui est compatible avec du sable et de la roche sédimentaire. Les valeurs de masse volumique oscillent entre 1 et 2 $g.cm^{-3}$. A titre de comparaison, les basaltes ont une masse volumique supérieure à 3 $g.cm^{-3}$ [Carter et al., 2009a]. Le milieu le moins poreux (et donc la roche de plus forte densité) est, d'après les données de WISDOM, le milieu du site n°4.

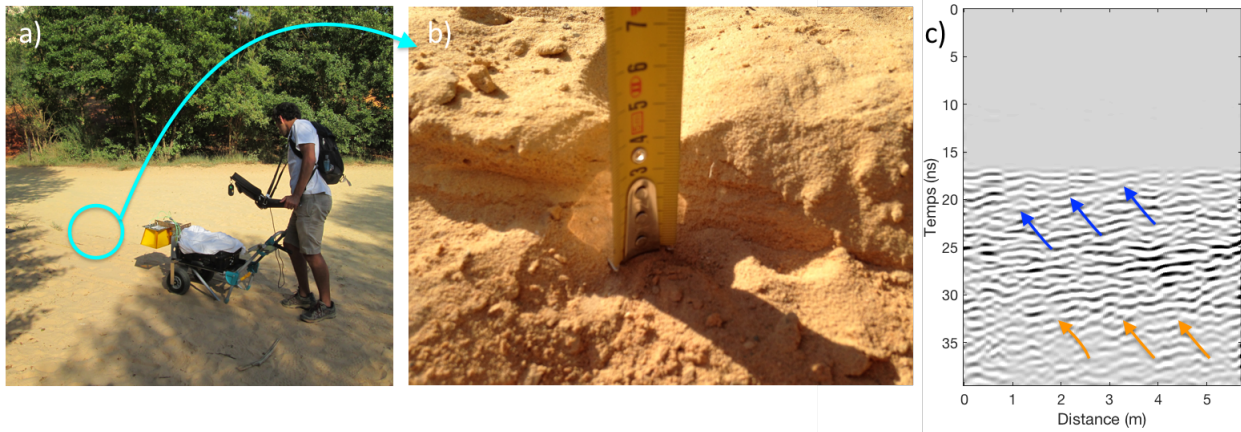


FIGURE 5.49 – a) Photo du site n°4 au Colorado Provençal, b) Zoom sur quelques centimètres de la couche consolidée qui permet de voir une stratification fine c) Radargramme acquis avec WISDOM sur le site n°4 où l'on voit des couches (flèches)

La Figure 5.49 montre le site de mesure n°4. Contrairement à ce qui est observé sur les sites n°2 et les autres sites, le site n°4 est exclusivement formé de roche consolidée qui affleure en surface. Le radar sonde donc directement de la roche et non pas du sable meuble. Ceci explique pourquoi la valeur de constante diélectrique estimée sur ce site et, en conséquence, la densité est plus élevée pour ce site. Le radargramme Figure 5.49c montre un sol stratifié. Nous pouvons voir des couches au sein de la roche sédimentaire (flèches).

1. à titre indicatif en préparation de la mission ExoMars 2020. Il n'y a pas de glace d'eau sur le site du Colorado Provençal

Analyse en laboratoire

L'interprétation des valeurs de constante diélectrique obtenues par WISDOM a été faite exclusivement sur la porosité des matériaux. Cependant, la différence de composition des matériaux en question peut également avoir un impact sur la valeur de la constante diélectrique. Pour quantifier cet effet, des prélèvements d'échantillons ont été réalisés sur le site n°2 afin de faire des analyses en laboratoire. Ces prélèvements concernent les sables blanc et rouge.

Les échantillons (sable blanc et rouge) ont été analysés par la méthode XRD (*X-Ray Diffractometry*) au Laboratoire de Géologie de Lyon afin de déterminer leur composition. Les résultats montrent des échantillons qui contiennent très peu d'argiles (entre 1 et 2% de kaolinite) avec un peu d'oxyde de Fer, les échantillons sont très majoritairement composés de quartz (98%). Ces types d'argiles peuvent être rencontrés sur Mars mais leur faible pourcentage dans les échantillons ne fait pas du site du Colorado provençal un analogue martien en terme de composition.

Des échantillons similaires prélevés sur le site n°2 ont été analysés pour connaître leur constante diélectrique.

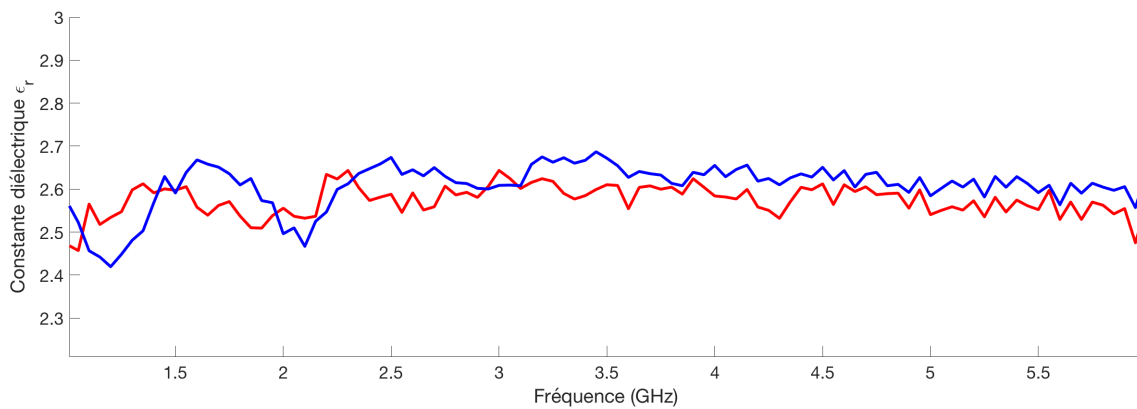


FIGURE 5.50 – Estimation de la constante diélectrique en laboratoire sur des échantillons provenant du Colorado Provençal. Courbe rouge : échantillon rouge, courbe bleue : échantillon blanc

La Figure 5.50 montre les valeurs mesurées de constante diélectrique pour les deux échantillons en fonction de la fréquence sur une bande de fréquence plus étendue que celle de WISDOM. Ces mesures ont été réalisées par le TUD (*Technische Universität Dresden*). Nous notons qu'il n'y a pas de tendance marquée en fonction de la fréquence, les matériaux ne sont pas dispersifs en fréquence. Nous remarquons aussi que les valeurs sont plus faibles ($\epsilon_r \approx 2.5$) que celles estimées in-situ sur le site du Colorado provençal ($\epsilon_r = 3 - 4.5$). Cela peut être dû à un dessèchement des échantillons ou à des mesures effectuées en laboratoire à des degrés de compaction plus faibles que sur le site même. Ce qui nous interpelle, par contre, c'est que, dans des conditions similaires de mesures, les deux échantillons de compositions différentes ont des valeurs de constante diélectrique très voisines. La différence observée par WISDOM sur la Figure 5.47 semble donc due à un changement de densité et non de composition.

Estimation de la profondeur

Les radargrammes permettent de voir des échos en fonction du temps d'arrivée, pour accéder à la profondeur nous devons être en mesure d'estimer la constante diélectrique du milieu sondé. Pour un milieu à faibles pertes le temps de propagation est lié à la profondeur dans le milieu par la relation suivante :

$$d = \frac{ct}{2\sqrt{\epsilon'_r}} \quad (5.17)$$

où d désigne la profondeur, c la vitesse de la lumière dans le vide, t le temps de propagation dans le milieu et ϵ'_r la constante diélectrique du milieu. A partir de la constante diélectrique estimée

précédemment, nous pouvons donc convertir les retards mesurés en distance dans le milieu et estimer la profondeur du socle rocheux sur le radargramme acquis sur le site n°2.

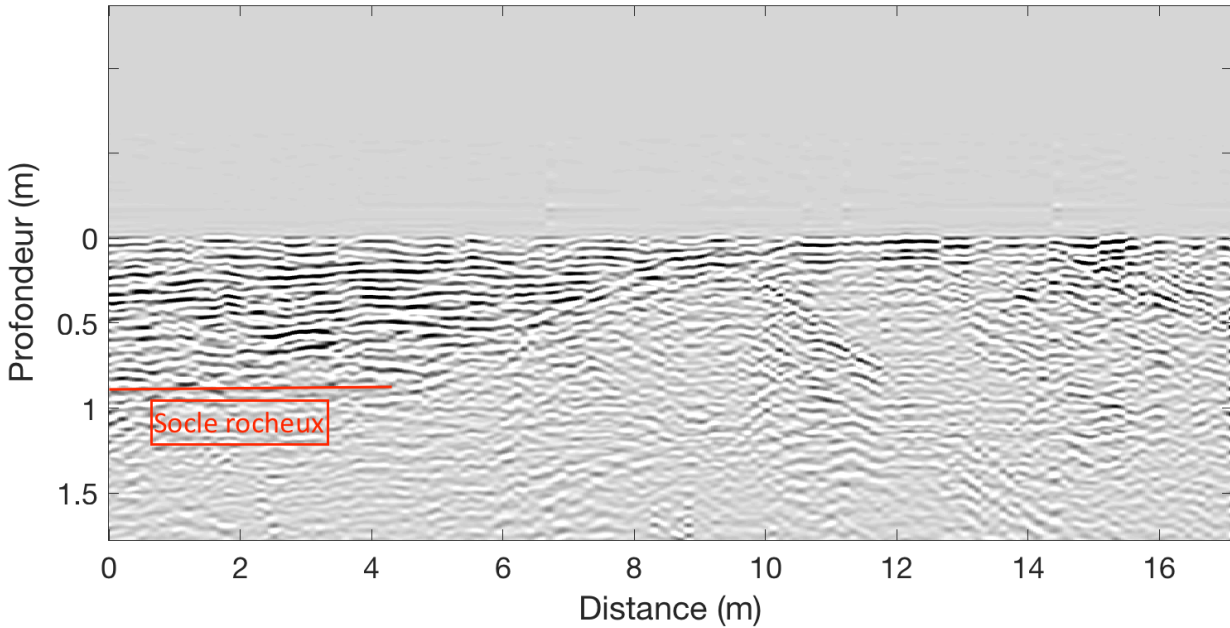


FIGURE 5.51 – Radargramme acquis avec WISDOM sur le site n°2 dans le Colorado provençal, le temps de propagation a été convertit en profondeur grâce à l’estimation de la constante diélectrique

Le temps de propagation jusqu’au socle rocheux peut être estimé à $11 \pm 1ns$, les constantes diélectriques ϵ'_r estimées dans cette zone (zone de sable blanc) sont comprises entre 2.29 et 4.73. Nous trouvons donc une profondeur pour le socle rocheux de $0.94 \pm 0.25m$. Nous pouvons réduire l’incertitude en considérant les variations de la moyenne glissante de la constante diélectriques (Figure 5.47) afin d’éliminer les valeurs extrêmes. Nous trouvons alors une profondeur de $0.91 \pm 0.12m$. L’incertitude de 12 cm reste élevée, cela représente 5% de la profondeur de pénétration du foret. Elle provient essentiellement de la difficulté à déterminer de façon précise la position du socle rocheux, ce qui est inévitable dans le cas d’un socle avec une certaine rugosité. Dans le cas où l’interface est lisse et donc clairement identifiable, nous pouvons réduire l’erreur sur le temps de propagation à la largeur à mi-hauteur de l’écho (0.3 ns). Pour un temps de propagation de $11 \pm 0.3ns$, nous estimons la profondeur à $0.93 \pm 0.06m$. L’incertitude n’est plus que de 6 cm. Cette incertitude, liée à l’erreur sur la détermination de la constante diélectrique, est proportionnelle à la profondeur ; en conséquence, pour une profondeur de 50 cm, la précision serait d’environ 3 cm. La précision obtenue dépend également de la rugosité de surface et du degré d’homogénéité des couches traversées. Enfin à partir de l’estimation de la profondeur, nous pouvons désormais estimer l’épaisseur des couches en sous-sol. Nous arrivons à distinguer 7 couches entre la surface et la base du socle rocheux (situé à 93 cm de profondeur), cela représente en moyenne des couches de 13 cm d’épaisseur. Ce qui est bien supérieur à l’épaisseur de la couche limite évaluée en section 2 nécessaire pour les résoudre.

D’un point de vue opérationnel pratique, WISDOM pourra déterminer rapidement si la zone intéressante est à portée de la foreuse ou non. Nous pourrions aussi donner une estimation avec une barre d’erreur (qui dépendra largement du milieu sondé) de la profondeur à viser. Lors de l’opération de forage, la surveillance du couple exercé par la foreuse permettra de connaître avec précision le moment où le foret atteindra la couche compacte. De même, les informations recueillies par le spectromètre Ma_MISS intégré dans la foreuse, fourniront des informations locales sur la composition des couches traversées qui pourront être a posteriori utilisées pour affiner les estimations de profondeur estimées par WISDOM.

Cette section nous permet de nous rendre compte de la précision que nous pouvons atteindre et de l’importance de l’estimation de la constante diélectrique pour prélever des échantillons.

5.5.5 Polarimétrie

Nous avons vu précédemment que l'utilisation de la capacité polarimétrique de WISDOM permet de recueillir des informations sur la forme des structures réfléchissantes. La Figure 5.52 est un radargramme en fausse couleur qui prend en compte trois des quatre polarisations possibles. Chacune des polarisations (00, 11 et 01) est adressée à un canal de couleur (respectivement rouge, vert et bleu) selon la norme RVB.

