



**HAL**  
open science

# Etude du comportement électromagnétique des structures pédologiques complexes pour la télédétection micro-ondes spatiale passive et active.

François Demontoux

► **To cite this version:**

François Demontoux. Etude du comportement électromagnétique des structures pédologiques complexes pour la télédétection micro-ondes spatiale passive et active.. Electromagnétisme. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2011. tel-00670142

**HAL Id: tel-00670142**

**<https://theses.hal.science/tel-00670142>**

Submitted on 14 Feb 2012

**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.

# Dossier

En vue de l'obtention du diplôme  
d'Habilitation à Diriger des Recherches

Spécialité : Electronique

Présenté à

## L'Université Bordeaux 1

Par **François Demontoux**

Maître de Conférences, Université Bordeaux 1

Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système, IMS, UMR CNRS 5218

---

Etudes du comportement électromagnétique des structures  
pédologiques complexes dédiées aux applications de  
télédétection micro-ondes spatiale passive et active.

---

Soutenu le : 12 Décembre 2011

Après avis de :

Mme Hélène Roussel

Rapporteur

Mr Laurent Ferro Famil

Rapporteur

Mr Jean Paul Caltagirone

Rapporteur

Devant la commission d'examen formée de :

Mme Valérie Vignéras

Examineur

Mr Jean Pierre Wigneron

Examineur

Mr Philippe Paillou

Examineur

# Dossier en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches

## Table des matières

<b>1 CURRICULUM VITAE</b>	<b>4</b>
1.1 Etat civil	4
1.2 Formation	5
1.3 Expériences Professionnelles et Positions Administratives	6
<b>2 ACTIVITES D'ACCUEIL ET DE SUIVI DES ETUDIANTS HANDICAPES</b>	<b>7</b>
2.1 Cellule PHASE	7
2.2 Création et animation d'un groupe de travail national, participation au programme Européen « Inclusive Education in Action »	10
2.3 Coordination du Groupe Thématique de Travail Handicap du PRES de Bordeaux	10
2.4 Responsable de l'accueil et du suivi des étudiants en situation de handicap à l'ENSCBP et l'IPB.	11
2.5 Implication dans le projet NUB (Nouvelle Université de Bordeaux)	12
2.6 Autres actions	12
<b>3 ACTIVITES ADMINISTRATIVES ET D'ENSEIGNEMENT</b>	<b>14</b>
3.1 Introduction	14
3.2 IUT GEII (2001-2011)	14
3.2.1 Informatique Industrielle	14
3.2.2 APP	14
3.3 Licence SARI	15
3.3.1 Réseaux et technologies d'échanges d'informations sans fil.	15
3.3.2 Cryptographie et sécurité des réseaux	17

3.4 Alternance	17
3.5 TP Maîtrise EEA (2000-2002)	17
3.6 ENSCBP (2000-2002)	18
3.7 Ateliers pour la fête de la science	18
3.8 Service d'enseignement 2009-2010	19
3.9 Encadrements	19
3.10 Autres activités exercées	20
<b>4 ACTIVITES DE RECHERCHE</b>	<b>22</b>
4.1 Structure d'accueil et contexte scientifique	22
4.2 Le sol : un milieu complexe qui nécessite de nouveaux outils d'analyse	23
4.2.1 Le sol	23
4.2.2 Pourquoi étudier les sols ?	24
4.2.3 Les fonctions du sol	24
4.2.4 Les constituants du sol.	25
4.2.5 Profil des sols	28
4.2.6 Le sol est le siège de nombreux phénomènes	31
4.2.7 L'eau dans le sol	32
4.2.8 La température du sol	36
4.2.9 Résolution de l'équation de la chaleur et de l'équation de Richards.	38
4.3 Outils d'analyse des sols développés	38
4.3.1 Bancs de mesures	38
4.3.2 Outils de calcul	74
4.4 Synthèse des principaux projets de recherche	95
4.5 Stratégie scientifique	101
4.6 Perspectives de recherche	103
4.6.1 Perspectives méthodologiques	104
4.6.2 Perspectives applicatives	105
4.7 Coopérations industrielles et valorisation	108
4.7.1 Cellule de transfert technologique IMS Transfert-A2M de l'IMS.	108
4.7.2 Laboratoire MASTER	109
4.8 Exemples de collaborations	110
4.9 Production scientifique (Liste complète en Annexe 1)	110
4.10 Encadrement scientifique	110

4.11	Programmes de financements de recherche conduits et obtenus	112
4.12	Reviewing, expertises, organisation d'évènements scientifiques et membership	113
4.13	Bibliographie	114
<b>ANNEXE 1 – LISTE DES PUBLICATIONS</b>		<b>130</b>
<b>ANNEXE 2 – EXEMPLES DE PUBLICATIONS</b>		
<b>ANNEXE 3 – EXEMPLES DE PROJETS DU GTT HANDICAP</b>		

# 1 Curriculum Vitae

## 1.1 Etat civil

**Nom :** Demontoux  
**Prénom :** François  
**Date de naissance :** 10 Août 1967 à Agen (47)  
**Nationalité :** Française  
**Situation de famille :** Marié, deux enfants

**Coordonnées personnelles :** 25 Ter rue Albert Schweitzer  
33320 Eysines  
Tél. : 05 56 16 07 01

**Coordonnées professionnelles :** Equipe CEMT / MCM / IMS – UMR 5218

Site ENSCBP

16 avenue Pey-Berland

33607 Pessac

Tél. : 05 40 00 27 08

Fax. : 05 40 00 66 31

E-mail : [francois.demontoux@ims-bordeaux.fr](mailto:francois.demontoux@ims-bordeaux.fr)

## **1.2 Formation**

**1996-1999** Doctorat de l'Université Bordeaux 1 – spécialité Instrumentation et mesures.

Mention : Très honorable avec félicitations du jury.

Sujet : "Contribution à l'amélioration des mesures de permittivité à 2450 MHz et au développement d'un applicateur dédié à la pasteurisation flash à l'aide de modélisations électromagnétiques et thermiques"

Soutenu le 14 décembre 1999 devant le jury composé de :

M. Jean Charles Bolomey, Professeur – Supélec Gif-sur-Yvette (91) – Président

Mme R. Blindt Docteur, Ingénieur – Unilever Research, Colworth Lab. Bedford (England)

M. Jean Paul Caltagirone, Professeur – Laboratoire MASTER-ENSCP (33)

M. Yves Danto, Professeur – Laboratoire IXL (33)

M. Serge Lefeuvre, Professeur – INP ENSEEIHT (31)

M. Claude Marzat, Directeur de Thèse, Professeur – Laboratoire MASTER-ENSCP (33)

M. Jean Paul Parneix, Professeur – Laboratoire PIOM-ENSCP (33)

M. Paul Rabette, Maître de conférences, Université Paul et Marie Curie Paris VI (75)

M. Georges Roussy, Directeur de recherches CNRS, Laboratoire de Spectroscopie et Techniques Micro-ondes, Université Henri Poincaré Nancy 1 Vandoeuvre-lès-Nancy (54)

**1995-1996** D.E.A. Instrumentation et mesures - Mention B - Université de Bordeaux 1

**1994-1995** Maîtrise E.E.A : 1 tronc commun (Mention B) et 4 options (3 Mentions B-1 Mention TB)

**1993-1994** Licence E.E.A. - Mention B

**1990-1993** Service militaire (1990-1991)

Emploi dans la société Process Vision (1991)

Hospitalisation prolongée (1991-1993)

**1989-1990** D.E.S sciences physiques au laboratoire de physique expérimentale et micro-ondes (Mention TB)

**1987-1989** D.U.T. génie électrique et informatique industrielle (**option réseau**).

### **1.3 Expériences Professionnelles et Positions Administratives**

**Depuis 2002** Maître de Conférences 63° section, IUT de l'Université Bordeaux 1, Département GEII depuis le 1° Septembre 2002

**2001** Chercheur contractuel au Laboratoire PIOM

**1999-2000** ATER Université Bordeaux 1 – Laboratoire MASTER

**1996-1999** Moniteur Université Bordeaux 1



## **2 Activités d'accueil et de suivi des étudiants handicapés**

**L'Université Bordeaux1 m'a accordé en 2011 une Prime de Responsabilité Pédagogique pour mon investissement dans ce travail.**

### **2.1 Cellule PHASE**

Depuis 2004 je fais partie de la cellule PHASE de l'Université Bordeaux 1. La Cellule PHASE a pour rôle d'ouvrir les formations dispensées à l'université Bordeaux 1 à des étudiants (artistes confirmés, personnes en situation de handicap, personnes en situation de longue maladie et sportifs de Haut Niveau) qui ne pourraient pas y accéder par suite d'une incompatibilité d'emploi du temps avec des activités extra-universitaires (répétitions ou concerts, séances de soins ou de kinésithérapie, entraînements ou compétitions,...) ou d'inaccessibilité physique. L'encadrement proposé à l'étudiant PHASE lui offre un accompagnement de sa scolarité avec la possibilité d'aménager sa scolarité dans le temps (2,3 ou 4 ans pour un DUT par exemple), de bénéficier de cours de compensation individuels ou encore d'effectuer des aménagements techniques pour les étudiants en situation de handicap (tiers temps, secrétaire personnel...).

Dans le cadre de cette dernière mission, une réflexion a été entamée au sein de l'équipe PHASE en collaboration avec des enseignants des départements Génie Electrique et Informatique Industrielle et Mesures Physiques de l'IUT Bordeaux 1 afin de permettre aux étudiants handicapés d'avoir la possibilité de réaliser les mêmes travaux pratiques que leurs camarades. Cela passe par un travail d'adaptation du poste de travail de l'étudiant et des maquettes de travaux pratiques.

Les métiers liés aux formations de l'EEA (Electronique, Electrotechnique, Automatismes) par exemple, font de plus en plus appel à des outils qui permettent de créer des interfaces Hommes-Machines. Les actions physiques complexes nécessaires à ces métiers se réduisent considérablement ce qui rend ces métiers accessibles à des personnes handicapées. Au-delà de notre mission de formation qui doit refléter cette évolution, nos universités ont aussi une mission d'information en direction des industriels afin de réduire leurs a priori éventuels quant au recrutement de personnes handicapées. Nous devons donc ouvrir nos formations aux

étudiants handicapés. Pour cela un travail est déjà entamé qui vise à améliorer l'accessibilité des locaux à ces personnes. Il nous faut aussi adapter certains de nos postes de travail de travaux pratiques pour les rendre utilisables par nos étudiants handicapés.

Nous avons entamé cette démarche au sein de la cellule PHASE. Notre projet consiste à édifier une base d'informations qui rendra plus facile l'application de notre démarche dans d'autres universités. La mutualisation des connaissances acquises au sein d'un site web dédié permettra de s'enrichir des expériences à travers la France entière. La communication autour de ce site permettra aux industriels de découvrir des applications concrètes de la mise en accessibilité d'un poste de travail dans le cadre des activités de l'EEA. Cette base de connaissance regroupera par exemple des études comparatives du prix de certains équipements (cartes d'interface, souris adaptées, attelles ...) des solutions de maquettes de TP (Travaux Pratiques) adaptées (accès aux points de mesure facilités, commutation de composants, sondes de mesure adaptées, expériences pédagogiques ...) et des informations sur les organismes qui peuvent participer au financement de l'achat de ces équipements (AGEFIPH en milieu professionnel, DDTEFP, FIPHFP pour la fonction publique ...).

Je propose chaque année depuis 2006 des projets aux étudiants (IUT, école d'ingénieur) autour de l'utilisation des technologies de l'information et de la communication au service de l'enseignement pour les étudiants handicapés.

En 2007, nous avons développé une IHM pour un étudiant tétraplégique dans le cadre de TP d'électronique. Le travail réalisé a permis à l'étudiant handicapé d'effectuer des manipulations et des prises de mesure. Il a pu ainsi atteindre une grande partie des objectifs pédagogiques de ce TP en le réalisant au même titre que ses camarades. La réussite de cette expérience nous a conduit à proposer régulièrement des sujets de projets tuteurés aux étudiants de DUT afin d'enrichir notre base de données et notre bibliothèque de matériel. Le matériel acheté ou développé dans le cadre de ce projet est destiné à être mis à disposition des filières de formation de l'université de Bordeaux 1 qui accueillent un public handicapé. Une communication envers les entreprises et le grand public (fête de la science ...) a été menée. Un dossier d'information a été réalisé au sujet de l'adaptation de ce poste de travail. L'étudiant handicapé pourra l'utiliser lors de sa recherche d'emploi. Ce dossier présente les

aides techniques que nous avons étudiées afin de démontrer que l'emploi d'une personne handicapée dans les métiers de l'EEA n'est pas une utopie.

Le projet proposé en 2009, par exemple, était lié à l'arrivée d'un étudiant handicapé moteur au département Génie Civil de l'IUT Bordeaux 1. L'objectif de la formation dispensée dans ce département est de former en 2 ans des collaborateurs polyvalents capables de participer à des fonctions de responsabilité aux différentes étapes de l'acte de construire : définition du projet, études, préparation et exécution des travaux, maintenance. Les métiers auxquels se destinent les étudiants de cette formation sont très variés (conducteur de travaux, chef de chantier, contrôleur de travaux, technicien de bureau d'études, dessinateur – projeteur, technico-commercial du BTP...). Ces métiers sont ouverts aux personnes handicapés et le département en reçoit donc. Lors de la formation, les étudiants sont amenés à effectuer des manipulations en Travaux Pratiques (TP) pour connaître les différents appareils et techniques utilisés dans la construction. Cette année, ce département accueille un étudiant qui souffre de difficultés respiratoires. Sa présence dans des salles de TP à forte teneur en poussières (bétons...) est donc interdite. Cet étudiant se destine à travailler dans un bureau d'étude mais il doit toutefois pouvoir suivre l'ensemble des enseignements.

L'objectif de ce projet tuteuré était d'étudier et de mettre en œuvre un système qui permette à cet étudiant de suivre (voir, écouter) et participer (poser des questions, effectuer des manipulations à distance) à ces TP.

Les difficultés de mise en œuvre sont nombreuses. Tout d'abord nous devons tenir compte des problèmes moteurs potentiels des utilisateurs en termes de frappe sur un clavier, de manipulation d'un micro ou d'une souris par exemple. D'autres contraintes telles que l'absence de réseau informatique devaient être prises en considération. Enfin une modification des fascicules d'enseignement a dû être envisagée.

Ce système sera utilisé afin de permettre à un étudiant handicapé, un étudiant hospitalisé ou immobilisé temporairement à son domicile de poursuivre les enseignements ou de suivre une visite d'entreprise.

## **2.2 Création et animation d'un groupe de travail national, participation au programme Européen « Inclusive Education in Action »**

Nous poursuivons nos travaux et créons de nouvelles collaborations locales (Ecole de Cognitive ...) et nationales (Michel Cartier – Université de Dijon, ...) sur ce thème.

Nous savons que d'autres établissements mènent des travaux comparables. Eric Woïgard (Chargé de mission Handicap Bordeaux 1), Miche Cartier (chargé de mission université de Bourgogne) et moi-même avons pensé qu'il serait important de regrouper ces volontés et ces compétences afin de mutualiser, de partager et de diffuser nos travaux.

Soutenus par Mme Annie Bretagnolle (Chargée de mission pour l'accompagnement des étudiants handicapés, Sous-direction de l'égalité des chances et de la vie étudiante, Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche) nous avons proposé la création d'un groupe national de travail sur cette thématique. Une annonce a été faite dans ce sens lors des journées des responsables d'accueil des étudiants handicapés à Lyon en Mars 2011.

Le premier objectif de ce groupe sera d'identifier les entités qui travaillent dans ce domaine au sein des établissements universitaires français. Après cet inventaire, nous pourrons proposer à ces personnes d'intégrer le groupe de travail afin de créer un réseau national. La mission de ce groupe sera d'échanger sur les expériences de chacun mais aussi d'engager des actions jugées prioritaires et de permettre le déploiement au niveau national de solutions s'avérant utiles aux étudiants en situation de Handicap.

Je suis en charge de la création de ce groupe de travail.

J'ai organisé une première journée de rencontre dans le cadre de ce groupe national de travail le 28 Juin 2011 à Bordeaux (programme de cette journée en Annexe 4).

J'ai été contacté afin d'intégrer ces actions au sein d'un projet de l'agence Européenne en collaboration avec l'UNESCO : Inclusive Education in Action <http://www.inclusive-education-in-action.org/iea/>

## **2.3 Coordination du Groupe Thématique de Travail Handicap du PRES de Bordeaux**

Dès sa création, le PRES de Bordeaux a souhaité voir émerger des Groupes de Travail Thématiques afin de créer des projets communs aux différents établissements qui le

composent. C'est ainsi qu'est né le GTT handicap qui dépend de la commission Vie Universitaire du PRES. Il a dans un premier temps regroupé les acteurs du Handicap dans les universités 1,2,3 et 4 qui travaillaient déjà en Inter U et dont je faisais partie. Ce GTT a été ouvert à tous les membres fondateurs et associés au PRES. Aujourd'hui ce GTT regroupe des représentants des 4 universités mais aussi des représentants de BEM, de l'IEP, de l'IPB, du CROUS, du SIUMPS et de la commission VU du PRES. J'ai été nommé par, ces membres, coordinateur de ce GTT. Cette fonction consiste à animer ce GTT et à être un correspondant avec le PRES et les autres structures. Le but de ce GTT est de conduire des projets inter établissement visant à améliorer l'inclusion de nos étudiants handicapés. Au sein de ce GTT nous avons créé des groupes projets en charge des différents projets que nous menons. A titre d'exemple deux fiches de description de projets sont jointes en annexe 3.

#### **2.4 Responsable de l'accueil et du suivi des étudiants en situation de handicap à l'ENSCBP et l'IPB.**

Depuis 2008, François Cansell puis Jean Marc Heintz successivement directeurs de l'ENSCBP (Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Biologie et de Physique) m'ont demandé de m'occuper de l'accueil et du suivi des étudiants handicapés dans cet établissement où mon équipe de recherche est hébergée. Cette tâche consiste à participer à l'aménagement de la scolarité d'étudiants handicapés et à apporter mon « expertise » dans ce domaine à cet établissement. J'ai ainsi été amené à participer au diagnostic accessibilité de l'ENSCBP, par exemple, dans le cadre de l'opération CAMPUS.

En 2009, François Cansell, directeur de l'IPB (Institut Polytechnique de Bordeaux) m'a demandé d'être le représentant Handicap de l'IPB. L'IPB regroupe différentes écoles d'ingénieurs qui n'ont pas encore la même expérience de l'accueil et du suivi des étudiants handicapés. Je propose des concepts et des actions qui ont pour but de structurer au sein de l'IPB ce travail. Cela a entraîné, par exemple, la nomination dans chaque école d'un référent handicap et la mise en relation de ces établissements avec le réseau Bordelais des chargés d'accueil et de suivi. J'ai aussi été amené à présenter le volet Handicap de l'IPB dans le cadre de l'évaluation AERES de l'IPB.

## **2.5 Implication dans le projet NUB (Nouvelle Université de Bordeaux)**

"Les Universités Bordeaux 1, Bordeaux 2, Bordeaux IV, l'Institut d'Études Politiques (IEP - Sciences Po Bordeaux) et l'Institut Polytechnique de Bordeaux (IPB) ont élaboré un projet stratégique commun "Université de Bordeaux", marquant leur volonté partagée de construire un grand établissement universitaire unique, innovant et de premier plan dans l'espace international et européen de l'enseignement supérieur et de la recherche."

Des groupes de réflexions ont été formés. Leur première mission est d'effectuer un état des lieux des pratiques et des missions des services dans les établissements. Puis ils doivent mettre en évidence les axes de travail prioritaires sur lesquels l'organisation de la NUB devra se concentrer. Ils souligneront aussi les bonnes pratiques desquelles la NUB devra s'inspirer et les points de vigilance auxquels elle devra prêter une attention particulière. L'objectif est donc de lancer un vaste chantier de réflexion qui doit conduire à des propositions qui participeront à l'édification de l'organisation de la NUB.

**Depuis Mai 2011 je suis membre du groupe de réflexion "gestion de la vie universitaire". Je suis plus particulièrement animateur du sous groupe handicap.**

## **2.6 Autres actions**

► Participation au projet ATAcc web (Approche Transversale de l'Accessibilité Web : développement d'un prototype pédagogique d'accompagnement et de formation à l'accessibilité web). L'objectif de ce projet est d'élaborer un prototype pédagogique afin de sensibiliser et de former des futurs développeurs ou spécialistes en ingénierie du web au concept d'accessibilité web. Une vision stéréotypée consiste à l'associer au domaine du handicap, ce qui ne concernerait qu'un public restreint. Or l'accessibilité web, intéresse non seulement les personnes en situation de handicap, mais aussi les concepteurs de sites, car elle permet de valoriser son site (meilleur référencement) et son contenu (organisation, facilité de navigation). Après un état de l'art et une analyse disciplinaire transversale, notre outil reposera sur les principes de Formations Ouvertes à Distance (ressources en ligne, simulation et scénarios d'usage) afin de pouvoir modifier les représentations des concepteurs et usagers et de réorienter les pratiques de développement des ingénieurs et informaticiens.

Ce projet a obtenu de l'IPB (Institut Polytechnique de Bordeaux) un soutien financier dans le cadre d'**actions de recherche interdisciplinaire en ingénierie**.

- ▶ Création d'un blog vidéo de présentation de certains de nos travaux <http://iuttel.blog-video.tv/>
- ▶ Développement en cours d'un site web « laboratoire » mettant en œuvre les nouvelles normes d'accessibilité handicap web.
- ▶ Membre du comité d'organisation des journées nationales des responsables d'accueil et de suivi des étudiants handicapés à Bordeaux en 2010.
- ▶ Membre du comité d'organisation de la journée de rencontre Aquitain entre les enseignants référents handicap (des lycées et collèges) et les structures d'accueil et de suivi universitaires en 2009.
- ▶ Participation à l'analyse du diagnostic accessibilité de l'Université de Bordeaux 1 dans le cadre de l'opération CAMPUS.

## **3 Activités administratives et d'enseignement**

### **3.1 Introduction**

Depuis mon recrutement en tant que maître de conférences je me suis investi dans le fonctionnement et l'animation pédagogique du département Génie Electrique et Informatique Industrielle de l'IUT de l'Université Bordeaux 1. Cela s'est principalement concrétisé par la mise au point de cours, de Travaux Dirigés, de Travaux Pratiques et d'ateliers pour la fête de la science. Je me suis aussi impliqué dans des tâches plus administratives comme par exemple la gestion de l'alternance en licence SARI. Enfin je me suis investi dans l'accueil et le suivi des étudiants en situation de handicap (Voir paragraphe 2).

### **3.2 IUT GEII (2001-2011)**

#### **3.2.1 Informatique Industrielle**

Mes activités d'enseignement en informatique Industrielle (GEII) m'ont amené à enseigner le langage VHDL (TP 1<sup>o</sup> année), le langage C (TD et TP de 1<sup>o</sup> année) et la programmation de microcontrôleur (68HC11, 68HC12, TD et TP en 1<sup>o</sup> et 2<sup>o</sup> année). J'ai participé à la rédaction de fascicules et l'écriture de sujets d'examens

#### **3.2.2 APP**

La majorité de nos étudiants arrivent au département sans réelle motivation. Pour tenter de remédier à cette difficulté, nous avons mis en œuvre des pédagogies actives. Cette expérience d'Apprentissage Par Problèmes (APP) a été proposée aux étudiants de 1<sup>ère</sup> année IUT GEII dès 2009. Une équipe pédagogique à laquelle j'appartiens a mené ce projet.

Chaque APP se décompose en trois parties encadrées : séance aller, séance retour et cours de restructuration. Lors de la séance aller, (1h30) un problème est proposé aux étudiants qui travaillent alors par groupe de 6 ou 7. Le groupe est imposé en début de semestre, et reste constant pour toutes les séances d'APP. Un tableau est à sa disposition, un scribe doit y noter les avancées du travail, ce qui permet à l'enseignant de suivre et de guider l'évolution de l'apprentissage. Un animateur est chargé au sein du groupe de mener les débats. Un enseignant supervise deux groupes différents.



Trop difficile à résoudre avec leurs connaissances antérieures, le problème a pour but de leur faire définir des objectifs d'apprentissage. Une série d'exercices, extrêmement progressifs, ainsi qu'un support de cours leur est fourni à la fin de cette première séance encadrée. Ils disposent ensuite d'un créneau horaire de 6 heures pour travailler en autonomie sur ces exercices. Une salle est mise à leur disposition, mais ils sont libres d'organiser leur travail à leur guise. Lors de la séance retour (1h30) le groupe doit se reconstituer et faire un bilan des connaissances acquises. A la fin de cette séance, les étudiants doivent lister un certain nombre de points sur lesquels ils souhaitent encore des éclaircissements. Un cours de restructuration d'une heure quinze, donné à l'ensemble des 56 étudiants, vient conclure cet APP. Il est fondé sur les questions soulevées par les étudiants, et doit aussi permettre d'aborder le problème suivant.

### **3.3 Licence SARI**

La licence Systèmes Automatisés et Réseaux Industriels est la première licence professionnelle créée par le département GEII en 2004. Je fais partie de l'équipe pédagogique qui a monté cette formation et qui l'anime. Outre des activités administratives, cette implication m'a amenée à créer dès 2004 des modules d'enseignements en réseaux et échanges d'informations sans fils (cours, TD et TP) et en cryptographie et sécurité des réseaux (cours, TD et TP). Depuis 2010 j'ai repris le module "transmission numérique" précédemment enseigné par Gérard Couturier.

#### **3.3.1 Réseaux et technologies d'échanges d'informations sans fil.**

Le module que j'ai élaboré traite des réseaux et technologies d'échanges d'informations sans fil. Outre une partie sur les aspects physiques de la propagation des ondes électromagnétiques, ce module aborde les réglementations en vigueur en termes de normes d'exposition. Cet enseignement regroupe aussi une description des protocoles Wifi, Bluetooth, ZigBee, WiMax et RFID par exemple.

La technologie de réseau sans fil WiFi trouve de plus en plus d'applications dans le domaine industriel que ce soit pour l'échange d'informations entre les personnes ou les équipements. Il a l'avantage de permettre une grande flexibilité du réseau mais nécessite des précautions d'installation pour être efficace (débit, fiabilité...). L'installateur d'un tel réseau

doit posséder des connaissances pour installer et configurer les matériels (points d'accès, cartes wifi) mais aussi des connaissances en propagation des ondes électromagnétiques qui véhiculent les informations. L'enseignement de cette technologie nécessite des travaux pratiques qui doivent permettre à l'étudiant de mettre en œuvre ces connaissances. J'ai mis en œuvre dans le cadre de travaux pratiques de licence SARI (2007-2009) des outils de calcul (logiciel HFSS-ANSOFT) pour permettre à l'étudiant de visualiser et ainsi de mieux maîtriser les phénomènes de propagation impliqués dans le fonctionnement d'un réseau WiFi.

Les technologies de réseaux sans fil sont de plus en plus répandues. Dans le cadre de mes enseignements, je suis amené à aborder les aspects techniques de ces technologies. Toutefois, l'expérience de la téléphonie mobile nous a montré les craintes que peuvent susciter ces produits auprès du grand public. Ces dernières proviennent de l'utilisation d'ondes électromagnétiques à des fréquences proches des fréquences de nos fours micro-ondes ménagers (2.45 GHz). Des études sont en cours depuis des années afin de déceler des effets éventuels sur l'organisme liés à l'utilisation prolongée des téléphones portables. Les réseaux sans fil de type Wifi ou ZigBee par exemple utilisent aussi des fréquences micro-ondes. D'autre part, les problèmes liés à la compatibilité électromagnétique des ondes avec les appareils électroniques doivent aussi être étudiés. La question de l'innocuité de ces technologies doit donc être abordée avec les étudiants. Ceux-ci pourront être amenés à installer ce type de matériel. J'ai intégré à l'enseignement des réseaux sans fil que j'effectue en licence SARI (2007-2011) un chapitre de cours traitant des normes d'exposition aux ondes électromagnétiques pour les êtres vivants et les appareils électroniques. Le but de cette démarche est de faire acquérir par l'étudiant des connaissances afin qu'il se forge une opinion et puisse fournir un discours éclairé aux futurs utilisateurs de ces réseaux. A cette fin, j'ai mis au point un outil de visualisation des répartitions de champs électromagnétiques. Cet outil utilisé en cours permet de comprendre l'environnement électromagnétique dans lequel nous vivons et de quantifier les valeurs de champs électromagnétiques qui nous traversent en fonction des applications (téléphonie, télévision, radio, WiFi, Bluetooth, ZigBee, four micro ondes ...)

### 3.3.2 Cryptographie et sécurité des réseaux

J'ai mis au point un module sur la cryptographie et la sécurité des réseaux. Ce module comprend des cours et des TD sur les techniques de chiffrement (Historique des codes de chiffrement, généralités, DES, AES, RSA) et la sécurité des réseaux (administration et sécurité, serveur radius 802.1X et EAP). Ce module comprend aussi des séances de TP qui permettent aux étudiants de mettre en œuvre certains de ces codes à l'aide du logiciel de calcul mathématique formel MapleV.

### 3.4 Alternance

En 2009 la licence SARI fut la première licence du département GEII à être proposée en alternance sous contrat de professionnalisation. Je fus un des acteurs majeur de cette évolution car je pense que ce mode de formation peut être très motivant pour nos étudiants et est un formidable tremplin vers le monde professionnel. Depuis 2009 je suis le responsable de l'alternance. Cela consiste à effectuer un travail d'information et de communication vers les entreprises et les étudiants. Du mois de Juin au mois de Septembre je dois m'occuper de la mise en contact des entreprises et des étudiants. Puis, en relation avec le service de la formation continue, le contrat de professionnalisation est rédigé puis signé. Durant l'année universitaire mon travail consiste à affecter à chaque étudiant un tuteur enseignant, suivre ces étudiants (gestion des fiches de présence...) et effectuer des visites en entreprises. Mon travail peut aussi consister à permettre d'anticiper certains enseignements pour des étudiants en alternance si ce module est indispensable à leur projet en entreprise. **L'Université Bordeaux1 m'a accordé en 2011 une Prime de Responsabilité Pédagogique pour mon investissement dans ce travail.**

### 3.5 TP Maîtrise EEA (2000-2002)

Les travaux pratiques (TP) en télécommunications permettent aux étudiants de se familiariser avec les différents instruments qui sont utilisés dans ce domaine. Ils peuvent ainsi mesurer des paramètres physiques qu'ils ont abordés en cours ou en travaux dirigés (coefficient de réflexion, gain d'antenne, matrice de transfert...). Les expériences élaborées pour les TP comprennent, par exemple, des analyseurs de réseaux ou des appareils de mesures de puissance. L'étudiant a ainsi accès à l'étude de divers phénomènes physiques (ondes

stationnaires...) à travers ses mesures. Il peut approfondir ainsi ses connaissances sur l'électromagnétisme. Pourtant il peut s'avérer que la mesure seule de divers paramètres ne suffise pas à l'étudiant pour comprendre certains phénomènes (diffraction des ondes...). Les diverses méthodes de calcul numérique (différences finies, éléments finis...) permettent d'accéder à un complément de connaissances. Nous pouvons par exemple visualiser la diffraction d'une onde sur un matériau alors que l'étudiant ne peut avoir accès qu'au coefficient de réflexion au niveau de l'antenne d'émission. Ces calculs peuvent être effectués sur des PC en des temps compatibles avec la durée d'un TP (quelques dizaines de minutes). L'utilisation de tels outils m'a permis de compléter les TP existants et a permis à l'étudiant de se familiariser avec des moyens de calcul de plus en plus répandus dans l'industrie. Pour avoir la possibilité de réaliser des simulations rapides, de divers bancs de mesure, le recours à des logiciels commerciaux était attractif. Malheureusement ces logiciels sont très chers. J'ai pu obtenir de la société Agilent Technologie l'obtention de licences enseignement du logiciel HFSS (simulation de structure hyperfréquences) à des conditions très avantageuses. Ceci a pu être possible grâce aux relations que j'avais pu créer avec cette société dans le cadre de mes recherches.

### **3.6 ENSCBP (2000-2002)**

Mise au point de sujets de Travaux Pratiques en simulation et modélisation des phénomènes électromagnétiques pour les élèves ingénieurs en troisième année à l'ENSCBP (Ecole Nationale Supérieure de Chimie et de Physique de Bordeaux) :

- Etude de structures absorbantes hyperfréquences à base de substrat multicouche et de réseaux bi périodiques de plaques métalliques avec le logiciel de modélisation de structures hyperfréquences HFSS .
- Etude de la détection d'objets enfouis à l'aide d'un radar avec le logiciel XFDTD
- Etude de structures multicouches à l'aide du logiciel SIMUMA
- Etude de la diffusion de structures réseaux avec le logiciel HERAKLES

### **3.7 Ateliers pour la fête de la science**

Depuis 2002 je propose chaque année au moins un atelier lors de la fête de la science autour de mes activités :

- Les ondes électromagnétiques (Téléphonie mobile, radar ...)
- Le champ magnétique
- La téléparticipation aux enseignements pour les étudiants handicapés

### **3.8 Service d'enseignement 2009-2010**

	Cours	TD	TP
TP microcontrôleur S2		8	16
Informatique Industrielle S3 et S4		25	50
Réseaux Locaux Industriels S4			15
Réseaux Locaux Industriels S3		6	
APP électronique S1		12	
Réseaux sans fil licence SARI	10	6	
Cryptographie licence SARI	10	5	18
Transmission numérique licence SARI	10	2	
Total	30	64	99

### **3.9 Encadrements**

Encadrement de projets d'étude (DUT GEII, MpH, ENSEIRB-MATMECA, ENSCBP, ENSC, TIPE école préparatoire)

Encadrement de 40 étudiants en stage de niveau L2 à M2 (DUT MpH, GEII, Informatique, licence CRED, licence SARI, ENSEIRB-MATMECA, programmes LEONARDO, ERASMUS, MASTER CUCIPHY)

### 3.10 Autres activités exercées

- ▶ Depuis 2008 Responsable de l'équipe de recherche CEMT du laboratoire IMS
- ▶ Depuis 2010 Coordinateur du Groupe de Travail Thématique Handicap du PRES de Bordeaux
- ▶ Depuis 2009 Responsable de l'accueil et du suivi des étudiants handicapés à l'IPB
- ▶ Depuis 2006 Membre de la cellule PHASE de l'Université de Bordeaux 1
- ▶ Depuis 2009 Responsable de la licence professionnelle AII-SARI en alternance
- ▶ 2007-2011 Représentant élu des Maîtres de conférences au conseil du laboratoire IMS
- ▶ 2006-2007 Membre de la commission communication du laboratoire IMS.
  
- ▶ 2001-2006 Correspondant SIMOA (simulation et modélisation en Aquitaine). Dans le cadre d'un groupement de laboratoires (TREFLE, LPCM, PIOM, LCPO), des supercalculateurs étaient mutualisés sur le site ENSCPB : un SGI ORIGIN 3000 (20 processeurs - 20Go de RAM) ainsi qu'un SGI ALTIX (12 processeurs).
- ▶ 2001-2006 Correspondant M3PEC (Modélisation Microscopique et Mésoscopique en Physique, dans l'Environnement et en Chimie). S'agissant du calcul scientifique, le Pôle M3PEC (Modélisation Microscopique et Mésoscopique en Physique dans l'Environnement et en Chimie) regroupe l'activité principale en calcul haute performance de l'Université Bordeaux 1 et de la DRIMM tant par son matériel que par la communauté scientifique qui le constitue. Son action vient s'articuler autour d'un programme scientifique s'inscrivant dans les principales thématiques de l'université et de ses laboratoires dont les besoins en moyens de simulation ont fortement augmenté.
  
- ▶ 2001-2006 Co responsable communication au laboratoire PIOM : Mise au point de la nouvelle plaquette du laboratoire, valorisation et diffusion de l'information scientifique
  
- ▶ 2002-2006 Correspondant DRIMM (Direction des Ressources Informatiques et Multimédia Mutualisées)-PIOM

- ▶ 2001-2010 Correspondant réseau PIOM-ENSCP puis IMS-ENSCP
- ▶ 2001-2006 Responsable informatique et webmaster au PIOM
- ▶ 2001-2005 Correspondant réseau PIOM-REAUMUR (REseau Aquitain des Utilisateurs des Milieux Universitaires et de Recherche)

## **4 Activités de recherche**

### **4.1 Structure d'accueil et contexte scientifique**

J'ai obtenu mon doctorat à l'Université de Bordeaux1 (spécialité instrumentation et mesures) le 14/12/1999 au sein du laboratoire MASTER (aujourd'hui TREFLE). J'ai été recruté en tant que maître de conférences à l'IUT de l'Université de Bordeaux 1 le 01/09/2002. Mes activités de recherche se déroulaient alors au laboratoire PIOM (intégré à l'IMS le 01/01/07). J'exerce aujourd'hui mes activités de recherche au sein du laboratoire IMS (UMR 5218) de l'Université de Bordeaux 1. Je travaille au sein de l'équipe CEMT (Caractérisation Electromagnétique de Matériaux et Télédétection ) dont je suis le responsable. Cette équipe est constituée d'un Maître de conférence IMS, d'un professeur associé à l'IMS, d'un Ingénieur de recherche CNRS, d'un ingénieur de recherche contractuel et d'un Post doctorant. (Page Web : <http://www.ims-bordeaux.fr/CEMT>).

Dans ce dossier de demande d'autorisation d'inscription à l'Habilitation à diriger des recherches, j'ai choisi de développer mes activités de recherche depuis 2002 afin de souligner le cheminement qui a permis la reconnaissance de mes travaux et la naissance de nombreuses collaborations. En 2001, j'ai effectué une étude détaillée des besoins en termes de recherche dans le domaine de la télédétection spatiale micro-ondes. Des contacts que j'ai pris à cette époque m'ont démontrés que la communauté scientifique dans ce domaine avait besoin de compétences en caractérisation électromagnétique des sols et en simulation et modélisation du comportement électromagnétique de ces milieux.