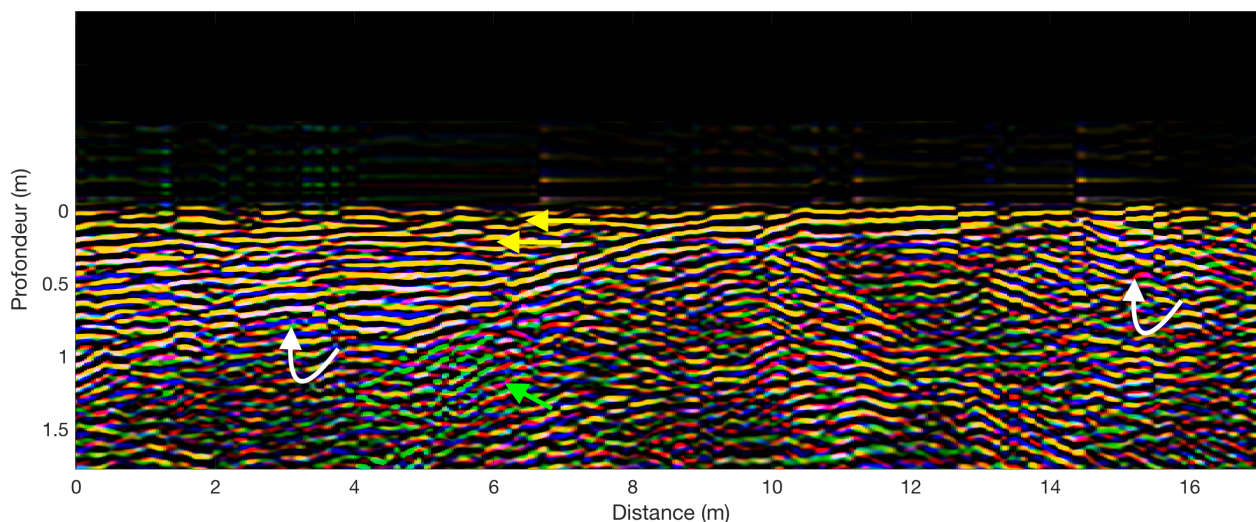


FIGURE 5.52 – Radargramme polarimétrique en fausses couleurs (Rouge : 00, Vert : 11, Bleu 01) acquis avec WISDOM sur le site n°2 dans le Colorado provençal, le temps de propagation a été convertit en profondeur grâce à l'estimation de la constante diélectrique

Les structures visibles dans les deux co-polarisations apparaissent en jaune, et celles visibles dans les trois polarisations en blanc. Nous remarquons que la surface ainsi que la première couche sont exclusivement jaunes, elles renvoient donc un signal beaucoup plus faible en cross-polarisation. En accord avec ce qui a pu être observé sur des données simulées et nos observations sur le terrain, nous pouvons faire l'hypothèse que la surface et la première couche en sous-sol sont lisses à l'échelle des longueurs d'onde du radar dans le milieu. En revanche, nous voyons apparaître au sein du milieu stratifié des zones blanches (flèches courbées) qui renvoient donc un signal non négligeable en cross-polarisation. Cela peut signifier que ces couches enfouies sont rugueuses. Ce changement de rugosité entre la surface et les couches en sous-sol peut témoigner d'un changement de structure au niveau du milieu stratifié. En effet, au niveau du site n°4, peu distant, nous voyons en surface de la roche sédimentaire consolidée de couleur claire (identique à celle du sable) montrant une rugosité non négligeable (Figure 5.49b et Figure 5.39). Nous pouvons faire l'hypothèse que nous trouvons sous le sable du site n°2 une couche consolidée de même nature. Lors du processus de formation/consolidation des dépôts, des couches rugueuses auraient pu être formées et, recouvertes par la suite par une couche de sable meuble non consolidé (d'une épaisseur d'environ 30 cm). Dans le cadre de la mission ExoMars, l'analyse du couple de la foreuse nous permettra de faire la différence entre dépôts éoliens et roche consolidée. En l'absence de profils radar additionnels recueillis dans la zone proche, nous ne pouvons pas étudier la possibilité qu'il s'agisse de couches lisses mais inclinées dans une direction perpendiculaire à la trajectoire du rover. Sur Mars, il est prévu au voisinage des zones d'intérêt de quadriller la zone en surface afin d'obtenir une visualisation en trois dimensions du sous-sol. Les profils seront cependant distants d'environ 1 m, ce qui rend impossible une réelle reconstitution en 3D.

Nous remarquons aussi des zones de fortes dépolarisation au niveau de l'affleurement, ce qui peut s'expliquer par les nombreuses inclusions (présences de nombreuses branches d'hyperbole) de ce type de structures. Enfin, nous voyons apparaître localement des signaux seulement en polarisation 11 (flèche verte), ce qui pourrait s'expliquer par une orientation particulière des structures dans ces zones.

5.5.6 Conclusion

La campagne du Colorado Provençal a permis de mettre en évidence et de valider les différentes étapes de traitement nécessaires à la compréhension et à l'interprétation des données. Tout au long de cette section, nous avons fait le parallèle avec les futures opérations qui se dérouleront pendant la mission ExoMars 2020. Cette campagne illustre la mise en place de la chaîne de traitement mais aussi de toute une chaîne d'outils d'interprétation afin de faciliter et de permettre la prise de décision (de forage) sur des critères objectifs. La campagne a seulement mobilisé l'instrument WISDOM. De futures campagnes permettront de préparer la synergie évoquée tout au long de ce chapitre avec la charge instrumentale (notamment avec PanCam pour la rugosité de surface et ADRON-RM pour la quantité d'eau en sous-sol) du Rover ExoMars 2020.

5.6 Conclusion

En conclusion, nous avons dans ce chapitre présenté des outils d'interprétation des données de WISDOM. La modélisation de l'instrument nous permet de comprendre la signature radar de structures attendues sur Mars (dont l'interprétation n'est pas toujours évidente) mais aussi de tester les limites des méthodes employées. Comme MARSIS et SHARAD, WISDOM pourra estimer la constante diélectrique des sols sondés. Nous présentons ici deux méthodes pour y parvenir. La première repose sur l'analyse de l'écho de sol alors que la seconde se sert de la signature hyperbolique de réflecteurs (roches) enfouies. Les travaux réalisés à partir des caméras des Rover martiens sur les roches en surface montrent que leur distribution et leurs formes peuvent contenir des informations utiles à l'interprétation du contexte géologique du site. Nous avons montré dans une configuration simple (cibles dans l'air) que WISDOM est, non seulement, capable de détecter des roches en sous-sol, mais encore de contraindre leurs formes grâce aux mesures polarimétriques. En outre, l'utilisation de la forme des diagrammes de rayonnement des antennes permet de mieux localiser les roches en trois dimensions. Afin de fournir rapidement des informations qui permettront de mieux comprendre le contexte géologique des sites et aussi de guider la foreuse, nous avons élaboré un algorithme de détection automatique de signatures hyperboliques. Ces outils d'interprétation mais aussi la chaîne de traitement développée dans le chapitre 3 ont été systématiquement utilisés lors de la campagne de mesure dans le sud de la France organisée dans le cadre de cette thèse.

Conclusion

Alors que les premières observations de Mars depuis son orbite ont dévoilé un monde froid et désert, les 50 dernières années d'observation par des orbiteurs, des atterrisseurs et des Rovers ont bouleversé notre connaissance de la planète rouge. Il apparaît que Mars n'a pas été un désert froid et hostile pendant toute son existence, elle a connu une période plus chaude où de l'eau liquide a pu s'établir et perdurer à sa surface. Elle a donc offert, comme la Terre à la même époque, un environnement favorable à l'éclosion de la vie.

Dans la première partie de ce manuscrit nous avons retracé l'histoire de l'exploration martienne et rappelé brièvement l'état des connaissances actuelles sur la planète. Les radars pionniers MARSIS et SHARAD ont démontré l'utilité des radars sondeurs pour la planétologie et l'apport de ce type de technologie dans la compréhension de l'évolution géologique de la planète rouge. Nous nous sommes attardés sur les résultats majeurs de MARSIS et SHARAD : MARSIS a permis d'établir la première carte de la constante diélectrique à la surface de Mars, de révéler la présence d'eau liquide sous la calotte polaire sud mais aussi de contraindre la composition de plusieurs formations martiennes. SHARAD, grâce à une meilleure résolution verticale, a permis de dévoiler la stratification fine des calottes polaires ainsi que des chenaux enfouis.

Si MARSIS et SHARAD ont ouvert la voie, d'ici quelques années, de nouveaux radars sondeurs hautes fréquences opérant depuis le sol vont étudier le proche sous-sol martien. Ces radars sont les radars à pénétration de sol (GPR) WISDOM/ExoMars 2020 (ESA) et RIMFAX/Mars 2020 (NASA).

WISDOM est un radar à sauts de fréquences sélectionné pour faire partie de la charge instrumentale du Rover de la mission ExoMars 2020. Conçu pour sonder le sous-sol jusqu'à 3 m de profondeur, ses objectifs sont de déterminer le contexte géologique des sites à l'étude, de caractériser leurs propriétés électromagnétiques et d'identifier la zone la plus prometteuse pour prélever un échantillon du sol grâce à la foreuse embarquée sur le Rover. Ces objectifs ambitieux demandent un important travail de préparation qui garantira les meilleures opérations à la surface et le meilleur retour scientifique possibles.

En conséquence, les objectifs de ce travail de thèse étaient de caractériser l'instrument WISDOM, de mettre en place une chaîne de traitement de données et de développer des outils facilitant l'interprétation des données.

La deuxième partie de ce manuscrit est consacrée à la description et à la caractérisation de l'instrument. La plupart des mesures réalisées pendant cette thèse l'ont été avec le prototype ou le modèle d'ingénierie de WISDOM. Cependant, dès que cela était possible, nous avons obtenu des données et testé nos méthodes d'analyse avec le modèle de vol de WISDOM. En particulier, nous avons établi le bilan de liaison de l'instrument et estimé ses performances à partir d'un code analytique. Nous avons également mesuré et modélisé la forme d'impulsion radar émise par WISDOM, ce qui nous permet de mieux modéliser numériquement le fonctionnement de l'instrument mais aussi d'utiliser et/ou de développer des algorithmes de traitements adaptés.

Dans le chapitre 3, nous décrivons précisément la chaîne de traitement de données de WISDOM qui a été retravaillée au cours de cette thèse afin de sélectionner les méthodes les plus adaptées aux caractéristiques de l'instrument. En particulier, nous y avons intégré une méthode pour limiter l'impact de signaux parasites. En effet, les mesures de WISDOM sont entachées de réflexions indésirables. Les sources de ces réflexions sont multiples (origines internes et externes) et afin de les réduire nous avons développé plusieurs méthodes comme des méthodes d'identification (AES et SRD) et évalué certaines

techniques classiques comme le retrait d'une moyenne glissante ou le filtrage des valeurs singulières. La technique SRD (Soustraction du Radargramme Décalé par translation temporelle) développée au cours de cette thèse montre d'excellents résultats ; c'est elle qui permet de retirer le plus grand nombre de parasites pour un coût en temps de calcul faible. Par conséquent, cette méthode a été intégrée dans le traitement automatique par défaut des données WISDOM.

Dans la partie 4, nous avons évalué les performances de l'algorithme haute résolution MUSIC, tout d'abord à partir d'un modèle simple de propagation 1D puis à l'aide d'un code numérique 3D reposant sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel. MUSIC doit permettre d'améliorer la résolution verticale des données de WISDOM. Notre étude a montré que ses performances sur des données synthétiques étaient bien supérieures à celles d'une transformée de Fourier inverse classique, et cela, même sur des milieux non-homogènes. L'application de MUSIC à des données expérimentales rebouclées (c'est-à-dire sans les antennes) s'est montrée également très prometteuse. En revanche, sur des mesures avec antennes, l'algorithme n'a pas démontré sa supériorité. Des mesures complémentaires ainsi qu'une caractérisation plus poussée des antennes seront donc nécessaires à l'adaptation de MUSIC pour le radar WISDOM. Nous avons aussi exploré des algorithmes voisins reposant, eux aussi, sur la décomposition de la matrice de covariance (ESPRIT et Min-Norm) mais ces derniers se sont révélés moins efficaces que MUSIC. Enfin, il existe d'autres techniques de haute résolution comme celles qui s'appuient sur l'extrapolation de la bande de fréquences. Nous entreprendrons bientôt une étude de ces dernières tant elles ont montré de bons résultats sur les données de MARSIS.

Le chapitre 4 conclut donc la partie du travail de thèse portant sur la mise en place d'une chaîne de traitement des données WISDOM. L'ensemble de ces codes sont actuellement utilisés pour la campagne de simulation ExoFit aux Tabernas (Espagne) et seront utilisés pour le traitement des données martiennes acquises par WISDOM dès le printemps 2021.

Le dernier chapitre du manuscrit est consacré à la mise en place d'outils d'interprétation des données de WISDOM ainsi qu'à la préparation du retour scientifique de l'instrument. Le chapitre constitue un premier pas vers Mars. A l'aide du code de simulation numérique TEMSI-FD, nous avons modélisé le fonctionnement du radar mais aussi simulées les signatures de structures attendues dans le sous-sol de Mars. Cet outil, développé au laboratoire XLIM de Limoges, se révèle précieux dans la préparation de la mission et dans l'évaluation des méthodes mises en place. Dans le chapitre 5, nous décrivons, en particulier, les deux méthodes d'évaluation de la constante diélectrique du sous-sol que nous avons développées. La première repose sur l'analyse de l'écho de surface, à partir d'une mesure de référence sur plaque métallique. Cette méthode fait l'hypothèse d'une surface lisse et homogène. Grâce à un effort de modélisation du radar et de différents types de sous-sols (notamment avec une surface rugueuse), nous avons pu tester les limites de cette méthode et déterminer l'épaisseur de la couche sondée nécessaire à une bonne estimation de la constante diélectrique. Pour des milieux très rugueux (écart type des hauteurs élevé et longueur de corrélation faible), la méthode ne fonctionne plus et l'erreur commise est importante ; cela se traduit par une mauvaise contrainte sur la composition des matériaux en sous-sol et par une erreur sur la profondeur estimée. La synergie entre WISDOM et PanCam devrait permettre de confirmer la rugosité de la surface évaluée à partir de l'écart-type des hauteurs vu par WISDOM et, en conséquence, la robustesse de notre estimation de constante diélectrique. Nous proposons une seconde méthode qui repose sur l'ajustement d'une signature hyperbolique, caractéristique de la présence d'une roche dans le sous-sol, par une hyperbole mathématique. La particularité de WISDOM est d'avoir des antennes à 38 cm du sol ; le phénomène de réfraction à la surface déforme les hyperboles attendues dans un milieu homogène. Nous avons cependant démontré que nous pouvons nous affranchir de ce phénomène de réfraction si nous ne considérons que les points proches du sommet de la signature hyperbolique.

Nous avons également développé des outils pour tirer parti des capacités polarimétriques de WISDOM. Les roches en surface offrent des indices précieux sur les événements qui font aujourd'hui l'histoire de la géologie martienne. C'est la raison pour laquelle plusieurs études s'intéressent à leur forme ainsi qu'à leur distribution. L'analyse des roches en sous-sol est très probablement tout aussi riche en enseignement. Nous avons démontré sur des cibles naturelles dans l'air que la polarimétrie peut aider

à contraindre la forme des roches et que l'exploitation du diagramme de rayonnement des antennes de WISDOM peut servir à localiser précisément des cibles enfouies. La connaissance du nombre de roches dans le sous-sol mais aussi de leur forme revêt donc un grand intérêt scientifique. La détection et la caractérisation de ces roches est aussi un enjeu technique. En effet, dans le cadre de la mission ExoMars 2020, WISDOM devra guider la foreuse en indiquant les zones riches en roches enfouies susceptibles de l'endommager. Pour toutes ces raisons, nous avons développé un code de détection automatique des signatures hyperboliques sur les radargrammes de WISDOM. Pendant ce travail de thèse, nous avons organisé une campagne de mesures dans le Sud de la France afin de tester les configurations d'opérations mais aussi les algorithmes de traitement et les outils d'interprétation développés et décrits dans ce manuscrit. Nous présentons, dans la dernière partie du chapitre 5, une sélection des mesures obtenues sur l'un des sites du Colorado Provençal, près de Rustrel. Le traitement de ces données de campagne dessine la production scientifique possible à partir de données WISDOM (estimation de la constante diélectrique, contrainte sur la composition, détection et analyse des structures en sous-sol, compréhension du contexte géologique du site,) et montre l'efficacité des chaînes de traitement et des outils d'interprétation mis en place dans ce manuscrit.