Mon parcours et mon expérience m'ont apporté des compétences en matière de métrologie (caractérisation diélectrique et magnétique) et de calcul (simulation des comportements électromagnétiques). J'ai donc décidé de m'investir dans cet axe de recherche en créant une série de collaborations avec d'autres laboratoires et en m'efforçant d'obtenir des financements afin d'acquérir les moyens de calcul et de mesures nécessaires.

Aujourd'hui, ces compétences et ces moyens acquis me sont utiles afin de réaliser des analyses très précises qui améliorent la compréhension des réponses électromagnétiques des structures pédologiques complexes. Ces compétences s'exercent principalement dans le cadre



de projets de recherche spatiaux (développement et validation d'algorithmes de traitement des données). Mes recherches s'orientent donc vers la modélisation et la simulation des phénomènes électromagnétiques en télédétection active et passive. L'objectif est de calculer le coefficient bi-statique ou l'émissivité de structures pédologiques et géologiques complexes. Ces recherches sont menées conjointement avec une démarche expérimentale de mesure des constantes diélectriques de sols en conditions extrêmes (en termes de température, d'humidité, d'hétérogénéité ou de salinité). L'application de ces recherches est l'analyse et l'identification de la signature radar ou radiométrique de ces milieux (pergélisols, évaporites ...).

## **4.2 Le sol : un milieu complexe qui nécessite de nouveaux outils d'analyse**

### 4.2.1 Le sol

Le sol n'est pas qu'une simple couche de terre qui recouvre la surface du globe. Le sol est une structure complexe et hétérogène. Il est le siège de multiples phénomènes et a de nombreuses fonctions.

Le sol est un milieu poreux constitué de matières minérales et organiques placé sur un substrat de roches. Au sein d'une phase solide des phases liquides et gazeuses peuvent exister. La proportion de ces phases dépend essentiellement de l'état d'hydratation du sol et de sa compacité. Les caractéristiques de ce système varient donc spatialement en profondeur (présence de différentes couches, gradients de température ou d'humidité ...) et dans les deux autres dimensions de l'espace (rugosité de surface, variation de types de sols, d'épaisseur, d'humidité ...). Le système sol subit aussi de fortes variations de caractéristiques temporelles. Ces dernières peuvent être à l'échelle humaine (température jour-nuit, saisons, humidité, composition ionique ...). D'autres caractéristiques peuvent varier à des échelles beaucoup plus grandes (millénaire). C'est le cas de la granulométrie des sols qui pourra être considérée comme constante lors des observations.

A cette complexité structurale du sol s'ajoute la complexité des échanges entre le système sol et son environnement. Ces échanges peuvent s'effectuer à l'interface air sol (eau, énergie par rayonnement solaire, apports organiques, refroidissement des températures...) mais ils peuvent aussi s'effectuer avec des couches plus profondes ou avec des plantes.

Ce système sol est donc en perpétuel changement. Même si certaines caractéristiques peuvent être considérées comme constantes à notre échelle il est nécessaire d'intégrer le plus possible la variabilité de ces caractéristiques dans nos études afin de représenter le plus correctement possible ce système qui doit être considéré en état transitoire perpétuel.

#### 4.2.2 Pourquoi étudier les sols ?

Au cours de l'histoire de l'humanité, la croissance et la disparition de civilisations ont souvent été liées à leur aptitude à nourrir leur population. De nombreux paléo climatologues (Bruno Malaizé UMR 5805 EPOC) ont avancé des hypothèses sur des événements climatiques tels que des sécheresses qui pourraient donner une explication sur la disparition de certaines civilisations (Maya, Mésopotamie...). Leurs études montrent aussi qu'un seul facteur, aussi puissant soit-il, ne peut pas expliquer l'abandon de cités entières à l'échelle d'une à deux générations. L'appauvrissement des terres cultivables (érosion éolienne ou hydrique, augmentation de la salinité des sols...) est probablement un facteur aggravant qui a participé à ces phénomènes. L'Homme réalise aujourd'hui l'impact qu'il a sur son environnement et l'importance de la surveillance et de la protection des sols afin qu'ils poursuivent leurs rôles.

#### 4.2.3 Les fonctions du sol

Le sol est un milieu pour d'innombrables organismes vivants et un milieu de nutrition des végétaux.

Le sol est donc impliqué dans la chaîne alimentaire et la qualité de l'environnement. Il possède aussi une fonction importante dans les équilibres des teneurs en gaz de l'atmosphère comme le dioxyde de carbone retenu par les plantes.

Outre ces fonctions liées à l'environnement, le sol a de nombreuses autres fonctions liées à l'activité humaine. L'agriculture est bien sûr l'activité la plus évidente mais le sol est aussi le support mécanique des activités de construction (route, bâtiment) et une source de matériaux (minerais, pétrole...). Enfin, le sol est encore malheureusement un lieu de stockage de déchets avec de nombreuses conséquences en terme de pollution irréversible.

#### 4.2.4 Les constituants du sol.

Le sol est formé de constituants organiques (organismes animaux et végétaux, matière organique, racines) et inorganique (sable, limon, argile). La matière organique peut ne représenter que quelques pourcents de la masse du sol mais peut aussi atteindre 30% (sols maraîchers) ou plus (tourbes). Dans le domaine micro-ondes, une permittivité équivalente est affectée au sol en tant que matière homogène. Plusieurs modèles [29] [26] [31] permettent de prédire la permittivité des sols en prenant en compte ses constituants inorganiques. La prise en compte des constituants organiques est plus compliquée car elle dépend de nombreux facteurs comme par exemple le type de sol, la situation géographique ou encore les saisons. Des mesures sur des échantillons prélevés sur site permettent alors la prise en compte de ces constituants. Il convient alors d'utiliser un système de mesure permettant l'étude d'un volume suffisant de matière [32] [34].

Nous nous concentrerons dans cette partie à la définition des constituants inorganiques des sols qui sont la base de leur classification [5].

Il existe trois manières de décrire la composition en matière inorganique d'un sol.

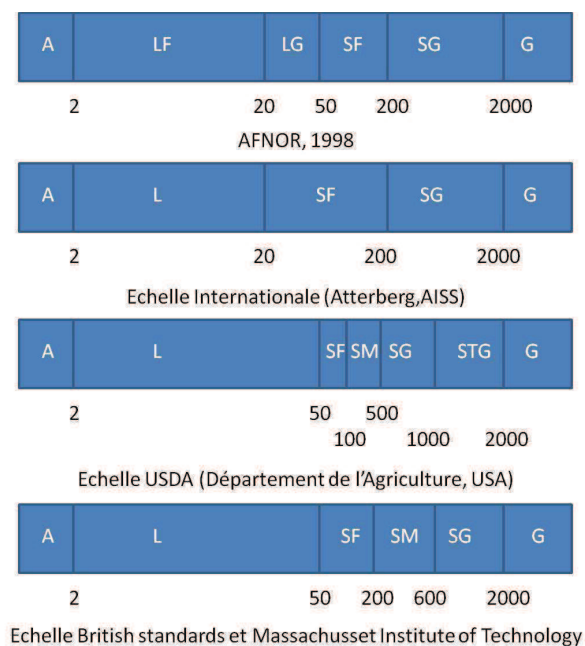
La première est la définition de la teneur en éléments chimiques du sol. Cette composition dite élémentaire permet de mettre en évidence les différentes molécules présentes dans le sol. On retrouve en majorité de l'oxygène (51%), du silicium (32%), de l'aluminium (7,5%), du fer (2,7%), du calcium (2,5%), du potassium (1,6%), du sodium (1,25%), du magnésium (0,95%) et du titane (0,03%). Ces pourcentages sont indicatifs mais sont les ordres de grandeurs que nous retrouverions dans tous les sols.

La seconde approche de description de la composition des sols en matière inorganique est la définition de la nature et la teneur des minéraux. Cette composition minéralogique regroupe les minéraux primaires et secondaires. Les premiers proviennent de roches présentes dans le substrat rocheux qui sont peu ou pas altérés. Les seconds sont soit des minéraux primaires altérés soit des minéraux altérés importés (précipitation ...). Les roches parentales et les processus de formation du sol (pédogénèse) sont à l'origine de la grande diversité des compositions minérales des sols.

La troisième méthode de définition de la composition des sols est la composition granulométrique. C'est cette méthode qui est couramment utilisée en télédétection. Toutes les

particules présentes dans les sols sont considérées comme des sphères de diamètre différent (un diamètre équivalent ou apparent est utilisé) mais de masse volumique identique. La propriété du sol (propriétés physiques, mécaniques et hydriques) est fonction de la taille de ces particules. Cette composition en taille de particules est appelée la texture du sol.

Il existe quatre échelles de classification granulométrique souvent employées présentées sur la figure 1.



**Figure 1 : Echelles de rugosité (en  $\mu\text{m}$ )**

Notations de la figure 1 :

A : Argile

L : Limon

LF : Limon Fin

LG : Limon Grossier

SF : Sable Fin

SM : Sable Moyen

SG : Sable Grossier

STG : Sable Très Grossier

G : Gravier

L'argile, le limon et le sable sont les trois types principaux de particules qui peuvent être définis. Nous utiliserons ces appellations dans leur sens granulométrique. Les particules seront ainsi classées en fonction de leur taille. La nature minéralogique des particules peut varier d'un sol à l'autre. Des études précises ont été effectuées par Bear (1964) sur la composition minéralogique des différents sols. Nous pouvons préciser que la classe argile contient majoritairement (environ 60%) des minéraux argileux et des oxydes métalliques. La classe sable contient quand à elle principalement des quartzs (environ 70%).

L'analyse granulométrique d'un échantillon de sol passe tout d'abord par un tri minutieux afin de retirer les particules organiques (racines) et les grosses particules inorganiques. Deux méthodes existent pour déterminer la granulométrie. La première est la sédimentation qui est difficile à mettre en œuvre en raison des produits chimiques nécessaires. La deuxième méthode est le tamisage. Nous utilisons au laboratoire préférentiellement le tamisage humide qui permet de trier des particules de taille inférieure à 50µm.

Nous nous sommes dotés d'un granulomètre Analysette 3 (Fritsch). C'est une tamiseuse à vibration. Les tamis sont déplacés par un entrainement électromagnétique ce qui permet un tamisage régulier et précis.

Une fois cette analyse granulométrique effectuée, la texture du sol peut-être classée dans une famille définie à l'aide du triangle de texture des sols présenté sur la figure 2

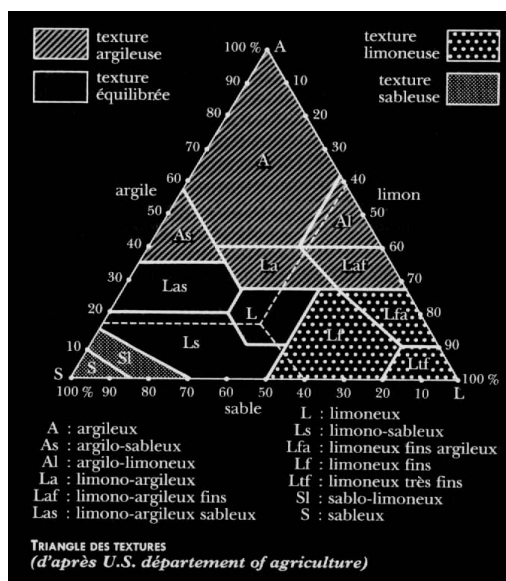
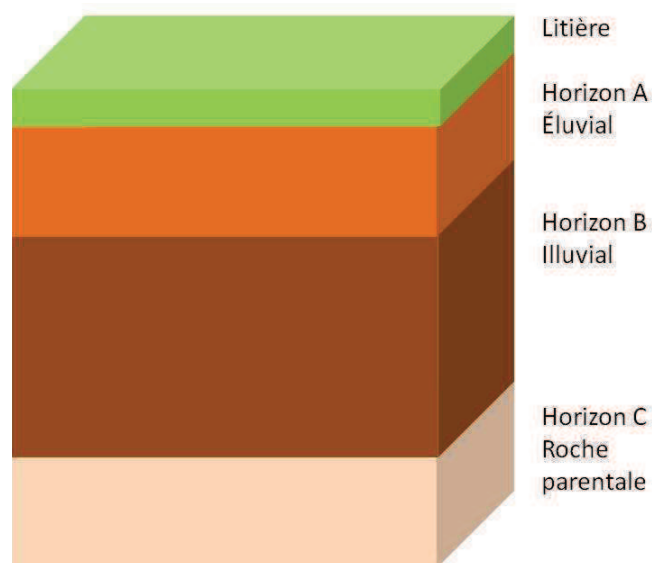


Figure 2 : Triangle de texture des sols

#### 4.2.5 Profil des sols

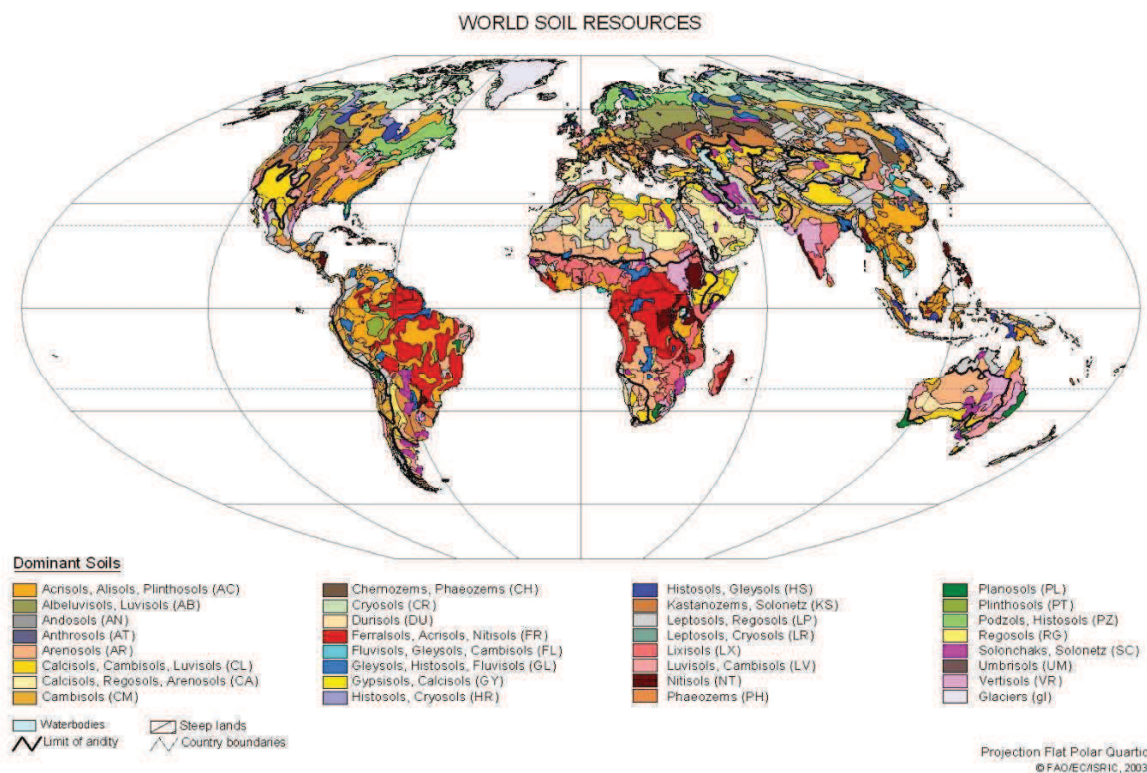
Nous avons vu comment caractériser les constituants d'un sol. Ce dernier n'est pas homogène il est courant d'utiliser l'expression profil pédologique plutôt que sol. Cette notion de profil permet d'introduire la variabilité spatiale du sol. Ces profils de sols peuvent être décomposés en couches plus ou moins parallèles appelées horizons présentés sur la figure suivante.



*Figure 3 : Structure de sols en profils*

L'Horizon A est celui utilisé par la culture agricole. C'est de cette couche que viendront les principales informations en télédétection spatiale micro ondes.

Il résulte de cette découpe du sol en profil toute une classification des sols (classification FAO ou US Survey ou encore la classification française CPCS) présentée sur la figure 4.



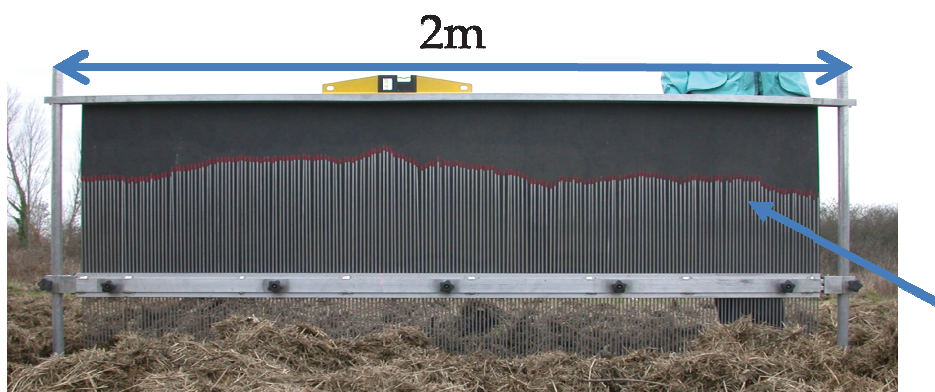
**Figure 4 : Différents type de sols à travers le monde**

Le sol est donc complexe par les constituants qui le composent et par sa structuration en profil. .

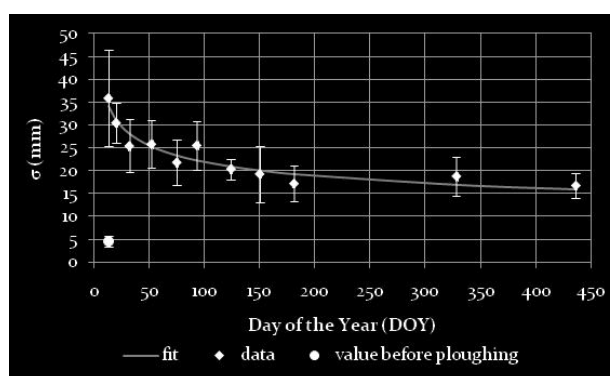
A la litière de surface et à l'horizon A particulièrement il convient aussi d'ajouter la rugosité de surface. La rugosité naturelle du sol peut être considérée comme une répartition aléatoire de hauteurs. Cependant, des grandeurs statistiques permettent de quantifier ce degré de rugosité de surface. Trois paramètres sont communément utilisés :

- L'écart type des hauteurs  $\sigma$
- La fonction d'autocorrélation et sa longueur associée.

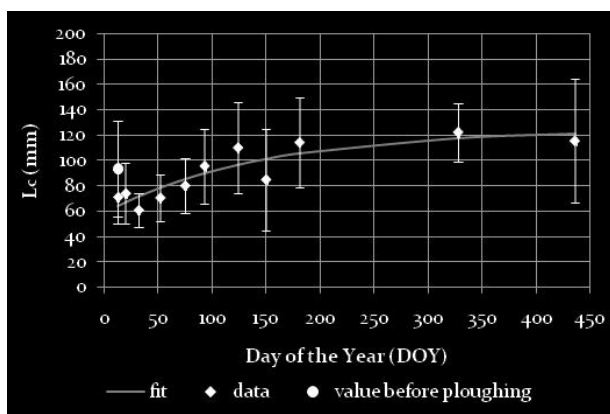
Ces trois paramètres peuvent être mesurés sur le terrain à l'aide d'un rugosimètre à aiguille par exemple.



**Figure 5 : Rugosimètre à aiguille (EPHYSE INRA)**



**Figure 6 : Ecart type des hauteurs**

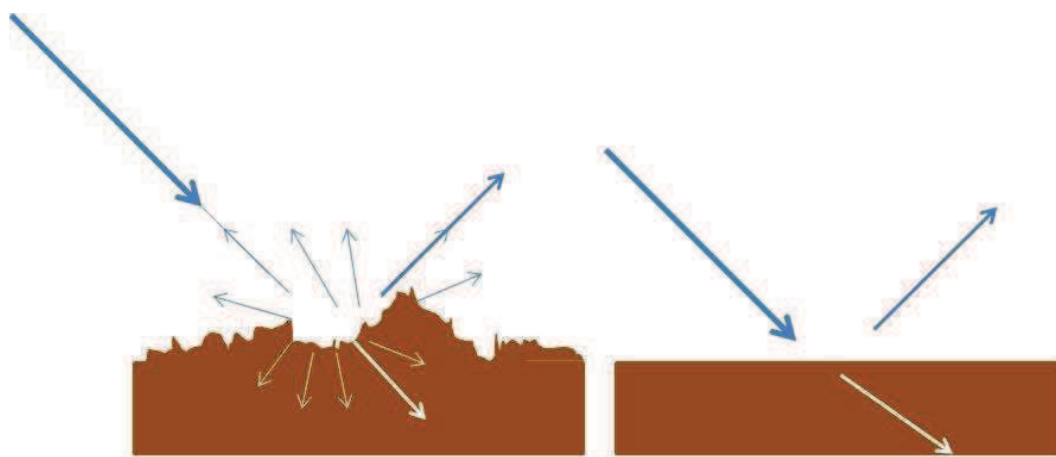


**Figure 7 : Longueur d'autocorrélation**

En télédétection micro-ondes [23] [24] [25], l'effet de la rugosité est notable. Dans le cas d'une interface lisse, une onde incidente serait en partie transmise dans le sol et en partie réfléchie d'une manière cohérente dans la direction spéculaire. Dans le cas d'une interface rugueuse, une partie de l'onde incidente part dans la direction spéculaire ; c'est la partie qui reste en cohérence de phase avec l'onde diffractée. Les autres composantes diffractées le sont



dans toutes les directions de l'espace. C'est la partie non cohérente. Alors que la partie cohérente ne se dépolarise pas ; la partie non cohérente peut se dépolariser.



*Figure 8 : Effet de la rugosité de surface du sol*

La condition de Fraunhofer permet de définir la rugosité au dessous de laquelle la surface est quasi lisse. Dans le domaine micro-ondes, cette condition est :

$$\sigma < \frac{\lambda}{32 \cos(\theta)} \quad \text{Équation 1}$$

Avec  $\lambda$  la longueur d'onde

$\sigma$  l'écart type des hauteurs

et  $\theta$  l'angle d'incidence.

#### 4.2.6 Le sol est le siège de nombreux phénomènes

Nous avons entraperçu la complexité du système sol. Le sol est aussi le siège de nombreuses réactions et phénomènes. Il est le siège de réactions chimiques (ionisation, oxydoréduction, transformation des composés organiques ...) et physiques (flux de chaleur, lieu de transport de gaz, de liquides et de particules en suspension ...). Tout ces phénomènes sont liés entre eux et contribuent à l'évolution de la nature du sol considéré.

La télédétection micro-ondes est très sensible à la teneur en eau du sol et apparaît donc comme un outil d'analyse intéressant des structures pédologiques. Elle est aussi sensible à la texture du sol ou à sa température et permet d'envisager des analyses des sols plus complexes qu'une mesure de l'humidité. Cependant le sol est un milieu très complexe et l'interprétation

de données de télédétection nécessite des modèles intégrant ces degrés de complexité. La télédétection micro-ondes permettant une analyse relativement profonde du sol (plusieurs dizaines de centimètres) les phénomènes de variation des profils de température et d'humidité au sein de ces milieux doivent être étudiés afin de mieux connaître leur impact sur les mesures de télédétection spatiale. Je me suis ainsi intéressé à ces deux paramètres physiques importants qui sont la température et l'humidité des sols [43] [109].

#### 4.2.7 L'eau dans le sol

Le sol est un milieu poreux. Les pores sont la principale source de rétention de l'eau. Celle-ci est aussi retenue dans les sols par interaction avec les composés argileux. La texture du sol, son profil, son environnement (climat...) sont une partie des nombreux facteurs qui peuvent influencer sur la teneur en eau d'un sol.

##### Mesure de la teneur en eau

La teneur en eau d'un échantillon de sol est réalisée au laboratoire par une méthode gravimétrique consistant à définir la quantité d'eau dans l'échantillon. Après une mesure de la masse de l'échantillon humide, une mesure de la masse sèche de l'échantillon est effectuée après passage dans une étuve en respectant des protocoles de chauffage. Le volume de l'échantillon est aussi mesuré ce qui permet d'accéder à la teneur massique et volumique d'eau dans l'échantillon.

En général l'humidité massique est notée  $W$  et s'exprime en pourcentage mais dans notre étude nous noterons l'humidité massique  $\%H$  pour plus de simplicité. Elle peut être déterminée pour des matériaux quelconques en utilisant la formule suivante :

$$\%H = \frac{m_h - m_s}{m_h} \times 100 \quad \text{Équation 2}$$

Où :  $m_s$  : masse de l'échantillon sec (après passage à l'étuve)

$m_h$  : masse sèche de l'échantillon.

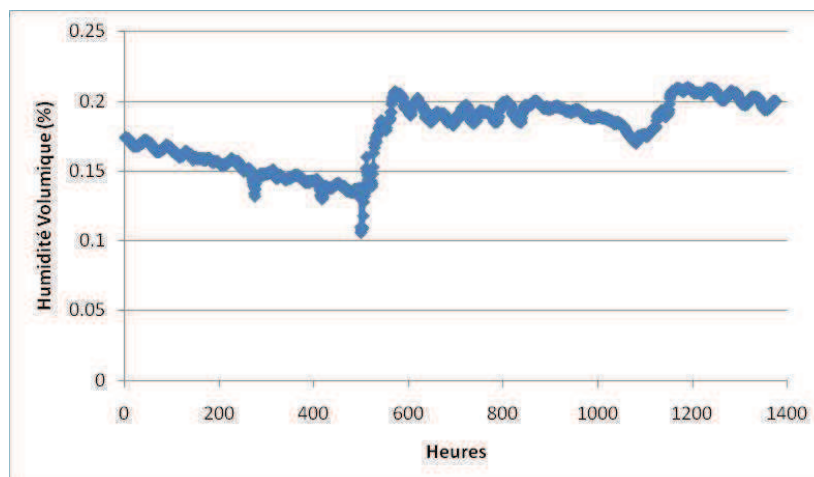
Nous pouvons aussi déterminer l'humidité volumique notée ici  $\%H_V$  grâce à la relation :

$$\%H_V = \frac{V_{eau}}{V_0} \times 100 = \frac{m_{eau} \times \rho_{matériau}}{m_s \times \rho_{eau}} \times 100 \quad \text{Équation 3}$$

Où :  $V_0$  : volume apparent du matériau.

## Variation de la teneur d'eau dans les sols

Cette teneur en eau de l'échantillon peut être reliée à l'état hydrique du sol à un endroit et à un instant donnés (prélèvement). En effet, l'état hydrique du sol varie spatialement (en surface et en profondeur) et temporellement (averse, saisons ...). La quantité d'eau qu'un sol peut absorber avant saturation dépend de sa nature (poreuse, argileuse...) et de sa profondeur.



*Figure 9 : Variation de l'humidité volumique du sol à 10 cm de profondeur sur le site SMOSREX en Juillet 2011*

## Diffusion de l'eau dans les sols

La diffusion de l'eau dans le sol est soumise à de nombreuses contraintes mais peut être représentée par une série d'équations. Chacune d'elles sont simplificatrices de la complexité réelle des phénomènes en présence mais représentent correctement le transport d'eau dans les sols.

La première approche est basée sur l'écoulement des fluides au sein d'un tube. Elle a été établie empiriquement par H.A Hagen (1839) puis par J.L.M Poiseuille (1844). Cette équation (équation de Hagen-Poiseuille) est une simplification de l'équation de Navier-Stokes applicable aux fluides de masse volumique, de viscosité et de faible vitesse constante.

La deuxième approche est la loi de Darcy établie en 1856. Son principe repose sur l'existence dans le sol d'un gradient macroscopique de potentiel hydrostatique qui provoque l'apparition d'un flux de fluide. Cette approche n'a de sens que si le volume élémentaire représentatif étudié est suffisamment grand vis-à-vis de la taille des pores afin de bien

représenter le sol considéré. Ce dernier est supposé homogène et la vitesse d'écoulement est limitée (écoulement laminaire). Cette condition est remplie pour des pores de rayons inférieurs à 100  $\mu\text{m}$ .

La troisième approche conduit à l'équation de Darcy-Buckingham qui permet d'étendre la loi de Darcy aux milieux saturés en eau.

L'équation de Richards permet de décrire la teneur en eau et conduit dans le cas d'un transport monodimensionnel à l'équation :

$$\frac{\partial \theta(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\theta(z,t)) \frac{\partial \Psi_T(\theta)}{\partial z} \right) \quad \text{Équation 4}$$

$\theta(z,t)$  est la teneur en eau qui est fonction de la profondeur  $z$  et du temps  $t$ .

$\Psi_T(\theta)$  est le potentiel hydrique qui résulte des champs de forces qui s'exercent sur l'eau dans le sol (gravité, forces de rétention ou de sorption, forces de pression).

$K$  est la conductivité hydraulique (cm/h). C'est une grandeur importante que nous retrouvons dans l'équation de Darcy et celle de Darcy-Buckingham et qui décrit la faculté du milieu à permettre le transport de l'eau. Elle est fonction de la teneur en eau (sol non saturé) et du potentiel hydrique mais aussi de la nature du sol. Elle n'est pas la même pour un sol saturé et non saturé en eau.

La conductivité hydraulique représente l'aptitude du sol à conduire l'eau. Elle dépend donc beaucoup du type de sol considéré. Elle dépend de la taille des pores, de la tortuosité et de la connectivité. La tortuosité représente la complexité des chemins que l'eau peut suivre dans un sol. La connectivité est une grandeur caractérisant les liens existants entre les pores et entre les chemins que l'eau suit dans le sol.

Dans nos applications nous nous intéressons à la conductivité des sols non saturés en eau. Le sol se trouve temporairement en état de saturation hydrique lors de très forte pluie. Une des formulations pour le calcul de  $K$  en situation non saturée (Mualem 1976) est :

$$K = K_S \frac{\{1 - (\alpha h)^{(n-1)} [1 + (\alpha h)^{(n)}]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha h)^{(n)}]^{m/2}} \quad \text{Équation 5}$$

avec  $m = 1 - \frac{1}{n}$  et  $h$  le potentiel matriciel

Le potentiel matriciel est lié à la tension de succion qui représente le potentiel du sol à retenir l'eau.

Sol	$K_s$ en cm/jour	$\alpha$	N
Sol sableux	303	0.0079	10.4
Sol sableux + Limons	108	0.00505	7.9
Sol limon	32	0.0115	2.03
Sol argileux	0.08	0.00202	1.59

*Tableau 1 : Propriétés hydriques de certains sols*

Pour les sols saturés, la conductivité hydraulique peut atteindre 10 cm/h pour un sol sableux alors qu'il ne dépassera pas 1 mm/h dans un sol argileux. Dans un sol non saturé en haut, K sera de l'ordre de 0.1 mm/h pour un sol de limon, soit un ordre de grandeur 100 par rapport au sol non saturé.

La conductivité hydraulique est aussi dépendante de la température. Sur un sol sableux avec limons à 10% d'humidité volumique (Constantz 1982) K peut varier de 0.07 cm/h (à 2°C) à 0.2 cm/h (à 25°C) jusqu'à 1 cm/h (à 40°C)

L'eau absorbée est donc transportée dans le sol. Toutefois une grande partie de l'eau absorbée est ré-évaporée dans l'atmosphère rapidement ou est captée par les racines. Ce phénomène d'évapo transpiration s'effectue à la surface du sol. Le reste de l'eau s'infiltré dans le profil en profondeur ou latéralement.

L'infiltration dans un milieu homogène peut être décrite par l'équation de Richards. Sa résolution, en appliquant des conditions limites correctes (concentration initiales, profondeur ...), peut permettre de calculer des profils d'humidité dans les sols.

#### 4.2.8 La température du sol

Les phénomènes physiques, chimiques et biologiques au sein du sol sont très fortement corrélés à la température. Ainsi les propriétés micro-ondes des sols sont très sensibles à la température comme elles le sont à l'humidité.

Le sol reçoit de l'énergie du soleil sous forme de rayonnement (longueurs d'ondes de 0.3 à 3 $\mu$ m). Ce rayonnement est en partie absorbé ce qui provoque un échauffement de la surface du sol. Une partie de l'énergie stockée est ré émise vers l'atmosphère à différentes longueurs d'ondes. De ce bilan il en résulte un rayonnement net qui prend en compte les rayonnements reçus et émis ( $Ray_n$ ).

A la surface du sol, à la frontière avec l'atmosphère il y a aussi des échanges thermiques par convection liés aux gradients thermiques et aux mouvements d'air (vent). Cette chaleur échangée est appelée chaleur sensible ( $Ch_s$ ).

L'évaporation de l'eau en surface du sol est aussi une source de perte d'énergie dite chaleur latente ( $Ch_l$ ).

Enfin une partie de l'énergie emmagasinée dans le sol est consommée lors des phénomènes chimiques d'échanges avec les organismes vivants dans le sol ( $En_{chim}$ ).

Il est alors possible d'écrire un bilan global de l'énergie stockée dans le sol  $E_{sol}$ :

$$E_{sol} = Ray_n - (Ch_s + Ch_l + En_{chim})$$

Comme tout milieu conduisant la température; le sol peut être caractérisé par sa capacité thermique. Cette propriété reflète la capacité du sol à emmagasiner la chaleur. Nous pouvons la considérer comme constante en fonction de la température (dans les gammes de températures rencontrées sur Terre ...).

Comme le montre le tableau 2 les milieux organiques stockent plus de chaleur que les sols minéraux qui conduisent moins bien la chaleur. Cela signifie que les milieux organiques mettront plus de temps à se réchauffer ou à se refroidir que des sols minéraux (à même apport énergétique). La conductivité thermique augmentant avec l'humidité, un sol très humide se refroidira et s'échauffera plus vite qu'un sol sec.

	Conductivité (W/mK)			Capacité (MJ/m3K)			Masse volumique			
	Min	Max	Nominale	Min	Max	Nominale	Min	Max		
<b>Terrains meubles</b>	Argile sèche	0.4	1	0.6	1.5	1.6	1.5	1.8	2	
	Argile saturée d'eau	0.9	2.3	1.4	2	2.8	2.3	2	2.2	
	Sable sec	0.3	0.8	0.5	1.3	1.6	1.4	1.8	2.2	
	Sable saturé d'eau	1.5	4	2.3	2.2	2.8	2.4	1.9	2.3	
	Gravier/pierres, sec	0.4	0.5	0.4	1.3	1.6	1.4	1.8	2.2	
	Graviers/pierres, saturé d'eau	1.6	2	1.7	2.2	2.6	2.3	1.9	2.3	
	Moraine compacte	1.7	2.4	1.8	1.5	2.5	2	1.9	2.5	
	Tourbe	0.2	0.7	0.4	0.5	3.8	1.6	0.5	0.8	
	<b>Roches sédimentaires</b>	Molasse d'eau douce sup. Argilite - pétite	2.3	2.4	2.3	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7
		Molasse d'eau douce sup. Petite	2.3	2.4	2.3	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7
Molasse d'eau douce sup. Grès fin		2.3	2.6	2.3	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7	
Molasse d'eau douce sup. Grès moyen		2.5	2.8	2.6	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7	
Molasse d'eau douce sup. Grès grossier et conglomérat		2.5	2.8	2.6	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7	
Molasse marine sup. Argilite - pétite		2.6	2.9	2.7	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7	
Molasse marine sup. Petite		2.6	2.9	2.7	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7	
Molasse marine sup. Grès fin		2.7	3.3	2.9	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7	
Molasse marine sup. Grès moyen		2.7	3.2	2.8	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7	
Molasse marine sup. Grès grossier et conglomérat		2.6	3	2.7	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7	
Molasse marine sup. Argilite - pétite		2.2	2.7	2.3	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7	
Molasse d'eau douce inf. Petite		2.3	2.8	2.4	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7	
Molasse d'eau douce inf. Grès fin		2.4	2.8	2.5	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7	
Molasse d'eau douce inf. Grès moyen		2.7	3.2	2.9	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7	
Molasse d'eau douce inf. Grès grossier et conglomérat		2.2	3.1	2.4	1.8	2.6	2.1	2.4	2.7	
Argilite		1.1	3.5	1.9	2.1	2.4	2.2	2.4	2.6	
Grès				2.3	1.8	2.6	2.1	2.2	2.7	
Conglomérat/brèche		1.3	5.1	2.6	1.8	2.6	2.1	2.2	2.7	
Roche marneuse		1.5	3.5	2.1	2.2	2.3	2.2	2.3	2.6	
Roche calcaire		2.5	4	2.8	2.1	2.4	2.2	2.4	2.7	
Roche sulfurée (anhydrite, gypse)	1.3	2.8	1.6			2				
<b>Roches de fond magmatiques</b>	Granite	2.1	4.1	2.8	2.1	3	2.4	2.4	3	
	Diorite	2	2.9	2.3			2.7	2.9	3	
	Gabbro	1.7	2.5	2			2.6	2.8	3.1	
	Schistes argileux	1.5	2.6	1.9	2.2	2.5	2.3	2.4	2.7	
	Marbre	1.3	3.1	1.9			2	2.5	2.8	
	Quartzite	5	6	5.3			2.1	2.5	2.8	
	Micaschistes	1.5	3.1	2	2.2	2.4	2.3	2.4	2.7	
	Gneiss	1.9	4	2.6	1.8	2.4	2	2.4	2.7	
	Amphibolite	2.1	3.6	2.6	2	2.3	2.1	2.6	2.9	
<b>Matériaux divers</b>	Mélange de ciment/bentonite			0.8			3	1.2	1.2	
	Béton	0.9	2	1.4			1.8	2	2.42	
	Glace (-10°C)			2.32			1.87	0.91	0.91	
	Polyéthylène (PE100)			0.4			1.63	0.96	0.96	
	Air (0°C - 20°C)			0.02			0.0012	0.00124	0.00124	
	Acier			60			3.12	7.8	7.8	
	Eau (10°C)			0.6			4.15	0.99	0.99	

**Tableau 2 : Propriétés thermiques de certains sols**

Le transfert de chaleur au sein des sols s'effectue par convection et conduction thermique. Les phénomènes de convection s'appliquent au déplacement de liquide sous l'effet de la chaleur. Ce phénomène est marginal comparé au phénomène de conduction thermique qui est prépondérant dans les sols. J'ai donc centré mes études sur ce phénomène thermique.