Cette thèse a mobilisé des ressources et des connaissances dans des domaines variés telle que la planétologie, la technique radar, la modélisation électromagnétique, la mesure expérimentale et le traitement du signal et des données. Elle ouvre de nombreuses perspectives. Le travail de modélisation a fait partie intégrante de ce travail de thèse en partenariat avec le laboratoire XLIM de Limoge et l'Université Technique de Dresde (Allemagne). L'étape de modélisation supplémentaire consistera à importer le diagramme de rayonnement des antennes du modèle de vol, mesuré en chambre anéchoïde, dans le code de simulation TEMSI-FD. Les structures d'analogues martiens modélisés dans ce manuscrit pourront être affinées par la suite (ajout de surface rugueuses et de milieu non-homogène). Enfin, parmi les outils d'interprétation, le code de détection automatique d'hyperbole est celui qui offre la plus grande marge de progression. Couplé à un réseau de neurones, ce code permettra, à terme, de rendre compte du nombre de roches en sous-sol et, par conséquent, d'apporter des indices importants pour la compréhension de la géologie martienne.

Le Rover de la mission ExoMars 2020 doit atterrir à la surface de Mars au printemps 2021. Le site d'atterrissage sera, quant à lui sélectionné définitivement, dans le courant de l'année prochaine. À l'heure où ces lignes sont écrites se déroule la première phase de la campagne de mesures ExoFit. Elle consiste à préparer les opérations de la mission ExoMars, à valider les procédures mises en place et à amorcer une synergie entre les équipes et les instruments du Rover. WISDOM fait partie des instruments sélectionnés pour cette campagne, le travail de cette thèse sera donc immédiatement mis à profit et confronté aux réalités de cette mission. Une bonne collaboration entre les instruments de la mission sera essentielle une fois sur Mars. La synergie avec PanCam a déjà fait l'objet d'études préliminaires et sera renforcée dans le cadre de la campagne ExoFit. Des campagnes de mesures conjointes avec le spectromètre MA_MISS, intégré dans la foreuse, vont être programmées pour faire suite d'un premier essai effectué au printemps dernier. Finalement, une campagne de mesure sur pergélisol devrait être effectuée en collaboration avec le détecteur de neutrons ADRON.

WISDOM a déjà des héritiers. En effet, son principe (modulation en sauts de fréquences) lui confère une certaine versatilité et c'est la raison pour laquelle des versions un peu différentes de cet instrument ont été proposées pour deux projets de missions vers des petits corps : le volet européen AIM (Asteroid Impact Monitoring) d'une mission test américano-européenne baptisée AIDA à destination de l'astéroïde binaire Didymos, et le projet de mission M5 Castalia destiné à accompagner une comète-astéroïde de la ceinture principale. La mission Castalia n'a pas été sélectionnée mais la mission AIM/AIDA a été rebaptisé HERA [Michel et al., 2016][Michel et al., 2018] et fait maintenant partie du programme de l'ESA « Science, Space Safety ».

L'apport de radars sondeurs pour la planétologie ne fera que croître avec les années. Après le succès de l'expérience CONSERT/Rosetta [Ciarletti et al., 2017b][Hérique et al., 2017][Kofman et al., 2015], cette technique est notamment appelée à se développer pour l'étude de petits corps du système solaire : comètes mais aussi astéroïdes, satellites irréguliers, Troyens et autres. L'étude de la structure interne

des astéroïdes est un objectif majeur de nombreux projets de missions d'exploration du système solaire [Herique et al., 2018] dont HERA mentionné ci-dessus. Après WISDOM et RIMFAX prévus pour atterrir en 2021, les mission JUICE (ESA) et Europa Clipper (NASA) embarquent les radar sondeurs RIME et REASON afin d'étudier les satellites Ganymède et Europe à la fin des années 2020.

À plus long terme, l'idée d'un radar orbital en bande P (~ 0.3 GHz) qui assurerait une cartographie 3D globale du proche sous-sol de Mars fait son chemin dans la communauté internationale [Campbell et al., 2006]. WISDOM et RIMFAX embarqués sur des Rovers dont les déplacements se limiteront à quelques centaines de mètres, ne donneront qu'une image locale du proche sous-sol. Gageons que ces expériences pionnières montreront vite l'intérêt d'une cartographie globale du proche sous-sol de Mars. Dans ce cadre, leurs observations constitueront d'ailleurs une « vérité terrain » précieuse. Ce radar pourrait opérer en synthèse d'ouverture (SAR) en visée oblique et comme un sondeur/altimètre en visée nadir. La bande P garantit une profondeur de pénétration de l'ordre de quelques mètres à quelques dizaines de mètres et une résolution verticale de l'ordre de quelques centimètres. Grâce au mode SAR, la résolution horizontale sera nettement meilleure que celles de MARSIS ou SHARAD (quelques dizaines de mètres contre quelques kilomètres). L'instrument pourra aussi être doté de capacités polarimétriques et interférométriques.

Bibliographie

- [Abujarad et al., 2005] Abujarad, F., Nadim, G., and Omar, A. (2005). Clutter reduction and detection of landmine objects in ground penetrating radar data using singular value decomposition (svd). In *Advanced Ground Penetrating Radar, 2005. IWAGPR 2005. Proceedings of the 3rd International Workshop on*, pages 37–42. IEEE.
- [Albee et al., 1998] Albee, A. L., Palluconi, F., and Arvidson, R. (1998). Mars global surveyor mission : overview and status. *Science*, 279(5357) :1671–1672.
- [Allen et al., 1998] Allen, C. C., Jager, K. M., Morris, R. V., Lindstrom, D. J., Lindstrom, M. M., and Lockwood, J. P. (1998). Martian soil simulant available for scientific, educational study. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 79(34) :405–409.
- [A.P.Annan, 2009] A.P.Annan (2009). Electromagnetic principles of ground penetrating radar. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications, Elsevier*.
- [Baker and Kochel, 1979] Baker, V. R. and Kochel, R. C. (1979). Martian channel morphology : Maja and kasei valles. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 84(B14) :7961–7983.
- [Barabell, 1983] Barabell, A. (1983). Improving the resolution performance of eigenstructure-based direction-finding algorithms. In *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP'83.*, volume 8, pages 336–339. Citeseer.
- [Benedetto et al., 2017] Benedetto, A., Tosti, F., Ciampoli, L. B., and D'Amico, F. (2017). An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections. *Signal processing*, 132 :201–209.
- [Benedix et al., 2013] Benedix, W.-S., Plettemeier, D., Zanoni, A., Preller, F., and Ciarletti, V. (2013). Advance of wisdom gpr antenna for exomars 2018 mission. In *Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE), 2013 IEEE International Conference on*, pages 1–3. IEEE.
- [Berenger, 1994] Berenger, J.-P. (1994). A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of computational physics*, 114(2) :185–200.
- [Besse, 2004] Besse, S. (2004). *ÉTUDE THÉORIQUE DE RADARS GÉOLOGIQUES : analyses de sols, d'antennes et interprétation des signaux*. PhD thesis, Limoges.
- [Bibring et al., 2017] Bibring, J.-P., Hamm, V., Pilorget, C., and Vago, J. L. (2017). The micromega investigation onboard exomars. *Astrobiology*, 17(6-7) :621–626.
- [Bibring et al., 2006] Bibring, J.-P., Langevin, Y., Mustard, J. F., Poulet, F., Arvidson, R., Gendrin, A., Gondet, B., Mangold, N., Pinet, P., Forget, F., et al. (2006). Global mineralogical and aqueous mars history derived from omega/mars express data. *science*, 312(5772) :400–404.
- [Blackman and Tukey, 1958] Blackman, R. B. and Tukey, J. W. (1958). The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering ?part i. *Bell System Technical Journal*, 37(1) :185–282.
- [Borison et al., 1992] Borison, S., Bowling, S. B., and Cuomo, K. M. (1992). Super-resolution methods for wideband radar.
- [Bouley et al., 2016] Bouley, S., Baratoux, D., Matsuyama, I., Forget, F., Séjourné, A., Turbet, M., and Costard, F. (2016). Late tharsis formation and implications for early mars. *Nature*, 531(7594) :344.

- [Bouley and Craddock, 2014] Bouley, S. and Craddock, R. A. (2014). Age dates of valley network drainage basins and subbasins within sabae and arabia terrae, mars. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 119(6) :1302–1310.
- [Boynton et al., 2009] Boynton, W., Ming, D., Kounaves, S., Young, S., Arvidson, R., Hecht, M., Hoffman, J., Niles, P., Hamara, D., Quinn, R., et al. (2009). Evidence for calcium carbonate at the mars phoenix landing site. *Science*, 325(5936) :61–64.
- [Braham, 2007] Braham, K. A. (2007). *Diffusion des ondes électromagnétiques par des surfaces rugueuses aléatoires naturelles. Méthode exacte en coordonnées curvilignes et Principe du faible couplage*. PhD thesis, Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines.
- [Byrne et al., 2009] Byrne, S., Dundas, C. M., Kennedy, M. R., Mellon, M. T., McEwen, A. S., Cull, S. C., Daubar, I. J., Shean, D. E., Seelos, K. D., Murchie, S. L., et al. (2009). Distribution of mid-latitude ground ice on mars from new impact craters. *science*, 325(5948) :1674–1676.
- [Cagnoli and Ulrych, 2001] Cagnoli, B. and Ulrych, T. (2001). Singular value decomposition and wavy reflections in ground-penetrating radar images of base surge deposits. *Journal of applied geophysics*, 48(3) :175–182.
- [Calvin et al., 2008] Calvin, W., Shoffner, J., Johnson, J., Knoll, A., Pockock, J., Squyres, S., Weitz, C., Arvidson, R., Bell, J., Christensen, P., et al. (2008). Hematite spherules at meridiani : Results from mi, mini-tes, and pancam. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 113(E12).
- [Campbell et al., 2006] Campbell, B. A. et al. (2006). Eagle : A synthetic aperture radar mapper for the mars scout program. In *37th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, volume 37.
- [Campbell and Ulrichs, 1969] Campbell, M. J. and Ulrichs, J. (1969). Electrical properties of rocks and their significance for lunar radar observations. *Journal of Geophysical Research*, 74(25) :5867–5881.
- [Carr and Head, 2015] Carr, M. and Head, J. (2015). Martian surface/near-surface water inventory : Sources, sinks, and changes with time. *Geophysical Research Letters*, 42(3) :726–732.
- [Carr, 1974] Carr, M. H. (1974). The role of lava erosion in the formation of lunar rilles and martian channels. *Icarus*, 22(1) :1–23.
- [Carr and Clow, 1981] Carr, M. H. and Clow, G. D. (1981). Martian channels and valleys : Their characteristics, distribution, and age. *Icarus*, 48(1) :91–117.
- [Carr and Head, 2003] Carr, M. H. and Head, J. W. (2003). Oceans on mars : An assessment of the observational evidence and possible fate. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 108(E5).
- [Carr and Head III, 2010] Carr, M. H. and Head III, J. W. (2010). Geologic history of mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(3-4) :185–203.
- [Carter et al., 2009a] Carter, L. M., Campbell, B. A., Holt, J. W., Phillips, R. J., Putzig, N. E., Mattei, S., Seu, R., Okubo, C. H., and Egan, A. F. (2009a). Dielectric properties of lava flows west of asraeus mons, mars. *Geophysical Research Letters*, 36(23).
- [Carter et al., 2009b] Carter, L. M., Campbell, B. A., Watters, T. R., Phillips, R. J., Putzig, N. E., Safaeinili, A., Plaut, J. J., Okubo, C. H., Egan, A. F., Seu, R., et al. (2009b). Shallow radar (sharad) sounding observations of the medusae fossae formation, mars. *Icarus*, 199(2) :295–302.
- [Cassidy et al., 2009] Cassidy, N. J. et al. (2009). Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis. *Ground penetrating radar : theory and applications*, pages 141–176.
- [Castaldo et al., 2017] Castaldo, L., Mège, D., Gurgurewicz, J., Orosei, R., and Alberti, G. (2017). Global permittivity mapping of the martian surface from sharad. *Earth and Planetary Science Letters*, 462 :55–65.
- [C.Guiffaut, 2010] C.Guiffaut, A. e. B. (2010). Nouveau formalisme des fils obliques pour la méthode fdtd avec jonctions multifils. *15 ème colloque international et exposition sur la compatibilité électromagnétique*.