L'équation qui décrit ce phénomène est l'équation de la chaleur qui est dérivée de la loi de Fourier et de l'équation de conservation de l'énergie. Cette équation peut être écrite, dans le cas d'une étude à une dimension spatiale sous la forme :

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial T(\theta)}{\partial z} \right) = \kappa \cdot \frac{\partial^2 T(\theta)}{\partial z^2} \quad \text{Équation 6}$$

Avec T la température, t le temps, z la profondeur et  $\kappa$  la diffusivité thermique du sol.

Cette dernière est égale à :

$$\kappa = \frac{k}{C_p} \quad \text{Équation 7}$$

avec  $k$  la conductivité thermique du sol et  $C_p$  sa capacité calorifique.

Cette équation régit la diffusion de la chaleur dans le système sol mais va dépendre des conditions extérieures au sol et en particulier de l'énergie fournie à ce système. Comme nous l'avons vu précédemment cette énergie provient principalement du rayonnement solaire et va donc dépendre du cycle jour/nuit mais aussi des saisons et plus généralement des conditions climatiques.

#### 4.2.9 Résolution de l'équation de la chaleur et de l'équation de Richards.

Nous pouvons constater de très fortes similitudes entre l'équation de la chaleur et celle de Richards pour la diffusion de l'eau.

L'étude mathématique de ces phénomènes peut s'effectuer soit par résolution numérique de ces équations, soit à l'aide d'une solution simplifiée. J'ai opté pour une résolution numérique par la méthode des éléments finis de ces équations définies dans leur écriture dans un espace à trois dimensions.

### **4.3 Outils d'analyse des sols développés**

Afin de répondre aux besoins d'analyse des sols je me suis doté de matériels adaptés et j'ai développé des bancs de mesure et des modèles mathématiques spécifiques

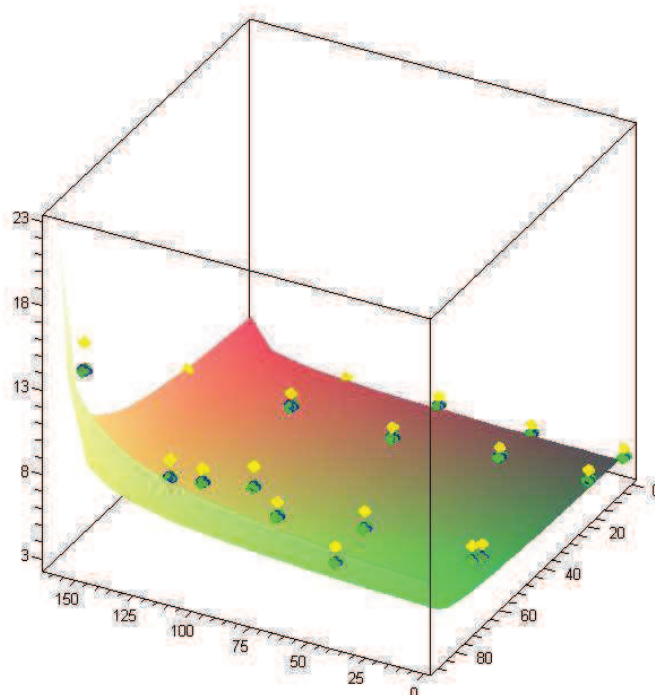
#### 4.3.1 Bancs de mesures

Il est possible d'utiliser des modèles d'estimation de la permittivité des sols souvent basés sur des lois de mélange ou des lois semi empiriques [26] [29] [30]. La mesure réelle de la permittivité d'échantillons de sol ou de roches est toutefois indispensable [34] [32] [42]. Elle permet de vérifier les résultats obtenus par ces modèles et d'obtenir des données dans des domaines non couverts par ces modèles (fréquence, humidité, type de sol ou de roche ...).

Les méthodes de mesures de la permittivité sont différentes suivant le domaine de fréquence, le volume de l'échantillon, la précision du résultat de mesure et la possibilité d'obtenir des échantillons de formes et de compositions diverses. J'ai ainsi dû mettre au point



des bancs de mesures spécifiques à l'étude des sols et permettant de couvrir l'ensemble des configurations de mesures possible en terme de fréquence, de type d'échantillon, de température ou encore d'humidité ou de salinité. Ces mesures peuvent être effectuées en fonction de deux paramètres tels que l'humidité et la salinité. La définition d'un plan d'interpolation des points de mesures peut permettre la définition d'une loi empirique de comportement de la permittivité (exemple figure 10). Ces mesures servent aussi à l'interprétation de la signature radar ou radiométrique de milieux pédologiques. Pour cela elles sont introduites dans des modèles analytiques et numériques.



*Figure 10 : Plan d'interpolation de données expérimentales de la partie réelle de permittivité de sol*

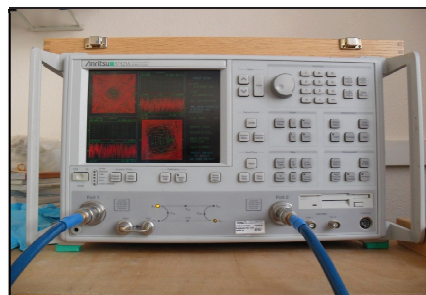
$$\varepsilon'_r = \left[ \sqrt{\frac{1}{161-x}} \times \sqrt{\frac{1}{90-y}} \right] \times 15 \quad \text{Équation 8}$$

Avec  $x$ , la salinité et  $y$  l'humidité.

Je présente ici les principales techniques utilisées. Pour chaque mesure une démarche d'estimation de l'incertitude de mesure est effectuée et des protocoles complexes ont été mis au point (répétitivité des mesures, stabilité des conditions de mesure, étalonnage et calibration des appareils). Ces points ne seront pas abordés dans ce manuscrit.

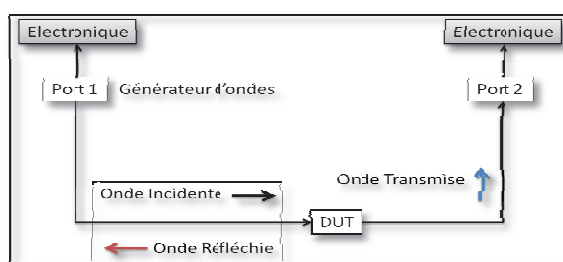
#### 4.3.1.1. Analyseurs de réseaux et paramètres S

L'analyseur de réseau vectoriel est l'élément central de nos mesures de constantes diélectriques [14].



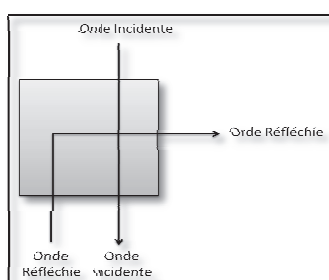
**Figure 11 : Analyseur de réseau vectoriel ANRITSU 37325A**

L'appareil est constitué d'un générateur d'ondes électromagnétiques qui envoie des impulsions aux fréquences désirées, l'électronique de ce dernier calcule alors les amplitudes et les phases des ondes réfléchies et transmises par un quadripôle connecté à l'appareil.



**Figure 12 : Schéma de fonctionnement d'un analyseur de réseau vectoriel**

Un circulateur permet de séparer l'onde incidente de celle réfléchie. L'onde peut ensuite être étudiée.



**Figure 13 : Circulateur**

Nous disposons de plusieurs analyseurs de réseaux. Pour les études liées à la télédétection micro-ondes des sols nous utilisons un analyseur fixe ANRITSU 37325A dont la gamme de

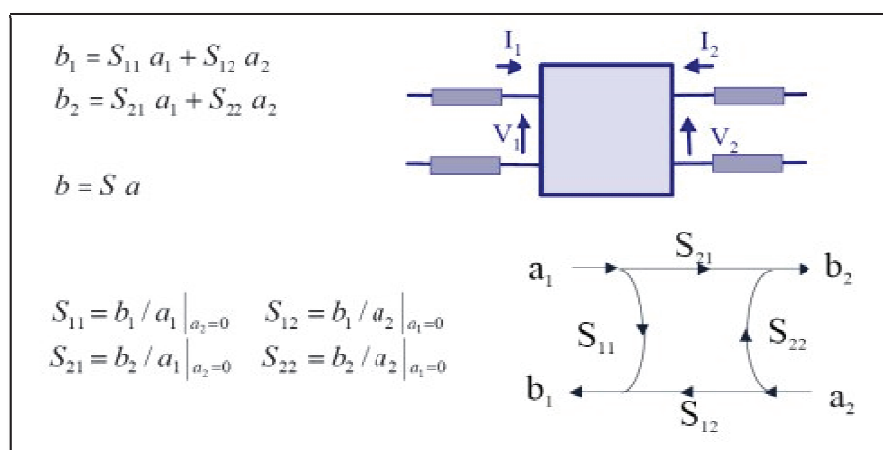
fréquence varie de 0,1 à 110 GHz et un analyseur portable ANRITSU MS2026A de gamme de fréquence similaire.

La mesure nous permet d'obtenir les paramètres S du quadripôle étudié. Un modèle électromagnétique de la cellule de mesure nous permet ensuite de remonter à la valeur de la permittivité relative de l'échantillon (partie réelle  $\epsilon'_r$  et partie imaginaire  $\epsilon''_{\text{réq}}$ ).

La permittivité complexe d'un matériau est déterminée à partir de la mesure par un analyseur de réseau vectoriel des coefficients de réflexion et de transmission d'une onde électromagnétique.

La matrice S (Scattering), aussi appelée matrice de répartition, donne les équations d'un multipôle (un quadripôle dans le cas d'une étude d'un DUT en réflexion et transmission) :

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad \text{Équation 9}$$



**Figure 14 : Concept des paramètres S.**

A travers les ports du quadripôle, les paramètres de la matrice S relient les ondes transmises et celles réfléchies. Ainsi, nous pouvons distinguer 4 paramètres caractéristiques de la propagation de l'onde :

- $S_{11}$  : coefficient de réflexion à l'entrée lorsque la sortie est adaptée (sens direct);
- $S_{12}$  : coefficient de transmission inverse lorsque l'entrée est adaptée (sens inverse);
- $S_{21}$  : coefficient de transmission direct lorsque la sortie est adaptée (sens direct);
- $S_{22}$  : coefficient de réflexion à la sortie lorsque l'entrée est adaptée (sens inverse).

Les paramètres  $S_{ij}$  sont complexes, ils se composent donc d'une partie réelle et d'une partie imaginaire.

Le module de  $S_{11}$  représente le rapport entre l'onde réfléchie et l'onde incidente et sa phase correspond à leur déphasage. De même,  $S_{21}$  correspond au rapport des ondes incidentes et transmises.

Plus précisément, ces coefficients sont des rapports de puissance entre les ondes incidentes, transmises et réfléchies :

$$S_{11} = \frac{P(\text{onde réfléchie})}{P(\text{onde incidente})} \qquad S_{21} = \frac{P(\text{onde transmise})}{P(\text{onde incidente})} \qquad \text{Équation 10}$$

Concrètement,  $S_{11}$  correspond ainsi au coefficient de réflexion, soit à la mesure de l'onde arrivant du port 1 et retournant sur le port 1, et  $S_{21}$  correspond, quant à lui, au coefficient de transmission; soit à la mesure de l'onde provenant du port 1 et arrivant sur le port 2.

En ce qui concerne les techniques de mesures, nous utilisons  $S_{11}$  (module et phase) pour la méthode de la sonde à effet de bout. Par contre seul le module de  $S_{21}$  est employé pour les mesures en cavité résonante. Nous utilisons les coefficients  $S_{11}$  et  $S_{21}$  (module et phase) pour la méthode en guide d'onde.

#### 4.3.1.2. La cavité résonante

Une cavité résonante se caractérise par deux paramètres de la courbe du module du coefficient de transmission  $S_{21}$  :  $f_0$  fréquence de résonance de la cavité et  $Q_0$  son coefficient de qualité.

Nous utilisons la méthode dite « des faibles perturbations » qui permet le calcul des variations des paramètres de la cavité ( $f_0, Q_0$ ) lorsqu'un échantillon est placé dans cette dernière [43]. Grâce à des relations établies, nous pouvons alors remonter aux caractéristiques électromagnétiques de l'échantillon perturbateur, soit sa permittivité.

Le coefficient de qualité est défini grâce à la mesure de la fréquence de résonance et de la différence des fréquences à -3dB (par rapport au maximum de transmission) de la cavité.

$$Q_0 = f_0 / \Delta f_{(-3dB)} \qquad \text{Équation 11}$$

A partir des fréquences de résonance et des coefficients de qualité obtenus lorsque la cavité est à vide et en charge (présence d'un échantillon), il nous est possible de trouver  $\epsilon'_r$  et  $\epsilon''_r$  grâce aux équations suivantes :

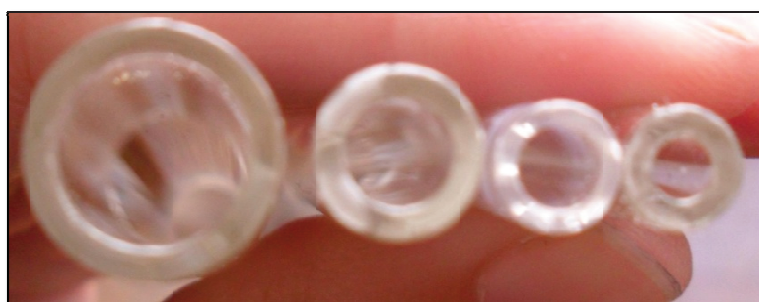
$$\epsilon'_r = 1 + \frac{1}{\alpha} \frac{f_0 - f_1}{f_0} \quad \epsilon''_r \text{ éq} = \frac{1}{2\alpha} \left| \frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right| \quad \text{Équation 12}$$

$$\text{avec } \epsilon''_{\text{réq}} = \epsilon''_r + \sigma / (\epsilon_0 \omega)$$

Avec :  $f_0, Q_0$ : Fréquence de résonance et coefficient de qualité de la cavité à vide,  
 $f_1, Q_1$  : Fréquence de résonance et coefficient de qualité de la cavité en charge (coefficients caractéristiques de la courbe de transmission en charge),  
 $\alpha$  : Coefficient de remplissage de la cavité.

Pour de faibles perturbations de la cavité la relation  $\alpha = k v_e / v_c = \alpha v_e$  ( $v_e$  est le volume de l'échantillon et  $v_c$  le volume de la cavité) peut être appliquée. Lorsque les conditions d'applications de la méthode sont respectées, le coefficient  $k$  peut-être défini à l'aide de mesures avec des charges étalons.

Les mesures en cavité résonante, par la méthode des faibles perturbations, sont d'une grande précision, cependant elles dépendent de nombreux facteurs. Ainsi, comme son nom l'indique, c'est une méthode qui fonctionne pour de faibles perturbations, ce qui implique donc l'utilisation d'échantillons de faible permittivité et/ou de taille réduite. C'est pourquoi nous avons à notre disposition plusieurs tubes de diamètres différents.



*Figure 15 : Exemples de diamètres de tubes.*

La cavité résonante ne travaille qu'à certaines fréquences particulières. Les dimensions du guide déterminent cette fréquence. Pour un guide rectangulaire de section  $a \times b$  et de longueur  $l$ , celle-ci vaut :

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} [(m/a)^2 + (n/b)^2 + (p/l)^2]^{1/2} \quad \text{Équation 13}$$

Avec  $m$  et  $n$  qui correspondent au mode de répartition de champ dans la cavité et  $p$  le nombre de maximum dans la cavité. Les méthodes de couplage (transition, iris de couplage ...) entre la cavité et les guides d'alimentation influent également sur ces fréquences.



*Figure 16 : Cavité résonante à 1,26 GHz et 1,7 GHz.*

### **Exemple d'application développée**

Cette technique peut être utile lorsque les échantillons ne peuvent pas être usinés (impossibilité d'utiliser la technique en guide d'ondes) et ne présentent pas de face plane (impossibilité d'utiliser la sonde à effet de bout). Nous avons donc développé un nouveau protocole de mesure permettant l'analyse de roches non usinables.

Les mesures radiométriques dans les domaines micro-ondes et ondes submillimétriques effectuées sur l'astéroïde Steins, par S. Gulkis (JPL) et l'équipe MIRO (l'instrument Microondes sur l'orbiteur de la sonde spatiale cométaire Rosetta), permettront de remonter aux caractéristiques physico-chimiques de cet astéroïde. Toutefois, cela nécessite de bien connaître la constante diélectrique complexe de ces objets qui peut être précisée par des mesures micro-ondes en laboratoire. L'équipe MIRO a obtenu des échantillons météoritiques

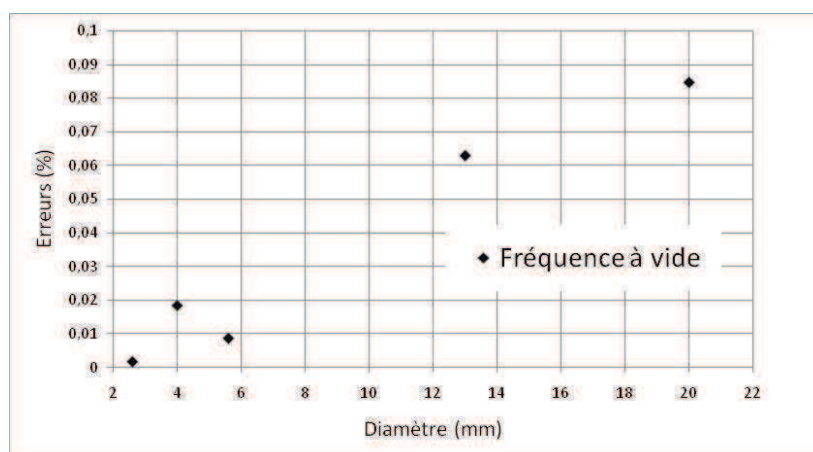
(Antarctique) dont la composition serait voisine de celle de l'astéroïde Steins croisé par « Rosetta » en septembre 2008. Nous avons été amenés à effectuer des mesures diélectriques sur ces échantillons. Ces échantillons de météorites sont très rares et ne peuvent pas être usinés. Une méthode de mesure a donc été mise au point.

La technique utilisée permet l'introduction dans la cellule de mesure de nos éclats de météorites. Ainsi nous avons retenu pour ces mesures la technique des faibles perturbations qui est très connue et qui repose à cette fréquence sur l'utilisation d'une cavité suffisamment grande pour contenir les échantillons. Cette technique consiste à introduire un échantillon au sein d'une cavité résonante en mode  $TE_{103}$  au niveau d'un maximum de champ électrique pour les mesures de permittivités. Les résultats de ces mesures sont très précis mais ne sont valables que sur une très faible plage de fréquence. Le réel désavantage de cette technique réside dans les conditions d'applications. En effet, pour utiliser les équations (12) de calcul de la permittivité des matériaux il faut que l'échantillon ne provoque pas de trop fortes perturbations ce qui impose des limitations sur le couple de paramètres volume-permittivités. En effet les conditions simplificatrices à l'origine du système d'équation imposent une forme précise de l'échantillon, un champ constant dans le matériau, une absence d'effets de dépolarisation de l'onde et une dégradation du coefficient de qualité de la courbe de résonance limitée.

Toutes les conditions d'application de cette méthode nous empêchent d'effectuer des mesures sur tout type d'échantillon ayant par exemple des formes quelconques ou une permittivité élevée ce qui est malheureusement le cas de nos échantillons. Nous avons donc mis au point une nouvelle technique de mesure dite des perturbations. Cette technique repose sur la perturbation d'une cavité résonante mais n'utilise pas de conditions simplificatrices conduisant à un système d'équation. Elle repose sur l'utilisation d'un modèle numérique représentant la cavité et l'échantillon.

Le principe de la méthode que nous avons développée repose sur la comparaison des courbes de résonance d'une cavité réelle chargée d'un échantillon avec des courbes obtenues à partir d'un modèle numérique. Ce dernier a été mis au point à l'aide du logiciel HFSS-ANSOFT-ANSYS [12]. Il simule le comportement de la cavité en respectant sa taille, son couplage avec l'analyseur de réseau et la forme de l'échantillon.

La répartition des champs électromagnétiques dans la cavité est calculée à l'aide de la méthode des éléments finis. La valeur des coefficients de réflexion et de transmission est aussi déterminée. Notre méthode ne peut s'appliquer que si le modèle représente correctement la cavité réelle. Afin de valider ce point nous avons par exemple comparé les courbes de résonances de notre cavité réelle chargée de tubes en pyrex vides avec les résultats de notre cavité numérique. La figure 17 présente les résultats des erreurs sur la fréquence de résonance.



**Figure 17 : Validité du modèle**

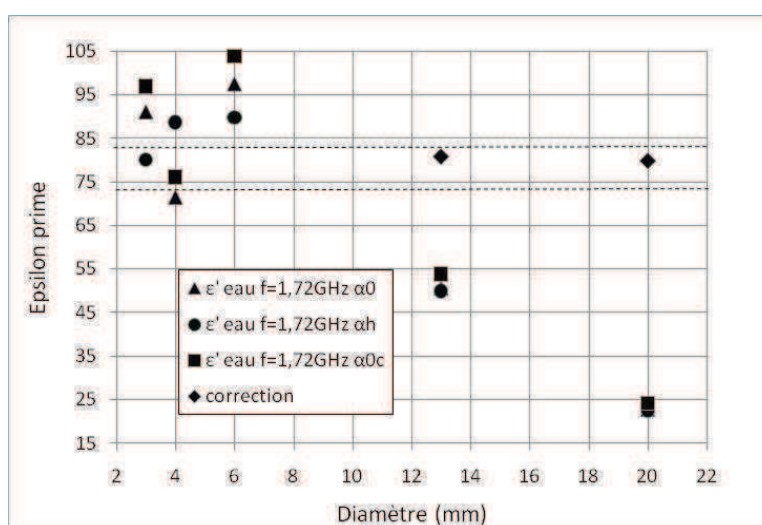
L'écart sur la fréquence de résonance ne dépasse pas les 0,2%. Pour le coefficient de qualité, l'écart est de 3%.

Nous distinguons trois types de perturbations. Les faibles perturbations pour lesquelles la méthode du même nom peut s'appliquer et pour lesquelles notre démarche ne présente que peu d'intérêts. Les moyennes perturbations pour lesquelles les équations (12) ne s'appliquent plus mais pour lesquelles les courbes de résonance peuvent encore être exploitées. Enfin les fortes perturbations pour lesquelles le coefficient de qualité de la courbe décroît considérablement ce qui empêche toute exploitation.

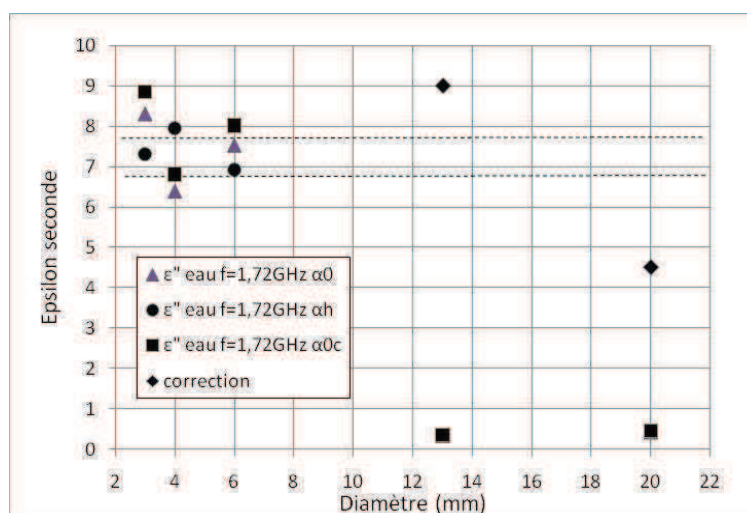
Pour les moyennes perturbations ; un calcul de permittivité est effectué à partir de la courbe de résonance expérimentale, à l'aide des équations (12). Une plage de permittivité est alors définie autour de cette valeur. Le modèle numérique permet d'obtenir pour chaque valeur de permittivité la courbe de résonance. Une comparaison avec la courbe expérimentale permet de remonter à une estimation précise de la valeur de permittivité. A titre d'exemple nous présentons à travers les figures 17 et 18 les résultats obtenus lors de mesures sur de l'eau



distillée à 1.72 GHz avec des diamètres d'échantillons variant de 3 à 20 mm. Nous avons tout d'abord appliqué trois méthodes de correction des résultats basées sur l'estimation du coefficient de remplissage  $\alpha$  ( $\alpha = \alpha h$  calculé en effectuant des mesures sur des échantillons étalons d'hexane,  $\alpha = \alpha_0 ve$  où  $\alpha_0 = 1/vc$  et  $\alpha = \alpha_{0c} = \alpha h_{2mm}/2mm$  . ve). Nous constatons sur les figures présentées que ces méthodes ne permettent une correction correcte que pour des diamètres inférieurs à 6 mm (les lignes en pointillés présentent les limites d'erreurs à +/- 5% par rapport à la valeur « vraie » de la permittivité).



**Figure 18 : Etudes menées sur l'eau à 1.72 GHz – Partie réelle de la permittivité**



**Figure 19 : Etudes menées sur l'eau à 1.72 GHz – Partie imaginaire de la permittivité**

Notre méthode de correction a été appliquée aux mesures effectuées sur des diamètres de 13mm et 20mm. Les valeurs de permittivités obtenues sont présentées sur les figures 2 et 3

(points correction). Notre méthode permet de réduire les erreurs sur la partie réelle de la permittivité à moins de 5%. Elle réduit aussi considérablement les erreurs sur la partie imaginaire.

Pour un diamètre de 20 mm, la perturbation engendrée est très importante ce qui conduit à un coefficient de qualité trop faible et à un décalage important de notre résonance qui l'approche de la résonance en mode  $TE_{102}$ .

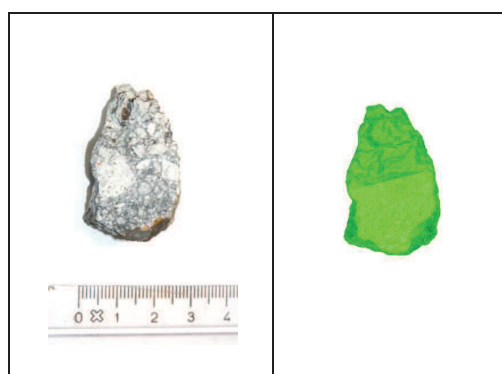
Pour les fortes perturbations, l'échantillon doit alors être déplacé dans la cavité expérimentale afin de l'éloigner du maximum de champ électrique. La courbe de résonance s'en trouve moins perturbée et une mesure du coefficient de qualité et de la fréquence de résonance est possible. La position de l'échantillon est alors modifiée dans le modèle numérique afin de respecter les nouvelles conditions expérimentales. Comme précédemment, la comparaison des courbes simulées et expérimentales permet de déterminer la permittivité du matériau.

### **Application à la mesure d'échantillons de forme complexe**

Notre démarche de calcul impose que notre modèle numérique représente le banc de mesure le plus fidèlement possible. Il nous est alors nécessaire de prendre en compte la géométrie de notre échantillon. Dans le cas d'éclats de météorites par exemple, la géométrie peut être complexe et la rareté des matériaux nous empêche de les usiner.

Nous avons travaillé avec la cellule de transfert technologique ArchéoTransfert qui a développé une méthode afin de « numériser » en trois dimensions nos échantillons. Les fragments ont été numérisés avec un bras de mesure couplé à une tête scanner laser (faro Scan Arm ©). Ce système permet des mesures sans contact avec l'objet numérisé et minimise les opérations d'assemblage des scans (alignement, fusion). La résolution atteinte est de l'ordre de 0.3mm et la précision inférieure au 1/10e de mm. L'acquisition se fait sous la forme d'un nuage de points qui sera ensuite maillé de manière à obtenir un modèle 3D polygonal fermé. Une fois le maillage effectué, le volume a été directement calculé avec le logiciel d'acquisition Geomagic ©.

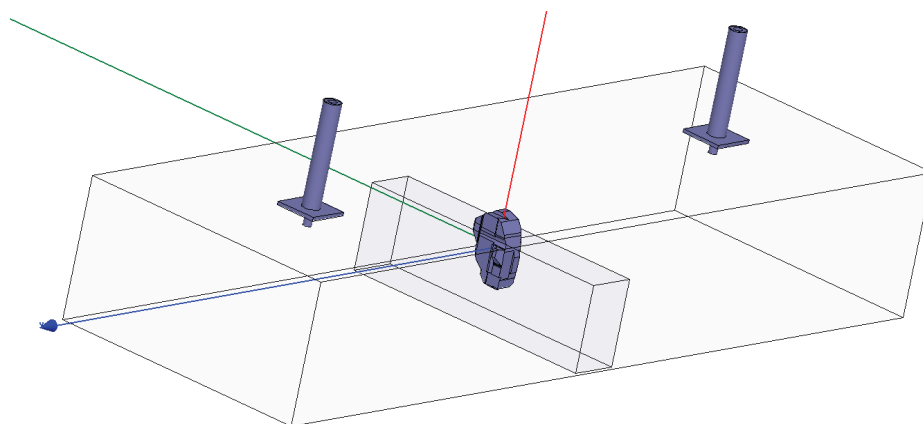
La photo et le scan 3D de l'éclat de météorite sont présentés sur la figure 20. Il nous est alors possible d'introduire dans notre modèle numérique ces géométries puis d'appliquer nos méthodes des moyennes ou fortes perturbations décrites précédemment (figure 21).



**Figure 20 : photo et le scan 3D de l'éclat de météorite**

Les mesures ont été réalisées à 1.26 GHz. Nous avons appliqué notre méthode en introduisant différentes résolutions de la représentation 3D de l'objet. Ainsi nous avons démontré qu'une résolution de 308 cellules pour représenter un volume d'échantillon de  $6373,6 \text{ mm}^3$  ( $\pm 1.5\%$ ) permettait de prendre en compte les effets de la forme de l'objet sur les mesures.

La valeur de permittivité obtenue est de  $4.4-j0.02$ . Si nous plaçons l'échantillon horizontalement au lieu de verticalement nous obtenons par notre méthode une valeur de  $3.8-j0.01$  qui est très proche de la valeur précédente pour un décalage de la fréquence de résonance ayant varié de 50% d'une position à l'autre et un coefficient de qualité divisé par 2.5.



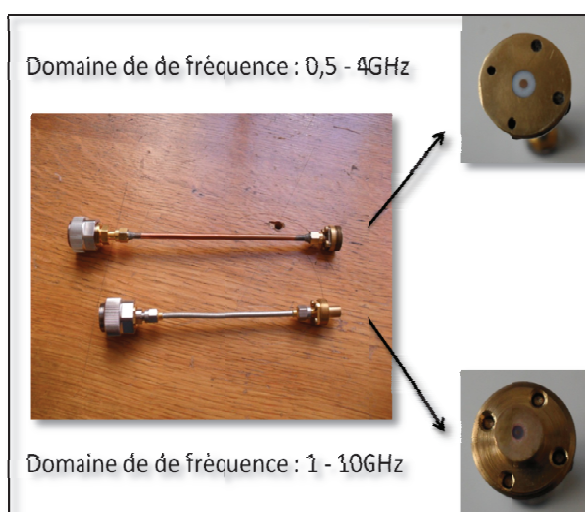
**Figure 21 : cavité modélisée avec l'éclat de météorite**

Notre méthode est désormais validée. Nous poursuivons les études engagées pour améliorer nos résultats pour de fortes perturbations en déplaçant l'échantillon.

#### 4.3.1.3. Sonde à effet de bout

La sonde de mesure est réalisée à partir d'un guide coaxial dont l'extrémité est coupée et auquel on ajoute un plan de masse rectangulaire ou circulaire, plus ou moins grand. Le principe de cette méthode consiste à mesurer le coefficient de réflexion  $S_{11}$  à l'interface du coaxial et de l'échantillon en contact et en déduire les propriétés diélectriques du matériau.

Une mesure s'effectue en posant la sonde sur le matériau à étudier. L'analyseur affiche alors des résultats en module et en phase. Un programme permet de remonter à la permittivité.



*Figure 22 : Sondes à effet de bout.*

De manière plus théorique, des études ont permis de montrer que la sonde se comporte comme un élément capacitif. La capacité en contact avec le milieu de permittivité  $\epsilon$  est égale à :

$$C = C_0 \epsilon^b \quad \text{Équation 14}$$

Où :

- C : capacité équivalente
- $\epsilon$  : permittivité relative de l'échantillon
- $C_0$  et  $b$  : constantes caractéristiques de la sonde.

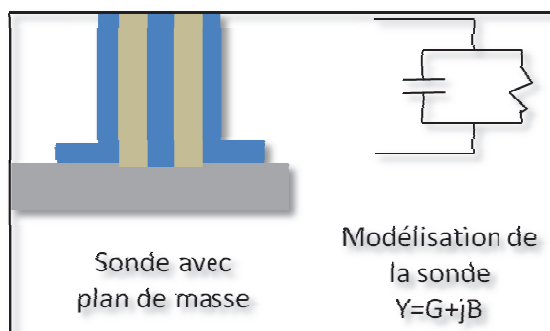
De plus, la connaissance de relations établies permet d'obtenir le modèle suivant :

$$\log(C' + C_0) = \log(C_0) + b \log(\epsilon) \quad \text{Équation 15}$$

Avec :  $C'$  : capacité de l'échantillon mesuré.

Ainsi, grâce à des mesures effectuées sur plusieurs matériaux de permittivité connue et un étalonnage minutieux de la sonde, il est possible de retrouver ses paramètres. Une fois  $C_0$  et  $b$  obtenus, nous pouvons déterminer facilement la permittivité de matériaux inconnus.

La sonde que nous avons utilisée pour les mesures présentées dans ce manuscrit avait pour caractéristiques  $C_0 = 3.10^{-14}$  et  $b=0,94$ .



**Figure 23 : Schématisation de la sonde à effet de bout.**

Enfin l'admittance complexe  $Y$  du circuit est égale à :

$$Y(\varepsilon, \omega) = j\varepsilon_0 \omega (C_f + C_0 \varepsilon) + (G_0 \omega^4 \varepsilon^2)^{5/2} \quad \text{Équation 16}$$

Avec :  $C_0$  : Capacité liée au champ électrique concentré dans le diélectrique en contact avec la sonde (caractéristique de la sonde)

$C_f$  : Capacité liée au champ électrique concentré dans la ligne de discontinuité (négligeable)

$G_0 \omega^4 \varepsilon^{5/2}$  : Conductance de la sonde qui est considérée comme négligeable pour de faibles valeurs du couple salinité/humidité.

Nous pouvons alors obtenir les relations permettant de déterminer la permittivité du matériau inconnu en contact avec la sonde :

$$\varepsilon'_r = B / \varepsilon_0 \omega C_0 - C_f / C_0 \quad \varepsilon''_{r \text{ éq}} = G / \varepsilon_0 \omega C_0 \quad \text{Équation 17}$$

La sonde à effet de bout est très performante sur des matériaux purs (solides ou liquides).

Cependant, l'avantage le plus important de cette technique de mesures est le domaine de fréquence sur lequel nous pouvons effectuer nos mesures (100 MHz – 5 GHz) avec une assez bonne précision.

Pour de trop basses fréquences, le coefficient de réflexion peut devenir trop faible pour être mesuré précisément. De plus, des travaux antérieurs (thèse de Thierry Colin, 1997) ont montré que l'épaisseur de l'échantillon faisait varier le paramètre  $C_0$  pour  $e < 2mm$ , mais cette variation peut aussi dépendre du type de matériau étudié.

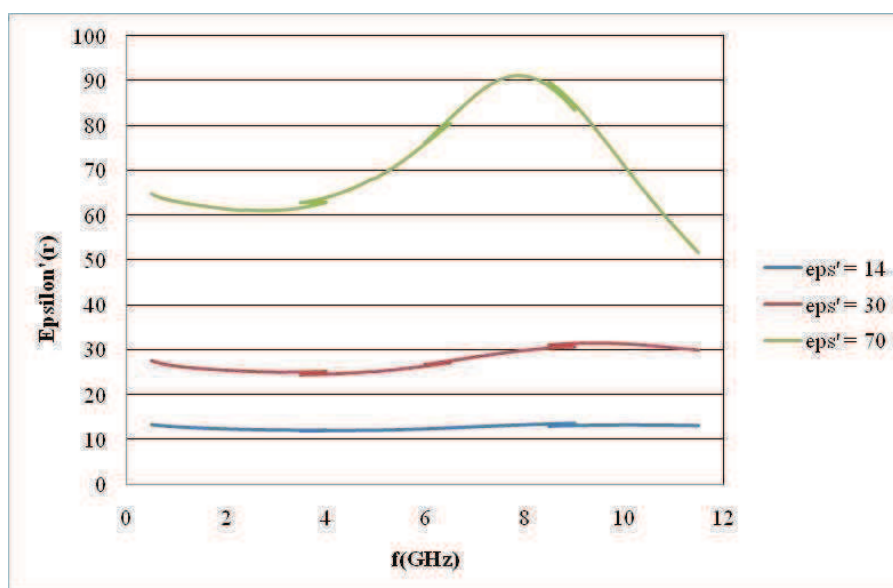
Théoriquement, la limite supérieure d'utilisation en fréquence de la sonde à effet de bout est donnée par la formule suivante :

$$F = \frac{1}{4} \times \frac{c}{e\sqrt{\varepsilon}} \quad \text{Équation 18}$$

Avec :  $c$  : célérité  $\sim 3E^8 m. s^{-1}$   
 $e$  : épaisseur de l'échantillon  
 $\varepsilon$  : permittivité

Par exemple, pour  $e = 5 mm$  et  $\varepsilon = 8$ , nous obtenons une fréquence maximale d'utilisation d'environ 5,3 GHz.

Nous avons réalisé des études du domaine de fréquence de la sonde grâce à des simulations numériques. Ces études nous ont permis de mieux contrôler la précision de nos mesures.