- [Christensen et al., 2001a] Christensen, P., Morris, R., Lane, M., Bandfield, J., and Malin, M. (2001a). Global mapping of martian hematite mineral deposits : Remnants of water-driven processes on early mars. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 106(E10) :23873–23885.
- [Christensen et al., 2004] Christensen, P., Wyatt, M., Glotch, T., Rogers, A., Anwar, S., Arvidson, R., Bandfield, J., Blaney, D., Budney, C., Calvin, W., et al. (2004). Mineralogy at meridiani planum from the mini-tes experiment on the opportunity rover. *Science*, 306(5702) :1733–1739.
- [Christensen et al., 2001b] Christensen, P. R., Bandfield, J. L., Hamilton, V. E., Ruff, S. W., Kieffer, H. H., Titus, T. N., Malin, M. C., Morris, R. V., Lane, M. D., Clark, R., et al. (2001b). Mars global surveyor thermal emission spectrometer experiment : investigation description and surface science results. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 106(E10) :23823–23871.
- [Ciarletti et al., 2017a] Ciarletti, V., Clifford, S., Plettemeier, D., Le Gall, A., Hervé, Y., Dorizon, S., Quantin-Nataf, C., Benedix, W.-S., Schwenzer, S., Pettinelli, E., et al. (2017a). The wisdom radar : unveiling the subsurface beneath the exomars rover and identifying the best locations for drilling. *Astrobiology*, 17(6-7) :565–584.
- [Ciarletti et al., 2011] Ciarletti, V., Corbel, C., Plettemeier, D., Cais, P., Clifford, S. M., and 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 et al., 2017b] Ciarletti, V., Herique, A., Lasue, J., Levasseur-Regourd, A.-C., Plettemeier, D., Lemmonier, F., Guiffaut, C., Pasquero, P., and Kofman, W. (2017b). Consert constrains the internal structure of 67p at a few metres size scale. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469(Suppl_2) :S805–S817.
- [Ciarletti et al., 2015] Ciarletti, V., Hervé, Y., Dorizon, S., Le Gall, A., Quantin, C., Broyer, J., Davis, J., and Grindrod, P. (2015). Modelling the performances of the wisdom radar on the oxia planum potential landing site for exomars. In *European Planetary Science Congress 2015*, volume 10, pages EPSC2015–574.
- [Clifford and Parker, 2001] Clifford, S. M. and 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.
- [Coates et al., 2017] Coates, A., Jaumann, R., Griffiths, A., Leff, C., Schmitz, N., Josset, J.-L., Paar, G., Gunn, M., Hauber, E., Cousins, C. R., et al. (2017). The pancam instrument for the exomars rover. *Astrobiology*, 17(6-7) :511–541.
- [Cochran et al., 1967] Cochran, W. T., Cooley, J. W., Favin, D. L., Helms, H. D., Kaenel, R. A., Lang, W. W., Maling, G. C., Nelson, D. E., Rader, C. M., and Welch, P. D. (1967). What is the fast fourier transform? *Proceedings of the IEEE*, 55(10) :1664–1674.
- [Cook, 1975] Cook, J. C. (1975). Radar transparencies of mine and tunnel rocks. *Geophysics*, 40(5) :865–885.
- [Cooley and Tukey, 1965] Cooley, J. W. and Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of computation*, 19(90) :297–301.
- [Costard et al., 2017] Costard, F., Séjourné, A., Kelfoun, K., Clifford, S., Lavigne, F., Di Pietro, I., and Bouley, S. (2017). Modeling tsunami propagation and the emplacement of thumbprint terrain in an early mars ocean. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 122(3) :633–649.
- [Cuomo, 1992] Cuomo, K. (1992). A bandwidth extrapolation technique for improved range resolution of coherent radar data.
- [Cutts and Blasius, 1979] Cutts, J. and Blasius, K. (1979). Martian outflow channels : Quantitative comparison of erosive capacities for eolian and fluvial models. In *Lunar and Planetary Science Conference*, volume 10, pages 257–259.
- [Cutts et al., 1971] Cutts, J. A., Soderblom, L. A., Sharp, R. P., Smith, B. A., and Murray, B. C. (1971). The surface of mars 3. light and dark markings. *Journal of Geophysical Research*, 76(2) :343–356.

- [De Sanctis et al., 2017] De Sanctis, M. C., Altieri, F., Ammannito, E., Biondi, D., De Angelis, S., Meini, M., Mondello, G., Novi, S., Paolinetti, R., Soldani, M., et al. (2017). Ma_{miss} on exomars : mineralogical characterization of the martian subsurface. *Astrobiology*, 17(6-7) :612–620.
- [D.J.Daniels, 1996] D.J.Daniels (1996). Surface-penetrating radar. *The institution of Electrical Engineers (IEE)*.
- [Dorizon, 2016] Dorizon, S. (2016). *Étude préparatoire à l'interprétation des données du radar WISDOM pour la mission ExoMars 2018*. PhD thesis, Université Paris-Saclay.
- [Dorizon et al., 2016] Dorizon, S., Ciarletti, V., Plettemeier, D., and Benedix, W.-S. (2016). Performance validation of the exomars 2018 wisdom gpr in ice caves, austria. *Planetary and Space Science*, 120 :1–14.
- [Dou et al., 2017] Dou, Q., Wei, L., Magee, D. R., and Cohn, A. G. (2017). Real-time hyperbola recognition and fitting in gpr data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(1) :51–62.
- [Dundas et al., 2018] Dundas, C. M., Bramson, A. M., Ojha, L., Wray, J. J., Mellon, M. T., Byrne, S., McEwen, A. S., Putzig, N. E., Viola, D., Sutton, S., et al. (2018). Exposed subsurface ice sheets in the martian mid-latitudes. *Science*, 359(6372) :199–201.
- [Eigenbrode et al., 2018] Eigenbrode, J. L., Summons, R. E., Steele, A., Freissinet, C., Millan, M., Navarro-González, R., Sutter, B., McAdam, A. C., Franz, H. B., Glavin, D. P., et al. (2018). Organic matter preserved in 3-billion-year-old mudstones at gale crater, mars. *Science*, 360(6393) :1096–1101.
- [ElShafie and Heggy, 2013] ElShafie, A. and Heggy, E. (2013). Dielectric and hardness measurements of planetary analog rocks in support of in-situ subsurface sampling. *Planetary and Space Science*, 86 :150–154.
- [Formisano et al., 2004] Formisano, V., Atreya, S., Encrenaz, T., Ignatiev, N., and Giuranna, M. (2004). Detection of methane in the atmosphere of mars. *science*, 306(5702) :1758–1761.
- [Frigeri et al., 2018] Frigeri, A., De Sanctis, M. C., Altieri, F., Ciarletti, V., and Plettemeier, D. (2018). Ma_{miss} and wisdom on exomars : building synergies through fieldwork. *European Planetary Science Congress 2018, poster session*.
- [Gaskin and Miller, 1996] Gaskin, G. and Miller, J. (1996). Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique. *Journal of agricultural engineering research*, 63(2) :153–159.
- [Goesmann et al., 2017] Goesmann, F., Brinckerhoff, W. B., Raulin, F., Goetz, W., Danell, R. M., Getty, S. A., Siljeström, S., Mißbach, H., Steininger, H., Arevalo Jr, R. D., et al. (2017). The mars organic molecule analyzer (moma) instrument : characterization of organic material in martian sediments. *Astrobiology*, 17(6-7) :655–685.
- [Goldspiel and Squyres, 2000] Goldspiel, J. M. and Squyres, S. W. (2000). Groundwater sapping and valley formation on mars. *Icarus*, 148(1) :176–192.
- [Golombek et al., 2003] Golombek, M. P., Haldemann, A., Forsberg-Taylor, N., DiMaggio, E. N., Schroeder, R., Jakosky, B., Mellon, M., and Matijevec, J. (2003). Rock size-frequency distributions on mars and implications for mars exploration rover landing safety and operations. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 108(E12).
- [Grima et al., 2009] Grima, C., Kofman, W., Mouginot, J., Phillips, R. J., Hérique, A., Biccari, D., Seu, R., and Cutigni, M. (2009). North polar deposits of mars : Extreme purity of the water ice. *Geophysical Research Letters*, 36(3).
- [Grimm et al., 2006] Grimm, R. E., Heggy, E., Clifford, S., Dinwiddie, C., McGinnis, R., and Farrell, D. (2006). Absorption and scattering in ground-penetrating radar : Analysis of the bishop tuff. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 111(E6).
- [Grotzinger et al., 2015] Grotzinger, J., Gupta, S., Malin, M., Rubin, D., Schieber, J., Siebach, K., Sumner, D., Stack, K., Vasavada, A., Arvidson, R., et al. (2015). Deposition, exhumation, and paleoclimate of an ancient lake deposit, gale crater, mars. *Science*, 350(6257) :aac7575.

- [Hamadi, 2010] Hamadi, A. (2010). Analyse et prédiction comportementales du radar GPR polarimétrique de la mission spatiale EXOMARS. *PhD thesis, Université de Limoges*.
- [Hamran et al., 2015] Hamran, S.-E., Berger, T., Brovoll, S., Damsgård, L., Hellenen, Ø., Øyan, M. J., Amundsen, H. E., Carter, L., Ghent, R., Kohler, J., et al. (2015). Rimfax : A gpr for the mars 2020 rover mission. In *Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), 2015 8th International Workshop on*, pages 1–4. IEEE.
- [Harris, 1978] Harris, F. J. (1978). On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 66(1) :51–83.
- [Hartmann, 2005] Hartmann, W. K. (2005). Martian cratering 8 : Isochron refinement and the chronology of mars. *Icarus*, 174(2) :294–320.
- [Hartmann and Neukum, 2001] Hartmann, W. K. and Neukum, G. (2001). Cratering chronology and the evolution of mars. In *Chronology and evolution of Mars*, pages 165–194. Springer.
- [Hartmann et al., 2010] Hartmann, W. K., Quantin, C., Werner, S. C., and Popova, O. (2010). Do young martian ray craters have ages consistent with the crater count system ? *Icarus*, 208(2) :621–635.
- [Head et al., 1999] Head, J. W., Hiesinger, H., Ivanov, M. A., Kreslavsky, M. A., Pratt, S., and Thomson, B. J. (1999). Possible ancient oceans on mars : evidence from mars orbiter laser altimeter data. *Science*, 286(5447) :2134–2137.
- [Hecht et al., 2009] Hecht, M., Kounaves, S., Quinn, R., West, S., Young, S., Ming, D., Catling, D., Clark, B., Boynton, W., Hoffman, J., et al. (2009). Detection of perchlorate and the soluble chemistry of martian soil at the phoenix lander site. *Science*, 325(5936) :64–67.
- [Heggy et al., 2006] Heggy, E., Clifford, S. M., Grimm, R. E., Dinwiddie, C. L., Wyrick, D. Y., and 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*, 111(E6).
- [Herique et al., 2018] Herique, A., Agnus, B., Asphaug, E., Barucci, A., Beck, P., Bellerose, J., Biele, J., Bonal, L., Bousquet, P., Bruzzone, L., et al. (2018). Direct observations of asteroid interior and regolith structure : science measurement requirements. *Advances in Space Research*, 62(8) :2141–2162.
- [Hérique et al., 2017] Hérique, A., Kofman, W., Beck, P., Bonal, L., Buttarazzi, I., Heggy, E., Lasue, J., Levasseur-Regourd, A. C., Quirico, E., and Zine, S. (2017). Cosmochemical implications of concert permittivity characterization of 67p/cg. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462(Suppl_1) :S516–S532.
- [Hervé et al., 2018] Hervé, Y., Ciarletti, V., Le Gall, A., Oudart, N., Loizeau, D., Plettmeier, D., and Benedix, W.-S. (2018). Interpretation of wisdom/exomars 2020 data acquired on natural dry environments. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 20, page 19207.
- [Hervé et al., 2017] Hervé, Y., Ciarletti, V., Le Gall, A. A., Oudart, N., Loizeau, D., Guiffaut, C., and Dorizon, S. (2017). Subsurface characterization by the ground penetrating radar wisdom/exomars 2020. In *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- [Holland and Simpson, 1981] Holland, R. and Simpson, L. (1981). Finite-difference analysis of emp coupling to thin struts and wires. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, (2) :88–97.
- [Jakosky et al., 2015] Jakosky, B. M., Lin, R., Grebowsky, J., Luhmann, J., Mitchell, D., Beutelschies, G., Priser, T., Acuna, M., Andersson, L., Baird, D., et al. (2015). The mars atmosphere and volatile evolution (maven) mission. *Space Science Reviews*, 195(1-4) :3–48.
- [Jiang and Ingram, 2004] Jiang, J.-S. and Ingram, M. A. (2004). Robust detection of number of sources using the transformed rotational matrix. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE*, volume 1, pages 501–506. IEEE.

- [Josset et al., 2017] Josset, J.-L., Westall, F., Hofmann, B. A., Spray, J., Cockell, C., Kempe, S., Griffiths, A. D., De Sanctis, M. C., Colangeli, L., Koschny, D., et al. (2017). The close-up imager onboard the esa exomars rover : objectives, description, operations, and science validation activities. *Astrobiology*, 17(6-7) :595–611.
- [Kahu and Rahate, 2013] Kahu, S. and Rahate, R. (2013). Image compression using singular value decomposition. *International Journal of Advancements in Research & Technology*, 2(8) :244–248.
- [Khairy et al., 2013] Khairy, A., Mohamed, T. S., Melad, M. S., et al. (2013). High resolution direction of arrival estimation (coherent signal source doa estimation). *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 3(1) :132–139.
- [Kim et al., 2007] Kim, J.-H., Cho, S.-J., and Yi, M.-J. (2007). Removal of ringing noise in gpr data by signal processing. *Geosciences Journal*, 11(1) :75–81.
- [Klein and Swift, 1977] Klein, L. and Swift, C. (1977). An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2(1) :104–111.
- [Kminek and Bada, 2006] Kminek, G. and Bada, J. L. (2006). The effect of ionizing radiation on the preservation of amino acids on mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 245(1-2) :1–5.
- [Kofman et al., 2015] Kofman, W., Herique, A., Barbin, Y., Barriot, J.-P., Ciarletti, V., Clifford, S., Edenhofer, P., Elachi, C., Eyraud, C., Goutail, J.-P., et al. (2015). Properties of the 67p/churyumov-gerasimenko interior revealed by consort radar. *Science*, 349(6247) :aab0639.
- [Korablev et al., 2017] Korablev, O. I., Dobrolensky, Y., Evdokimova, N., Fedorova, A. A., Kuzmin, R. O., Mantsevich, S. N., Cloutis, E. A., Carter, J., Poulet, F., Flahaut, J., et al. (2017). Infrared spectrometer for exomars : a mast-mounted instrument for the rover. *Astrobiology*, 17(6-7) :542–564.
- [Kumlu and Erer, 2017] Kumlu, D. and Erer, I. (2017). A comparative study on clutter reduction techniques in gpr images. In *Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), 2017 4th International Conference on*, pages 323–328. IEEE.
- [Lane and Saxton, 1952] Lane, J. and Saxton, J. (1952). Dielectric dispersion in pure polar liquids at very high radio-frequencies i. measurements on water, methyl and ethyl alcohols. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 213(1114) :400–408.
- [Laskar et al., 2004] Laskar, J., Correia, A., Gastineau, M., Joutel, F., Levrard, B., and Robutel, P. (2004). Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of mars. *Icarus*, 170(2) :343–364.
- [Lauro et al., 2010] Lauro, S. E., Mattei, E., Pettinelli, E., Soldovieri, F., Orosei, R., Cartacci, M., Cicchetti, A., Noschese, R., and Giuppi, S. (2010). Permittivity estimation of layers beneath the northern polar layered deposits, mars. *Geophysical Research Letters*, 37(14).
- [Le Bastard, 2007] Le Bastard, C. (2007). *Apport de techniques de traitement du signal super et haute résolution à l'amélioration des performances du radar-chaussée*. PhD thesis, UNIVERSITE DE NANTES.
- [Le Bastard et al., 2007] Le Bastard, C., Baltazart, V., Wang, Y., and Saillard, J. (2007). Thin-pavement thickness estimation using gpr with high-resolution and superresolution methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(8) :2511–2519.
- [Leighton and Murray, 1971] Leighton, R. B. and Murray, B. C. (1971). One year's processing and interpretation?an overview. *Journal of Geophysical Research*, 76(2) :293–296.
- [Leovy et al., 1971] Leovy, C. B., Smith, B. A., Young, A. T., and Leighton, R. B. (1971). Mariner mars 1969 : atmospheric results. *Journal of Geophysical Research*, 76(2) :297–312.
- [Leuschen, 1999] Leuschen, C. (1999). Analysis of the complex permittivity and permeability of a martian soil simulat from 10 mhz to 1 ghz. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS'99 Proceedings. IEEE 1999 International*, volume 4, pages 2264–2266. IEEE.

- [Loizeau et al., 2007] Loizeau, D., Mangold, N., Poulet, F., Bibring, J.-P., Gendrin, A., Ansan, V., Gomez, C., Gondet, B., Langevin, Y., Masson, P., et al. (2007). Phyllosilicates in the mawrth vallis region of mars. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 112(E8).
- [Loizeau et al., 2012] Loizeau, D., Werner, S., Mangold, N., Bibring, J.-P., and Vago, J. (2012). Chronology of deposition and alteration in the mawrth vallis region, mars. *Planetary and Space Science*, 72(1) :31–43.
- [Malin and Carr, 1999] Malin, M. C. and Carr, M. H. (1999). Groundwater formation of martian valleys. *Nature*, 397(6720) :589.
- [Mangold et al., 2004] Mangold, N., Quantin, C., Ansan, V., Delacourt, C., and Allemand, P. (2004). Evidence for precipitation on mars from dendritic valleys in the valles marineris area. *Science*, 305(5680) :78–81.
- [Martinez-Agirre et al., 2016] Martinez-Agirre, A., Álvarez-Mozos, J., and Giménez, R. (2016). Evaluation of surface roughness parameters in agricultural soils with different tillage conditions using a laser profile meter. *Soil and Tillage Research*, 161 :19–30.
- [Masursky, 1973] Masursky, H. (1973). An overview of geological results from mariner 9. *Journal of Geophysical Research*, 78(20) :4009–4030.
- [Masursky et al., 1977] Masursky, H., Boyce, J., Dial, A., Schaber, G., and Strobell, M. (1977). Classification and time of formation of martian channels based on viking data. *Journal of Geophysical Research*, 82(28) :4016–4038.
- [McCauley et al., 1972] McCauley, J. F., Carr, M. H., Cutts, J., Hartmann, W., Masursky, H., Milton, D., Sharp, R., and Wilhelms, D. E. (1972). Preliminary mariner 9 report on the geology of mars. *Icarus*, 17(2) :289–327.
- [McEwen et al., 2014] McEwen, A. S., Dundas, C. M., Mattson, S. S., Toigo, A. D., Ojha, L., Wray, J. J., Chojnacki, M., Byrne, S., Murchie, S. L., and Thomas, N. (2014). Recurring slope lineae in equatorial regions of mars. *Nature Geoscience*, 7(1) :53.
- [McEwen et al., 2011] McEwen, A. S., Ojha, L., Dundas, C. M., Mattson, S. S., Byrne, S., Wray, J. J., Cull, S. C., Murchie, S. L., Thomas, N., and Gulick, V. C. (2011). Seasonal flows on warm martian slopes. *Science*, 333(6043) :740–743.
- [Mellon et al., 2009] Mellon, M. T., Arvidson, R. E., Sizemore, H. G., Searls, M. L., Blaney, D. L., Cull, S., Hecht, M. H., Heet, T. L., Keller, H. U., Lemmon, M. T., et al. (2009). Ground ice at the phoenix landing site : Stability state and origin. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 114(E1).
- [Michel et al., 2016] Michel, P., Cheng, A., Küppers, M., Pravec, P., Blum, J., Delbo, M., Green, S., Rosenblatt, P., Tsiganis, K., Vincent, J.-B., et al. (2016). Science case for the asteroid impact mission (aim) : a component of the asteroid impact & deflection assessment (aida) mission. *Advances in Space Research*, 57(12) :2529–2547.
- [Michel et al., 2018] Michel, P., Kueppers, M., Sierks, H., Carnelli, I., Cheng, A. F., Mellab, K., Granvik, M., Kestilä, A., Kohout, T., Muinonen, K., et al. (2018). European component of the aida mission to a binary asteroid : Characterization and interpretation of the impact of the dart mission. *Advances in Space Research*, 62(8) :2261–2272.
- [Miller, 1986] Miller, G. S. (1986). The definition and rendering of terrain maps. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, volume 20, pages 39–48. ACM.
- [Milton, 1973] Milton, D. J. (1973). Water and processes of degradation in the martian landscape. *Journal of Geophysical Research*, 78(20) :4037–4047.
- [Mitrofanov et al., 2002] Mitrofanov, I., Anfimov, D., Kozyrev, A., Litvak, M., Sanin, A., Tret'yakov, V., Krylov, A., Shvetsov, V., Boynton, W. v., Shinohara, C., et al. (2002). Maps of subsurface hydrogen from the high energy neutron detector, mars odyssey. *Science*, 297(5578) :78–81.
- [Mitrofanov et al., 2017] Mitrofanov, I., Litvak, M., Nikiforov, S. Y., Jun, I., Bobrovniksky, Y. I., Golovin, D., Grebennikov, A., Fedosov, F., Kozyrev, A., Lisov, D., et al. (2017). The adron-rm instrument onboard the exomars rover. *Astrobiology*, 17(6-7) :585–594.

- [Mohanna et al., 2013] Mohanna, M., Rabeh, M. L., Zieur, E. M., and Hekala, S. (2013). Optimization of music algorithm for angle of arrival estimation in wireless communications. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2(1) :116–124.
- [Morgan et al., 2013] Morgan, G. A., Campbell, B. A., Carter, L. M., Plaut, J. J., and Phillips, R. J. (2013). 3d reconstruction of the source and scale of buried young flood channels on mars. *Science*, 340(6132) :607–610.
- [Mouginot et al., 2012] Mouginot, J., Pommerol, A., Beck, P., Kofman, W., and Clifford, S. M. (2012). Dielectric map of the martian northern hemisphere and the nature of plain filling materials. *Geophysical research letters*, 39(2).
- [Mouginot et al., 2010] Mouginot, J., Pommerol, A., Kofman, W., Beck, P., Schmitt, B., Herique, A., Grima, C., Safaeinili, A., and Plaut, J. (2010). The 3–5 mhz global reflectivity map of mars by marsis/mars express : Implications for the current inventory of subsurface h₂o. *Icarus*, 210(2) :612–625.
- [Núñez et al., 2016] Núñez, J., Barnouin, O., Murchie, S., Seelos, F., McGovern, J., Seelos, K., and Buczkowski, D. (2016). New insights into gully formation on mars : Constraints from composition as seen by mro/crism. *Geophysical Research Letters*, 43(17) :8893–8902.
- [Ojha et al., 2015] Ojha, L., Wilhelm, M. B., Murchie, S. L., McEwen, A. S., Wray, J. J., Hanley, J., Massé, M., and Chojnacki, M. (2015). Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on mars. *Nature Geoscience*, 8(11) :829.
- [Olhoef and Strangway, 1975] Olhoef, G. R. and Strangway, D. (1975). Dielectric properties of the first 100 meters of the moon. *Earth and Planetary Science Letters*, 24(3) :394–404.
- [Orosei et al., 2018] Orosei, R., Lauro, S., Pettinelli, E., Cicchetti, A., Coradini, M., Cosciotti, B., Di Paolo, F., Flamini, E., Mattei, E., Pajola, M., et al. (2018). Radar evidence of subglacial liquid water on mars. *Science*, page eaar7268.
- [Pajola et al., 2017] Pajola, M., Rossato, S., Baratti, E., Pozzobon, R., Quantin, C., Carter, J., and Thollot, P. (2017). Boulder abundances and size-frequency distributions on oxia planum-mars : Scientific implications for the 2020 esa exomars rover. *Icarus*, 296 :73–90.
- [Parker et al., 1993] Parker, T. J., Gorsline, D. S., Saunders, R. S., Pieri, D. C., and Schneeberger, D. M. (1993). Coastal geomorphology of the martian northern plains. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 98(E6) :11061–11078.
- [Parker et al., 1989] Parker, T. J., Saunders, R. S., and Schneeberger, D. M. (1989). Transitional morphology in west deuterionilus mensae, mars : Implications for modification of the lowland/upland boundary. *Icarus*, 82(1) :111–145.
- [Phillips et al., 2008] Phillips, R. J., Zuber, M. T., Smrekar, S. E., Mellon, M. T., Head, J. W., Tanaka, K. L., Putzig, N. E., Milkovich, S. M., Campbell, B. A., Plaut, J. J., et al. (2008). Mars north polar deposits : Stratigraphy, age, and geodynamical response. *Science*, 320 :1182–1185.
- [Pilorget and Forget, 2016] Pilorget, C. and Forget, F. (2016). Formation of gullies on mars by debris flows triggered by co₂ sublimation. *Nature Geoscience*, 9(1) :65.
- [Plaut et al., 2007] Plaut, J. J., Picardi, G., Safaeinili, A., Ivanov, A. B., Milkovich, S. M., Cicchetti, A., Kofman, W., Mouginot, J., Farrell, W. M., Phillips, R. J., et al. (2007). Subsurface radar sounding of the south polar layered deposits of mars. *science*, 316(5821) :92–95.
- [Plettemeier et al., 2009] Plettemeier, D., Ciarletti, V., Hamran, S.-E., Corbel, C., Cais, P., Benedix, W.-S., Wolf, K., Linke, S., and Roddecke, S. (2009). Full polarimetric gpr antenna system aboard the exomars rover. In *Radar Conference, 2009 IEEE*, pages 1–6. IEEE.
- [Pollack et al., 1987] Pollack, J. B., Kasting, J. F., Richardson, S. M., and Poliakov, K. (1987). The case for a wet, warm climate on early mars. *Icarus*, 71(2) :203–224.
- [Putzig et al., 2009] Putzig, N. E., Phillips, R. J., Campbell, B. A., Holt, J. W., Plaut, J. J., Carter, L. M., Egan, A. F., Bernardini, F., Safaeinili, A., and Seu, R. (2009). Subsurface structure of planum boreum from mars reconnaissance orbiter shallow radar soundings. *Icarus*, 204(2) :443–457.

- [Quantin et al., 2016] Quantin, C., Carter, J., Thollot, P., Broyer, J., Lozach, L., Davis, J., Grindrod, P., Pajola, M., Baratti, E., Rossato, S., et al. (2016). Oxia planum, the landing site for exomars 2018. In *47th Lunar and Planetary Science Conference Abstracts, Abstract*, volume 2863.
- [Ramirez and Craddock, 2018] Ramirez, R. M. and Craddock, R. A. (2018). The geological and climatological case for a warmer and wetter early mars. *Nature Geoscience*, 11(4) :230.
- [Ren and Willis, 1997] Ren, Q. and Willis, A. (1997). Extending music to single snapshot and on line direction finding applications.
- [Rodriguez et al., 2016] Rodriguez, J. A. P., Fairén, A. G., Tanaka, K. L., Zarroca, M., Linares, R., Platz, T., Komatsu, G., Miyamoto, H., Kargel, J. S., Yan, J., et al. (2016). Tsunami waves extensively resurfaced the shorelines of an early martian ocean. *Scientific reports*, 6 :25106.
- [Roy and Kailath, 1989] Roy, R. and Kailath, T. (1989). Esprit-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. *IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 37(7) :984–995.
- [Rull et al., 2017] Rull, F., Maurice, S., Hutchinson, I., Moral, A., Perez, C., Diaz, C., Colombo, M., Belenguer, T., Lopez-Reyes, G., Sansano, A., et al. (2017). The raman laser spectrometer for the exomars rover mission to mars. *Astrobiology*, 17(6-7) :627–654.
- [Schmidt et al., 2017] Schmidt, F., Andrieu, F., Costard, F., Kocifaj, M., and Meresescu, A. G. (2017). Formation of recurring slope lineae on mars by rarefied gas-triggered granular flows. *Nature Geoscience*, 10(4) :270.
- [Schmidt, 1986] Schmidt, R. (1986). Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 34(3) :276–280.
- [Seu et al., 2004] Seu, R., Biccari, D., Orosei, R., Lorenzoni, L., Phillips, R., Marinangeli, L., Picardi, G., Masdea, A., and Zampolini, E. (2004). Sharad : The mro 2005 shallow radar. *Planetary and Space Science*, 52(1-3) :157–166.
- [Seu et al., 2007] Seu, R., Phillips, R. J., Biccari, D., Orosei, R., Masdea, A., Picardi, G., Safaeinili, A., Campbell, B. A., Plaut, J. J., Marinangeli, L., et al. (2007). Sharad sounding radar on the mars reconnaissance orbiter. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 112(E5).
- [Seyfried and Schoebel, 2015] Seyfried, D. and Schoebel, J. (2015). Stepped-frequency radar signal processing. *Journal of applied geophysics*, 112 :42–51.
- [Shan et al., 1985] Shan, T.-J., Wax, M., and Kailath, T. (1985). On spatial smoothing for direction-of-arrival estimation of coherent signals. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 33(4) :806–811.
- [Sharp et al., 1971] Sharp, R. P., Murray, B. C., Leighton, R. B., Soderblom, L. A., and Cutts, J. A. (1971). The surface of mars 4. south polar cap. *Journal of Geophysical Research*, 76(2) :357–368.
- [Shrestha and Arai, 2003] Shrestha, S. M. and Arai, I. (2003). High resolution image reconstruction by gpr using music and sar processing method for landmine detection. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International*, volume 4, pages 2921–2923. IEEE.
- [Shrestha et al., 2004] Shrestha, S. M., Arai, I., and Tomizawa, Y. (2004). Landmine detection with gpr using super resolution signal processing algorithm. In *Ground Penetrating Radar, 2004. GPR 2004. Proceedings of the Tenth International Conference on*, pages 705–708. IEEE.
- [Smith et al., 1999] Smith, D. E., Zuber, M. T., Solomon, S. C., Phillips, R. J., Head, J. W., Garvin, J. B., Banerdt, W. B., Muhleman, D. O., Pettengill, G. H., Neumann, G. A., et al. (1999). The global topography of mars and implications for surface evolution. *Science*, 284(5419) :1495–1503.
- [Smith et al., 2009] Smith, P. H., Tamppari, L., Arvidson, R., Bass, D., Blaney, D., Boynton, W. V., Carswell, A., Catling, D., Clark, B., Duck, T., et al. (2009). H₂O at the phoenix landing site. *Science*, 325(5936) :58–61.