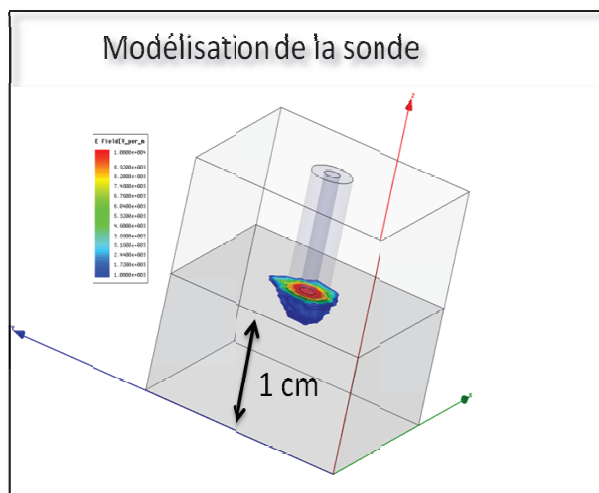


**Figure 24 : Domaine de validité en fréquence des mesures par sonde à effet de bout**

L'inconvénient majeur de cette technique de mesure provient de la pression appliquée sur la sonde lors de la mesure. En effet, selon la pression, une lame d'air ou d'eau peut entraîner des mesures de permittivité plus faibles que la permittivité réelle de l'échantillon.

Ce phénomène est lié à la faible pénétration de l'onde dans le matériau (voir figure 25). Nous réalisons donc des mesures quasi surfaciques, la sonde doit être la plus lisse possible,

tout comme la surface de contact. Pour cela, il est nécessaire de poncer la surface de la sonde afin qu'il n'y ait pas d'aspérité ou de problème de contact entre le matériau et la sonde, puis polir l'échantillon de façon à obtenir une surface très plane.



*Figure 25 : Modélisation de l'onde surfacique.*

### Exemple de mesures sur des échantillons de désert Bolivien (salar de Uyuni)

Le Salar de Uyuni est un vaste désert de sel situé sur les hauts plateaux du sud-ouest de la Bolivie.

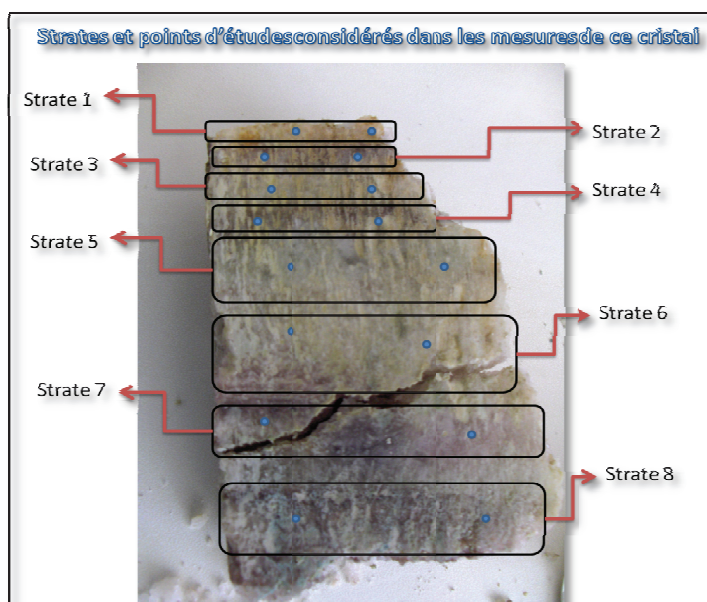


*Figure 26 : Salar de Uyuni*

Une étude de roches nous a été proposée dans le cadre d'une coopération avec le laboratoire isardSat en Espagne (Maria José Escoruela). Il s'agissait d'une roche provenant du salar de Uyuni, composé de potassium, bore, magnésium, lithium, sulfate de sodium et de borax (carbonates). Le lithium étant un élément rare, coûteux et de plus en plus utilisé pour la conception de batteries ou de piles, il serait avantageux de pouvoir le repérer par télédétection, grâce à un signal précis et connu. Pour cela, il est nécessaire de caractériser cette roche au moyen de mesures de constantes diélectriques [46].

Le cristal étant un solide assez compact et presque impossible à transformer en poudre, les mesures ont toutes été réalisées avec la technique de la sonde à effet de bout. Le « sol » est structuré en strates. Notre étude, pour être la plus rigoureuse possible, a donc dû considérer chaque strate.

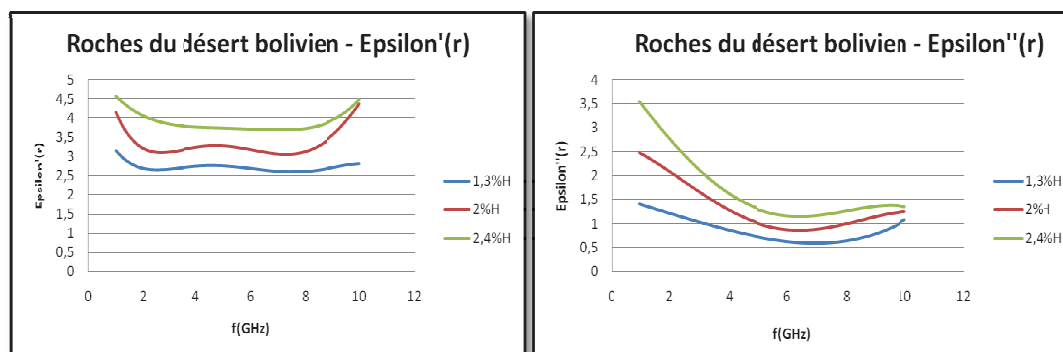




**Figure 27 : Strates et points d'études considérés.**

Ainsi, nous avons étudié huit strates en effectuant deux mesures par strate, à l'aide d'une sonde à effet de bout de gamme de fréquence 0,5 – 4 GHz et de caractéristique  $b=0,94$ .

Nous avons commencé par réaliser des mesures sur un échantillon, à humidité ambiante (soit 1,3%*H*) que nous avons ensuite humidifié petit à petit dans une chambre d'humidification. La roche est un cristal composé de sels. Il est donc impossible de la plonger entièrement dans de l'eau sans provoquer sa dissolution. Pour humidifier la roche nous l'avons placée dans une atmosphère saturée en humidité. Elle a ainsi pu absorber lentement de l'eau sans se dissoudre. Nous n'avons pu atteindre qu'une humidité de 2,4%*H* sans dissoudre l'échantillon. Nous avons ensuite tenté de créer des saumures (solutions saturées en sel). Cette phase d'étude est complexe et encore en cour.

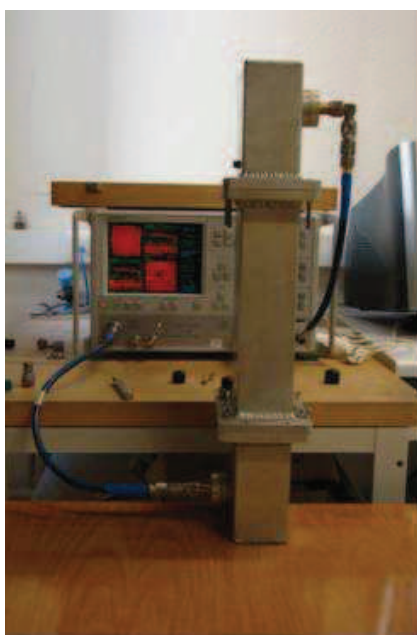


**Figure 28 : Comparaison de la roche pour différentes humidités.**

#### 4.3.1.4. Guide d'onde

Cette technique utilise les paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$ . Elle détermine la permittivité du matériau à l'aide du comportement en réflexion et en transmission de l'onde émise.

Le banc de mesure se compose de deux transitions coaxial-guide d'onde non solidaires l'une de l'autre entre lesquelles un porte-échantillon et un guide d'onde viennent se positionner.



*Figure 29 : Banc de mesure.*

Plusieurs étapes sont nécessaires pour obtenir la permittivité d'un matériau. Un étalonnage est au préalable effectué afin de pouvoir corriger les résultats des mesures par la suite. Lorsque cette étape est finie, il suffit de remplir la bride avec le matériau et de la placer dans le guide. Une fois la mesure réalisée, un programme écrit sous le langage VEE transfère les données des paramètres S dans un tableau Excel. Ces données, ainsi que celles de l'étalonnage, sont alors introduites dans un autre programme écrit sous le logiciel Matlab qui calcule les valeurs de permittivité corrigées.

Pour ce type de mesure, la détermination des paramètres électromagnétiques de l'échantillon est rendue possible grâce à la méthode de Nicolson, Ross et Weir. Cette

procédure de calcul est basée sur les mesures de réflexion et de transmission. C'est à l'aide des paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  que nous sommes capables de calculer  $\Gamma_1$ , coefficient de première réflexion, et T, coefficient de transmission grâce aux relations suivantes :

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2 S_{11}}$$

$$\Gamma_1 = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad \text{avec} \quad |\Gamma_1| \leq 1$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma_1}{1 - (S_{11} + S_{21}) \Gamma_1}$$

*Équation 19*

De plus, sachant que les échantillons étudiés ne présentent pas de caractéristiques magnétiques, on obtient les résultats suivants :

$$\begin{cases} \mu = 1 \\ \underline{\varepsilon}_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \frac{\gamma_g \lambda_{0g}}{j2\pi} \frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \end{cases}$$

Où

$$\gamma_g = \frac{-1}{2d} \ln(T) = \frac{-1}{2d} (\ln(|T|) + j\Phi)$$

Et

$$\lambda_{0g} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}}$$

*Équation 20*

Avec :  $\gamma_g$  : Constante de propagation guidée dans le guide rectangulaire ;

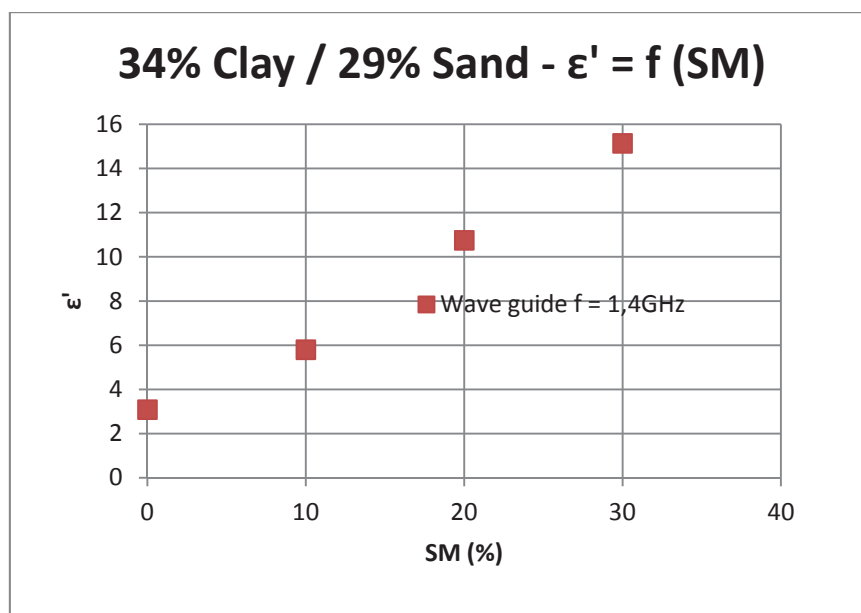
$\lambda_{0g}$  : Longueur d'onde dans le guide vide ;

$\lambda_0$  : Longueur d'onde dans le vide ;

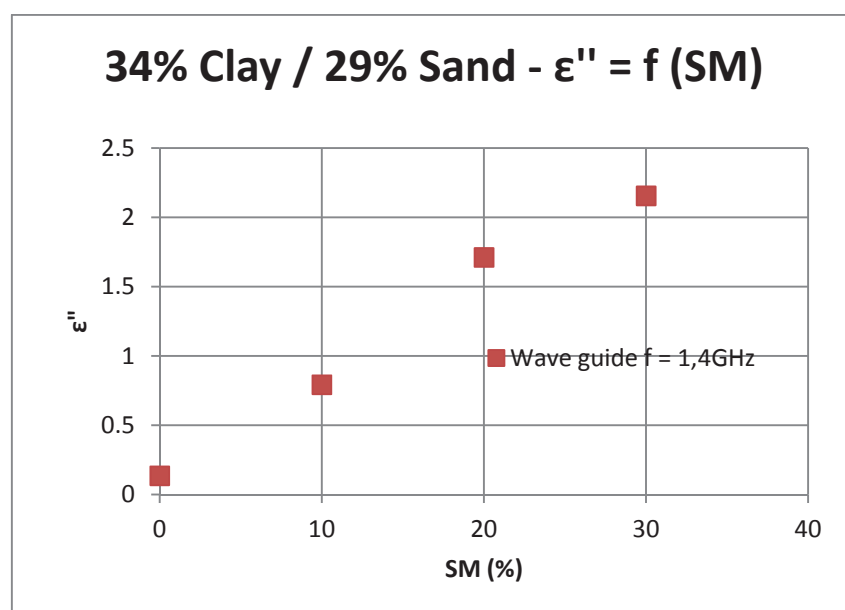
$\lambda_c$  : Longueur d'onde de coupure du guide rectangulaire

$\lambda_c = 2b$  où b est la largeur caractéristique du guide

L'avantage principal de la mesure en guide réside dans le fait que l'échantillon étudié est suffisamment conséquent pour représenter l'hétérogénéité des milieux naturels. Un protocole minutieux permet des mesures en fonction de l'humidité de l'échantillon. Toutefois, bien que l'utilisation de mélanges épais soit un avantage, cette caractéristique peut présenter des inconvénients, tels l'apparition de gradients d'humidité et de température, l'intégration d'une faible rugosité etc...



*Figure 30 : Partie réelle de la permittivité*



*Figure 31 : Partie imaginaire de la permittivité*

## Mesures d'échantillon de litière [32] [38]

Le but de ce travail a été d'étudier les propriétés diélectriques d'un type de litière et de terre afin d'intégrer ces valeurs à un modèle analytique multi couches de sol. L'objectif était de mettre en évidence les effets de cette strate sur le système multi couche global [55]. Ceci permettra d'aboutir à une formulation analytique simple d'un modèle de litière qui puisse être intégré à l'algorithme de calcul de SMOS [9] [10] afin de recueillir des informations sur l'humidité à partir des mesures d'émissivité [67][68][69][70].

### Présentation du protocole de mesure

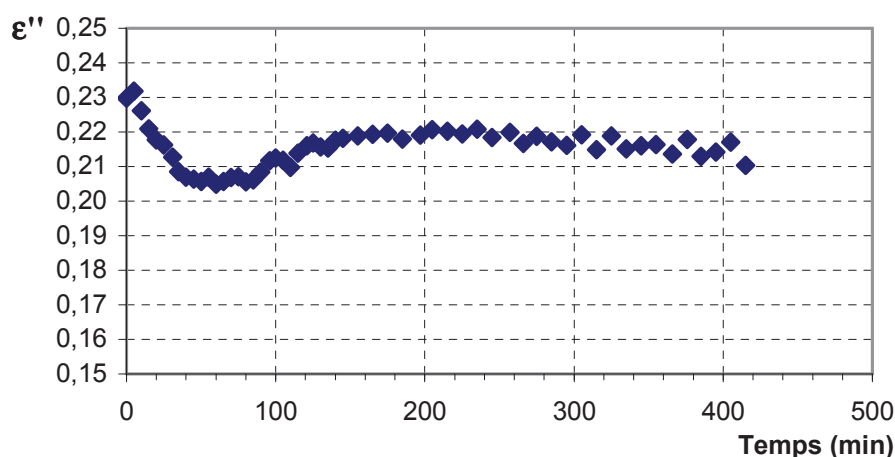
La première étape de cette étude a consisté à réaliser des mesures de permittivité afin de pouvoir les implanter par la suite dans les modèles numériques et analytiques de calcul d'émissivité.

Les résultats présentés concernent des échantillons prélevés le 15 février 2006 sur le site INRA du Bray (33). Ceux-ci se présentaient dans une configuration multicouche constituée par une première couche de 1 à 10 cm de litière sur le sol puis d'une couche de 10 à 30 cm de paille. Avant de procéder aux mesures les échantillons ont été pesés et séchés en étuve (terre et litière). Nous avons mesuré des permittivités faibles pour la paille, en conséquence cette étude ne tiendra pas compte de la couche de paille. Toutes les mesures ont été réalisées en guide d'onde. Cette méthode nous permet de travailler sur des volumes d'échantillons suffisamment importants pour représenter l'hétérogénéité du milieu. Les échantillons sont maintenus dans le guide à l'aide d'une bride dont le fond est constitué d'une feuille de Mylar de 100 $\mu$ m d'épaisseur considérée comme quasi transparente aux ondes électromagnétiques. Deux épaisseurs de brides ont été utilisées, en fonction des permittivités attendues pour chacun des matériaux. Les mesures s'effectuent par l'intermédiaire d'un analyseur de réseaux ANRITSU 37325A qui est piloté par ordinateur pour l'acquisition et le traitement des données. Les mesures sont effectuées dans une salle régulée en température. L'analyseur nous permet de mesurer les coefficients complexes  $S_{21}$  et  $S_{11}$  de la matrice de répartition. La détermination des paramètres électromagnétiques de l'échantillon se fait grâce à la méthode de Nicolson Ross Weir (NRW) pour les guides d'onde rectangulaires. L'introduction de notre échantillon dans le guide produit un changement d'impédance caractéristique. L'ensemble des réflexions multiples dans le matériau est pris en compte dans les expressions des coefficients

$S_{11}$  et  $S_{21}$  qui sont mesurés. Un algorithme de calcul permet ensuite d'obtenir la permittivité complexe du matériau ;  $\epsilon'$  et  $\epsilon''$ , sur la plage de mesure considérée, en l'occurrence [1.3GHz 1.5GHz]. La perméabilité relative du matériau sera égale à 1 car ces matériaux ne sont pas magnétiques.

La variation de teneur en eau de l'échantillon s'effectue par injection d'une quantité fixée d'eau distillée. Ainsi les phénomènes de diffusion de l'eau dans l'échantillon vont avoir un effet notable sur les résultats des mesures.

La figure 32 illustre les résultats de nos mesures en fonction du temps pour une humidité volumétrique fixée à 15.54% .



**Figure 32 : Influence, sur  $\epsilon''$ , de la répartition de l'eau dans un échantillon de litière pour une humidité de 44.95%.**

Ces mesures permettent d'estimer l'erreur induite par le temps imposé entre chaque point.

Il a été ainsi possible de considérer qu'avec un délai de 200mn, les mesures fournissent une bonne estimation de la permittivité de la litière alors que ce délai passe à 300 mn pour la terre. Cette étude préliminaire a permis de mettre en évidence un phénomène transitoire lors de la mesure. En effet l'absorption de l'eau n'est pas instantanée et influence donc les résultats. De plus la méthode de post traitement est prévue pour un matériau homogène, ce qui explique les fluctuations non négligeables de la permittivité lorsque le temps d'attente entre chaque mesure varie. Il est donc nécessaire de patienter suffisamment longtemps pour que l'erreur commise soit raisonnable.

Cette étude permet également de supposer que le phénomène de pluie a une influence non négligeable sur la permittivité des matériaux et donc sur l'émissivité de la structure géologique.

### Présentation des mesures

Dans la nature, l'humidité volumétrique de la terre varie habituellement entre 0% et 30% (au maximum 40 à 50% à saturation). C'est pour cette raison que l'approximation induite par les mesures se limitera à ce domaine.

Rappelons les deux méthodes de calcul de l'humidité (volumétrique pour la terre et gravimétrique pour la litière) :

$$\left\{ \begin{array}{l} SM = \frac{P_W^S}{P_{Dry}^S} \rho_b \\ LM = \frac{P_W^L}{P_{Dry}^L + P_W^L} \end{array} \right. \quad \text{Équation 21}$$

où :  $P_W^I$  est le poids d'eau présente dans l'échantillon

où  $I=S$  pour le sol et  $I=L$  pour la litière ;

$P_{Dry}^I$  est le poids de l'échantillon sec ;

$\rho_b$  est la masse volumique de la terre.

Contrairement à la terre, la litière est rarement sèche dans la nature. Son humidité gravimétrique varie plutôt entre 15% et 80%. L'étude sera donc focalisée sur ce domaine d'humidité.

Les erreurs de mesures ont plusieurs causes. Il y a celles entraînées par la pesée de l'échantillon et de la bride, celles engendrées par la méthode de mesure, par la méthode de calcul de la permittivité et enfin les erreurs résultant de la répétitivité de la méthode de mesure.

Concernant les incertitudes engendrées par la méthode de mesure, la calibration de l'analyseur de réseaux permet de corriger certaines imperfections du système mais il en subsiste telles que le bruit de mesure de l'appareil, les différentes dérives, les coefficients aux différentes interfaces....

Les incertitudes liées à la méthode de calcul sont, quant à elles, dues aux erreurs d'arrondis réalisés lors des calculs numériques. Ces deux types d'erreurs sont difficiles à quantifier.

Néanmoins, nous estimons à  $\pm 5\%$  l'influence de cet ensemble d'incertitudes sur les valeurs des résultats de mesures.

L'erreur sur le calcul de l'humidité est principalement due aux erreurs de pesées des échantillons, pesées effectuées par l'intermédiaire d'une balance où le poids est juste au dixième près. Les masses mesurées sont donc exactes à  $\pm 0.05$  g près.

Concernant les erreurs sur l'évaluation des poids, nous la prendrons égale à  $\pm 0.10\%$  car les poids d'eau et poids secs sont calculés par différences respectivement du poids mouillé, du poids sec et du poids bride + échantillon et du poids de la bride seule.

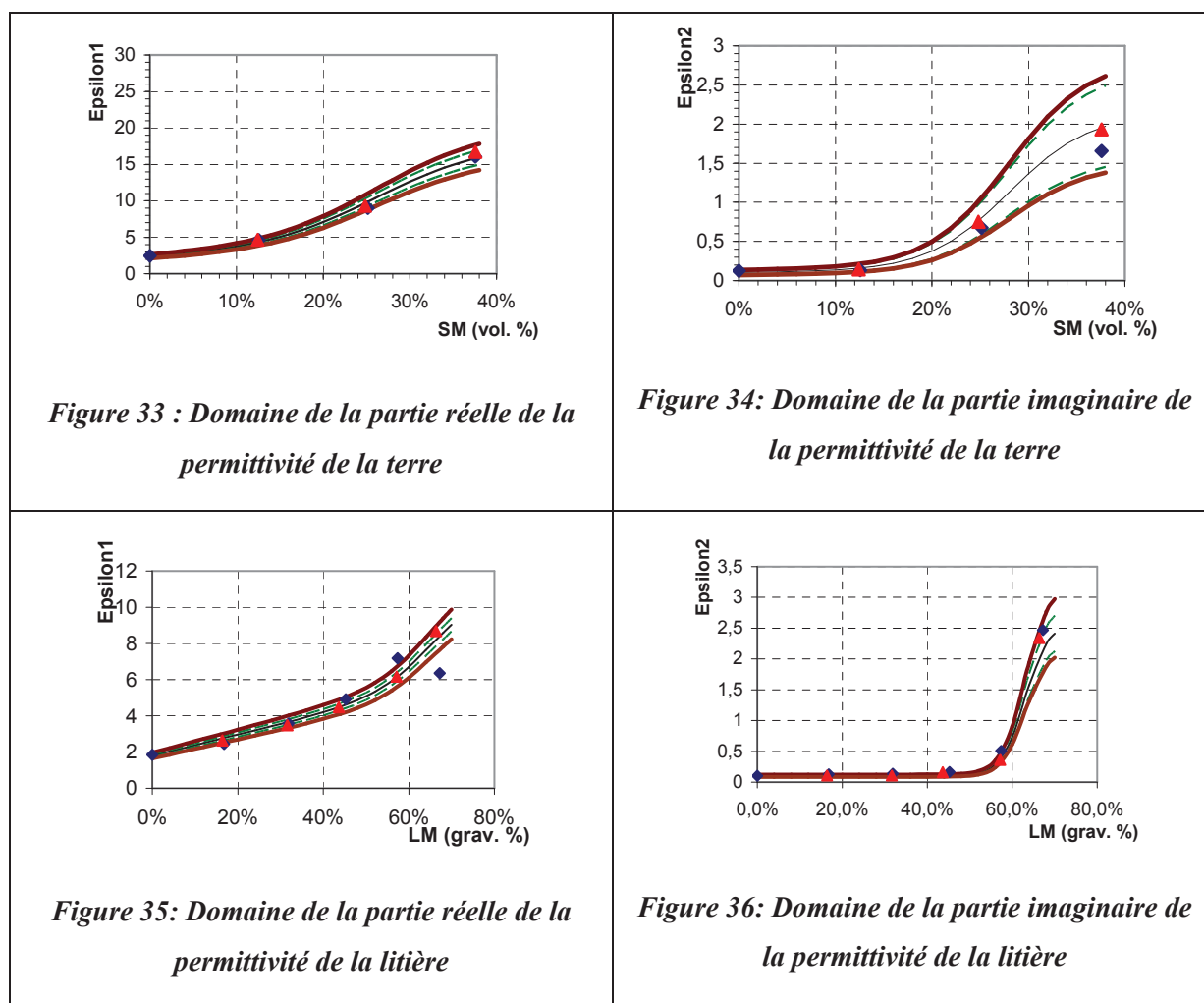
Finalement, les calculs effectués, l'erreur de calcul de l'humidité du sol et de la litière sont respectivement de  $\pm 0.11\%$  et de  $\pm 0.19\%$ .

Afin de prendre en compte dans nos mesures l'hétérogénéité des milieux et la répétitivité des résultats nous avons effectué plusieurs mesures sur les échantillons en les disposant de manières différentes dans le guide.

De ces résultats nous avons pu définir l'écart type qui permet d'intégrer autour de notre résultat de mesure un domaine des permittivités possibles.

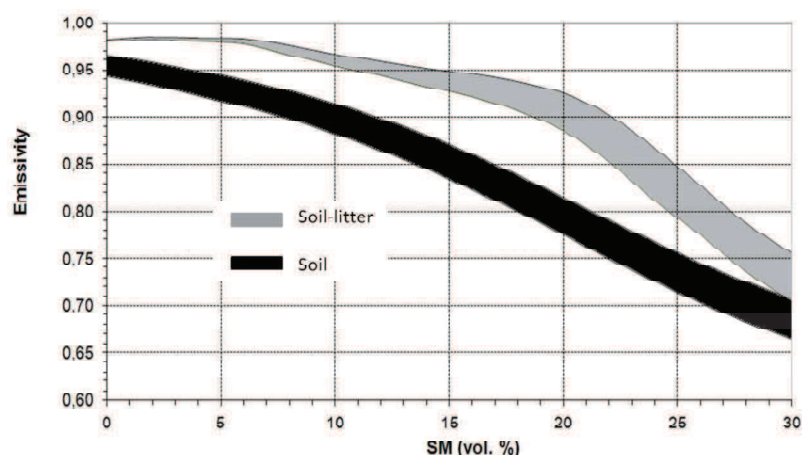
Les différentes erreurs ou variations de la mesure amènent à définir non plus une courbe de type permittivité en fonction de l'humidité, mais un domaine de permittivité évoluant en fonction de l'humidité du milieu considéré. Deux domaines peuvent être définis. Le premier sera appelé le domaine des permittivités possibles et le deuxième le domaine des permittivités corrigées. Le premier intégrera les fluctuations des mesures que nous avons observés (hétérogénéité des milieux) et le deuxième intégrera en plus les erreurs de mesure. Ces résultats sont présentés sur les figures 33 à 36; les courbes en pointillé délimitent le domaine des permittivités possibles et les courbes pleines le domaine des permittivités corrigées.





### Exploitation des mesures

Afin d'estimer la pertinence de la précision de nos mesures nous avons intégré les domaines de permittivité mesurés dans un modèle numérique simplifié de calcul d'émissivité développé à l'aide du logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator). La configuration de calcul est un système bi couches sans rugosité avec une observation au Nadir. Des mesures nous ont permis de définir une relation entre l'humidité du sol (SM) et celle de la litière (LM). Les résultats suivants de l'étude du système sol+litière sont présentés uniquement en fonction de SM.



*Figure 37 : domaine d'émissivité*

Nous avons tout d'abord intégré le domaine des permittivités possible dans notre modèle HFSS bi-couches (terre + litière de 3 cm d'épaisseur). Le domaine d'émissivité calculé est représenté sur la figure 37 par la zone grisée pour la structure sol-litière et en noir pour le sol nu. Nous constatons que nos mesures et notre modèle nous permettent de bien appréhender la valeur d'émissivité que nous pourrions mesurer sur ce type de sol à l'aide d'un radiomètre. Nous pouvons noter sur la figure que l'écart sur le calcul de l'émissivité, intégré par les erreurs de mesures, est au maximum de 0.01 pour une émissivité de 0.71 soit une erreur de 1.41%.

À la vue de nos résultats, nous constatons que notre protocole de la mesure nous permet d'évaluer correctement les caractéristiques électromagnétiques des milieux géologiques complexes tels que la litière. Un prolongement de ce travail a consisté à étudier l'évolution de ces propriétés pendant un an. Ceci permet de prendre en compte de nouveaux facteurs tels que la constitution de la litière ou de la température (la terre froide en hiver et la terre très sèche en été...). Dans cette étude nous avons considéré une couche uniforme de litière de 3 centimètres d'épaisseur et nous avons constaté que cette couche influence de manière significative l'émissivité du système de sol/litière. En réalité cette couche de litière n'est pas uniforme en épaisseur. Nous avons introduit cette nouvelle fonctionnalité dans notre modèle.

### **Utilisation en chambre climatique**

Les propriétés des sols sont sensibles à la température.

Pour effectuer des mesures en température, une chambre climatique (Vötsch VC 0034) contrôlable en température et en humidité est utilisée. Elle permet d'étudier des échantillons en haute température tout en gardant son humidité constante (collaboration Institut EGID-Adrian Cerepi).

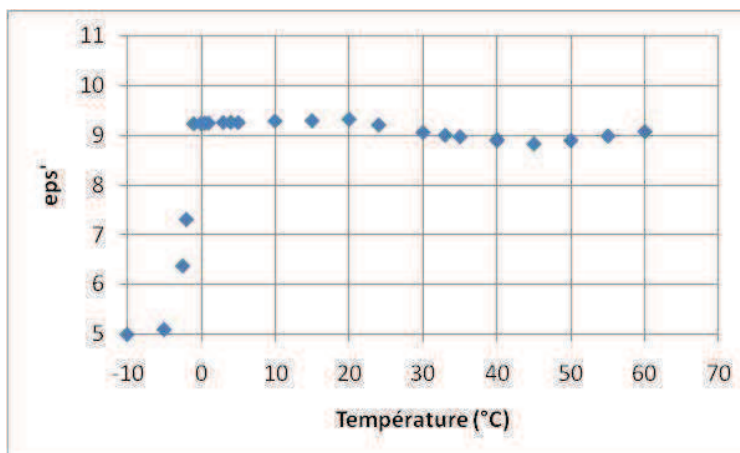


*Figure 38 : Enceinte climatique (EGID)*

Pour permettre à l'échantillon d'atteindre la température souhaitée tout en gardant son humidité, le guide d'onde de mesure a dû être percé (voir figure 39).



*Figure 39 : Guide d'onde*

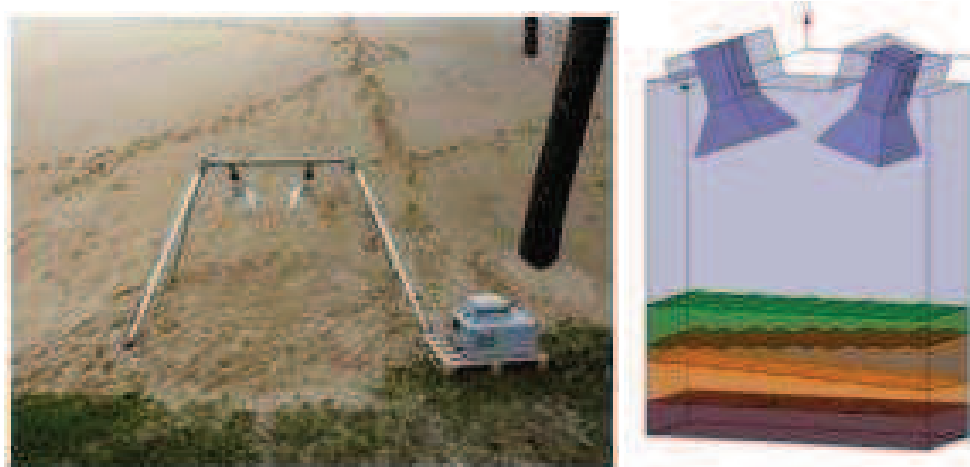


*Figure 40 : Partie réelle de la permittivité du sol du SMOSREX SM = 20%*

#### 4.3.1.5. Caractérisation électromagnétique in-situ de sols en bande L. Application à l'identification de profils géologiques.

Le développement des instruments de mesure des applications de télédétection spatiale (active ou passive) nécessite des phases de validation in-situ. Les équipements (radar ou radiomètre) doivent être testés sur des profils géologiques réels. Nous devons donc posséder des informations précises sur ces profils étudiés (permittivités, humidité, épaisseurs de couches...). Des capteurs (humidité), des carottages (épaisseurs) ou des mesures en laboratoire (permittivité) nous donnent des informations ponctuelles sur le profil considéré alors que les équipements utilisés effectuent une mesure globale sur un volume plus ou moins important de la structure géologique. Pour obtenir des d'informations globales et instantanées sur le profil nous avons mis au point un banc de caractérisation in-situ, basé sur deux antennes cornets, associées à un logiciel d'identification de profils.

Le principe de ce système d'exploitation repose sur l'utilisation d'une base de données renfermant les réponses électromagnétiques de nombreuses configurations géologiques. Un utilitaire, programmé sous Matlab, permet de comparer les mesures obtenues par le banc avec des résultats simulés. Ces derniers sont générés en utilisant le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) de la société ANSOFT-ANSYS [12]. Ceci rend possible la caractérisation électromagnétique des milieux considérés ainsi que la définition de caractéristiques morphologiques, telle que l'épaisseur des différentes couches qui composent un milieu.

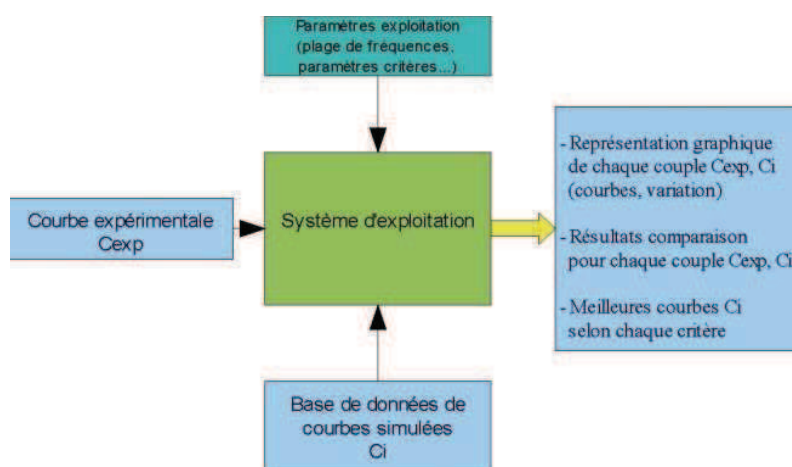


*Figure 41 : Banc de mesure in-situ et modèle numérique*

Le banc de mesure in-situ est constitué d'un portique, de deux antennes cornets et d'un analyseur de réseau vectoriel portable ANRITSU 2026 A (figure 41). Les antennes sont choisies en fonction de la gamme de fréquence de mesures désirées. Le modèle numérique représentant le banc de mesure a été créé à l'aide du logiciel HFSS et est basé sur la méthode des éléments finis pour la résolution des équations de Maxwell.

### Principe du logiciel d'identification de profils

Le système d'exploitation va comparer la courbe expérimentale, nommée  $C_{exp}$ , avec une base de données de courbes simulées, nommées  $C_i$ . Le système choisira plusieurs courbes optimales, en fonction de différents critères implémentés. Cette structure est représentée dans la figure 42.



**Figure 42 : Structure du logiciel d'identification**

L'objectif n'est pas une identification automatique des caractéristiques électromagnétiques du milieu mesuré. Le système permet l'exploitation des mesures en réflexion ou en mesure bi-statique des milieux géologiques, facilitant la caractérisation des milieux.

La démarche pour l'exploitation passe par une modélisation du système de mesure et du milieu mesuré. Une fois la modélisation faite, il est possible d'obtenir une base de données de courbes en fonction de plusieurs paramètres du milieu. Ces paramètres sont les caractéristiques électromagnétiques (permittivité), ou des caractéristiques morphologiques du milieu, tel que l'épaisseur d'une couche de matériau ou la rugosité.

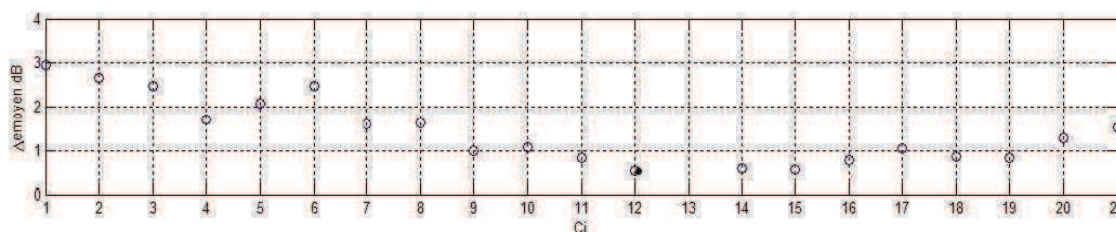
Il est aussi possible d'envisager la construction d'une base de données contenant des courbes générées pour plusieurs configurations de milieu (monocouche, bicouche, avec rugosité...) et pour plusieurs épaisseurs et permittivités.

Si la base de données ne contient aucun des cas équivalents au milieu étudié, une nouvelle modélisation est nécessaire.

Le système va suggérer une ou plusieurs courbes optimales. À la fin, ce sera à l'utilisateur de décider quelles courbes sont des solutions possibles, en prenant en compte des paramètres des courbes simulées. Par exemple, une courbe correspondant à un milieu monocouche d'une certaine épaisseur et permittivité peut avoir la même forme que la courbe d'un système bicouche avec des épaisseurs différentes et des permittivités différentes sur une plage limitée de fréquences. Plusieurs solutions sont alors possibles, et c'est l'utilisateur, qui, en connaissant les conditions de la mesure ou en changeant la largeur de la plage de fréquence pourra lever l'indétermination et pourra choisir finalement la meilleure courbe.

### Structure interne du système d'exploitation sous Matlab

Les données d'entrées au système sont les noms des fichiers de mesure et ceux simulés et les paramètres nécessaires pour définir les comparaisons. La courbe expérimentale est contenue dans un fichier texte généré par l'analyseur de réseaux ANRITSU 2026 A utilisé. Les données simulées sont aussi enregistrées dans des fichiers texte générés par le logiciel HFSS. Dans un premier temps, le programme lit ces fichiers et garde en mémoire toutes les données. Puis, des comparaisons selon différents critères sont effectuées. Enfin, les résultats des comparaisons sont présentés sous forme de courbes.



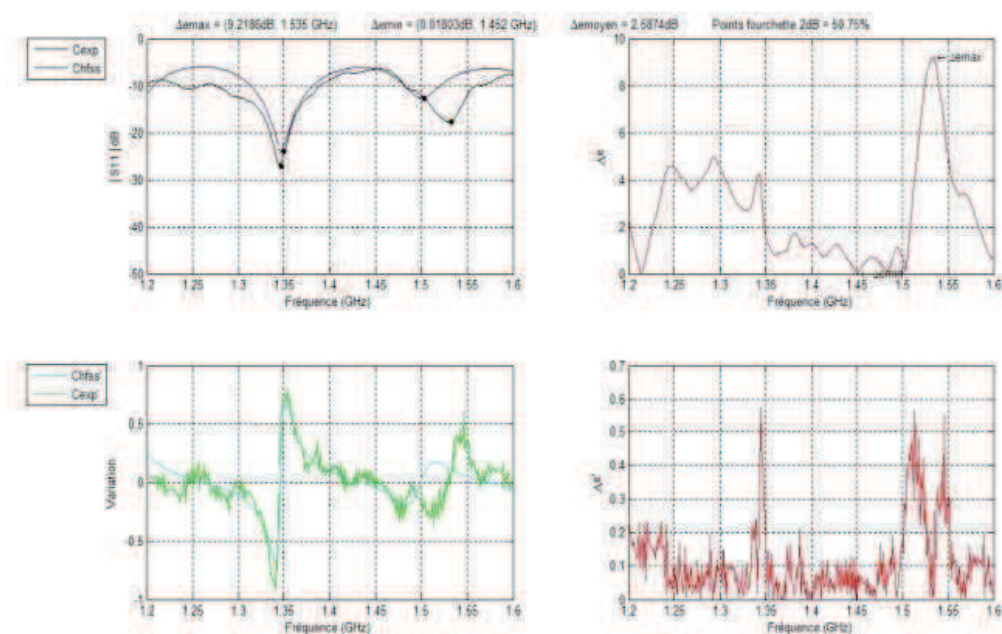
**Figure 43 : Courbe de présentation de critère de comparaison**

Pour chaque critère, une série de points présente le résultat obtenu pour chaque comparaison d'une courbe simulée  $C_i$  avec la mesure (figure 43). Un point noir indique la

meilleure courbe pour chaque critère. Un point rouge indique l'impossibilité d'appliquer le critère pour la courbe Ci donnée.

Plusieurs critères ont été implémentés. Ces critères ont été choisis en tenant compte les caractéristiques des courbes mesurées.

Le premier critère est le décalage entre les pics de résonance. Le programme détecte les pics (minimums) présents dans la courbe expérimentale et les courbes simulées et calcule les décalages en fréquence entre eux. Pour chaque pic, la meilleure courbe sera celle avec un décalage minimal. Pour ce premier critère, plusieurs courbes de résultats seront présentées si plusieurs pics sont présents. Le programme recherche les pics de la courbe expérimentale et les pics des courbes simulées. Si le nombre de pics n'est pas le même, un point rouge apparaît dans la courbe de résultats pour la courbe Ci correspondante. Si le nombre de pics est le même, les décalages sont calculés et présentés sur une courbe spécifique à chaque pic. Il faut noter que la détection des pics de résonance équivaut à la détection des minimums plus prononcés dans les courbes. L'algorithme développé utilise un filtrage passe-bas pour cette détection. C'est la fréquence de coupure de ce filtre qui va déterminer les pics détectés. Il est donc possible de changer cette fréquence pour d'autres types de courbes.



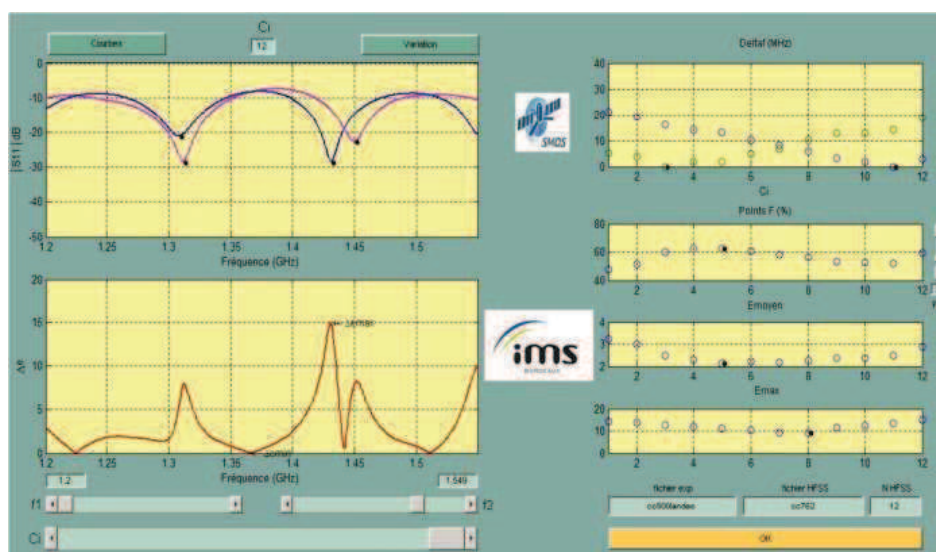
*Figure 44 : Exemple de résultats*

Le deuxième critère est le nombre de points compris dans une fourchette d'erreur autour des valeurs expérimentales: Cette fourchette d'erreur est exprimée en dB. Le programme calcule le nombre de points présents dans cette fourchette, exprimé en %. La meilleure courbe est celle qui maximise cette valeur ce qui symbolise un faible écart entre les courbes considérées.

Le troisième critère est le calcul de l'erreur moyenne entre la courbe expérimentale et les courbes simulées. La meilleure courbe est bien sûr celle qui minimise cette valeur.

Enfin, le dernier critère est le calcul de l'erreur maximale entre la courbe expérimentale et les courbes simulées. La meilleure courbe est celle qui minimise cette valeur.

Le nombre important de paramètres à manipuler et de résultats à visualiser nous a conduit à développer une interface graphique d'utilisation. Cette dernière est appelée GUI (Graphical User Interfaces) dans Matlab. Les dernières versions de Matlab (ultérieures à 5.0-1997) disposent d'un outil baptisé GUIDE (Graphical User Interface Development Environment) spécifique à la création de ce type d'interface.



**Figure 45 : Interface utilisateur**

Nous avons donc créé une interface utilisateur afin de simplifier l'utilisation du logiciel (figure 45). Dans la partie supérieure gauche, la courbe expérimentale est représentée avec les courbes simulées. Des points noirs indiquent les pics de résonance détectés. Dans la partie inférieure gauche, c'est la courbe d'erreur qui est représentée. La courbe simulée représentée est sélectionnée avec le *slider*  $C_i$ , dans la partie basse. Il est aussi possible de visualiser les taux de variation, en appuyant sur le bouton nommé "variation". Ce taux de variation est



simplement calculé comme la différence entre deux échantillons du signal, et constitue une approximation de la dérivée. Les *sliders* "f1" et "f2" définissent la plage de fréquences représentée et utilisée pour réaliser les comparaisons.

Dans la partie de droite, les courbes des différents critères sont représentées. De haut en bas nous trouvons les valeurs pour les décalages des pics, les points dans la fourchette d'erreur, l'erreur moyenne et l'erreur maximale pour chaque courbe simulée. Le *slider* "FdB" permet à l'utilisateur de changer la taille de la fourchette d'erreur. Les noms de fichiers et le nombre de fichiers HFSS sont introduits dans les espaces indiqués, dans la partie inférieure à droite. Une analyse automatique et successive d'un ensemble de fichiers est possible ce qui permet un traitement rapide des données.

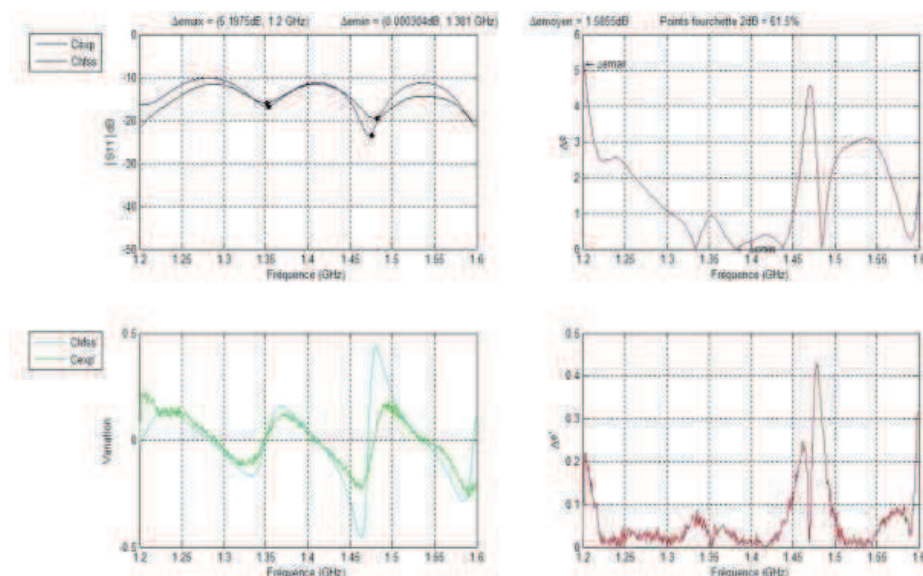
Dans cette première implémentation du système d'exploitation, c'est l'utilisateur qui doit faire la correspondance entre les courbes simulées  $C_i$  et les caractéristiques électromagnétiques de la structure représentée. Les résultats des critères sont présentés en fonction des  $C_i$  ; l'axe des abscisses indiquant le numéro de la courbe  $C_i$ . Il faut noter que cette implémentation n'est pas adaptée à l'utilisation d'une base de données importante. Dans des futures versions du système, un système d'entêtes des fichiers HFSS sera utilisé. Il est en cours de mise au point et il permettra une gestion de la future base de données de courbes simulées. Cela permettra au système d'exploitation de montrer sur l'écran les caractéristiques électromagnétiques des meilleures courbes, améliorant ainsi la démarche d'exploitation.

### **Exemple de résultats**

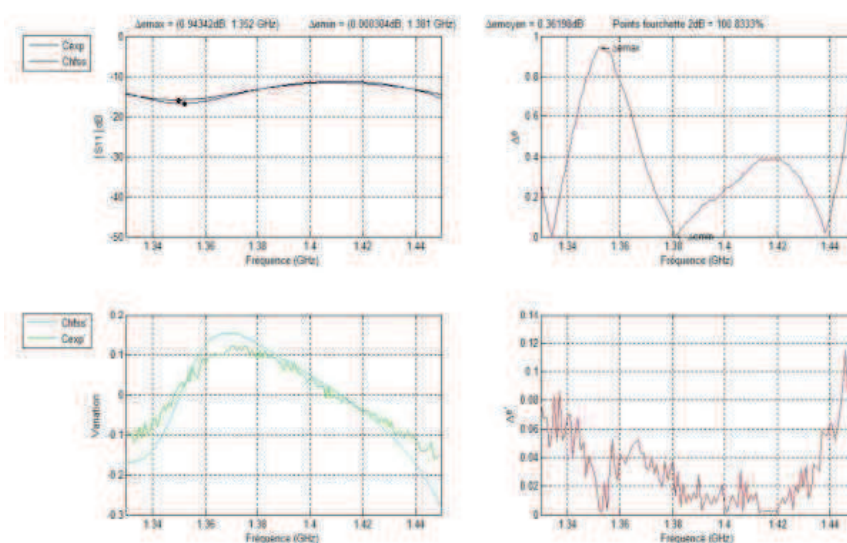
Le cas pratique que nous présentons a été réalisé dans la forêt des landes (Site du Bray 33 France). Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une campagne de mesures destinée à valider l'algorithme de traitement des données de la mission spatiale SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity). [9][10][67][68]

La figure 46 montre que l'erreur commise entre les fréquences 1.34 GHz et 1.45 GHz est de 1dB au maximum. Les courbes sont presque identiques, l'identification est donc possible. Nous pouvons attribuer les différences observées (beaucoup plus grandes que les écarts trouvés lors d'études préliminaires en laboratoire) à plusieurs facteurs. D'abord, nous devons prendre en compte les erreurs de mesures expérimentales, c'est à dire, les erreurs de mesure de la hauteur, de l'inclinaison de(s) l'antenne(s) et les erreurs de mesure de l'analyseur. Nous

devons aussi prendre en compte les erreurs de modélisation (taille du domaine de calcul, raffinement du maillage, critères de convergence du calcul ...).



**Figure 46 : Exploitation sur un cas réel 1.3 GHz – 1.5 GHz**



**Figure 47 : Exploitation sur un cas réel 1.34 GHz – 1.45 GHz**

De plus, la surface du terrain n'est pas parfaitement plane (des rugosités sont présentes), et le milieu n'est pas homogène (inclusions, gradient d'humidité...). Le modèle numérique utilisé pour créer la base de données simulées exploitée lors de cette étude ne prenait pas encore en

compte la rugosité. Depuis la rugosité est introduite dans notre modèle numérique ce qui améliore la représentation de la structure pédologique simulée.

En utilisant des mesures de permittivité de la terre en fonction de l'humidité obtenues au laboratoire IMS, il est possible, à partir de la permittivité retrouvée pour la terre, d'estimer l'humidité du sol mesuré. Les valeurs de la partie réelle et imaginaire de la permittivité obtenue,  $\epsilon_r = 6 - j0.1$ , sont cohérentes et correspondent à une humidité de la terre aux alentours de  $SM = 17\%$  ; valeur mesurée in-situ à l'aide de capteurs (sondes theta probe).

Les résultats des modélisations ont montré qu'il est possible d'obtenir des courbes simulées similaires aux courbes expérimentales, mais que la modélisation des milieux géologiques n'est pas triviale. Si nous souhaitons obtenir de résultats plus satisfaisants, des calibrations du domaine d'intégration numérique plus précises se montrent nécessaires, ainsi qu'une modélisation plus complexe des milieux géologiques. Nous incluons les rugosités et nous travaillons actuellement à la prise en compte de sources d'hétérogénéités tels que des gradients d'humidités. Toutefois, les résultats sont encourageants. Le modèle testé dans cette étude fournit des valeurs de permittivités cohérentes avec d'autres mesures pour les milieux caractérisés.

L'utilisation du système d'exploitation lors des modélisations effectuées a démontré son utilité pour faciliter et améliorer l'interprétation des résultats. Les critères implémentés se sont montrés performants en permettant de choisir les meilleures courbes. Les perspectives de développement du système passent par la mise en place d'un système d'entêtes pour les fichiers simulés HFSS. Cela rendra possible une obtention plus directe des résultats. De nouveaux critères pourront être aussi définis et testés. Ils compléteront les critères existants et amélioreront les performances globales du système d'exploitation.

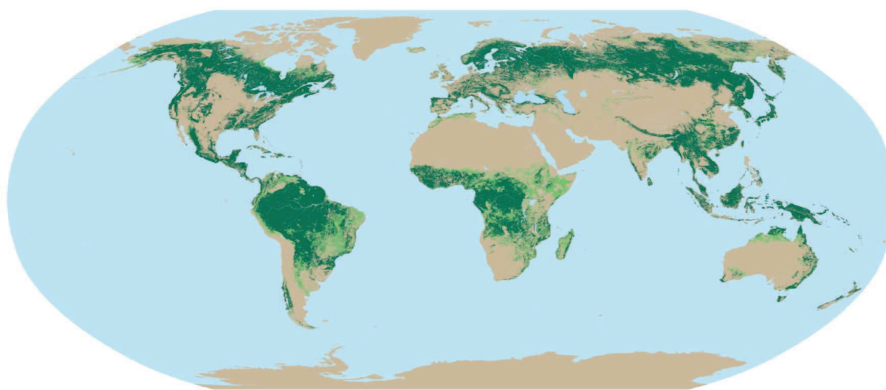
Cet outil a été utilisé pour l'exploitation de données déjà recueillies (site du Pyla 33) et lors de nouvelles mesures comme par exemple le suivi en continu de propriétés de sols.

### 4.3.2 Outils de calcul

Afin de répondre aux besoins scientifiques liés à la recherche dans le domaine de la télédétection micro-ondes j'ai été amené à développer des outils de calcul. Ces outils servent par exemple à traiter les données de mesures afin de calculer la permittivité. Ils peuvent aussi permettre l'implantation d'un code de calcul analytique (calcul d'émissivité ou de coefficient bistatique). Dans ce manuscrit, je me concentre sur le travail réalisé afin de développer un modèle numérique de calcul du coefficient bi statique et de l'émissivité de structures pédologiques.

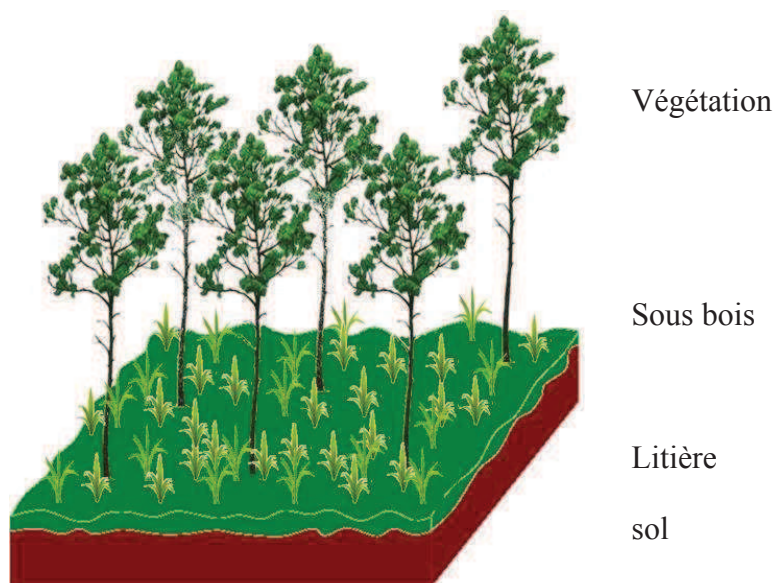
#### 4.3.2.1. Position du problème

Nous avons vu que le sol est une structure complexe. L'interprétation des données de télédétection micro-ondes passive et active nécessite des algorithmes précis. En particulier, l'étude des forêts par télédétection micro-ondes est un problème complexe à traiter. Ce dernier est pourtant incontournable car les forêts couvrent une importante surface de notre planète (figure 48) et jouent un rôle majeur (stockage du gaz carbonique, échanges avec l'atmosphère ...).



**Figure 48 : Répartition des forêts**

L'effet de la végétation (arbres) sur les signaux de télédétection est connue et des modèles tels que le modèle t-w permettent d'intégrer ces effets dans les algorithmes d'inversion (LMEB – SMOS). Des modèles analytiques (IEM, AIEM, SPM) et semi empiriques (Q-h model (Choudhury et al 1979 and Wang et al 1981)) existent pour calculer le coefficient bi statique ou l'émissivité des sols. Ils ont toutefois un domaine de validité qui s'avère être insuffisant dans le cas des sols des forêts par exemple qui est un milieu très particulier.



*Figure 49 : Structure des forêts*

Dans le cas des modèles analytiques, les conditions simplificatrices qui ont conduit à leur élaboration sont trop restrictives (non prise en compte des effets volumiques, des structures multicouches, des gradients ...). Dans le cas des modèles semi empiriques, les coefficients utilisés sont obtenus pour une gamme de condition limitée (humidité, fréquence ...).

Une autre voix d'étude a été envisagée. Elle consiste à utiliser un modèle numérique. Les méthodes numériques permettent de résoudre les équations de Maxwell dans un domaine d'étude. Elles sont moins restrictives dans leur domaine d'application mais nécessitent plus de ressources informatiques (mémoire) et de temps de calcul. Mon idée est de développer un modèle numérique des sols intégrant le plus les propriétés réelles de ces structures. Le modèle validé, il sera utilisé pour créer une base de données de coefficient  $\epsilon$  statique et d'émissivité de structures pédologiques. Ces données pourront être alors utilisées pour définir de nouveaux paramètres de modèles semi empiriques ou pour définir de nouvelles lois de comportement analytiques.

Ce modèle doit être capable d'étudier le comportement électromagnétique de structures pédologiques complexes en prenant en compte la nature multi couche des sols, la rugosité des interfaces, les propriétés du sol (texture, humidité, température, salinité, gradients ...). Il doit calculer le coefficient  $\epsilon$  statique et l'émissivité de ces structures quelle que soit la polarisation ou l'incidence de l'onde (application radar) dans le domaine micro-ondes. Il doit

aussi posséder des fonctionnalités permettant le calcul systématique sur une plage de paramètres afin de faciliter la création de la base de données.

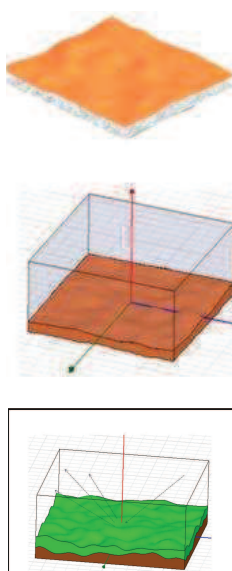
#### 4.3.2.2. Méthode retenue pour le calcul de l'émissivité et du coefficient bi-statique

Différentes méthodes numériques existent (FEM, FDTD, méthode des moments...). Nous les avons testés et nous avons retenu la méthode des éléments finis. Nous nous sommes dotés du logiciel HFSS-ANSOFT pour la résolution des équations de Maxwell et le logiciel ANSYS-Professional NLT pour la résolution de l'équation de la chaleur et la construction des profils de gradients d'humidité.

La procédure de calcul peut être décomposée en différentes étapes. De nombreuses étapes ont été perfectionnées et validées lors de la thèse de Heather Lawrence.

Construction de la structure pédologique considérée :

La difficulté majeure de cette étape est l'introduction de la rugosité d'interface. La procédure que nous avons créée consiste à définir à l'aide du logiciel R un ensemble de points représentant le plan d'interface et répondant à des caractéristiques statistiques de rugosité choisies. Puis, à l'aide du logiciel C4W 3D shop model design nous créons le plan d'interface puis la couche avant de l'exporter en fichier géométrie ré-importable dans HFSS.



*Figure 50 : Création des profils numériques de sols*

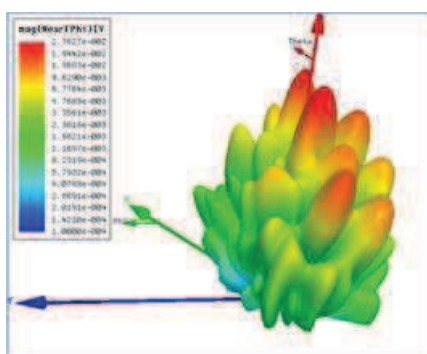
Un maillage automatique permet de découper l'espace d'étude en un ensemble de cellules tétraédriques sur lesquelles l'algorithme de résolution des équations de Maxwell par la méthode des éléments finis va s'appliquer.

Les propriétés physiques des couches sont définies à l'aide de la permittivité calculée (modèle de Dobson ou de Mironov [26] [29] [30] [41]) ou mesurée au laboratoire en fonction de la texture, de l'humidité et de la température. Chaque cellule du maillage est associée à une permittivité.

Une série de conditions limites doit être imposée aux bords du domaine de calcul afin de représenter au mieux la réalité.

Des études ont permis de définir des paramètres de calcul tels que la taille de domaine ou les critères de convergence conduisant aux meilleurs résultats. Une onde gaussienne est envoyée sur la structure afin de récupérer l'onde diffractée.

A l'issue du calcul, le champ proche diffracté ou émis par la structure peut être récupéré sur une demi sphère coiffant la structure étudiée.



*Figure 51 : Représentation du champ émis ou diffracté*

De ce champ, il est possible de remonter au coefficient bi-statique ou à l'émissivité.

Mathématiquement cette dernière phase peut s'écrire :

Coefficient bi-statique

$$\sigma_{rp}^0(\theta_s, \phi_s; \theta, \phi) = \frac{4\pi R^2 |E_{r,p}^s(\theta_s, \phi_s)|^2}{A |E_p^i(\theta, \phi)|^2} \quad \text{Équation 22}$$

Réfectivité

$$\Gamma_p(\theta, \phi) = \frac{1}{4\pi} \iint_{\text{hemisphere superieur}} \frac{1}{\cos\theta} \left[ \sigma_{pp}^0(\theta_s, \phi_s; \theta, \phi) + \sigma_{rp}^0(\theta_s, \phi_s; \theta, \phi) \right] \sin\theta_s d\theta_s d\phi_s. \text{Équation 23}$$

Emissivité

$$e_p(\theta, \phi) = 1 - \Gamma_p(\theta, \phi) \quad \text{Équation 24}$$

#### 4.3.2.3. Validation

Avant de nous lancer dans l'exploitation du nous avons conduit une série d'études afin de valider les résultats de notre modèle. Les permittivités utilisées lors de ces études proviennent de mesures effectuées au laboratoire (sol et litière) ou de calculs (modèle de Mironov) [32].

#### Exemple de validation par comparaison avec la méthode des moments

La méthode des moments est une méthode utilisée pour calculer l'émissivité de surfaces rugueuses et des études ont montré une bonne précision de ses résultats. Elle nous a donc servi de référence dans nos validations. Il est important de noter que notre démarche de calcul permettra d'explorer plus de cas que la méthode des moments (structures multicouches, effets volumiques, gradients de propriétés ...)

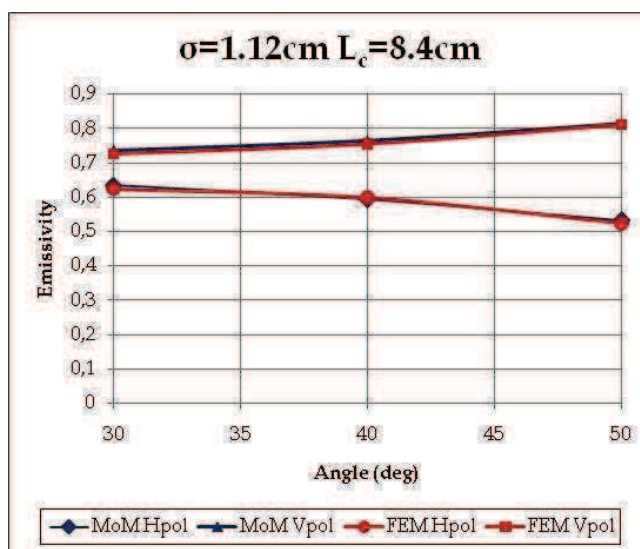


Figure 52 : Rugosité représentée à l'aide d'une fonction d'autocorrélation de forme exponentielle. Permittivité du sol :  $\epsilon_r = 15.34 + 3.66i$



L'ensemble des résultats obtenus montrent une bonne concordance avec la méthode des moments. Il faudra cependant améliorer certains critères de calcul afin d'améliorer certains résultats (incidences  $>60^\circ$ ).

### Validation par comparaison avec des données expérimentales

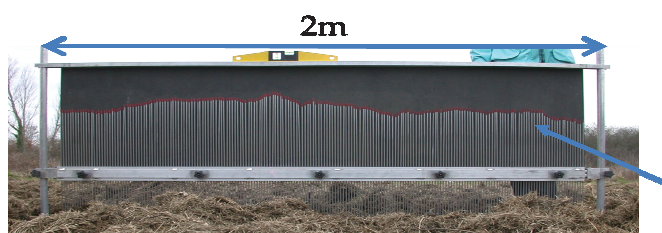


*Figure 53 : Radiomètre LEWIS et Champ de mesure labouré le 10/01/2006*

Nous avons utilisé des données recueillies sur le site du SMOSREX. Le radiomètre LEWIS nous a permis de recueillir des mesures à 1.4 GHz en polarisation H et V toutes les 3 heures (angle d'observation  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ).

Au niveau de la zone étudiée, la rugosité a été mesurée ainsi que l'humidité (sondes Theta probes) et la température.

Mesure de la rugosité



*Figure 54 : Rugosimètre*

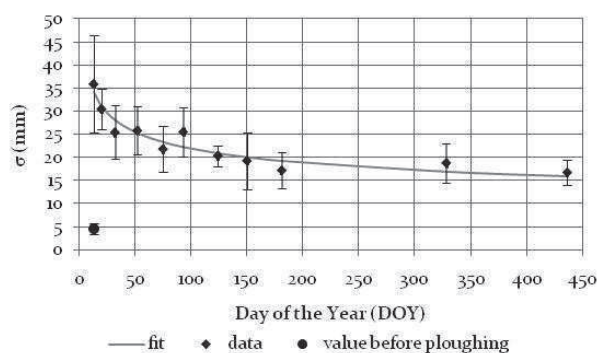


Figure 55 : Ecart type des hauteurs

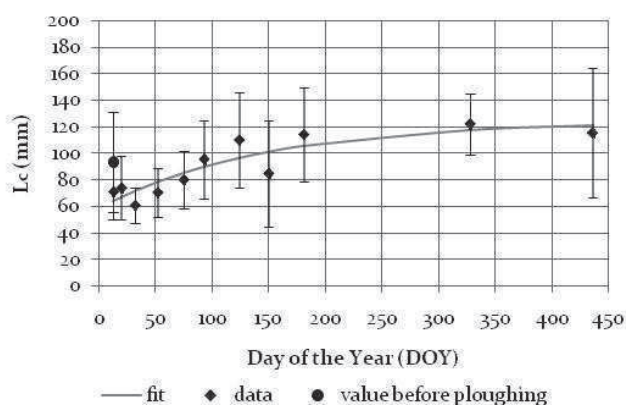


Figure 56 : Longueur d'autocorrélation

Résultats de comparaisons expérimentales.

Faible rugosité :  $\sigma=1.7\text{cm}$   $L_c=12.1\text{cm}$

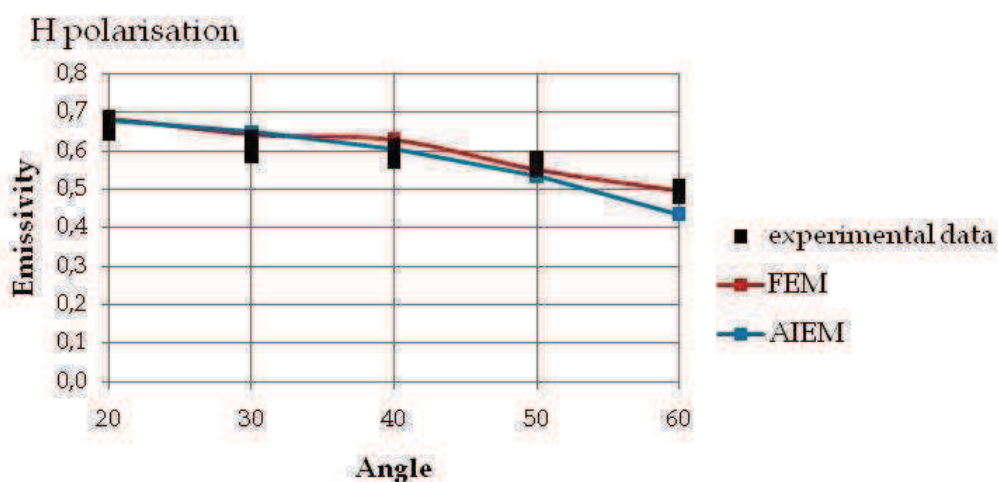


Figure 57 : Polarisation H – Faible rugosité

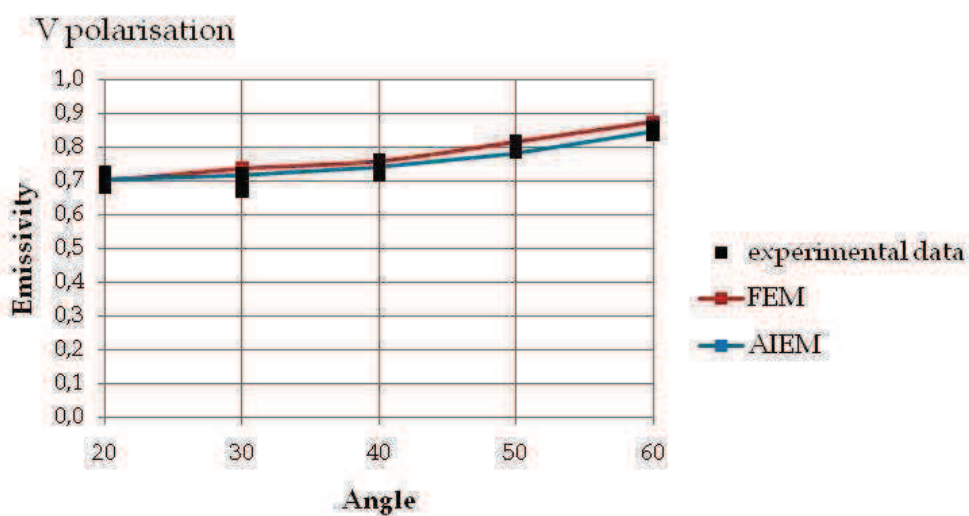


Figure 58 : Polarisation V – Faible rugosité

Nous pouvons noter une bonne concordance de nos résultats avec les mesures. En particulier notre modèle a de meilleurs résultats que l'AIEM couramment utilisé pour le calcul de l'émissivité des sols.

Forte rugosité :  $\sigma=2.8\text{cm}$   $L_c=7.1\text{cm}$

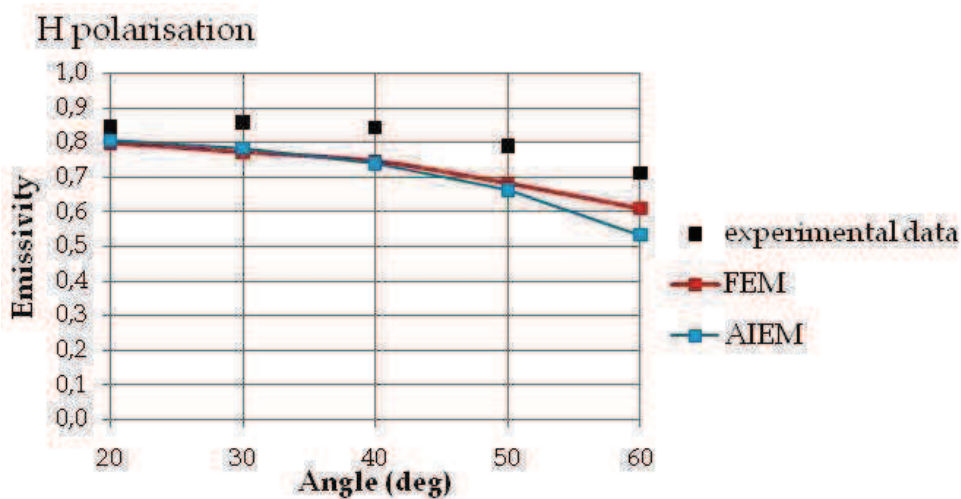
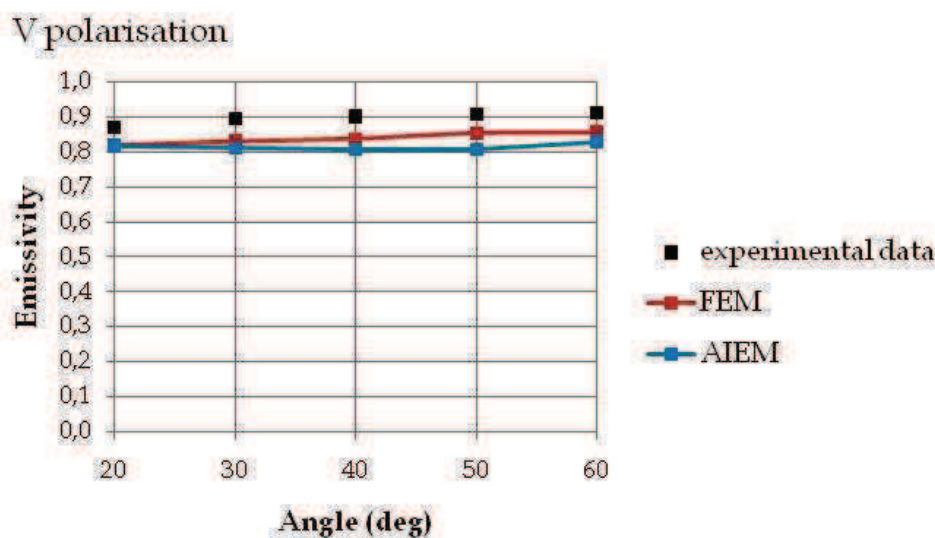


Figure 59 : Polarisation H – Forte rugosité



*Figure 60 : Polarisation V - Forte rugosité*

Une nouvelle fois, notre modèle est plus proche des résultats expérimentaux que l'AIEM. Un écart est toutefois présent entre notre modèle et les mesures. Cet écart peut provenir de différents facteurs :

-D'un point de vue modèle :

-La rugosité étant plus forte, la diffraction des champs l'est aussi et il faut donc correctement échantillonner ce champ afin de ne pas perdre d'information utile. Un pas d'intégration du champ diffusé plus petit va être testé et améliorera peut être ce facteur.