- [Stickley et al., 2000] Stickley, G., Noon, D., Cherniakov, M., and Longstaff, I. (2000). Gated stepped-frequency ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 43(2-4) :259–269.
- [Stillman and Grimm, 2011a] Stillman, D. E. and Grimm, R. E. (2011a). Dielectric signatures of adsorbed and salty liquid water at the phoenix landing site, mars. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 116(E9).
- [Stillman and Grimm, 2011b] Stillman, D. E. and Grimm, R. E. (2011b). Radar penetrates only the youngest geological units on mars. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 116(E3).
- [Stofan et al., 2007] Stofan, E. R., Elachi, C., Lunine, J., Lorenz, R., Stiles, B., Mitchell, K., Ostro, S., Soderblom, L., Wood, C., Zebker, H., et al. (2007). The lakes of titan. *Nature*, 445(7123) :61.
- [Stogryn, 1971] Stogryn, A. (1971). Equations for calculating the dielectric constant of saline water (correspondence). *IEEE transactions on microwave theory and Techniques*, 19(8) :733–736.
- [Stuurman et al., 2016] Stuurman, C., Osinski, G., Holt, J., Levy, J., Brothers, T., Kerrigan, M., and Campbell, B. (2016). Sharad detection and characterization of subsurface water ice deposits in utopia planitia, mars. *Geophysical Research Letters*, 43(18) :9484–9491.
- [Sun et al., 2017] Sun, M., Le Bastard, C., Pinel, N., Wang, Y., Li, J., Pan, J., and Yu, Z. (2017). Estimation of time delay and interface roughness by gpr using modified music. *Signal Processing*, 132 :272–283.
- [Sun et al., 2016] Sun, T., Zhang, Z., Song, B., Tang, X., and Liu, S. (2016). Subsurface fine structures survey by gpr b-scan image based on signal subspace method. In *Ground Penetrating Radar (GPR), 2016 16th International Conference on*, pages 1–5. IEEE.
- [Tang et al., 2017] Tang, X., Ren, W., Sun, T., and Zhang, Z. (2017). Rock structures analysis from gpr radargram based on music method. In *Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), 2017 9th International Workshop on*, pages 1–4. IEEE.
- [ThetaProbe, 1999] ThetaProbe (1999). ThetaProbe soil moisture sensor type ML2x user manual.
- [Tjora et al., 2004] Tjora, S., Eide, E., and Lundheim, L. (2004). Evaluation of methods for ground bounce removal in gpr utility mapping. In *Ground Penetrating Radar, 2004. GPR 2004. Proceedings of the Tenth International Conference on*, volume 1, pages 379–382. IEEE.
- [Ulaby et al., 1988] Ulaby, F., Bengal, T., East, J., Dobson, M., Garvin, J., and Evans, D. (1988). Microwave dielectric spectrum of rocks.
- [Ulaby et al., 2014] Ulaby, F. T., Long, D. G., Blackwell, W. J., Elachi, C., Fung, A. K., Ruf, C., Sarabandi, K., Zebker, H. A., and Van Zyl, J. (2014). *Microwave radar and radiometric remote sensing*, volume 4. University of Michigan Press Ann Arbor.
- [Vago et al., 2015] Vago, J., Witasse, O., Svedhem, H., Baglioni, P., Haldemann, A., Gianfiglio, G., Blancquaert, T., McCoy, D., and de Groot, R. (2015). Esa exomars program : the next step in exploring mars. *Solar System Research*, 49(7) :518–528.
- [Vago et al., 2017] Vago, J. L., Westall, F., Coates, A. J., Jaumann, R., Korablev, O., Ciarletti, V., Mitrofanov, I., Josset, J.-L., De Sanctis, M. C., Bibring, J.-P., et al. (2017). Habitability on early mars and the search for biosignatures with the exomars rover. *Astrobiology*, 17(6-7) :471–510.
- [Verma et al., 2009] Verma, P. K., Gaikwad, A. N., Singh, D., and Nigam, M. (2009). Analysis of clutter reduction techniques for through wall imaging in uwb range. *Progress In Electromagnetics Research*, 17 :29–48.
- [Vuksanovic et al., 2013] Vuksanovic, B., Bostanudin, N., Hidzir, H., and Parchizadeh, H. (2013). Discarding unwanted features from gpr images using 2dpc and ica techniques. *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 3(3) :317.
- [Watters et al., 2007] Watters, T. R., Campbell, B., Carter, L., Leuschen, C. J., Plaut, J. J., Picardi, G., Orosei, R., Safaenili, A., Clifford, S. M., Farrell, W. M., et al. (2007). Radar sounding of the medusae fossae formation mars : Equatorial ice or dry, low-density deposits? *Science*, 318(5853) :1125–1128.

- [Webster et al., 2018] Webster, C. R., Mahaffy, P. R., Atreya, S. K., Moores, J. E., Flesch, G. J., Malespin, C., McKay, C. P., Martinez, G., Smith, C. L., Martin-Torres, J., et al. (2018). Background levels of methane in mars? atmosphere show strong seasonal variations. *Science*, 360(6393) :1093–1096.
- [Williams and Greeley, 2004] Williams, K. K. and Greeley, R. (2004). Measurements of dielectric loss factors due to a martian dust analog. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 109(E10).
- [Williams et al., 2013] Williams, R. M., Grotzinger, J. P., Dietrich, W., Gupta, S., Sumner, D., Wiens, R., Mangold, N., Malin, M., Edgett, K., Maurice, S., et al. (2013). Martian fluvial conglomerates at gale crater. *science*, 340(6136) :1068–1072.
- [Williams et al., 1988] Williams, R. T., Prasad, S., Mahalanabis, A. K., and Sibul, L. H. (1988). An improved spatial smoothing technique for bearing estimation in a multipath environment. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 36(4) :425–432.
- [Wordsworth et al., 2013] Wordsworth, R., Forget, F., Millour, E., Head, J., Madeleine, J.-B., and Charnay, B. (2013). Global modelling of the early martian climate under a denser co2 atmosphere : Water cycle and ice evolution. *Icarus*, 222(1) :1–19.
- [Wordsworth et al., 2015] Wordsworth, R. D., Kerber, L., Pierrehumbert, R. T., Forget, F., and Head, J. W. (2015). Comparison of ?warm and wet? and ?cold and icy? scenarios for early mars in a 3-d climate model. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 120(6) :1201–1219.
- [Wu and King, 1965] Wu and King (1965). The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, AP-13 :369–373.
- [Wu and Shen, 1967] Wu and Shen (1967). Cylindrical antenna with tapered resistive loading. *Radio Science*, 2 :191–201.
- [Xu et al., 1994] Xu, G., Roy, R. H., and Kailath, T. (1994). Detection of number of sources via exploitation of centro-symmetry property. *IEEE Transactions on Signal processing*, 42(1) :102–112.
- [Yamada et al., 1991] Yamada, H., Ohmiya, M., Ogawa, Y., and Itoh, K. (1991). Superresolution techniques for time-domain measurements with a network analyzer. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 39(2) :177–183.
- [Yee, 1966] Yee, K. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell’s equations in isotropic media. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 14(3) :302–307.
- [Yingst et al., 2007] Yingst, R. A., Haldemann, A., Biedermann, K. L., and Monhead, A. M. (2007). Quantitative morphology of rocks at the mars pathfinder landing site. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 112(E6).
- [Yung and Pinto, 1978] Yung, Y. and Pinto, J. (1978). Primitive atmosphere and implications for the formation of channels on mars. *Nature*, 273(5665) :730.
- [Zhang and Ng, 2010] Zhang, Y. and Ng, B. P. (2010). Music-like doa estimation without estimating the number of sources. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58(3) :1668–1676.
- [Zhou et al., 2010] Zhou, H., Zhang, Q., and Zhu, J. (2010). Ultra-thin asphalt pavement layer interface detection and time delay estimation based on music. In *Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2010 6th International Conference on*, pages 1–4. IEEE.
- [Zribi and Dechambre, 2003] Zribi, M. and Dechambre, M. (2003). A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from c-band radar data. *Remote Sensing of Environment*, 84(1) :42–52.
- [Zuber et al., 1992] Zuber, M. T., Smith, D., Solomon, S., Muhleman, D., Head, J., Garvin, J., Abshire, J., and Bufton, J. (1992). The mars observer laser altimeter investigation. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 97(E5) :7781–7797.
- [Ô.Yilmaz, 2001] Ô.Yilmaz (2001). Seismic data analysis. *Soc. Explor. Geophys.*

Table des figures

1.1	Surface de Mars dévoilée par les caméras des orbiteurs de la mission Viking, crédit : NASA/JPL	2
1.2	Cartes topographiques réalisées à partir des observations de l'altimètre MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) de la mission Mars Global Surveyor (NASA), crédits : NASA/JPL	3
1.3	Grand événements martiens en fonction des périodes géologiques de la planète. Extrait de [Carr and Head III, 2010].	4
1.4	Ares Vallis, image THEMIS, Crédit : NASA/JPL/ASU	6
1.5	Réseaux de vallée sur West Echus Chasma plateau (0°N, 81°W), a) Image THEMIS/Mars Odyssey, b) Carte du réseau, Extrait de [Mangold et al., 2004]	7
1.6	Haut : ravines photographiées par HiRISE/MRO. Bas : la combinaison avec les données CRISM ne montre pas d'altération par de l'eau liquide, Crédits : NASA/JPL-Caltech/UA/JHUAPL	7
1.7	Recurring Slope Lineae (RSL) dans Coprates Chasma, image HiRISE, crédit : NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona	8
1.8	Comparatif entre des galets a) observés sur Mars (au niveau d'un affleurement surnommé "Link" et imagé par la Mastcam/Curiosity) et, b) sur Terre dans le désert d'Atacama, au Chili. Extrait de [Williams et al., 2013]	9
1.9	Carte des minéraux hydratés dans la région de Marwth Vallis, les minéraux ne se trouvent pas dans le chenal (flèche bleue) mais sur les rives (flèche rouge). Extrait de [Bibring et al., 2006]	10
1.10	Carte d'élévation de l'hémisphère Nord où figurent les lignes de rivage "contact 1" et "contact 2". Extrait de [Head et al., 1999]	11
1.11	Constante diélectrique estimée à partir des données MARSIS/Mars Express. Extrait de [Mouginot et al., 2012]	11
1.12	Carte du contenu en hydrogène, et donc indirectement en eau, du premier mètre du sous-sol martien déduit des mesures du spectromètre à neutrons de l'instrument GRS/Mars Odyssey/NASA. Crédits : NASA/JPL/Los Alamos National Laboratory	12
1.13	Carte du contenu en eau dans les premiers mètres du sous-sol martien à partir des mesures du spectromètre à neutrons de l'instrument GRS/Mars Odyssey/NASA. Extrait de [Byrne et al., 2009]	13
1.14	Mission Mariner 4 : a) Mariner 4 (Crédit : NASA/JPL-Caltech), b) Première image de Mars prise par la sonde Mariner 4 (Crédit : NASA/JPL)	14
1.15	Mission Viking/NASA : a) Orbiteur Viking b) Atterrisseur Viking, crédit : NASA/JPL	15
1.16	Première image prise à la surface de Mars par la sonde Viking (1976). Crédit : NASA/JPL	16
1.17	Mars vue par l'Europe : a) Image HRSC/Mars express de Mars, crédits : ESA/DLR/FU Berlin, CC BY-SA 3.0 IGO, b) Image CIVA prise depuis le lander Philae à bord de Rosetta, crédits : ESA/Rosetta/Philae/CIVA, c) Image CaSSIS/TGO du rebord du cratère Korolev, crédits : ESA/Roscosmos/CaSSIS	17
1.18	a) Vue du dessus de la station Pathfinder, b) Sojourner en pleine analyse du rocher Yogi, c) Vue du rocher Yogi par la caméra de Sojourner. Crédit des images : NASA/JPL . .	18

1.19	Rovers toujours en activité à la surface de Mars : a) Vue d'artiste du Rover de la mission MER, crédits : NASA/JPL/Cornell University/Maas Digital, b) Auto-portrait du Rover MSL, crédits : NASA/JPL-Caltech/MSSS	19
1.20	a) Le Rover ExoMars crédit : ESA/ATG medialab b) le Rover Mars2020 crédit : NASA/JPL-Caltech	19
1.21	Historique de la mission ExoMars, Crédit : ESA/ROSCOSMOS/NASA	21
1.22	Mission ExoMars 2016 : Trace Gas Orbiter et son module Schiaparelli, Crédit : ESA/ATG medialab	22
1.23	Rover de la mission ExoMars 2020, Crédit : ESA/ATG medialab	23
1.24	Sites d'atterrissages à l'étude pour la mission ExoMars 2020, à gauche Mawrth Valis, à droite Oxia planum, Credit : ESA/DLR/FU Berlin et NASA MGS MOLA Science Team	25
1.25	Terme A_{Att} en fonction de la profondeur et de la fréquence et des pertes : a) $\epsilon_r'' = 1e - 1$, b) $\epsilon_r'' = 1e - 2$ et c) $\epsilon_r'' = 1e - 3$	30
1.26	Constante diélectrique ϵ_r' et partie imaginaire ϵ_r'' de la permittivité en fonction de la fréquence de l'eau liquide pure à 1 et 20°C	31
1.27	Constante diélectrique ϵ_r' et partie imaginaire ϵ_r'' de la permittivité en fonction de la fréquence, pour de la glace l'eau pure à -3 et -73°C	32
1.28	Carte interpolée des valeurs de constante diélectrique déterminées à partir des données de MARSIS/Mars Express. Extrait de [Mouginot et al., 2010]	34
1.29	Sondage de la North Polar Layered Deposit par MARSIS (orbit 1855) : a) Radargramme MARSIS, b) Simulation à partir des données de topographie MOLA, c) Données MOLA, Crédits : [Seu et al., 2007]	37
1.30	Radargramme MARSIS (orbite 2896) acquis au dessus de la Medusae Fossae Formation. Extrait de [Watters et al., 2007]	38
1.31	Calotte polaire Sud (SPLD) : A et C radargrammes MARSIS acquis au dessus de la SPLD, B et D données MOLA, F épaisseur de la SPLD estimée à partir des données MARSIS. Extraits de [Plaut et al., 2007]	38
1.32	Sondage de la SPLD par MARSIS : a) Données MOLA de la SPLD où figure la zone à l'étude (carré noir), b) Intensité du signal réfléchi par la couche basale (dB), c) Estimation de la constante diélectrique à l'intérieur et à l'extérieur de la zone réfléchissante. Extrait de [Orosei et al., 2018]	39
1.33	Radargramme MARSIS acquis au-dessus de la SPLD (orbite 10737) ; la surface, la zone réfléchissante et l'épaisseur de la SPLD sont indiquées par des flèches. Extrait de [Orosei et al., 2018]	40
1.34	Radargramme SHARAD acquis au-dessus de la NPLD. Extrait de [Phillips et al., 2008]	41
1.35	a) Radargrammes utilisés dans la reconstruction 3D, b) Reconstruction 3D du canal enfoui à partir des données SHARAD. Extrait de [Morgan et al., 2013].	41
1.36	Emplacement des sondages SHARAD au dessus d'Utopia Planitia. Extrait de [Stuurman et al., 2016]	42
2.1	Module électronique (WEU) du modèle de vol (PFM) : a) WISDOM (PFM), b) Carte Radio-Fréquence (RF), c) Carte Numérique (DPU, <i>Data Processing Unit</i>), d) Carte DC/DC (<i>Direct Current to Direct Current converter</i>)	47
2.2	Schéma synoptique de WISDOM	48
2.3	a) Photo du système d'antennes de WISDOM (Tx : antenne émettrice, Rx : antenne réceptrice), b) Disposition des éléments rayonnants	50
2.4	Diagrammes de rayonnement 3D des antennes de WISDOM à différentes fréquences : a) 0.5 GHz, b) 1.7 GHz, c) 3 GHz.	50
2.5	Impulsion mesurée (normalisée par le maximum) (2^{eme} colonne) et modélisée (3^{eme} colonne) et leur réponse (normalisée par le maximum) dans le domaine fréquentiel (4^{eme} colonne) pour chaque protocole de mesure décrit dans la 1^{ere} colonne : a) mesures sur plaque, b) mesures sur sol naturel, c) mesures avec les antennes face à face, d) mesures sans antenne.	56