-La forte rugosité nécessite peut être un nombre de points plus important afin de bien la représenter dans notre modèle numérique.

-Des phénomènes de diffusion volumique sont peut être présents et non introduits dans nos couches (hétérogénéités, gradients d'humidité...). Ce point est abordé plus loin dans nos perspectives.

-D'un point de vue expérimental :

-Présence d'hétérogénéités dans le sol ;

-Erreurs sur la mesure d'humidité ;

-Imprécision de la mesure de rugosité ;

-Non uniformité forte de la rugosité.

## Premiers résultats d'un système sol-litière

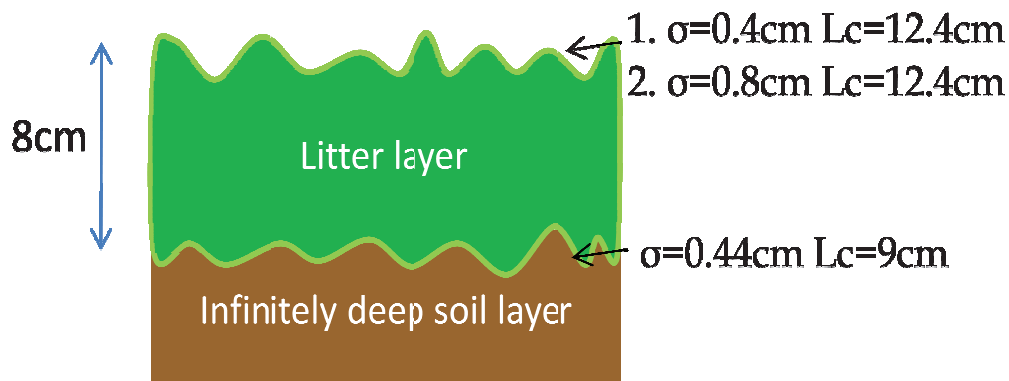


Figure 61 : Structure sol-litière

La configuration 3D retenue est présentée sur la figure 61. Une rugosité du sol a été choisie et deux rugosités de surface de la litière ont été testées ( $\sigma=0.4\text{cm}$   $L_c=12.4\text{cm}$  : sol-litière1 et  $\sigma=0.8\text{cm}$   $L_c=12.4\text{cm}$  : sol-litière2)

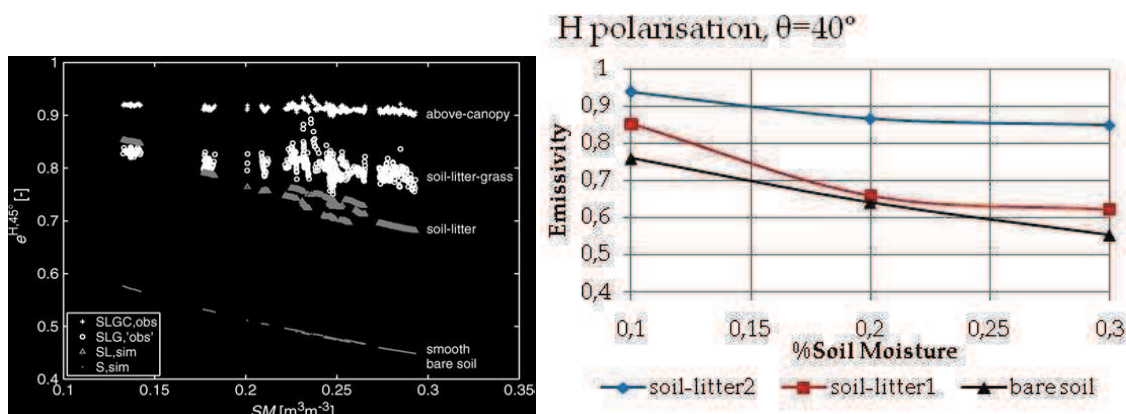
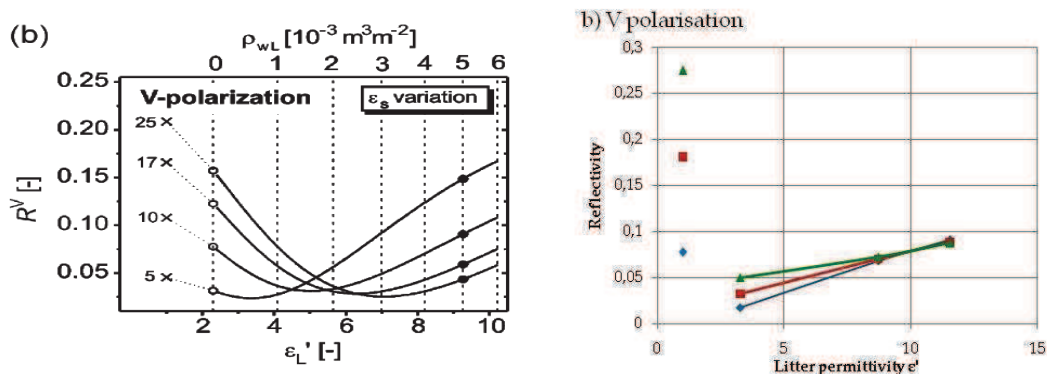


Figure 62 : Comparaison avec les résultats de Grant et al 2009

Les mesures relevées avaient été moyennées sur 6 mois. Dans ce cas particulier une relation avait été mise en évidence entre l'humidité de la litière et celle du sol. Peu d'informations étaient disponibles concernant la hauteur de litière et sa rugosité. Nous avons ainsi testé 2 configurations. Nous retrouvons des comportements comparables avec les résultats mesurés. En particulier ces résultats mettent en évidence l'effet de la litière sur l'émissivité globale ainsi que l'effet de la rugosité de surface de la litière.

## Comparaison avec le modèle de Schwank

Ce modèle estime la réflectivité de la litière.



**Figure 63 : Résultats du modèle de Schwank et du modèle FEM**

Les points à droite de chaque graphe présentent la réflectivité du sol nu pour trois permittivités du sol (vert :  $\epsilon' = 16.9$ , rouge :  $\epsilon' = 10.3$ , bleu :  $\epsilon' = 5.3$ ). Les courbes, quand à elles, représentent la réflectivité du système sol-litière pour différentes humidité de litière ; à humidité du sol constante (permittivités du sol nu). A forte humidité, la forte permittivité de la litière doit masquer le signal du sol. Ainsi la réflectivité du système sol-litière doit devenir indépendante du type de sol recouvert. Ce résultat se retrouve sur notre modèle et non sur celui de Schwank.

Effets de la variation d'humidité du sol

La configuration étudiée est celle de la figure 61.

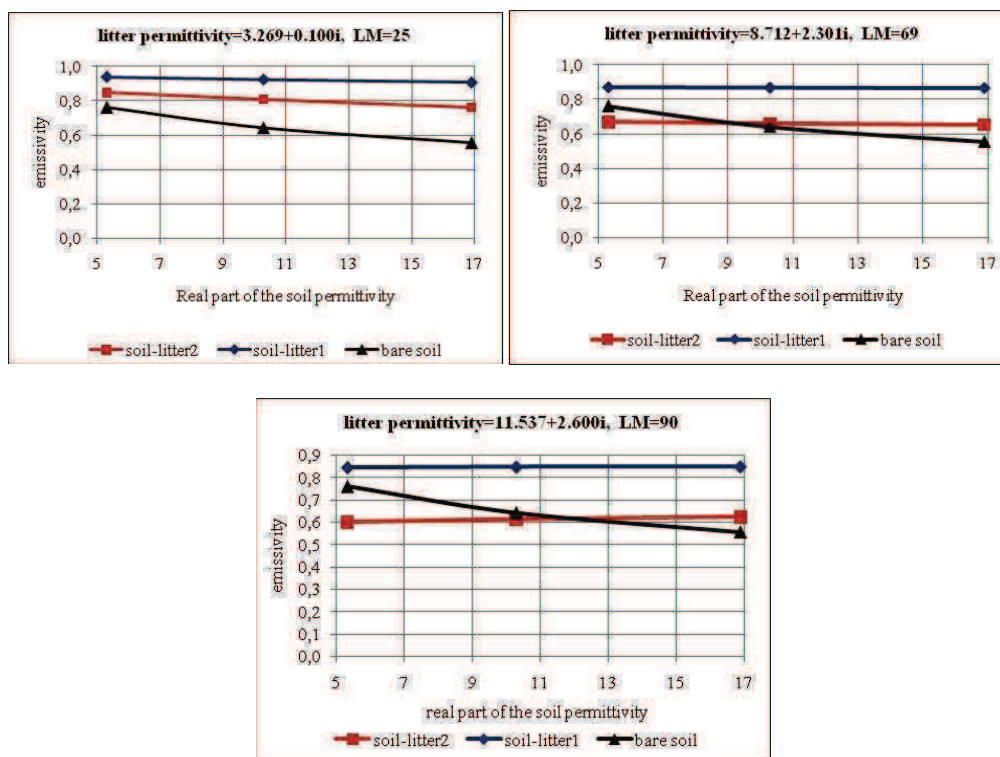


Figure 64 : Exemples de résultats sur le système sol litière - Effets de la variation d'humidité du sol

Nous présentons ici un exemple de résultats. Ces graphes présentent l'émissivité d'un sol nu et de ce sol recouvert de deux types de litières en polarisation H. Chaque graphe présente, pour des humidités de litières différentes (mesures effectuées au laboratoire) l'émissivité des structures en fonction de l'humidité du sol.

Nous remarquons qu'au-delà d'une certaine humidité et épaisseur de litière, l'émissivité de la structure sol-litière est indépendante de l'humidité du sol. Dans le cadre de la mission SMOS cela indique qu'il sera impossible de remonter à l'humidité du sol par une seule mesure angulaire et polarimétrique. Nous pourrions étudier à l'aide du modèle la possibilité de remonter à l'humidité du sol en couplant différentes mesures de SMOS.

## Sensibilité à l'humidité de litière

Pour confirmer les études précédentes nous présentons des résultats de l'effet de la variation de l'humidité de la litière.

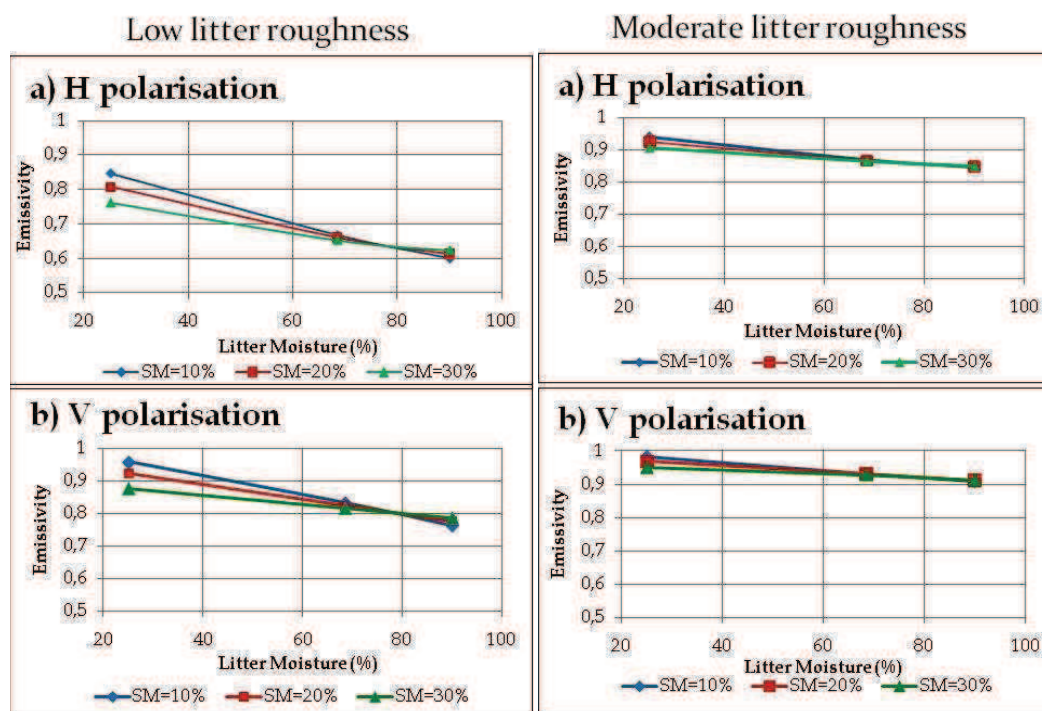


Figure 65 : Exemples de résultats - Sensibilité à l'humidité de litière (angle d'observation=40°)

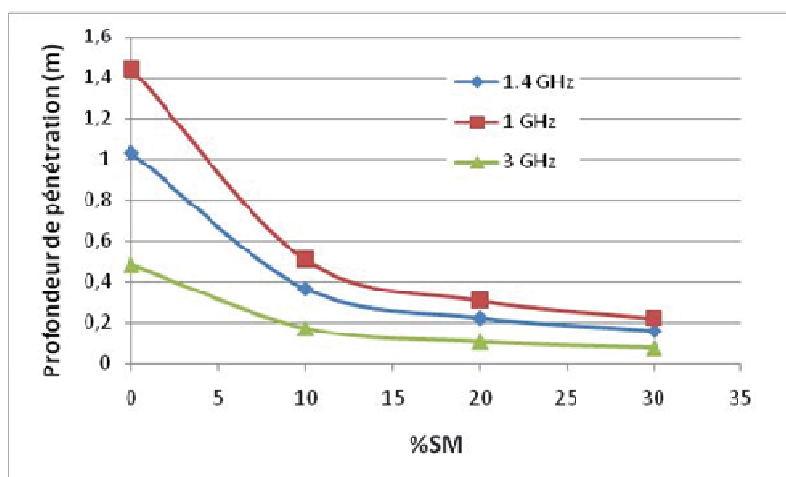


#### 4.3.2.4. Prise en compte des effets thermiques et des profils d'humidité.

Nous avons utilisé la méthode des éléments finis (FEM) pour calculer les effets thermiques dans le sol et les infiltrations d'eau. En couplant la résolution de l'équation de la chaleur et des équations de Maxwell, nous sommes capable d'étudier le comportement électromagnétique de structure pédologiques telles que les pergélisols ou d'étudier les changements rapides de température. Cela pourra être très utile pour les observations spatiales à forte répétitivité telles que celles de la mission SMAP (mission d'observation micro-ondes active et passive de la NASA) [54]. Nous présentons ici des premiers résultats obtenus sur des simulations de l'effet d'infiltration d'eau dans les sols sous forme de gradients d'humidité.

#### **Méthode**

Nous avons vu que l'étude des sols nécessite la prise en compte de nombreux paramètres. La température et l'humidité varient énormément selon le type de sol, le climat et la région considérée. Ces paramètres influent beaucoup sur la permittivité et donc sur le comportement électromagnétique des sols. Des gradients de ces propriétés peuvent exister. Est-il important de les prendre en considération ? En télédétection active et passive le paramètre  $p \cdot \cos\theta$  est utilisé pour quantifier l'atténuation des ondes émises ou absorbées ( $p$  = profondeur de pénétration et  $\theta$  l'angle de réfraction dans le milieu) par les sols. Cette grandeur permet de définir l'épaisseur de sol participant aux perturbations des ondes électromagnétiques et donc au signal reçu par l'instrument. Cette épaisseur correspond à la couche de sol analysable par l'instrument. En télédétection active par exemple, en fonction de la sensibilité du récepteur et de sa fréquence, il existe une épaisseur de sol au-delà de laquelle un objet ne pourra pas être détecté. En télédétection passive, 63% de l'énergie émise par le sol provient d'une épaisseur de sol en surface de hauteur  $p \cos\theta$ , 87% d'une couche d'épaisseur double et 95% d'une épaisseur triple. Dans le cas de la mission SMOS par exemple, 63% de l'énergie provient des 20 premiers centimètres, 87% des 40 cm et 95% des 60 cm. Dans ce cas, il est inévitable de prendre en compte l'ensemble des phénomènes dans cette épaisseur de sol dans lequel des gradients d'humidité et de température existent.

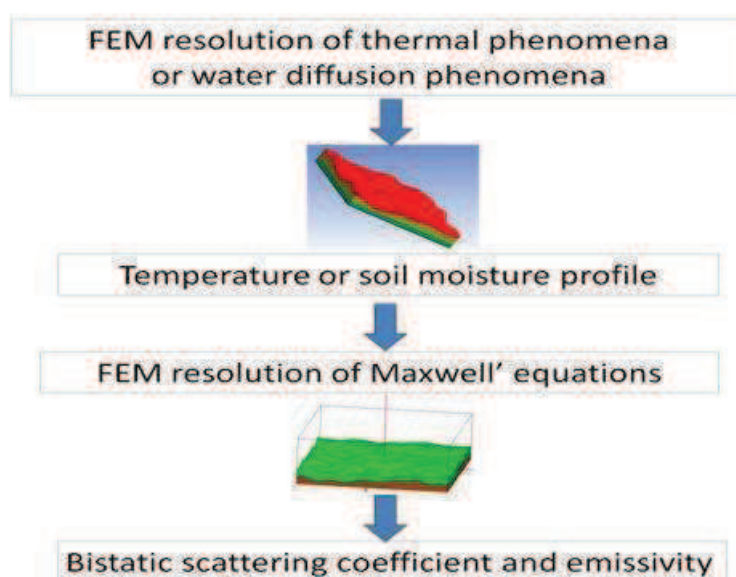


**Figure 66 : Profondeur de pénétration**

Les gradients de température et d’humidité doivent être pris en considération. Dans le but de compléter notre modèle, j’ai travaillé à la prise en compte de ces gradients dans des systèmes multicouches pédologiques.

Notre modèle électromagnétique résout les équations de Maxwell en utilisant la méthode des éléments finis (FEM). L’idée a été d’utiliser cette méthode pour résoudre d’autres équations. Cela permet de créer des gradients thermiques et d’humidité dans les structures étudiées.

Cette procédure peut être divisée en trois étapes.

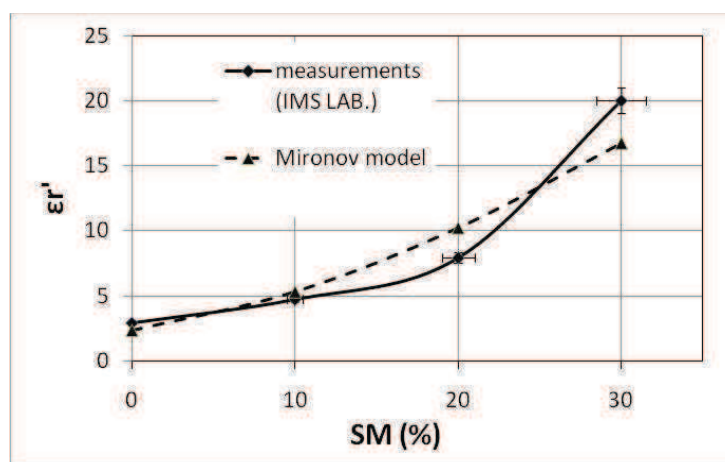


**Figure 67 : Algorithme de la prise en compte de la température et de l’humidité**

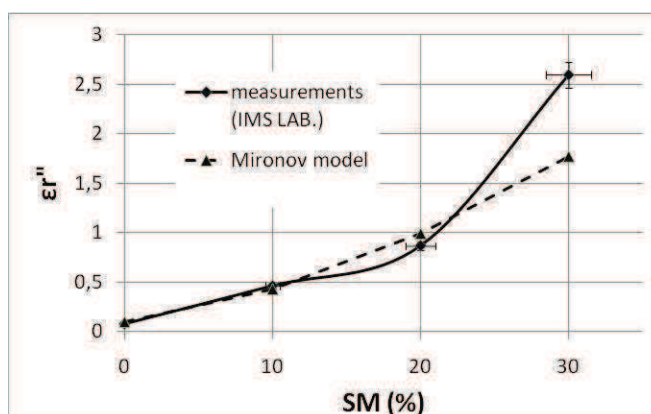
Tout d'abord nous utilisons le logiciel ANSYS-NLT. Nous importons la géométrie de la structure multicouche que nous souhaitons étudier. Pour l'étude thermique nous appliquons les conditions limites en temps et en espace soit pour simuler un cycle thermique (variations des profils de température en continu durant la journée et la nuit) soit pour créer un profil spatial bien défini dans la structure (profil spécifique d'un pergélisol par exemple). Pour l'humidité, nous utilisons cette possibilité de résolution d'équation de diffusion pour créer des profils d'humidité.

Cette phase de résolution s'achève par la création d'un maillage 3D représentant notre structure. Chaque maille porte alors une information d'humidité ou de température. L'ensemble du maillage représente notre profil 3D de température ou d'humidité.

La seconde étape consiste à remplacer l'information d'humidité ou de température dans chaque cellule par une information de permittivité. Cela est possible à l'aide de courbes de variations obtenues par la technique de mesure en guide d'ondes par exemple. Cela est aussi possible en utilisant le modèle de calcul de permittivité de Mironov sur lequel nous avons collaboré dans le cadre d'un projet PICS du CNRS.



**Figure 68 : Partie réelle de la permittivité en fonction de l'humidité du sol. Mesures et résultats du modèle de Mironov.**

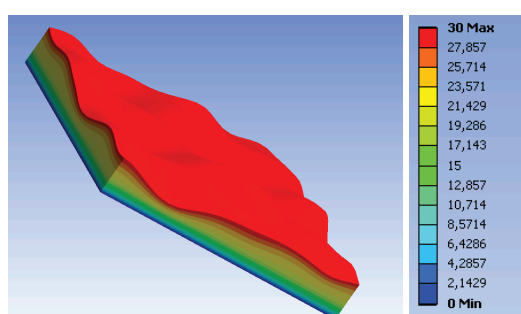


**Figure 69 : Partie imaginaire de la permittivité en fonction de l'humidité du sol. Mesures et résultats du modèle de Mironov.**

La dernière partie de la procédure consiste en l'introduction de ces profils de permittivité dans le modèle résolvant les équations de Maxwell afin de calculer l'émissivité ou le coefficient bi-statique de ces structures.

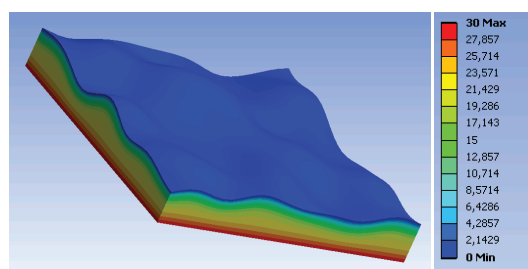
### Premiers résultats.

Les exemples présentés se concentrent sur l'étude des effets des gradients d'humidité. Les profils présentés ont été obtenus en appliquant des gradients d'humidité entre la surface du sol et une profondeur de 15 cm. La résolution d'une équation de diffusion a permis d'obtenir les profils des figures 70 et 71. Il est important de noter que ces profils ne sont pas réalistes mais ils ont pour but de mettre en lumière l'effet de ces gradients et ainsi l'importance d'introduire ces profils dans notre modèles.



**Figure 70 : Profile 1 d'humidité du sol introduit dans le modèle.**

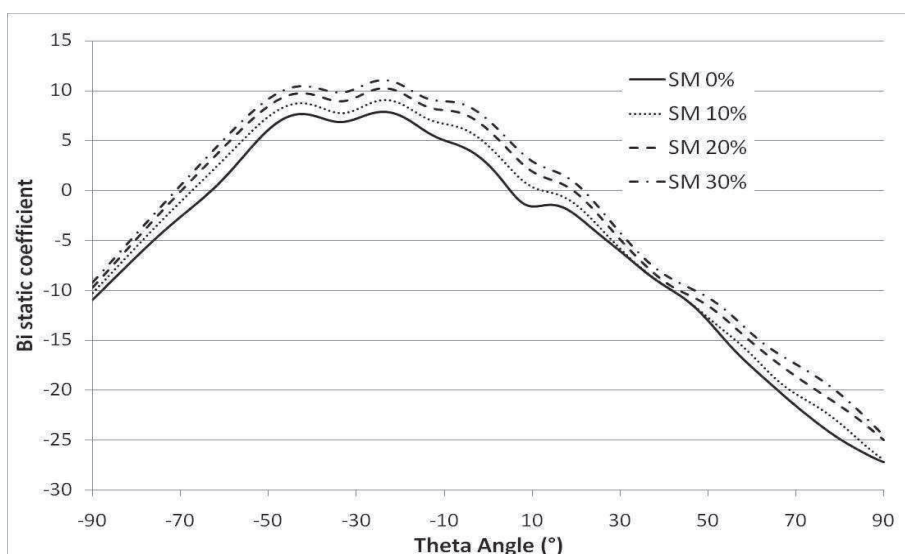
**Humidité de surface = 30 % - Humidité en profondeur [15cm] = 0%.**



**Figure 71 : Profile 2 d'humidité du sol introduit dans le modèle.**

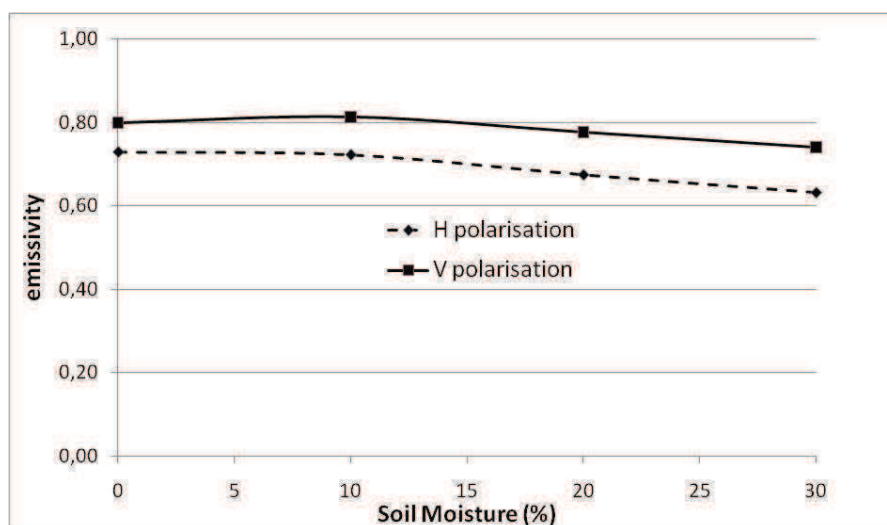
**Humidité de surface = 0 % - Humidité en profondeur [15cm] = 30%**

L'humidité a d'abord été considérée comme homogène. Le coefficient bi-statique et l'émissivité du sol du SMOSREX a été calculé. Ce site d'expérimentation a aussi été utilisé pour la validation de notre modèle électromagnétique. La texture du sol est de 17% d'argile et 36% de sable. La rugosité de surface du sol était : [ $k\sigma = 1$ ,  $kLc = 6$ ]. Les résultats sont présentés sur les figures 72 et 73.



**Figure 72 : Coefficient Bi-statique d'un sol rugueux.**

**Fréquence=1.4GHz, angles d'incidences  $\phi=0^\circ$   $\theta=30^\circ$ , angle d'observation  $\phi=0^\circ$ , polarisation HH, texture du sol = [17% Clay, 36% Sand], rugosité [ $k\sigma=1, klc=6$ ], température du sol homogène=25°C, humidité du sol homogène [0%,10%,20%,30%].**

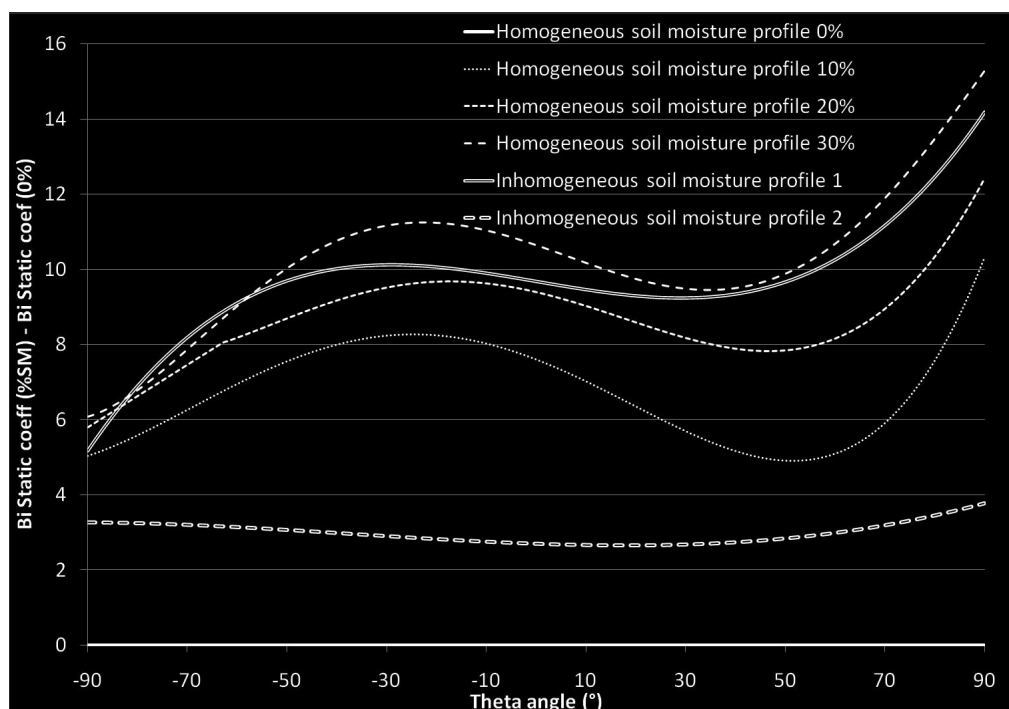


**Figure 73 : Emissivité d'un sol rugueux.**

***Fréquence=1.4GHz, angles d'incidences  $\phi=0^\circ$   $\theta=30^\circ$ , polarisation H et V, texture du sol = [17% Clay, 36% Sand], rugosité [ $k\sigma=1, klc=6$ ], température du sol homogène=25°C, humidité du sol homogène [0%,10%,20%,30%].***

Dans un deuxième temps, les profils inhomogènes ont été introduits dans notre modèle. Pour se focaliser sur l'effet de la présence de gradients de propriétés dans le sol, nous avons choisi de présenter la différence entre le coefficient bi statique de la couche humide et le coefficient bi statique de la couche sèche (voir Figure 74). Sur cette figure, nous observons clairement l'effet du gradient d'humidité. Pour le profil 1 (30% d'humidité en surface et 0% à 15 cm de profondeur) la valeur du coefficient bi statique fluctue entre les valeurs de ce coefficient calculé pour une couche à humidité homogène de 30% et de 20%.

L'effet est encore plus prononcé pour le profil 2 (0% d'humidité en surface et 30% à 15 cm de profondeur).

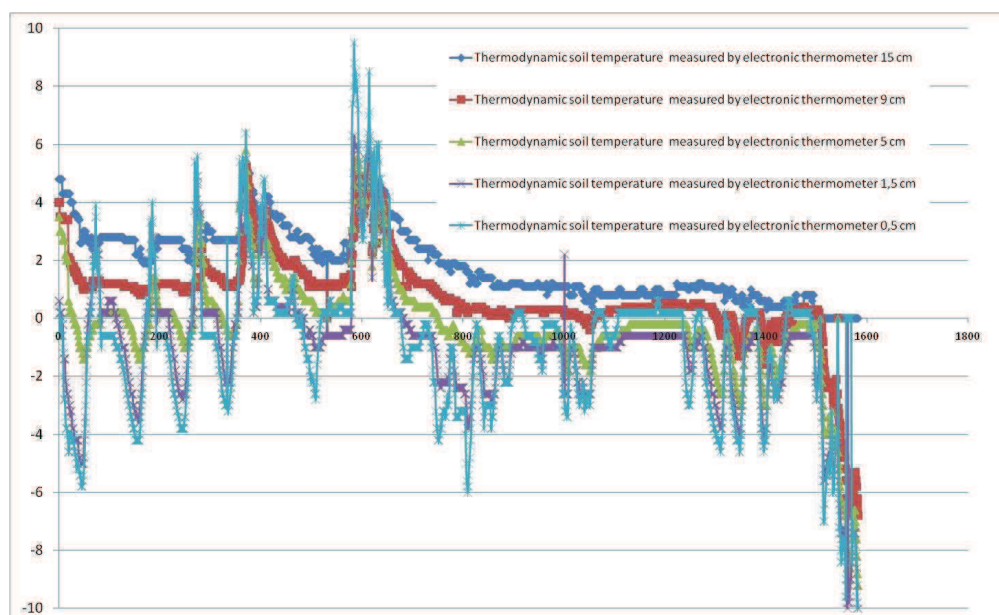


**Figure 74 : Coefficient Bi-statique (%SM) - Coefficient Bi-statique (0%).**

***Fréquence=1.4GHz, angles d'incidences  $\phi=0^\circ$   $\theta=30^\circ$ , angle d'observation  $\phi=0^\circ$ , polarisation HH, texture du sol = [17% Clay, 36% Sand], rugosité [ $k\sigma=1, klc=6$ ], température du sol uniforme=25°C et non uniforme [profil 1 & 2] et humidité du sol homogène [0%,10%,20%,30%].***

Ces études sur des profils peu réalistes ont été effectuées afin de s'assurer de la prise en compte correcte de ces profils non homogènes dans notre modèle. Ces premiers résultats sont très encourageants et corroborent des mesures effectuées sur le terrain. Elles démontrent la sensibilité des mesures de télédétection micro-ondes aux gradients de propriétés dans les premières dizaines de centimètres du sol.

J'effectue actuellement une phase de validation. Pour se faire, j'ai récupéré des données de terrain. D'une part, je dispose de mesures d'humidité et d'émissivités acquises sur le site du SMOSREX. D'autre part je dispose de mesures sur un site Sibérien. Le sol y subit de forts gradients thermiques. Je dispose des données d'humidité, de température, d'émissivité et de coefficient de réflexion.



*Figure 75 : Mesures acquises sur le site de mesure Sibérien*

Les profils de température et d'humidité sont en train d'être recréés numériquement. Je les intégrerai dans le modèle afin de comparer les résultats numérique avec les données expérimentales.



#### **4.4 Synthèse des principaux projets de recherche**

La première collaboration forte sur ce thème de recherche a été créée avec le laboratoire LAB (UMR 5804). Les premières études ont commencé avec l'observatoire de Floirac (Philippe Paillou), suite à une campagne radar GPR. L'objectif des travaux était, dans un premier temps, de caractériser des échantillons bruts de roches. Toutes ces mesures ont permis d'élaborer des modèles de calcul et d'exploitation de signatures Radar dans le cadre de projets spatiaux d'exploration de la sub-surface de Mars. Cette collaboration a continué sur les techniques de détection de zones humides par ondes électromagnétiques en 2 polarisations. Essam Heggy [47] a effectué un post-doctorat au Lunar Planetary Institute (LPI) de la NASA, et l'équipe CEMT a été consultante pour l'aider à s'équiper de systèmes de mesures.

La mesure de l'humidité des sols à l'aide de systèmes radar a fait l'objet de nombreux travaux ces vingt dernières années. Plus particulièrement, la relation existant entre les propriétés diélectriques des sols et leur teneur en eau nous a conduit à s'interroger sur l'impact du taux d'humidité sur le coefficient de rétrodiffusion radar  $\sigma^0$ . Si l'effet du taux d'humidité sur la permittivité a été largement étudié et modélisé, il n'en est pas de même pour la salinité. De récents travaux ont souligné l'influence de la présence de sels en solution sur les propriétés diélectriques des sols, spécialement sur la partie imaginaire  $\epsilon''$  de la constante diélectrique. Si la partie réelle  $\epsilon'$  de la permittivité, liée à la polarisation du milieu, conditionne la célérité d'une onde dans le matériau et donc sa capacité à conduire l'énergie,  $\epsilon''$  quant à elle, est liée à la conductivité du milieu et traduit l'atténuation du signal radar par absorption de l'énergie nécessaire pour atteindre la polarisation. Il apparaît donc indispensable de tenir compte de la présence de roches salines (évaporites) dans les applications de télédétection radar. Pour ce faire, une étude a été menée conjointement entre le LAB et l'équipe CEMT (Thèse Yannick Lasne [46]) afin d'étudier l'influence de la présence de sels sur le coefficient  $\sigma^0$  via les propriétés diélectriques des milieux considérés. La méthodologie adoptée reposait sur une série de mesures réalisées au laboratoire IMS au moyen d'un analyseur de réseau, pour évaluer le potentiel des lois de mélange diélectrique reposant sur les formules de Debye. Un modèle numérique de la sonde de mesure a été réalisé à l'aide de la méthode des éléments finis (outil de simulation HFSS-ANSOFT). Il a permis d'optimiser notre sonde et de définir les domaines de validité de nos méthodes d'exploitation des mesures. Ces modèles diélectriques ont permis

de définir les paramètres d'entrée nécessaires à la modélisation du coefficient  $\sigma^0$ , au moyen de modèles analytiques type IEM et SPM. Les résultats de simulations ont été confrontés à des mesures terrain (Pyla, Death Valley, Mojave) et exploités pour l'interprétation d'images SAR (AIRSAR, JPL). L'objectif à terme est d'exploiter les propriétés des roches salines dans les applications de détection de résurgences d'eau, tant pour les surfaces terrestres que dans le cadre de l'exploration martienne (la présence d'évaporites à la surface de la planète rouge étant aujourd'hui communément admise).

Une collaboration de recherche complémentaire est aussi apparue avec le laboratoire EPHYSE de l'INRA (Jean-Pierre Wigneron) et le CESBIO (Yann Kerr) pour élaborer des modèles diélectriques de sol et des modèles numériques de calcul de structures pédologiques pour le suivi des zones humides et des zones arides.

La mission SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) de l'ESA, dont le lancement a été effectué en 2010, consiste au lancement d'un satellite qui transporte un radiomètre interférométrique 2D. Ce dernier effectuera la première cartographie à l'échelle planétaire de l'humidité des sols et de la salinité des océans et ce grâce à un unique instrument de mesure capable de capturer d'images des radiations micro ondes émises autour de 1.4GHz (Bande L).

L'humidité de surface du sol est une variable clé pour décrire les échanges d'eau et d'énergie entre la terre et l'atmosphère. Des études ont montré que les capteurs micro-ondes passifs étaient les mieux adaptés pour réaliser un suivi de l'humidité de surface des sols. La thématique principale associée à ces observations est le suivi des échanges hydriques au niveau planétaire dans le cadre du changement climatique. Le projet européen SMOS regroupe des instituts de recherche en France (CESBIO, Météo-France, INRA) et dans de nombreux pays européens. Les observations micro-ondes permettent d'estimer la permittivité équivalente des sols, qui est le paramètre principal influant sur la mesure en bande L. Cependant, l'effet de la couverture de végétation, la présence de litière, la température, la rugosité du sol, la couverture neigeuse et la topographie, etc. ont également un effet sur l'émissivité micro-ondes en surface. Le but de mes travaux de recherche est l'amélioration de la compréhension des réponses d'une telle structure.

Je suis parti prenante avec le laboratoire EPHYSE de l'INRA dans l'étude et la validation de l'algorithme d'inversion des données LMEB (L-band Microwave Emission of Biosphere)

de la mission SMOS qui lie l'émissivité mesurée à l'humidité des sols. Les mesures de SMOS portent sur des milieux très différents. Je me suis intéressé aux forêts qui sont présentes dans la majorité des pixels en zone tropicale, boréale et tempérée. Les forêts sont des couverts relativement opaques, sur lesquels le suivi de l'humidité reste problématique. En particulier, l'effet de la litière avait, jusqu'ici, été négligé. Ainsi mes études se sont focalisées sur les structures bi-couches sol-litière.

Je dirige le développement d'une approche numérique 3D de calcul du comportement micro-ondes de telles structures (thèse Heather Lawrence). Cette approche permet de calculer le coefficient bi-statique et l'émissivité de structures pédologiques multicouches. Ce modèle 3D fonctionne sur une large bande de fréquence mais son intérêt est accru dans le domaine des micro-ondes où des modèles prenant en compte les effets volumiques n'existent pas. Ce modèle permet aussi de prendre en compte de nombreux paramètres tels que l'humidité, l'épaisseur des différentes couches, les gradients de propriétés des sols, la présence d'hétérogénéités ou de litière. Les résultats obtenus ont mis en évidence les effets de cette couche de litière sur le système multi couches global. Ceci a permis de développer une formulation analytique simple d'un modèle de litière qui pourrait être intégré à l'algorithme de calcul de SMOS.

Il a ensuite été nécessaire d'approfondir notre démarche afin d'intégrer de nouveaux paramètres qui peuvent avoir un effet non négligeable sur les mesures. En effet, jusqu'à présent l'effet de la rugosité du sol associé à celui de la litière n'a pas été étudié. De plus, l'épaisseur de litière n'est jamais constante et il faut donc introduire un profil de variation d'épaisseur de litière réaliste. Des recherches ont été menées et le modèle permet d'intégrer aujourd'hui des profils pédologiques plus complexes. J'ai travaillé sur un couplage de résolution d'équations basé sur la méthode des éléments finis au sein de notre modèle numérique. Ce couplage permet de prendre en compte, dans les structures étudiées, les phénomènes thermiques et les phénomènes de diffusion d'eau (gradients). Des études de validation de cette nouvelle approche sont en cours grâce notamment à des données recueillies sur un site test Sibérien dans le cadre d'une coopération avec l'équipe du Professeur Mironov du Kirensky Institute of Physics (Russie).

Je travaille aussi à la création d'une base de données d'émissivités de sols calculées sur une large plage de variation de paramètres. Cette base de données permettra la validation et le perfectionnement des algorithmes d'inversion des missions spatiales de télédétection active ou passive micro-ondes (LMEB).

L'introduction de la prise en compte des effets thermiques au sein du modèle numérique développé a été dictée par la nécessité d'étudier des milieux dans lesquels de forts gradients thermiques sont présents tels que les pergélisols. Ces structures sont des milieux pédologiques gelés en permanence en profondeur mais pouvant avoir en surface une partie dégelée (partie dite active d'une épaisseur pouvant aller jusqu'à 1 m). Ces milieux sont de très fiables indicateurs des changements climatiques et font l'objet d'études approfondies dans le cadre de projets de télédétection spatiale (*International Permafrost Association*).

La qualité des résultats de calculs numériques repose sur la précision avec laquelle les modèles représentent correctement la réalité. Au-delà de la résolution correcte des équations physiques mises en jeu (équations de Maxwell, équation de la chaleur ...) il est impératif de connaître les propriétés des matériaux utilisés vis-à-vis des phénomènes modélisés. Parallèlement aux travaux de développement de ce modèle, j'ai mené des travaux sur la détermination des permittivités des sols en condition extrême de température et d'humidité. Ces recherches m'ont conduit à aborder un aspect expérimental de cette approche et à participer au développement d'un modèle d'estimation de la permittivité des sols (coopération avec le Pr. Mironov Du Kirensky Institute of Physics en Russie).

D'un point de vue expérimental, j'ai travaillé sur la mise au point d'un protocole de mesure de permittivité dédié aux mesures sur des échantillons de sol en humidité et en température.

Les mesures ont été réalisées en guide d'onde. Cette méthode permet de travailler sur des volumes d'échantillons suffisamment importants pour représenter l'hétérogénéité éventuelle du milieu. Les échantillons sont maintenus dans le guide à l'aide d'une bride dont le fond est constitué d'une feuille de Mylar de 100 $\mu$ m d'épaisseur considérée comme quasi transparente aux ondes électromagnétiques. Deux épaisseurs de brides ont été utilisées, en fonction des permittivités attendues pour chacun des matériaux. Les mesures s'effectuent par l'intermédiaire d'un analyseur de réseaux ANRITSU 37325A qui est piloté par ordinateur pour l'acquisition et le traitement des données. Les mesures sont effectuées dans une salle

régulée en température, pour les mesures en température ambiante, et en enceinte climatique pour les mesures en température. L'analyseur permet de mesurer les coefficients complexes  $S_{21}$  et  $S_{11}$  de la matrice de répartition. La détermination des paramètres électromagnétiques de l'échantillon se fait grâce à la méthode de Nicolson Ross Weir (NRW) pour les guides d'onde rectangulaires. Cette procédure de calcul de paramètres électromagnétiques d'un matériau est basée sur des mesures de réflexion et de transmission qui est bien adaptée aux analyseurs de réseaux. L'introduction de l'échantillon dans le guide produit un changement d'impédance caractéristique. L'ensemble des réflexions multiples dans le matériau est pris en compte dans les expressions des coefficients  $S_{11}$  et  $S_{21}$  qui sont mesurés. Ces derniers permettent alors de calculer  $\Gamma$ , coefficient de la première réflexion et  $T$ , coefficient de transmission. Un algorithme de calcul permet ensuite d'obtenir la permittivité complexe du matériau ;  $\epsilon'$  et  $\epsilon''$ , sur la plage de mesure considérée, en l'occurrence [1.3GHz ; 1.5GHz] pour la mission SMOS.

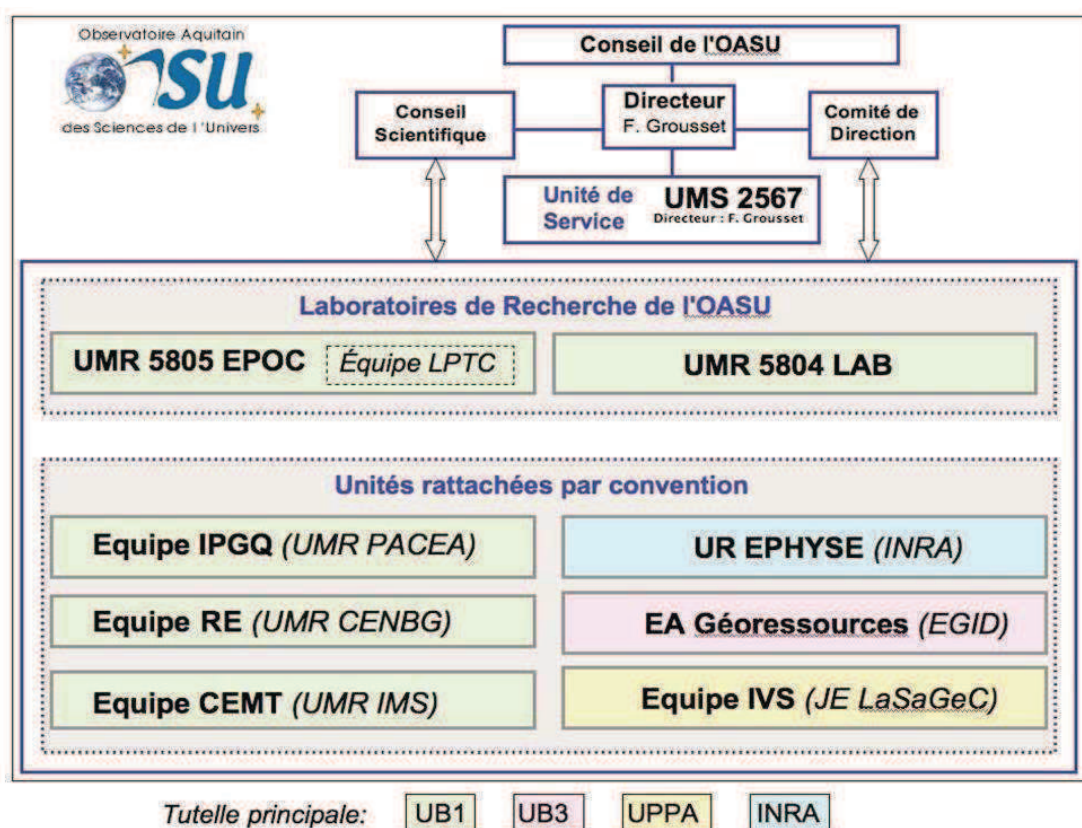
Les mesures effectuées permettent de réaliser des calculs précis du comportement électromagnétique de ces milieux.

Une autre approche a aussi été étudiée pour calculer la permittivité de nombreux types de sols (texture ...) en fonction de l'humidité et de la température afin d'obtenir suffisamment de paramètres pour générer une vaste base de données d'émissivités et de coefficients bi statiques de structures pédologiques. Un modèle d'estimation de la permittivité des sols a donc été étudié dans le cadre d'une coopération (Projet International de Coopération Scientifique du CNRS - PICS) avec le Kirensky Institute of Physics en Russie. Les modèles diélectriques des sols et de la couverture végétale sont une partie essentielle des algorithmes utilisés pour le traitement de données en télédétection passive ou active. A l'heure actuelle, le modèle semi-empirique (Semiempirical Mixing Dielectric Model : SMDM) de mélanges diélectriques est devenu l'un des plus judicieux pour déterminer le comportement diélectrique des sols dans la bande de fréquences micro-ondes en termes de radiométrie micro ondes et de télédétection radar. Il faut noter que ce modèle nécessite des paramètres de régression qui sont estimés en utilisant seulement cinq types de sols. L'application du SMDM à une variété plus étendue de sols n'a pas encore été correctement discutée à ce jour dans la littérature. Récemment, un modèle diélectrique spectroscopique a été développé pour les sols humides, employant le modèle de mélange de réfraction diélectrique (Refractive Mixing Dielectric

Model : RMDM). Le RMDM a été modifié dans le but de distinguer deux types d'eaux du sol (liée et libre), et leur permittivité a été déterminée séparément à l'aide des mesures diélectriques menées sur des échantillons de sol humide à teneurs en eau variées à une fréquence donnée. De plus, une méthodologie a été proposée afin de dériver les paramètres de relaxation de Debye et la conductivité ohmique pour l'eau du sol liée et libre. Le modèle développé a été désigné sous le nom de modèle généralisé de mélange de réfraction diélectrique (Generalized Refractive Mixing Dielectric Model  $\Leftrightarrow$  GRMDM). Avec le GRMDM, les spectres diélectriques des sols humides peuvent être déterminés pour un type de sol donné en fonction de l'humidité et de la température. Cette détermination s'effectue sur la base des paramètres spectroscopiques, qui incluent la permittivité du sol sec, le paramètre MBWF (fraction maximale d'eau libre ; Maximum Bound Water Fraction : MBWF), les limites en fréquence de la constante diélectrique, le temps de relaxation dans la formule de Debye, aussi bien que la conductivité ohmique, et en prenant en compte les deux types d'eau dans le sol. Chacun des paramètres spectroscopiques mentionné a une réalité physique et peut être déterminé en utilisant les mesures diélectriques habituelles avec des échantillons de sol humide. Le GRMDM s'est avéré efficace pour prévoir la constante diélectrique complexe d'un type de sol humide donné, à condition que tous les paramètres spectroscopiques, propres à ce type de sol, soient obtenus avec des mesures diélectrique, qui doivent être effectuées avant pour chaque type de sol. C'est principalement sur ce point que mon travail en caractérisation des sols est intervenu. De ce point de vue, le GRMDM est moins performant que le SMDM, puisque ce dernier ne nécessite aucune mesure diélectrique pour fonctionner, ses paramètres d'entrée étant uniquement les données granulométriques du sol, soit les teneurs en sable et en argile dans ce type de sol. Par conséquent, l'avantage d'utiliser le GRMDM plutôt que le SMDM, qui est bien connu et largement employé, peut être justifié seulement si la précision des prédictions diélectriques du SMDM sont insuffisantes, ceci étant le cas pour plusieurs sols mentionnés dans les publications. Mes travaux de recherche ont aussi porté sur ce point et consistent à valider l'intérêt du modèle GRMDM par rapport au modèle SMDM.

#### 4.5 Stratégie scientifique

Ces travaux m'ont donc conduit à créer de nombreuses collaborations (CNES, LAB, INRA, CESBIO, ...) et à obtenir des financements de recherche (PICS CNRS, CNES TOSCA, ANR, Région Aquitaine). Mon implication dans ces activités de recherche m'ont permis de conduire avec succès les démarches de rattachement par convention de l'équipe CEMT de l'IMS à l'OASU (Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers, UMS 2567). A ce titre je suis membre invité au CS de l'OASU.



*Figure 76 : Structuration de l'OASU*

Les travaux de recherche menés par l'équipe CEMT sont destinés à améliorer les outils d'observation de la Terre. Nous nous inscrivons donc logiquement dans un continuum d'étude comme le montre le schéma de synthèse présenté dans le rapport quadriennal de l'OASU (Figure 77).

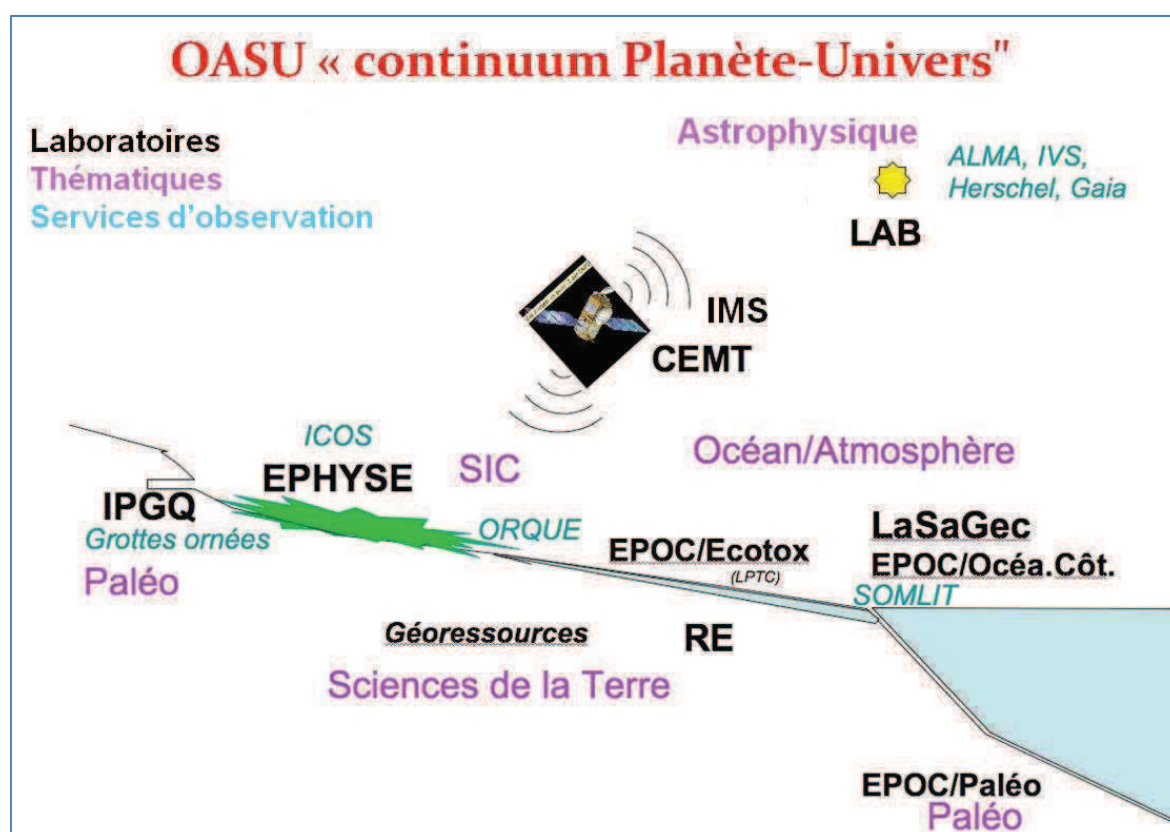


Figure 77 : Continuum d'étude de l'OASU

Ce rattachement de l'équipe CEMT à l'OASU s'inscrit aussi dans l'élaboration d'un réseau de télédétection en Aquitaine. Les activités dans le domaine de la télédétection en Aquitaine présentent une grande richesse en termes de méthodes et d'objets d'étude : modélisation et traitement de l'image satellite, du visible au domaine micro-ondes en passant par l'infrarouge, étude et suivi des sols, de la végétation, du littoral. Dans le domaine de la télédétection, l'Aquitaine se place ainsi parmi les grands centres régionaux au plan national. Les équipes concernées sont par ailleurs impliquées dans des projets spatiaux : Venus et Mistigri (CNES) pour les domaines du visible et de l'infrarouge et SMOS et Biomass (ESA) pour le domaine micro-ondes. Une collaboration forte est par ailleurs engagée avec l'OMP de la région Midi-Pyrénées (CESBIO, ONERA, CNES) sur ces différents projets.

Le potentiel du réseau aquitain de télédétection pour l'étude de questions scientifiques liées à des enjeux forts (qualité des eaux, état et devenir des écosystèmes terrestres et côtiers) est certain mais reste encore peu exploité. Un programme d'actions scientifiques visant à fédérer les actions de télédétection en Aquitaine a été initié au sein de l'OASU et à travers une Action



Scientifique Transverse dans le contexte de la création future du pôle National de Télédétection sur les surfaces continentales (PNSC) prévu pour 2012.

L'objectif est le développement d'un programme d'actions scientifiques en Aquitaine visant à fédérer les actions de télédétection, à faire émerger des synergies dans les compétences méthodologiques présentes dans les différents laboratoires et à renforcer le potentiel et la visibilité du réseau Aquitain de télédétection pour l'étude de questions liées à des enjeux thématiques forts (qualité des eaux, état et devenir des écosystèmes terrestres et côtiers).

Deux axes de recherche ont été dégagés. Le premier concerne la détection et le suivi des changements de surfaces en s'appuyant sur des observations optiques. Le deuxième, où j'interviens, est l'interprétation des signatures micro-ondes (domaines passif et radar) pour l'estimation des caractéristiques hydriques du sol et de la végétation. Dans le cadre de ce quadriennal, les activités porteront principalement sur des développements méthodologiques prometteurs, permettant d'initier des collaborations scientifiques pertinentes et effectives.

L'année 2011 a été marquée par le projet fédérateur STELLA déposé à la Région Aquitaine qui portait sur la "Caractérisation de la dynamique spatiale et temporelle des changements majeurs affectant le fonctionnement et la durabilité des écosystèmes sur le site atelier télédétection Aquitain".

Un projet Région STELLA-MICRO-ONDES, qui se focalise sur le 2<sup>ème</sup> axe de l'AST et qui concerne les équipes du LAB, IMS et EPHYSE, coordonné par Ph. Paillou sera soumis en 2012. Il vise à valider des méthodes de suivi du gel / dégel des sols par télédétection micro-ondes. Un site test est en cours de définition dans la vallée de Laruns, il sera instrumenté pour étudier les variations de constante diélectrique des sols au cours de l'année. Les études réalisées serviront à l'utilisation opérationnelle des données des satellites SMOS et SMAP.

#### **4.6 Perspectives de recherche**

Je dispose d'un outil de calcul de l'émissivité et du coefficient bi statique qui peut être utilisé pour l'étude de structures pédologiques complexes. Mes perspectives de travaux à venir se concentrent sur l'exploitation des données de la mission SMOS mais d'autres perspectives d'utilisation du modèle sont envisagées.

#### 4.6.1 Perspectives méthodologiques

##### ► Amélioration du modèle

J'ai travaillé sur un couplage de résolution d'équations basé sur la méthode des éléments finis. Ce couplage permet de prendre en compte, dans les structures étudiées, les phénomènes thermiques et les phénomènes de diffusion d'eau (gradients). Certaines améliorations sont encore nécessaires comme par exemple la précision pour de fortes rugosités et des angles d'observation supérieurs à 60°. Afin de lancer des campagnes de calcul, je travaille à l'optimisation en terme de temps de calcul et de mémoire nécessaire afin d'accélérer la création de la base de données

##### ► Perspectives d'évolution du modèle

L'objectif est d'amener progressivement le modèle à pouvoir étudier des structures plus grandes. Nous pouvons ainsi parler de tache focale d'observation numérique. L'objectif est de pouvoir étudier des zones regroupant des milieux différents.

L'évolution des ressources informatiques ouvrent des perspectives très intéressantes en termes de calcul. Si nous regardons les ressources disponibles au laboratoire sur les 10 dernières années ; la vitesse des microprocesseurs a été multipliée par 10. L'apparition des multi cœurs a permis aussi d'accélérer les temps de calcul. Enfin l'augmentation conséquente de la mémoire RAM disponible a permis de multiplier par 350 la taille des surfaces des zones que notre modèle peut étudier ...

L'équipe CEMT dispose d'ordinateurs dédiés au calcul intensif. Il existe déjà sur le marché des produits permettant par exemple des gains en surface de tache focale numérique importants (x4). Si le modèle est exporté sur un super calculateur ; ce gain peut être de l'ordre de 20 à 30. Il est ainsi possible d'envisager aujourd'hui l'étude de surfaces de 1500 m<sup>2</sup> (sur une épaisseur de 50 cm). Nous sommes encore loin des dimensions du pixel de SMOS par exemple (30 km x 30 km) mais cela peut permettre d'étudier des configurations intéressantes.

Une autre approche consiste à étudier le champ diffusé par une structure pédologique de taille limitée. Cette structure représentant une brique élémentaire, nous pourrions obtenir le comportement de briques de nature différentes (sol nu, sol+litière, sol humide, sol sec ...). Je vais étudier la possibilité d'obtenir le comportement de la juxtaposition de briques à partir de

la connaissance du comportement des différentes briques. Par effet "mosaïque", il sera ainsi possible d'étudier des surfaces étendues présentant des disparités de milieux.

#### 4.6.2 Perspectives applicatives

##### ► Mission SMOS

Le modèle étant validé je vais l'utiliser afin d'étudier l'émissivité des structures sol litière. Comme nous l'avons vu notre modèle permet de prendre en compte de nombreux paramètres. Ainsi je vais lancer des campagnes de calcul afin de récolter le maximum d'informations. Ces dernières seront mises à disposition de la communauté scientifique de télédétection afin de valider et perfectionner l'algorithme de la mission SMOS.

La base de données est prête à stocker les résultats des calculs. Elle permettra d'extraire les données stockées à l'aide de paramètres de sélection (angle d'observation, polarisation, structure étudiée, humidité ...).

La base des données est hébergée sur le serveur de l'ENSCP (où se trouve le laboratoire) à Bordeaux. Un environnement de gestion de la base a été créé afin de rentrer ou d'extraire des données de la base. Une nouvelle mise à jour est à l'étude.

Une fois qu'un utilisateur est connecté, la page web est visible et configurée grâce à XHTML (HTML et CSS). Chaque fois que l'utilisateur veut rechercher ou rentrer des données, la page web travaille avec son code en PHP (en contact avec le serveur) pour pouvoir communiquer avec notre base de données en MySQL, en utilisant le code SQL, afin d'extraire ou d'entrer des données.

Des campagnes de calcul vont être prochainement lancées afin d'édifier la base de données et la mettre à disposition de la communauté scientifique.

Des confrontations des résultats du modèle avec les premières données SMOS sur les forêts sont en cours. L'exploitation de ces comparaisons va permettre une meilleure compréhension et interprétation des signaux recueillis par le radiomètre de SMOS.

Des campagnes de calcul ont permis de recueillir des données qui ont déjà permis d'améliorer les paramètres de prise en compte de la rugosité du modèle H-Q de l'algorithme LMEB de la mission SMOS.

► Mission BIOMASS [58]

Le laboratoire CESBIO a proposé un projet de mission à l'Agence Spatiale Européenne en réponse au 2<sup>ème</sup> appel d'offres ESA "Earth Explorer Core Missions" du 15 Mars 2005. Le groupe scientifique est piloté par Thuy Le Toan du CESBIO (Toulouse) et Shaun Quegan du "Centre for Terrestrial Carbon Dynamics" (UK). Ce projet repose sur l'utilisation d'un Radar à Synthèse d'Ouverture en bande P (432-438 MHz) pour observer la distribution spatiale de la biomasse à l'échelle planétaire. Le 2 Mars 2009, cette mission a été sélectionnée par l'ESA et a donc commencé sa phase A d'étude. Je collabore avec le laboratoire CESBIO. J'ai proposé les compétences de l'équipe CEMT en matière de mesure des propriétés électromagnétiques et de modélisation. Elles ont été jugées très utiles par Mme Thuy Le Toan qui pilote ce projet. J'espère collaborer dans un avenir proche à ce projet.

► Etude des pergélisols et prise en compte des effets thermiques

Associé à Philippe Paillou (LAB UMR 5804 – Université Bordeaux 1) nous créons une collaboration avec François Costard (IDES UMR 8148 – Université Paris Sud) sur l'étude des pergélisols. Ces structures sont des milieux pédologiques gelés en permanence en profondeur mais pouvant avoir en surface un partie dégelée (partie dite active d'une épaisseur pouvant aller jusqu'à 1 m). Ces milieux sont de très fiables indicateurs des changements climatiques et font l'objet d'études approfondies dans le cadre de projets de télédétection spatiale (*International Permafrost Association*). Cependant les hétérogénéités de température dans ces structures rendent l'interprétation de leur signature radar difficile.

L'équipe de François Costard est reconnue dans le domaine de l'étude et de la réalisation de pergélisols en laboratoire. De notre côté nous avons travaillé sur un couplage de résolution d'équations basé sur la méthode des éléments finis. Ce couplage permet de prendre en compte dans les structures les phénomènes thermiques et les phénomènes de diffusion d'eau (gradients). Des études de validation de cette nouvelle approche sont en cours. Cependant les résultats sont très prometteurs et la collaboration avec l'équipe de François Costard va permettre d'intégrer dans le modèle des profils réalistes de température. Nous pourrons ainsi étudier la réponse radar de ces structures et ainsi proposer un outil d'interprétation des signaux recueillis par des radars micro-ondes.

Dans le cas de la mission SMAP\* par exemple, l'outil de modélisation développé pourra aussi être très utile pour l'étude des signaux qui seront recueillis avec une périodicité de quelques jours et pour laquelle les effets de la température (jour, nuit) ne pourront pas être négligés.

Je suis d'ailleurs co-proposant d'un projet TOSCA CNES « suivi de la dynamique temporelle des déserts de Mongolie intérieure par télédétection radar : préparation à l'analyse des données SMAP » accepté.

De plus, soutenu par l'AST télédétection et le CNES, nous souhaitons demander un financement CNES et région Aquitaine afin de financer une thèse sur ce sujet dès 2012.

#### ► Equipex SETHI-NG

L'équipe CEMT est aussi partenaire d'une demande d'Equipex SETHI-NG. Ce projet consiste à l'élaboration d'une plateforme aéroportée dédiée à l'étude des surfaces continentales. Cette plateforme comportera des instruments couvrant un large spectre de fréquences (du domaine radar au domaine visible). Cet équipement aura de plus la faculté d'effectuer des acquisitions simultanées avec plusieurs instruments. Il fournira des données prétraitées géo référencées qui seront directement utilisables par la communauté scientifique.

La variété des données acquises par les équipements de cet Equipex en terme de fréquence, de milieux observés et de conditions d'observations sera une source d'information inestimable pour mes recherches.

Les avancées attendues trouveront en particulier leurs applications dans le développement et la validation des algorithmes d'inversion des futurs projets spatiaux de télédétection micro-ondes active et passive à fréquence de revisite importante.

*\*SMAP : Soil Moisture Active and Passive mission.* Mission de la NASA dont le lancement est prévu en 2013. Elle repose sur l'utilisation d'un radiomètre et d'un radar en bande L. Les objectifs de cette mission sont l'estimation de l'humidité des sols, l'étude des flux de carbone, l'amélioration des études climatiques ou encore la prévision des inondations.

## **4.7 Coopérations industrielles et valorisation**

### 4.7.1 Cellule de transfert technologique IMS Transfert-A2M de l'IMS.

La cellule de transfert A2M (Atelier Micro-ondes et Matériau), née en 2002 au laboratoire PIOM, a été rattachée à IMS Transfert, cellule de transfert technologique du laboratoire IMS (Intégration du Matériau au Système). Elle développe des dispositifs de contrôle non-destructif utilisant des moyens micro-ondes ou réalise de la caractérisation de matériau (permittivité, conductivité...).

Pour cela nous disposons de plusieurs analyseurs d'impédance de  $10^{-2}$  Hz à 1,8 GHz et d'analyseurs de réseaux vectoriels de 10 MHz à 110 GHz, équipés de cellules de mesures ou de bancs d'antenne focalisés. Nous avons également à notre disposition des outils de simulation électromagnétique (HFSS, XFDTD, ou code interne.....) sur des calculateurs scientifiques, qui nous permettent de modéliser n'importe quel dispositif de propagation pour une meilleure compréhension ou une optimisation des phénomènes électromagnétiques.

Cette cellule de transfert répond au cas par cas à un problème industriel ou de laboratoire particulier (prestation ou étude et développement). Les moyens du laboratoire, analyseurs en particulier, permettent de vérifier la faisabilité du contrôle et de déterminer quel est le paramètre le plus pertinent (mesure de phase ou de module, fréquence de mesure, etc...). Ces moyens sont coûteux et ces premières mesures ne peuvent être faites que par des opérateurs expérimentés. Le rôle de la cellule est alors de mettre en place des dispositifs simples et peu coûteux, accessibles à des opérateurs sans formation particulière ce que le développement des technologies micro-ondes permet actuellement.

Dans le cadre de la cellule de transfert technologique IMS Transfert-A2M du laboratoire IMS, je participe à des contrats de recherches ou industriels. Les premiers sont principalement des demandes de mesures de propriétés électromagnétiques de matériaux ou de simulations et sont issus de laboratoires Français ou étrangers. Les contrats industriels quand à eux, portent sur l'interaction ondes-matières particulièrement dans le domaine des micro-ondes (détection de défauts, traitement de matériaux).

Exemples de projets :

**2009-2012** Mise au point d'un appareil de mesure non destructive in situ de l'humidité et de la salinité des bétons. Application au suivi des ouvrages de génie civil. Coopération avec le laboratoire I2M-GCE. Caractérisation électromagnétique des bétons (0,3 à 3 GHz) et simulations électromagnétiques.

**2010-2013** Projet ANR dans le cadre du Programme ECOTECH du nom de COFRAGE, sur le recyclage des bétons en collaboration avec le BRGM d'Orléans qui est le coordinateur principal de cette étude en partenariat également avec les sociétés Cassin et Selfrag et le laboratoire de génie chimique de Toulouse. L'étude consiste à fragiliser les bétons à l'aide de rayonnement micro-ondes. Les travaux portent sur la caractérisation électromagnétique des bétons à 2.45GHz et à effectuer des simulations électromagnétiques et thermiques en vue de concevoir un applicateur.

**2005-2009** Société NDT expert : Détection de défauts dans des structures d'avion. Les contraintes subies par les structures d'avion conduisent à l'apparition d'inclusions d'eau dans les structures par infiltration. Ces inclusions d'eau doivent être détectées afin d'être supprimées car elles peuvent conduire à une fragilisation de ces structures qui pourrait être fatale. Un système de détection électromagnétique micro-ondes a été développé. Il permettra de diagnostiquer ces problèmes.

**2006-2010** Société EODISS. Etude de tunnels de traitement micro-ondes de matériaux. Caractérisation diélectrique et simulations électromagnétiques.

#### 4.7.2 Laboratoire MASTER

**1999** Participation à un projet de recherche avec les sociétés VITAGERMINE (FR) et VIVER (UK) "Etude de faisabilité d'une nouvelle chaîne de stérilisation de pots d'aliments pour nourrissons par micro-ondes"

**1998-2001** Co responsable d'un projet Européen Brite Euram BRPR 98 0668 "Firing / Sintering of ceramic materials by multiplefrequency microwave radiation" (MW Sint)

Début : Septembre 1998- Durée : 3 ans

**1996-1999** Thèse effectuée en partenariat avec le groupe UNILEVER dans le cadre du développement d'un applicateur micro-ondes dédié à la pasteurisation flash.

#### **4.8 Exemples de collaborations**

- ▶ Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux (LAB UMR 5804),
- ▶ Laboratoire EPHYSE de l'INRA à Bordeaux,
- ▶ Laboratoire CESBIO à Toulouse (UMR 5126);
- ▶ Kirensky Institute of Physics en Russie ; Faculty of Earth and Life science
- ▶ Geo-environmental science and Hydrology Laboratory (Amsterdam university),
- ▶ Laboratoire JPL-NASA Pasadena.
- ▶ Unilever Research, Colworth Laboratory. Bedford (England)
- ▶ isarSAT Laboratory Barcelone
- ▶ Monash University, Australie
- ▶ Observatoire de Paris – LERMA UMR 8112
- ▶ BRGM d'Orléans

#### **4.9 Production scientifique (Liste complète en Annexe 1)**

- ▶ 11 publications dans des revues avec comité de lecture
- ▶ 67 communications dans des Colloques nationaux et internationaux avec actes. 12 de ces communications ont été publiées dans le cadre de *proceedings books* (RAQRS, IEEE IGARSS, IEEE Microrad) d'un très fort rayonnement international.
- ▶ 3 participations dans des conférences invités comme co auteur
- ▶ 1 Brevet en tant que déposant principal
- ▶ Participation à la rédaction d'un ouvrage scientifique

#### **4.10 Encadrement scientifique**

Mon niveau d'encadrement scientifique peut être interprété comme relativement faible. Cela est dû à une forte implication dans des actions structurantes afin de créer des



collaborations avec d'autres équipes de recherche et aux responsabilités que j'ai été amenées à prendre en enseignement et dans le cadre de l'accueil et du suivi des étudiants en situation de handicap. Je compte remédier à ce déficit. Soutenu par l'AST télédétection et le CNES, je vais demander un financement CNES et région Aquitaine afin de financer une thèse dès 2012.

► 2002-2010 : Participation à l'encadrement de trois doctorants et 30 étudiants de niveau L2 à M2.

[PhD3]

01/10/07 – 15/12/2010 Lawrence Heather – Thèse d'université – Modélisation de l'effet de la rugosité de surface et de la litière des couverts naturels sur les observations micro-ondes passives : application au suivi global de l'humidité du sol par la mission SMOS

Niveau d'encadrement : 80%

Thèse soutenue. Aujourd'hui en Post Doctorat au laboratoire CESBIO (Toulouse)

Publications communes : 2 publications dans des journaux scientifiques, 8 communications dans des congrès avec actes.

[PhD2]

01/10/06 – 01/10/08 Lahoudere Julien – Thèse d'Université – Modélisation électromagnétique du système radar UHF de la mission spatiale exoMars.

Niveau d'encadrement : 50 %

Thèse non soutenue suite abandon. Etudiant réorienté en MASTER (obtenu). Sur le marché du travail.

Publications communes : 4 communications dans des congrès avec actes.

[PhD1]

01/09/02 – 13/12/05 Oyhenart Laurent – Thèse d'Université – Modélisation, réalisation et caractérisation de matériaux tridimensionnels à bandes interdites photoniques appliqués à la compatibilité électromagnétique.

Niveau d'encadrement : 20 %

Thèse soutenue. Aujourd'hui Maître de conférences à l'Université Bordeaux 1

Publications communes : 1 publication dans un journal scientifique, 9 communications dans des congrès avec actes.

[Mt2]

01/01/06 – 01/06/06 Lawrence Heather – MASTER 2 – Investigation into soil humidity as measured using a radiometer at 1.4 GHz and development of a numerical model to calculate soil emissivity.

[Mt1]

01/01/06 – 01/06/06 Le Crom Bénédicte – MASTER 2 – Caractérisation électromagnétique de milieux hétérogènes naturels. Application à la mesure de l'humidité des sols par radiométrie micro-ondes.