2.6	Mesures sur plaque : a) Au laboratoire avec le prototype, b) En chambre anéchoïde avec l'EM, c) En salle blanche avec le PFM.	58
2.7	Mesures sur plaque avec les différents modèles de WISDOM (PFM, EM, BB) : a) réponses temporelles, b) réponses fréquentielles.	58
2.8	Schéma de la configuration de mesure	60
2.9	Gain des antennes WISDOM EQM en dBi	60
2.10	Puissance émise en fonction de la fréquence	61
2.11	Puissance émise en fonction de la fréquence	61
2.12	α et β en fonction de la fréquence	62
2.13	Coefficient de réflexion Γ mesuré sur plaque métallique	62
2.14	Facteur de bruit mesuré et calculé en fonction de l'atténuation (atténuateur de la chaîne de réception) et de la fréquence	64
2.15	Modèle à 2 couches utilisé pour estimer les performances de WISDOM. La surface de la couche supérieure est lisse. L'interface entre la couche supérieure et la couche inférieure peut être lisse ou rugueuse.	64
2.16	SNR en fonction de la fréquence et des pertes (cas lisse) : a) $\epsilon'' = 0.05$ b) $\epsilon'' = 0.1$ c) $\epsilon'' = 0.25$	65
2.17	SNR en fonction de la fréquence et des pertes (cas rugueux) : a) $\epsilon'' = 0.01$ b) $\epsilon'' = 0.1$ c) $\epsilon'' = 0.25$	66
2.18	Estimation de la résolution verticale R_v en fonction de la profondeur de l'interface enfouie et des pertes dans le milieu dans le cas d'interfaces lisses et rugueuses	67
2.19	Amplitude du couplage direct en fonction de la température pour l'EM, a) Température des cartes de WISDOM, b) Amplitude du couplage direct, c) Amplitude en fonction du couplage direct.	67
2.20	Amplitude du couplage direct (en ADU) en fonction de la température (en °C) a) pour le prototype (BB), b) pour le modèle de vol (PFM).	68
2.21	a) Photo du dispositif expérimental, b) Amplitude de l'écho de surface et du couplage direct par mesure (code couleur), c) Amplitude du module de la réponse fréquentielle par mesure.	69
2.22	a) Température des cartes par numéro de mesure, b) Amplitude de l'écho de surface et du couplage direct par numéro de mesure, c) Amplitude du couplage direct et de l'écho de surface en fonction de la température.	69
2.23	Amplitude de l'écho de surface en fonction de l'amplitude du couplage direct	69
2.24	Cuve dans laquelle les tests thermiques du modèle de vol ont été réalisés (PIT OVSQ)	70
2.25	a) Température de la cuve où ont été effectués les tests de qualification du PFM en fonction du numéro de mesure, b) Amplitude des mesures rebouclées en fonction de la température.	71
2.26	Mesures en espace libre : a) En extérieur avec le prototype, b) En chambre anéchoïde avec l'EM, c) En salle blanche avec le PFM.	71
2.27	Mesure en espace libre : a) Mesures en espace libre (PFM, EM et prototype), b) Radar-gramme de la mesure en espace libre du prototype.	72
2.28	Mesure sur une plaque métallique située à 38 cm des antennes : a) Configuration de la mesure sur plaque métallique, b) Réponse de l'électronique (jaune), couplage direct (rouge) et écho de surface (bleu).	72
2.29	Amplitude de l'écho sur la plaque en fonction de l'inclinaison θ des antennes	74
2.30	Mesures sur sphère métallique avec a) le prototype, b) le modèle de vol (PFM), c) l'EM.	74
2.31	Effet théorique et observé des additions cohérentes sur le rapport signal sur bruit (SNR). Ces résultats ont été obtenus à partir de mesures rebouclées faites avec le PFM.	75
2.32	Principe du gating	76

2.33	Mesures rebouclées (avec des câbles de longueur différente) effectuées avec le PFM avec et sans gating. Sans gating, l'amplitude du second écho (vers 11 ns) est inférieur de 4.7 dB à l'amplitude du premier (vers 8 ns). Avec gating, le second écho domine le premier de 7.8 dB.	76
2.34	Prototype de l'instrument WISDOM monté sur un chariot adapté.	76
2.35	Campagne de mesures sur le mont Etna (Italie)-10/2010. Crédit : WISDOM team . . .	77
2.36	Campagne de mesures dans les grottes glacées du Dachstein (Autriche)-10/2013. Crédit : WISDOM team	78
2.37	Rover "Bridget" sur lequel est monté le prototype de WISDOM dans le désert de l'Atacama (Chili)-10/2013. Crédit : Rafik Hassen-Khodja	78
2.38	Campagne de mesures dans le "Colorado Provençal" (Rustrel, France)-07/2017. Crédit : WISDOM team	79
2.39	Campagne à Pérouze (Italie)-06/2018. Crédit : Alessandro Frigeri	79
2.40	Terrain aménagé sur le site de Guyancourt du LATMOS pour tester le radar WISDOM, d) Radargramme acquis par WISDOM sur ce terrain test	80
3.1	Principe du radar à sauts de fréquences. Deux courbes du haut : Signal émis dans les domaines fréquentiel et temporel. WISDOM émet typiquement 1001 fréquences sur une bande de fréquences de 2.5 GHz donc avec un pas en fréquence $F_e = 2.5$ MHz. Courbe du milieu : signal reçu dans le domaine fréquentiel. WISDOM ne permet que l'acquisition de la partie réelle de ce signal dans le domaine fréquentiel c'est-à-dire de la voie I (avant dernière courbe). La courbe du bas montre la partie imaginaire du signal reçu dans le domaine fréquentiel (c'est-à-dire la voie Q). L'information contenue dans cette dernière peut être en grande partie reconstruite grâce à une transformée de Hilbert.	84
3.2	a) Différents types de fenêtres d'apodisation, b) Réponses temporelles des fenêtres d'apodisation	86
3.3	a) Largeur à mi-hauteur de l'écho sur plaque métallique en fonction des fenêtres d'apodisation, b) Enveloppe de l'écho sur plaque métallique	87
3.4	Radargramme acquis par WISDOM : a) traité avec une fonction porte Π , b) traité avec une fenêtre de Hamming	87
3.5	Signaux temporels obtenus avec WISDOM reconstruits à partir des parties réelle et imaginaire (trait plein) ou seulement à partir de la partie réelle via une transformée de Hilbert (traits pointillés).	88
3.6	Haut : comparaison de l'amplitude de 100 signaux temporels obtenus avec WISDOM reconstruits à partir des parties réelle et imaginaire ou seulement à partir de la partie réelle via une transformée de Hilbert. Les couleurs indiquent différents niveaux d'atténuation dans les chaînes d'émission et de réception. Bas : Idem qu'en haut mais en ne gardant que les points correspondant au pic de la réponse temporelle sur une dynamique de 30 dB (voir Figure 3.5).	90
3.7	Radargramme acquis par WISDOM filtré par bande de fréquences, a) 0.5-1.3 GHz, b) 0.5-2.0 GHz, c) 0.5-3.0 GHz	90
3.8	Construction d'un radargramme : a) A-scan ou profil radar b) image d'un A-scan c) B-scan ou radargramme	91
3.9	Radargrammes acquis par WISDOM. a) Radargramme brut, b) Radargramme traité avec soustraction de la moyenne	92
3.10	Interpolation en temps d'un profil radar mesuré par WISDOM	93
3.11	a) Schéma du dispositif expérimental, b) Amplitude de l'écho en fonction de la distance antenne-mur, c) Reconstitution de l'écho par méthode stroboscopique et <i>zero-padding</i>	93
3.12	Radargramme acquis par WISDOM a) sans interpolation selon la distance, b) avec interpolation selon la distance	94
3.13	Comparaison des méthodes d'application de gain sur un radargramme acquis par WISDOM. a) sans gain, b) avec gain exponentiel, c) gain appliqué sur une fenêtre glissante	95

3.14	Schéma représentant les origines possibles des réflexions parasites : 1) couplage interne de l'électronique, 2) réflexions internes dans l'instrument (<i>ringing</i>), 3) couplage direct entre les antennes, 4) réflexions multiples entre les antennes et la surface, 5) réflexions entre les antennes, le corps du Rover et la surface (<i>clutter</i>)	96
3.15	a) Amplitude en dB des contributions à la mesure, b) Radargrammes obtenus sur le terrain d'expérimentation "Mars yard" avant et après avoir soustrait la mesure en espace libre	98
3.16	Radargramme obtenu sur le terrain d'expérimentation "Mars yard", a) radargramme brut, b) radargramme brut avec, en rouge, le couplage direct et, en bleu, l'écho de surface et leurs répétitions, c) radargramme traité par soustraction de la moyenne. . .	99
3.17	Radargramme WISDOM après soustraction de la moyenne, a) avec toutes les fréquences, b) avec les basses fréquences, c) avec les hautes fréquences	100
3.18	Radargrammes WISDOM après soustraction d'une moyenne glissante calculée pour différentes valeurs de N	100
3.19	Radargramme obtenu sur le terrain d'expérimentation "Mars Yard" traité par soustraction d'une moyenne (gauche), traité par analyse de l'écho de sol (droite).	102
3.20	Radargramme obtenu du terrain d'expérimentation "Mars Yard" : a) Comparaison des méthodes de soustraction par la moyenne (M) et de SRD sur toute la bande de fréquences, b) Comparaison des méthodes de soustraction par une moyenne glissante (MG) et de SRD avec filtrage en fréquence	103
3.21	Décomposition d'une photographie par décomposition en valeurs singulières : a) Image originale (Crédit : Yann Hervé), b) Image reconstituée après suppression de la première valeur singulière, c) Image reconstituée après suppression des deux premières valeurs singulières, d) Amplitudes des 16 premières valeurs singulières	104
3.22	a) Image originale, b) Sinus amorti, c) Image bruitée par un sinus amorti	105
3.23	a) Image originale, b) Image débruitée par SVD par suppression de la première valeur singulière, c) Résidus	105
3.24	a) Coefficient de corrélation entre l'image originale et l'image débruitée par filtrage des valeurs singulières, b) Coefficient de corrélation entre l'image originale et l'image débruitée par soustraction d'une moyenne glissante.	106
3.25	a) Image originale, b) Image bruitée c) Image traitée par SVD ($n_i = 15$), d) Image traitée par SVD ($n_i = 40$)	107
3.26	Simulation du fonctionnement d'un GPR sous TEMSI-FD : a) Vue 3D de boîte de modélisation montrant les antennes de WISDOM (en rouge) à 38 cm au dessus de la surface (en vert) et une sphère enfouie dans le sol (en bleu), b) Constante diélectrique selon le plan XZ passant par $Y = 1$ m	107
3.27	Méthodes de réduction du <i>ringing</i> appliquées sur données simulées : a) Données synthétiques brutes, b) Données synthétiques traitées par soustraction de la moyenne (M), c) Données traitées par filtrage des valeurs singulières (SVD).	108
3.28	Radargramme obtenu sur le "Mars Yard", a) Radargramme débruité par soustraction d'une moyenne, b) Radargramme débruité par SVD après filtrage de la première valeur singulière, c) Radargramme debruité par SVD après filtrage des deux premières valeurs singulières.	109
3.29	Résidu de la méthode de décomposition en valeurs singulières : a) image propre correspondant à la première valeur singulière, b) image propre correspondant à la deuxième valeur singulière, c) comparaison entre le radargramme brut et le résidu (somme des deux premières singulières) obtenu par SVD	109
3.30	Radargramme WISDOM traité par différentes méthodes de réduction de parasites. . .	110

3.31	Application des méthodes de réduction des parasites sur le site 1 de la campagne de mesures dans le "Colorado Provençal" : a) Données brutes, b) Radargramme traité par soustraction de la moyenne (M), c) Radargramme traité par soustraction d'une moyenne glissante (MG), $N = 50$ soit 1.7 m, d) Radargramme traité par filtrage des valeurs singulières (SVD) , e) Radargramme traité par analyse de l'écho de sol (AES), f) Radargramme traité par soustraction par le radargramme décalé par translation temporelle (SRD)	113
3.32	Application des méthodes de réduction des parasites sur le site 2 de la campagne de mesures dans le "Colorado Provençal" : a) Données brutes, b) Radargramme traité par soustraction de la moyenne (M), c) Radargramme traité par soustraction d'une moyenne glissante (MG), $N = 50$ soit 1.7 m, d) Radargramme traité par filtrage des valeurs singulières (SVD) , e) Radargramme traité par analyse de l'écho de sol (AES), f) Radargramme traité par soustraction par le radargramme décalé par translation temporelle (SRD)	114
3.33	Chaîne de traitement des données du radar à pénétration de sol WISDOM	116
4.1	Résolution verticale d'un GPR en fonction de sa bande de fréquences et de la constante diélectrique d'un sol considéré comme homogène.	118
4.2	Radargrammes acquis par WISDOM sur un sol stratifié naturel : (à gauche) radargramme filtré aux basses fréquences ($B = 1.2$ GHz), (au centre) radargramme sur toute la bande de fréquences ($B = 2.5$ GHz), (à droite) Profil radar à la distance marquée par des pointillés sur les radargrammes.	119
4.3	Pseudo-spectre MUSIC d'un signal simulé présentant deux échos dont les retards sont 10 et 15 ns. Le SNR des échos est de 20 dB.	122
4.4	Principe du moyennage en sous-bandes de fréquences	122
4.5	Ecart en temps estimé avec MUSIC et la MSSP ou la SSP en fonction de la bande de fréquences effective (à gauche) et pourcentage de second écho résolu (à droite)	124
4.6	De gauche à droite : signal obtenu avec une IFFT , pseudo-spectre MUSIC obtenu avec la méthode SSP, pseudo-spectre MUSIC obtenu avec la méthode MSSP	125
4.7	R en fonction du produit $B\Delta t$ pour a) $B_{eff} = 0.5B$, b) $B_{eff} = 0.7B$	126
4.8	Antennes de WISDOM au-dessus d'un sol stratifié à deux couches homogènes.	127
4.9	Épaisseur estimée par transformée de Fourier inverse (gauche) et par MUSIC (centre). Comparaison IFFT/MUSIC (droite).	127
4.10	Erreur relative sur l'estimation de l'épaisseur de la couche supérieure en fonction du SNR et de l'épaisseur de cette couche a) avec une IFFT, b) avec MUSIC.	128
4.11	Caractéristique de la couche avec hétérogénéités : a) Coupe de la couche supérieure montrant l'échelle des hétérogénéités, b) Distribution des constantes diélectriques au sein de la couche supérieure.	129
4.12	Radargramme simulé pour une couche supérieure présentant des hétérogénéités de petite taille ($L = 1.5$ cm) et de faibles variations de constante diélectrique ($std = 0.15$) a) obtenu avec une transformée de Fourier inverse IFFT, b) obtenu avec MUSIC.	129
4.13	Performances de MUSIC en fonction de l'hétérogénéité du milieu : a) Erreur relative sur l'estimation de la constante diélectrique en fonction de la taille des hétérogénéités (L) et de l'écart type des variations de constante diélectrique (std), b) Erreur relative sur l'épaisseur de la couche supérieure (en mètre) en fonction de la taille des hétérogénéités (L) et de l'écart type des variations de constante diélectrique (std).	130
4.14	Radargrammes construits à partir de l'algorithme MUSIC sur les données simulées présentées dans cette section	130
4.15	Schéma du montage pour l'acquisition de mesures avec l'EM (sans antenne)	131
4.16	Pseudo-spectre MUSIC et réponse temporelle (IFFT) a) de la mesure 1, b) de la mesure 5.	132
4.17	Mesures sur plaque métallique : a) Radargramme obtenu avec une IFFT, b) Radargramme obtenu avec MUSIC.	133

5.1	Cellule de Yee, les composantes du champ électrique sont calculées sur le milieu des arêtes et les composantes du champ magnétique sur le milieu des faces	137
5.2	Visualisation d'un milieu modélisé sous TEMSI-FD	138
5.3	Surfaces rugueuses générées pour différentes valeurs de longueur de corrélation l_c (écart type des hauteurs σ_h fixé à 5 cm)	140
5.4	Surface rugueuse : a) Photo prise par la caméra de Pathfinder IMP (<i>Imager for Mars Pathfinder</i>) b) Reconstitution 3D à partir de la stéréo caméra du lander Pathfinder (IMP)	140
5.5	Illustration des étapes correspondant à une itération du processus. À chaque itération, 8 nouveaux cubes sont générés par le modèle	141
5.6	Coupe d'un milieu généré par TEMSI-FD à partir de la méthode diamant-carré pour plusieurs valeurs du nombre d'itérations N, (H et F sont fixées)	142
5.7	Modélisation du terrain d'expérimentation avec TEMSI-FD	142
5.8	Comparaison entre les données expérimentales et les données simulées sous TEMSI-FD sur le terrain d'expérimentation ("Mars Yard") : a) Photo du terrain d'expérimentation, b) Radargramme expérimental, c) Radargramme simulé sous TEMSI-FD	143
5.9	Modélisation d'un chenal enfoui sous TEMSI-FD : a) Chenal enfoui dans le désert de Kau, Hawaii, b) modèle géoélectrique du chenal enfoui, c) Radargramme simulé sous TEMSI-FD, il correspond au modèle géoélectrique du sous sol présenté en b), d) Radargramme migré. Extrait de [Ciarletti et al., 2017a]	144
5.10	Modélisation d'un polygone de dessiccation sous TEMSI-FD : a) Modèle géoélectrique de la fente et son radargramme associé b) Modèle géoélectrique de la fente et d'une deuxième couche avec son radargramme associé. Extrait de [Ciarletti et al., 2017a]	145
5.11	a) Vue 3D du volume de calcul où l'on voit les antennes de WISDOM (en rouge) à 38 cm au dessus du sol, qui est divisé en trois zones avec différentes densités de roches (en vert). Les flèches rouges montrent le déplacement des antennes sur 3.3 m, b) vue du dessus du volume de calcul, c) Radargramme simulé, d) Radargramme migré. Extrait de [Ciarletti et al., 2017a]	146
5.12	Couche de glace souterraine simulée sous TEMSI-FD : a) Milieu homogène, b) Milieu homogène avec interfaces rugueuses, c) Milieu non-homogène avec interfaces rugueuses	147
5.13	Radargrammes obtenus sur les milieux modélisés sous TEMSI-FD présentés sur la Figure 5.12, a) Radargramme d'un milieu homogène avec interface lisse, b) Radargramme d'un milieu homogène avec interfaces rugueuses, c) Radargramme d'un milieu non homogène avec interfaces rugueuses	148
5.14	Constante diélectrique estimée à partir de la méthode de l'écho de sol sur des données simulées : a) Modèle à une couche modélisé sous TEMSI-FD, b) Comparaison entre la constante diélectrique en entrée du code et celle estimée par la méthode présentée en 5.2.1	150
5.15	Mesures sur le Terrain d'expérimentation : a) avec la sonde ThetaProbe ML2x, b) Le GPR SIR-4000 GSSI, c) Le prototype de WISDOM	151
5.16	Constante diélectrique estimée avec la sonde Thetaprobe : a) Carte de la constante diélectrique du terrain d'expérimentation, b) Constante diélectrique estimée sur les profils P1, P2, P3 et P4 (Figure 5.15c)	152
5.17	Mesures sur le Terrain d'expérimentation : a) Photo du dispositif expérimental, b) Radargramme obtenu avec le SIR 4000, 900 MHz, c) Radargramme obtenu avec le SIR 4000, 400 MHz	152
5.18	Constantes diélectriques estimées à partir des mesures sur le Mars yard avec le SIR-4000 (antennes de 400 et 900 MHz)	153
5.19	Valeurs de la constante diélectrique ϵ'_r estimée à partir de l'écho de surface sur le terrain d'expérimentation pour les deux modes en co-polarisation de WISDOM	154

5.20	Paramètre des surfaces rugueuses générées, σ_h, l_c sont les paramètres d'entrée et σ'_h, l'_c les paramètres calculés sur les surfaces modélisées : a) Longueur de corrélation calculé l'_c sur les surfaces générées en fonction des paramètres d'entrée (σ_h, l_c), b) écart-type des hauteurs σ'_h calculé sur les surfaces générées en fonction des paramètres d'entrée (σ_h, l_c), c) Paramètre Z_s en fonction des paramètres calculés sur surfaces générées en fonction des paramètres d'entrée (σ_h, l_c)	155
5.21	Evaluation de la constante diélectrique sur les surfaces rugueuses modélisées : a) Longueur de corrélation estimée l''_c à partir des radargramme obtenus sur les surfaces modélisées en fonction des paramètres d'entrée (σ_h, l_c), b) Ecart-type des hauteurs σ''_h estimé à partir des radargrammes obtenus sur les surfaces modélisés en fonction des paramètres d'entrée (σ_h, l_c), c) Erreur relative sur la constante diélectrique $\Delta\epsilon$ calculée à partir de l'écho de sol en fonction des paramètres calculés sur surfaces modélisés en fonction des paramètres d'entrée (σ_h, l_c)	155
5.22	Evaluation de l'erreur relative sur la profondeur calculée à partir de la constante diélectrique estimée sur les surface rugueuses (σ_h, l_c) : a) Profondeur estimée $Z(m)$, b) Erreur relative sur la profondeur $\Delta Z(m)$	157
5.23	a) Milieu simulé sous TEMSI-FD b) Constante diélectrique ϵ'_r estimée à partir de l'écho de surface, en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure $d1$ et de sa constante diélectrique	157
5.24	Signature radar d'un réflecteur en sous-sol	158
5.25	Estimation de la constante diélectrique à partir de la signature de réflecteurs dans l'air. Les points rouge représentent les points expérimentaux à partir desquelles l'ajustement est réalisé	159
5.26	Principe du code de lancer de rayon	160
5.27	Valeurs de ϵ'_r estimées à partir d'une signature d'un réflecteur enfoui en fonction de sa profondeur et de la permittivité du milieu. a) avec un ajustement fait sur 61 points b) avec un ajustement fait sur 11 points au voisinage du sommet	161
5.28	a) Antennes de WISDOM (WAA), b)Principe de la synthèse additive (RVB) et application dans la visualisation des données polarimétriques de WISDOM.	162
5.29	Mesures polarimétriques effectuées lors de la campagne de mesures conduite dans les grottes glacées du Dachstein, en Autriche (voir Chapitre 1). Ces mesures sont visualisées par utilisation de la synthèse additive.	163
5.30	a) Photo du site d'atterrissage de Pathfinder prise par la sonde (crédits : NASA), b) Répartition des roches. La taille des cercles indiquent la taille des roches et leur couleur donne une indication sur leur forme [Yingst et al., 2007]	164
5.31	Cibles (de gauche à droite) : sphère métallique de 10 cm de diamètre, galet (roche lisse), roche anguleuse, sphère métallique de 5 cm de diamètre et ensemble de petites (<5 cm) roches.	164
5.32	Mesures sur cibles suspendues : a) en co-polarisation 00, b) en cross-polarisation 01 . .	165
5.33	Principe de localisation des cibles à partir des données polarimétriques de WISDOM : a) Tâches au sol, b) Signature radar du réflecteur en 00 et 11.	165
5.34	Mesures sur une cible suspendue : a) Dispositif expérimental, b) Photo du dispositif expérimental.	166
5.35	Mesures polarimétriques en fonction de la localisation (centre, gauche et droite) de la sphère métallique.	167
5.36	a) Radargramme acquis sur le terrain d'experimentation, b) Radargramme de contour, c) Radargramme où chaque classe a une couleur différente	169
5.37	Algorithme de détection, condition de formation des classes	169

5.38	Détection automatique de signatures hyperboliques sur le terrain d'expérimentation : Radargramme où figure les différentes classes, b) Détection d'hyperbole sur le radargramme : les points rouges représentent les points sur lesquelles sont réalisés l'ajustement, les pointillés indiquent de fausses détections, c) Estimation de la constante diélectrique à partir des signatures hyperboliques détectées	170
5.39	Position des sites de mesures dans le "Colorado Provençal".Crédit : réalisée à partir de Googlemap	171
5.40	Mesures sur le site 2 du Colorado provençal	172
5.41	Radargramme acquis avec le prototype de WISDOM sur le site 2	173
5.42	Radargramme et son interprétation	174
5.43	Radargrammes acquis sur le site n°2 avec le radar commerciale SIR-4000/GSSI avec des antennes de 400, 900 et 1600 MHz. L'échelle verticale est adaptée à la profondeur de pénétration des fréquences utilisées	175
5.44	Analyse de la texture des radargramme par le calcul de l'entropie a) Entropie du radargramme après filtrage, b) contour qui délimite les différentes textures du radargramme	176
5.45	Détection des pentes apparentes θ : a) classes avec une pente apparente inférieure à 10° , b) classes avec un pente apparente supérieure à 10°	177
5.46	Détection automatique d'hyperboles : les hyperboles (vertes) sont des hyperboles mathématiques qui résultent de l'ajustement sur les points expérimentaux (points rouge) par la méthode des moindres carrés	177
5.47	Estimation de la constante diélectrique à partir de l'écho de sol sur le site n°2 du Colorado Provençal	178
5.48	Estimation de la constante diélectrique à partir des réflecteurs en sous-sol sur le site n°2 du Colorado Provençal	179
5.49	a) Photo du site n°4 au Colorado Provençal, b) Zoom sur quelques centimètres de la couche consolidée qui permet de voir une stratification fine c) Radargramme acquis avec WISDOM sur le site n°4 où l'on voit des couches (flèches)	180
5.50	Estimation de la constante diélectrique en laboratoire sur des échantillons provenant du Colorado Provençal. Courbe rouge : échantillon rouge, courbe bleue : échantillon blanc	181
5.51	Radargramme acquis avec WISDOM sur le site n°2 dans le Colorado provençal, le temps de propagation a été convertit en profondeur grâce à l'estimation de la constante diélectrique	182
5.52	Radargramme polarimétrique en fausses couleurs (Rouge : 00, Vert : 11, Bleu 01) acquis avec WISDOM sur le site n°2 dans le Colorado provençal, le temps de propagation a été convertit en profondeur grâce à l'estimation de la constante diélectrique	183

Liste des tableaux

1.1	Estimation de la constante diélectrique d'analogues martiens. Code couleur : gris (analysé dans des fréquences voisine (450 MHz-1.5 GHz) de celles de WISDOM), blanc (analyse entre 10 et 200 MHz)	33
1.2	Estimation de la constante diélectrique de formations martiennes à partir des données MARSIS, SHARAD et TECP/Phoenix. Code couleur : MARSIS (blanc), SHARAD (cyan), TECP/Phoenix (orange)	35
1.3	Radars sondeurs martiens	43
2.1	Caractéristiques et performances attendues du radar WISDOM	49
2.2	Caractéristiques attendues du système d'antennes de WISDOM	51
2.3	Tests et qualifications des modèles de WISDOM	54
2.4	Paramètres du modèle d'impulsion sino-gaussienne (Equation(2.2)) pour chaque configuration de mesures	57
2.5	Principales campagnes de mesures avec le prototype de WISDOM	81
3.1	Fenêtres d'apodisation	87
3.2	Méthodes de réduction des parasites	112
4.1	Ecart théorique estimés $\delta t_{theorique}$ à partir de la mesure du temps de propagation dans chaque câble à l'analyseur de réseaux	132
4.2	Ecart en temps estimés par IFFT et MUSIC.	132
5.1	Moyenne et écart-type des valeurs de constante diélectrique en fonction des instruments	154
5.2	Moyenne et écart-type des valeurs de constante diélectrique sur les sites de la campagne de mesure Figure 5.39	180