#### **4.11 Programmes de financements de recherche conduits et obtenus**

- ▶ Participation au programme **TOSCA 2011 du CNES** : suivi de la dynamique temporelle des déserts de Mongolie intérieure par télédétection radar: préparation à l'analyse des données SMAP
- ▶ Participation aux programmes **TOSCA-SMOS du CNES (2008-2009-2010 et 2011)**;
- ▶ **Financement CNRS 2009-2012** : Direction d'un projet **PICS - CNRS** en collaboration avec le Kirensky Institute en Russie (2009-2010-2011). Participation au développement et à la validation d'un modèle d'estimation des propriétés diélectriques des sols (PICS 2009-2012 N° 4856) (Generalized Refractive Mixing Dielectric Model : **GRMDM**). Application au traitement des données de missions de télédétection spatiale active et passive.
- ▶ **Financement région Aquitaine 2007-2010** : Développement d'une méthode numérique 3D de calcul de l'émissivité des sols en bande L. Application à l'interprétation des données de la mission SMOS. co-financement de thèse
- ▶ **Financement CNES 2007-2010** : Développement d'une méthode numérique 3D de calcul de l'émissivité des sols en bande L. Application à l'interprétation des données de la mission SMOS. co-financement de thèse
- ▶ Les différents financements obtenus ont permis l'achat de matériel de mesure (analyseurs de réseau...), de stations de calculs hautes performances et d'outil de simulations puissants (logiciels HFSS-ANSOFT, NLT-ANSYS, CST ...)

#### **4.12 Reviewing, expertises, organisation d'évènements scientifiques et membership**

- ▶ *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Membership (09)*
- ▶ *Reviewer* d'article pour l'*International Journal of Microwave Science and Technology (2010)*
- ▶ *Reviewer* d'article pour le journal *Canadian Journal of Remote Sensing (2010-2011)*
- ▶ *Reviewer* pour le congrès IGARSS (IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium) (2008-2009-2010)
- ▶ **Expertise** de dossiers ANR (2009)
- ▶ Membre du Club EEA depuis 1999
- ▶ Organisation d'un séminaire scientifique autour de l'invitation du Pr Valery Mironov et Liudmila Kasolapova du Kirensky Institute of physics (Russie) (2009)
- ▶ Membre du comité d'organisation du congrès JCMM (Journées de Caractérisation Micro ondes et Matériaux) à La Rochelle (2004)

### 4.13 Bibliographie

[1] H.T. Ewe, J.T. Johnson and K.S.Chen, (2001a) “*A comparison study of the surface scattering models and numerical model,*” in Proc. IGARSS, Sydney, Australia, pp. 2692 – 2694.

[2] H.T. Ewe, J.T. Johnson and K.S.Chen, (2001b) “*A Comparison Study of the Surface Scattering Models and Numerical Model*” presentation at IGARSS, Sydney, Australia, July 13, 2001.

[3] P. Ferrazzoli and L. Guerriero (1996), “Passive microwave remote sensing of forests: A model investigation,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 34, no. 2, pp. 433–443.

[4] P. Ferrazzoli, L. Guerriero, and J.-P. Wigneron (2002), “Simulating L-band emission of forests in view of future satellite applications,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, no. 12, pp. 2700–2708.

[5] Raoul Calvet (2003) “*Le sol propriétés et fonctions* “ Tomes 1 & 2 , Dunod

[6] A.K. Fung (1994a), *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*. Norwood, MA: Artech House, 1994.

[7] B. J. Choudhury, T. J. Schmugge, and T. Mo (1982), “A parameterization of effective soil temperature for microwave emission,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 87(C2), pp. 1301–1304.

[8] A.A Chukhlantsev (2006), *Microwave Radiometry of Vegetation Canopies*, Springer 2006

- [9] ESA website: <http://www.esa.int/esaLP/LPsmos.html>.
- [10] CNES website: <http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/7899-lancement-de-smos.php>.
- [11] EADS Space website: <http://www.space.eads.net/>
- [12] ANSOFT : <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>
- [13] ANSYS : <http://ansys.com/>
- [14] Altschuler, Handbook of microwave circuits measurements, vol II, John Wiley & sons, Inc., New York, USA, (1963)
- [15] Site de l'ESA : <http://www.esa.int/esaCP/index.html>. Lien: Observing the Earth / Esa EO Programme : The living planet / Earth Explorers / SMOS
- [16] M. A. Karam (1997), "A physical model for microwave radiometry of vegetation," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 35, no. 4, pp. 1045 – 1058.
- [17] Y.H. Kerr, P. Waldteufel, J.-P. Wigneron, J. Martinuzzi, J. Font, and M. Berger (2001), "Soil moisture retrieval from space: the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, no. 8, pp. 1729-1735.
- [18] C. Matzler et al (2006), *Thermal Microwave Radiation: Applications for Remote Sensing*, The Institution of Engineering and Technology.

- [19] C. Mätzler, *Physical Principles of Remote Sensing*, Lecture course, Bern, Suisse 2007
- [20] P. Tran (1997), “Calculation of the scattering of electromagnetic waves from a two-dimensional perfectly conducting surface using the method of ordered multiple interaction,” *Waves in Random Media*, vol.7, no. 3, pp. 295 – 302.
- [21] E.G. Njoku and D. Entekhabi (1996), “Passive microwave remote sensing of soil moisture,” *J. Hydrol.*, vol 184, pp. 101-129.
- [22] L. Tsang, J. Kong, K.-H. Ding, C. Ao (2001), *Scattering of Electromagnetic Waves, vol. 2 Numerical Simulations*, New York: Wiley.
- [23] F.T. Ulaby, R.K. Moore and A.K. Fung (1985), *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, vol. I. Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*, Dedham, MA: Artech House, 1985.
- [24] F.T. Ulaby, R.K. Moore and A.K. Fung (1985), *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, vol. II. Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*, Dedham, MA: Artech House, 1985.
- [25] F.T. Ulaby, R.K. Moore and A.K. Fung (1985), *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, vol. III From Theory to Applications*. Dedham, MA: Artech House, 1985.
- [26] M. C. Dobson, F. T, Ulaby, M. T. Hallikainen, and M. A. El-Reyes (1985), “Microwave dielectric behavior of wet soil—Part II: Dielectric mixing models,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 23, pp. 35–44.

[27] B. J., Choudhury, T. J., Schmugge, A., Chang, and R. W. Newton (1979), "Effect of surface roughness on the microwave emission from soils," *Journal of Geophysical Research*, vol. 84, pp. 5699–5706.

[28] E. Ceraldi, G. Franceschetti, A. Iodice (2005), "Estimating the Soil Dielectric Constant via Scattering Measurements Along the Specular Direction," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 43, no. 2, pp. 295-305.

[29] V.L. Mironov, L.G.Kosolapova, and S.V. Fomin, "Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.47, no.7, pp.2059-2070, July 2009.

[30] V.L. Mironov, Fomin S.V "Temperature and mineralogy dependable model for microwave dielectric spectra of moist soils" in *PIERS Proceedings*, 938 - 942, August 18-21, Moscow Russia, 2009.

[31] P.P. Bobrov, V.L. Mironov, A.S. Yashchenko, Diurnal Dynamics Radiobrightness Temperature of Soil on the Frequency 1.4 and 6.9 GHz in the Processes of Freezing/Thawing. Abstracts of *IGARSS'2010*, July 25-30, Honolulu, USA.

[32] F. Demontoux, B. Le Crom, G. Ruffié, J.P. Wigneron, J.P. Grant, V.L. Mironov and H. Lawrence, “Electromagnetic characterisation of soil-litter media: Application to the simulation of the microwave emissivity of the ground surface in forests,” *EPJ Applied Physics*, vol. 44, no. 3, pp. 303-315, Dec. 2008

[33] Demontoux F., Ruffié G. and Wigneron J.P, "*Amélioration de l'étude de l'humidité de sols par radiométrie. Caractérisation et modélisation diélectriques de profils géologique*" Journées Nationales Microondes, Nantes, May 2005.

[34] Demontoux F., Ruffie G., Wigneron J.P., Escorihuela M.-J. "*Caractérisation électromagnétique de milieux hétérogènes naturels - Application à la mesure de l'humidité du sol par radiométrie micro-onde*"

JCMM 2006, Saint Etienne, 2006

[35] V.Pohl, D. Fricke, A. Mühlbauer. *Correction procedures for the measurement of permittivities with the cavity perturbation method* . Journal of Microwaves Power and Electromagnetic Energy, Vol. 30, n° 1, (1995)

[36] G. Boudouris. *Validité de la méthode de perturbation appliquée aux cavités résonantes pour la mesure de la perméabilité et de la permittivité des petits échantillons*. Journal of physic, Vol. 25, P-119 A, (1965)

[37] M. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. Dobson, M. A. El-Rayes, and L. Wu (1985), “*Microwave dielectric behavior of wet soil—Part I: Empirical models and experimental observations*,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. GRS-23, no. 1, pp. 25–34.



[38] B. Le Crom, F. Demontoux, G. Ruffie, JP. Wigneron, JP. Grant "*Caractérisation électromagnétique de matériaux géologiques en vue du suivi de l'humidité des sols par radiométrie micro-ondes*" Jfmma & Telecom 2007 – Fes, Maroc

[39] C. Mätzler (1994), "Microwave (1–100 GHz) dielectric model of leaves," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 32, no. 4, pp. 947–949.

[40] C. Mätzler (1998), "Microwave permittivity of dry sand," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* vol. 36, pp. 317–319.

[41] V.L. Mironov, M.C. Dobson, V.H. Kaupp, S.A. Komarov, and V.N. Kleshchenko (2004), "Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 42, no. 4 pp. 773 – 785.

[42] Demontoux F., Bonnaud F., Duffour C., Ruffié G., Mora P., Beaudin G., Encrenaz P., Gulkis S. "*Caractérisation électromagnétique de matériaux non usinables. Application à l'étude d'éclats de météorites*" Dans dans actes de JCMM'2010 : Les 11ièmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux - JCMM'2010 : Les 11ièmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, France (2010)

[43] Demontoux F. "*Contribution à l'amélioration des mesures de permittivité à 2450 MHz et au développement d'un applicateur dédié à la pasteurisation flash à l'aide de modélisations électromagnétiques et thermiques*" Doctorat de l'Université Bordeaux 1 1999

[44] V.L. Mironov, L.G.Kosolapova, and S.V. Fomin (2009), "Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.47, no.7, pp.2059-2070.

[45] J.R. Wang, and T.J. Schmugge (1980), “*An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content,*” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol 18, pp. 288-295.

[46] Y. Lasne, G. Ruffie, C. Serradilla, F. Demontoux, Ph. Paillou, A. Freeman, T. Farr, K. McDonald, B. Chapman, J.-M. Malézieux “*Effect of salinity on the dielectric properties of geological materials: implication for soil moisture detection by means of radar remote sensing*” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46, 2007

[47] Heggy E., Paillou P., Costard F., Mangold N., Ruffie G., Demontoux F., Grandjean G., Malezieux J.M. “*Local geoelectrical models of the Martian subsurface for shallow groundwater detection using sounding radars*” *Journal.Geophys.Research.*, 2003, vol108 n°E4,10.1029/2002JE1871

[48] P. de Rosnay, J. Calvet, Y. Kerr, J. Wigneron, F. Lemaître, M. Escorihuela, J. Sabater, K. Saleh, J. Barrié, G. Bouhours et al. (2006a), “*SMOSREX: A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing,*” *Remote Sens. Environ.*, vol.102 (n 3-4), pp. p377-389.

[49] P. de Rosnay, J.-P. Wigneron, T. Holmes, and J.-C. Calvet, (2006b) “*Parametrizations of the effective temperature for L-band radiometry. Inter-comparison and long term validation with SMOSREX field experiment,*” C. Matzler *Thermal microwave radiation – Applications for remote sensing*, The Institution of Engineering and Technology, pp. 312 - 324.

[50] A. Della Vecchia, P. Ferrazzoli, J.-P. Wigneron, and J. P. Grant (2007), “*Modeling Forest Emissivity at L-Band and a Comparison With Multitemporal Measurements,*” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing Lett.*, vol. 4, no. 4, pp. 508 – 512.

[51] J. grant, J.P. Wigneron, A.A. Van de Griend, S. Schmidl Søbjærg, N. Skou, A. Kruskewski, J. Balling, *First Result of the 'Bray 2004' field experiment on L-band radiometry – microwave signal behaviour for varying conditions of ground moisture*, journal 'Remote Sensing of Environment'

[52] J. P. Grant, J.-P. Wigneron, A. A. Van de Griend, A. Kruszewski, S. Schmidl Søbjærg, and N. Skou, “*A field experiment on microwave forest radiometry: L-band signal behaviour for varying conditions of surface wetness*,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 109, no. 1, pp. 10–19, Jul. 2007.

[53] H. Lawrence, F. Demontoux, J.-P. Wigneron, P. Paillou, T.-D. Wu and Y. H. Kerr, “A New Numerical Approach for Modeling the 3-Dimensional Scattering and Emission of a Rough Surface,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing Lett.*, 2010

[54] SMAP mission : <http://smap.jpl.nasa.gov/mission/>

[55] J. P. Grant, A. A. Van de Griend, M. Schwank, and J.-P. Wigneron (2009), “Observations and Modeling of a Pine Forest Floor at L-Band,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, no. 7, pp. 2024-2034.

[56] M. Guglielmetti, M. Schwank, C. Mätzler, C. Oberdörster, J. Vanderborght, and H. Flüher (2008), “FOSMEX: Forest Soil Moisture Experiments With Microwave Radiometry,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 3, pp. 727 – 735.

[57] T.R.H. Holmes, P. de Rosnay, R. de Jeu, J.-P. Wigneron, Y. Kerr, J.-C. Calvet, et al, (2006) “A new parameterization of the effective temperature for L band radiometry,” *Geophysical Research Letters*, 33, L L07405.

[58] T. Le Toan, S. Quegan, M. Davidson, H. Balzter, P. Paillou, K. Papathanassiou, S. Plummer, S. Saatchi, H. Shugart, and L. Ulander (2010), “The BIOMASS Mission : Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle”, *Remote Sensing of the Environment*, October 2010.

[59] Y.-A. Liou, K.-S. Chen, and T.-D. Wu, (2001) “Reanalysis of L-band brightness predicted by the LSP/R model-for prairie grassland: incorporation of rough surface scattering,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39 no. 1, pp. 129 – 135.

[60] W.H. Peake 1959, “*Interaction of electromagnetic waves with some natural surfaces*,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 7, pp. 324-329.

[61] C. Prigent, J.-P. Wigneron, W.B. Rossow, and J.R. Pardo-Carrion (2000), “*Frequency and angular variations of land surface microwave emissivities: Can we estimate SSM/T and AMSU emissivities from SSM/I emissivities?*” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, pp. 2373–2386.

[62] E. Santi, S. Paloscia, P. Pampaloni, and S. Pettinato (2007), “*Ground-based microwave investigations of forest plots in Italy*,” in *Proc. Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, Barcelona, Spain, Jul. 23–28, 2007, pp. 1416–1419.

[63] M. Schwank, M. Guglielmetti, C. Matzler, and H. Fluhler (2008), “Testing a New Model for the L-Band Radiation of Moist Leaf Litter”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 7, pp 1982-1994.

[64] M. Schwank, I. Völksch, J.-P. Wigneron, Y. H. Kerr, A. Mialon, P. de Rosnay, and C. Mätzler (2010), “Comparison of Two Bare-Soil Reflectivity Models and Validation With L-Band Radiometer Measurements,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 48, no. 1, pp. 325–337.

[65] J.R. Wang, and B.J. Choudhury (1981), “Remote sensing of soil moisture content over bare field at 1.4 GHz frequency,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, pp. 5277–5282.

[66] J.R. Wang, P.E. O'Neill, T.J. Jackson, and E.T. Engman (1983), “Multifrequency measurements of the effects of soil moisture, soil texture, and surface roughness,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 21, pp. 44–51.

[67] J.-P. Wigneron, L. Laguerre, and Y. Kerr (2001), “Simple modeling of the L-band microwave emission from rough agricultural soils,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 39 no. 8, pp. 1697–1707.

[68] J. -P. Wigneron, , J. -C. Calvet, T. Pellarin, A. Van de Griend, M. Berger, and P. Ferrazzoli (2003), “Retrieving near surface soil moisture from microwave radiometric observations: Current status and future plans” *Remote Sens. Environ.*, vol. 85, pp 489–506.

[69] J.-P. Wigneron , Y. Kerr, P. Waldteufel, K. Saleh, M.-J. Escorihuela, P. Richaume , P. Ferrazzoli, P. de Rosnay, R. Gurney, J.-C. Calvet, J.P. Grant, M. Guglielmetti, B. Hornbuckle, C. Matzler, T. Pellarin, and M. Schwank (2007), “L-band Microwave Emission of the Biosphere (L-MEB) Model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 107, no. 4, pp. 639–655.

[70] J.-P. Wigneron, A. Chanzy, Y. H. Kerr, H. Lawrence, J. Shi, M. J. Escorihuela, V. Mironov, A. Mialon, F. Demontoux, P. de Rosnay, and K. Saleh-Contell (2010), “Evaluating an Improved Parameterization of the Soil Emission in L-MEB”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, accepted Sep. 2010

[71] F. Demontoux, H. Lawrence, JP Wigneron, "Modélisation des effets de la rugosité sur l'étude de l'humidité des sols par radiométrie micro-ondes. Application à la mission spatiale SMOS" *jfmma telecom 08 Agadir Maroc*

[72] K. S. Chen, T. D. Wu, M. K. Tsay, and A. K. Fung (2000), “A note on the multiple scattering in IEM models,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 38, pp. 249–256.

[73] K. S. Chen, T. D. Wu, L. Tsang, Q. Li, J. C. Shi, and A. K. Fung (2003), “Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 41, no. 1, pp. 90–101.

[74] M. F. Chen and S. Y. Bai (1990), “Computer simulation of wave scattering from a dielectric random surface in two dimensions - Cylindrical case,” *J. Elec. Waves Appl.*, vol. 4, no. 10, pp. 963-982.

[75] A. K. Fung, and K. S. Chen (2004), “An Update on the IEM Surface Backscattering Model,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 1, no. 2, pp. 75–77.

[76] J. C. Shi, K. S. Chen, Q. Li, T. J. Jackson, P. E. O’Neill, and L. Tsang (2002), “A parameterized surface reflectivity model and estimation of bare surface soil moisture with L-band radiometer,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, no. 12, pp. 2674–2686.

[77] T. T. Wilheit (1978), “Radiative transfer in a plane stratified dielectric,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 16, no. 2, pp. 138–143.

[78] T.-D. Wu, K.S. Chen, J. Shi, A.K. Fung (2001), “A Transition Model for the Reflection Coefficient in Surface Scattering,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39 (9), pp. 2040-2050.

[79] T.-D. Wu, and K.S. Chen (2004), “A reappraisal of the validity of the IEM model for backscattering from rough surfaces,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 42, no. 4, pp. 743–753.

[80] T.-D. Wu, K.-S. Chen, J. Shi, H.-W. Lee, and A. K. Fung (2008), “A Study of an AIEM Model for Bistatic Scattering From Randomly Rough Surfaces,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46 (9), pp. 2584-2598.

[81] Heather Lawrence, Jean-Pierre Wigneron, Senior Member, IEEE, François Demontoux, Member, IEEE, Arnaud Mialon and Yann Kerr, Senior Member, IEEE “*Evaluating the semi-empirical  $H - Q$  model, used to calculate the emissivity of a rough bare soil, with a numerical modeling approach*” IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters (soumis)

[82] Heather Lawrence, François Demontoux, Jean-Pierre Wigneron, Senior Member, IEEE, Philippe Paillou, Tzong-Dar Wu and Yann H. Kerr “*Evaluation of a Numerical Modeling Approach based on the Finite Element Method for calculating the Rough Surface Scattering and Emission of a soil layer*” IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters

[83] R. M. Axline and A. K. Fung (1978), “Numerical Computation of Scattering from a Perfectly Conducting Random Surface,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 26, no. 3, pp. 482 – 488.

[84] H. Braunisch, Y. Zhang, C. O. Ao, S.-E. Shih, Y. E. Yang, K.-H. Ding, J. A. Kong, and L. Tsang (2000), “Tapered Wave with Dominant Polarization State for All Angles of Incidence,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 48, no. 7, pp. 1086 - 1096.

[85] H. Lawrence, F. Demontoux, J.-P. Wigner, Y. Kerr, T.-D. Wu, P. Borderies, P. Paillou, L. Chen and J.-C. Shi, “Modeling the Effect of surface roughness on the back-scattering coefficient and emissivity of a soil-litter medium using a numerical model,” *proc. Igarss 2009*

[86] H. Lawrence, F. Demontoux, J.-P. Wigner, A. Mialon, Y. Kerr, T.D. Wu, V.L. Mironov, L. Chen, J.-C. Shi “L-Band emission of rough surfaces: comparison between experimental data and different modeling approaches“ *proc. Microrad 2010*

[87] Q. Li, L. Tsang, J.C. Shi, C.H. Chan, (2000) “Application of Physics-Based Two Grid Method and Sparse Matrix Canonical Grid Method for Numerical Solutions of Emissivities of Soils with Rough Surfaces at Microwave Frequencies,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.38, no.4, pp.1635-1643.

[88] S. H. Lou, L. Bang and C. H. Chan, (1991a), “Application of the finite element method to Monte Carlo simulations of scattering of waves by random rough surfaces: penetrable case”, *Waves in Random and Complex Media*, vol. 1, no. 4, pp. 287 – 307.



[89] S.H. Lou, L. Tsang, C.H. Chan, and A. Ishimaru (1991b), "Application of finite element method to Monte Carlo simulations of scattering of waves by random rough surfaces with the periodic boundary condition," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 5, iss. 8, pp. 835 – 855.

[90] R.T. Marchand and S. G. Brown, (1999) "On the use of finite surfaces in the numerical prediction of rough surface scattering," *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 47, no. 4, pp 600–604.

[91] A. Taflove, and K.R. Umashankar (1989), "Review of FD-TD Numerical modeling of electromagnetic wave scattering and radar cross-section," *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, no. 5, pp. 682 – 699.

[92] J. V. Toporkov, R.S. Awadallah, and G. S. Brown (1999), "Issues related to the use of a Gaussian-like incident field for low-grazing-angle scattering," *J. Opt. Soc. Am. A* vol. 16, no.1, pp 176 – 187.

[93] H.Ye and Y.Q. Jin (2005), "Parameterization of the tapered incident wave for numerical simulation of electromagnetic scattering from rough surface," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 3, pp. 1234-1237.

[94] K. S. Yee (1966), "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-14, pp. 302-307.

[95] L. Zhou, L. Tsang, V. Jandhyala, and C.-T. Chen (2001), "Studies on Accuracy of Numerical Simulations of Emission from Rough Ocean-Like Surfaces," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 39, no. 8, pp. 1757 – 1763.

[96] L. Zhou, L. Tsang, V. Jandhyala, Q. Li, C.H. Chan (2004), “Emissivity Simulations in Passive Microwave Remote Sensing with 3-D Numerical Solutions of Maxwell Equations,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.42, no.8, pp.1739-1748.

[97] S. Huang, L. Tsang, E.G. Njoku, K.S. Chan, (2010) “Backscattering Coefficients, Coherent Reflectivities, and Emissivities of Randomly Rough Soil Surfaces at L-Band for SMAP Applications Based on Numerical Solutions of Maxwell Equations in Three-Dimensional Simulations,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.48, no.6, pp.2557-2568.

[98] K. Inan and V. B. Ertürk (2006), “Application of Iterative Techniques for Electromagnetic Scattering From Dielectric Random and Reentrant Rough Surfaces,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 44, no. 11 pp 3320 – 3329.

[99] V. Jandhyala, E. Michielssen, S. Balasubramaniam and W.C. Chew (1998), “A Combined Steepest Descent-Fast Multipole Algorithm for the Fast Analysis of Three-Dimensional Scattering by Rough Surfaces,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 3, pp 738-748.

[100] D. A. Kapp and G. S. Brown (1996), “A new numerical method for rough surface scattering calculations,” *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 44, pp 711–721

[101] A. Mialon, J.-P. Wigneron, P. De Rosnay, M.J. Escorihuela and Y. Kerr (2008), “Continuous monitoring of surface roughness changes over a bare soil field using L-Band brightness temperature,” *poster presentation at Microrad*, Florence, Italy.

[102] M Saillard and A Sentenac (2001), “Rigorous solutions for electromagnetic scattering from rough surfaces,” *Waves in random media*, vol. 11, no.3, pp 103-137.

[103] T. Mo, and T.J. Schmugge (1987), “A parameterization of the effect of surface roughness on microwave emission,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 25, pp. 47–54.

[104] G. Soriano and M. Saillard (2001), “Scattering of electromagnetic waves from two-dimensional rough surfaces with impedance approximation,” *J. Opt. Soc. Am. A*

[105] E. I. Thorsos (1988), “The validity of the Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 83, pp. 78-92.

[106] K.F. Warnick and W.C. Chew (2001), “Numerical Simulation Methods for Rough Surface Scattering,” *Waves in Random Media*, vol. 11, issue 1, pp. 1-30.

[107] U. Wegmüller, and C. Mätzler (1999), “Rough bare soil reflectivity model,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 37, pp. 1391–1395.

[108] M. Zribi, N. Baghdadi, N. Holah, O. Fafin, and C. Guerin (2005), “Evaluation of a rough soil surface description with ASAR-ENVISAT radar data,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 95, no. 1, pp. 67 – 76.

[109] Demontoux F., Lawrence H., Mironov V., L.G. K., Mialon A., Duffour C., Kruszewski A., V. M., Wigneron J. P., Kerr Y. “L-band emission of rough soil surface covered with a grass litter layer including a moisture gradient: comparison between experimental data and a numerical model approach” Dans actes de The 3rd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing: RAQRS'III - The 3rd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing: RAQRS'III, Espagne 2010

## **ANNEXE1 - Liste des publications**

# ANNEXE 1 : Liste des communications et publications

## Sommaire

A. Revues Internationales à Comité de Lecture (8) .....	132
B. Revues Nationales à Comité de Lecture (3).....	133
C. Participation à des ouvrages scientifiques avec comité de lecture (1).....	133
D. Brevets (2) .....	134
E. Colloques nationaux et internationaux avec actes (57).....	134
F. Conférences Pédagogiques (10).....	143
G. Autres communications et réunion de projets Industriels (14) .....	144
H. Rapports de contrats .....	147

## **A. Revues Internationales à Comité de Lecture (8)**

**2011**

**[R11]**

**Evaluating the semi-empirical H – Q model, used to calculate the emissivity of a rough bare soil, with a numerical modeling approach**

Heather Lawrence, Jean-Pierre Wigneron, Senior Member, IEEE, François Demontoux, Member, IEEE, Arnaud Mialon and Yann Kerr, Senior Member, IEEE  
IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters (28 pages) (soumis)

**[R10]**

**Evaluation of a Numerical Modeling Approach based on the Finite Element Method for calculating the Rough Surface Scattering and Emission of a soil layer**

Heather Lawrence, François Demontoux, Jean-Pierre Wigneron, *Senior Member, IEEE*, Philippe Paillou, Tzong-Dar Wu and Yann H. Kerr  
IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters Vol 8 No. 5, p 953-958 (6 pages)

**[R9]**

**Evaluating an Improved Parameterization of the Soil Emission in L-MEB**

Wigneron J. P., Chanzy A., Kerr Y., Lawrence H., J.C. S., Escorihuela M.-J., Mironov V., Mialon A., Demontoux F., De Rosnay P. et al  
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 49, No. 4, p 1177-1189, April 2011 (12 pages)

**2008**

**[R8]**

**Electromagnetic characterization of soil-litter media- Application to the simulation of the microwave emissivity of the ground surface in forests**

F. Demontoux, B. Le Crom, G. Ruffie, Jp. Wigneron, J.P Grant, V. Mironov  
The European Physical Journal - Applied Physics 2008 (13 pages)

**2007**

**[R7]**

**Effect of salinity on the dielectric properties of geological materials: implication for soil moisture detection by means of radar remote sensing**

Y. Lasne, G. Ruffie, C. Serradilla, F. Demontoux, Ph. Paillou, A. Freeman, T. Farr, K. Mcdonald, B. Chapman, J.-M. Malézieux  
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **46**, 2007 (8 pages)

**2005**

**[R6]**

**A three dimensional planar photonic crystal using conducting polymers**

Oyhenart L., Vigneras V., Demontoux F., Parneix J.P.,  
Microwave and optical technology letters, 2005 March 5. (8 pages)

2003

[R5]

Heggy E., Paillou P., Costard F., Mangold N., Ruffie G., Demontoux F., Grandjean G., Malezieux J.M.

**Local geoelectrical models of the Martian subsurface for shallow groundwater detection using sounding radars**

Journal.Geophys.Research., 2003, vol108 n°E4,10.1029/2002JE1871 (9 pages)

2002

[R4]

**"Models of the Martian subsurface for radar detection of shallow ground water"**

Heggy E., P. Paillou, F. Costard, N.Mangold, G. Ruffie, F.Demontoux, J.Grandjean, J.-M. Malezieux

Journal .Geophys.Research , 2002

## **B. Revues Nationales à Comité de Lecture (3)**

2009

[R3]

**L'enseignement de l'électronique accessible aux étudiants handicapés**

Demontoux F., Woirgard E., Belliard E., Verdeau K., Bernou C.

J3EA Vol 8 Hors série 1 (2009) (5 pages)

2008

[R2] **Approche pédagogique sur l'innocuité des technologies de réseaux sans fil**

Demontoux François, Rafael Hidalgo Muñoz

J3EA vol 7 Hors série Février 2008 (6 pages)

2006

[R1] **Travaux pratiques sur les réseaux locaux de type WIFI utilisant des simulations numériques des phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques.**

F. Demontoux, Jl. Miane

J3EA vol 5 Hors série 2 en 2006 (4 pages)

## **C. Participation à des ouvrages scientifiques avec comité de lecture** **(1)**

[O1] Contribution à un ouvrage scientifique «Cours d'électrothermie » - série Dopee - EDF (CEE : Club d'Electrotechnologies Enseignement). Réalisation d'une annexe sur les applications de la modélisation numérique dans le secteur des micro-onde.

## **D. Brevets (2)**

**[B2]**

"Procédé et dispositif de distribution maîtrisée de l'énergie micro-ondes appliquée à un produit contenu dans un récipient".

Déposant : F. Demontoux, co-inventeurs : J. Bows (UNILEVER), R. Blindt (UNILEVER) – Janvier 2000 - N° de brevet: FR2804826 (A1)

**[B1]**

Participation aux études ayant conduits au dépôt d'un brevet

Conception et réalisation d'un applicateur micro-ondes dédié à la génération de plasma froid.

Collaboration avec le CENG (Centre d'Études Nucléaires de Grenoble).

Ce travail a conduit au dépôt d'un brevet FR2668676 (A2) : "Dispositif perfectionné pour l'application de micro-ondes

## **E. Colloques nationaux et internationaux avec actes (57)**

Les 12 communications marquées d'un astérisque ont été publiées dans le cadre de *proceedings books* (RAQRS, IEEE IGARSS, IEEE Microrad) d'un très fort rayonnement international.

## **Conférences Internationales à Comité de Lecture (28)**

2011

**[CI28]**

**Evaluating the H-Q Model using a Numerical Approach based on the Finite Element Method**

H. Lawrence, J.-P. Wigneron, F. Demontoux, A. Mialon, Y.Kerr

SMOS SCIENCE WORKSHOP

27-29 September 2011 – Arles – France

**[CI27]**

**Error of Moisture Retrieving from the SMOS Radiobrightness with the Use of the Temperature Dependable Soil Dielectric Model**

Valery L. Mironov, Lyudmila G. Kosolapova, François Demontoux

The 30th PIERS in Suzhou, China, 12-16 September, 2011

**[CI26]**

**Retrievals of Soil Moisture and Optical Depth from CAROLS**

M. Pardé, J.-P. Wigneron, M. Zribi, Y. Kerr, P. Fanise, J.-C. Calvet, C. Albergel, A. Albitar, F. Cabot, F. Demontoux, E. Jacquette, E. Lopez-Baeza, A. Mialon, C. Moisy, N. Novello, P.

Richaume, K. Saleh, M. Schwank, P. Waldteufel, E. Zakharova, and M. Dechambre

The 29th PIERS in Marrakech, Maroc, 20-23 Mars, 2011



2010

[CI25]

**\* L-band emission of rough soil surface covered with a grass litter layer including a moisture gradient: comparison between experimental data and a numerical model approach**

Demontoux F., Lawrence H., Mironov V., L.G. K., Mialon A., Duffour C., Kruszewski A., V. M., Wigneron J. P., Kerr Y.

Dans **actes de The 3rd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing: RAQRS'III** - The 3rd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing: RAQRS'III, Espagne (2010)

[CI24]

**\*First evaluation of SMOS observations and L2 soil moisture products over a variety of biomes at global scale**

Wigneron J. P., Novello N., Kerr Y., Cabot F., Delwart S., Demontoux F., Govind A., Guyon D., Jacquette E., Lawrence H. et al

Dans **Proceedings of the 3rd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing: RAQRS'III** - *3rd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing: RAQRS'III*, Espagne (2010)

[CI23]

**Coupling the temperature and mineralogy dependable soil dielectric model and a numerical model to compute scattering coefficient of complex multilayer soil structures**

Demontoux F., Duffour C., Kerr Y., L.G. K., Lawrence H., Mironov V., Wigneron J. P.

Dans dans **actes Remote Sensing of Natural Covers by Synthetic Aperture Radars symposium** - Russie, Fédération De (2010)

[CI22]

**\*Statistical error for the moistures retrieved with the smos radiobrightness data, as induced by imperfectness of a dielectric model used**

V. M., Kerr Y., Wigneron J. P., L.G. K., Demontoux F., Duffour C.

Dans **Dans actes de : 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2010)** - 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2010), États-Unis (2010)

[CI21]

**\*The determination of the interior of a dike body with L-band radiometry**

De Jeu R., Parinussa R., Biemond L., Haarbrink R., Demontoux F., Provoost I.

in **dans actes de : 11th IEEE Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment** - 11th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, United States (2010)

[CI20]

**\*L-Band emission of rough surfaces: comparison between experimental data and different modeling approaches**

Lawrence H., Demontoux F., Wigneron J. P., Mialon A., Kerr Y., T.D. W., Mironov V., L. C.

Dans **dans actes de : 11th IEEE Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment** - 11th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, États-Unis (2010)

2009

[CI19]

**Error and Domain of Applicability Studies for the Schmugge's Dielectric Model of Moist Soils**

V. M., Wigneron J. P., Demontoux F., S.V. F., L.G. K.

Dans **actes du congrès PIERS 09 - Progress in electromagnetics Research Symposium - PIERS 09 - Progress in electromagnetics Research Symposium**, Russie, Fédération De (2009)

[CI18]

**\*Modeling the effect of surface roughness on the back-scattering coefficient and emissivity of a soil-litter medium using a numerical model**

Lawrence H., Demontoux F., Wigneron J. P., Kerr Y., T.D. W., P. B., Paillou P., L. C., J.C. S.

Dans **acte du colloque IGARSS09 International Geoscience and remote sensing symposium - IGARSS09 International Geoscience and remote sensing symposium**, Afrique Du Sud (2009)

2008

[CI17]

**\*Improved parameterization of the soil emission in L-MEB**

Wigneron J. P., Chanzy A., Kerr Y., J.C. S., Cano A., De Rosnay P., Escorihuela M.-J., Mironov V., Demontoux F., Grant J. et al

Dans **Dans actes IEEE Microrad 2008 - Microrad 08**, Italie (2008)

[CI16]

**\*Parameterisation and calibration of L-MEB in the Level-2 SMOS algorithm**

Kerr Y., Wigneron J. P., Saleh K., Richaume P., De Rosnay P., Calvet J.-C., Escorihuela M.-J., Cano A., Chanzy A., Demontoux F. et al

Dans **Dans Actes Microrad 2008 - Microrad 08**, Italie (2008)

2007

[CI15]

\*Y. Lasne , Philippe Paillou, Gilles Ruffié , Carlos Serradilla, François Demontoux, Anthony Freeman, Tom Farr, K. McDonald, B. Chapman, J.-M. Malézieux

**Effect of salinity on the dielectric properties of geological materials : implication for soil moisture detection by means of remote sensing**

Dans Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2007. IEEE International IGARSS'07 - *IGARSS'07, Barcelona, Spain, july 2007*, Espagne (2007)

[CI14]

\*F. Demontoux, B. Crom, G. Ruffié, Jp. Wigneron, J. Grant, D. Medina Hernandez

**Inversion model validation of ground emissivity. Contribution to the development of SMOS algorithm**

Dans Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2007. IEEE International IGARSS'07 - *IGARSS'07, Barcelona, Spain, july 2007*, Espagne (2007)

2006

[CI13]

\*J.P. Grant, J.P. Wigneron, A.A Van De Griend, F. Demontoux, G. Ruffie, A. Della Vecchia, N. Skou, B. Le Crom

**Lband radiometric behaviour of pine forests for a variety of surface moisture conditions**

2nd International Symposium Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, - RAQRS'II  
Valencia Spain 2006

[CI12]

\*Wigneron J.-P., Y. Kerr, P. Waldteufel, P. Ferrazzoli, P. Richaume, K. Saleh, J-C Calvet, A. Chanzy, F. Demontoux, P. De Rosnay, M-J Escorihuela, J. Fenollar, J. P. Grant, R. Gurney, B. Hornbuckle, A. Kruszewski, E. Lopez-Baeza, C. Mätzler, T. Pellarin, G. Ruffie, M. Schwank, A. Van De Griend, A. Mahmoodi, S. Delwart

**Recent Advances in modelling the land surface emission at L-band - Application to L-MEB in the operational SMOS algorithm**

2nd International Symposium Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, - RAQRS'II  
Valencia Spain 2006

2005

[CI11]

Oyhenart L., Vigneras-Lefebvre V., Demontoux F., Parneix J.P.,

**Simulation of random variations and localized defects in cubic 3D Photonic Band Gap Structures**

Latsis symposium 2005 EPFL, Lausanne, 02/05

[CI10]

Jl Miane, F. Demontoux, A. Mouhsen, H. Rmili, F. Bonnaud

**End effect and permittivity measurements : from Modeling to measurement methods.**

ICMS 2005 22-24 Novembre 2005 Marrakech, Maroc

[CI9]

Jl. Miane, F Demontoux, G.Ruffie, J.P. Wigneron, Maria - Jose Escorihuela

**3D modeling and dielectric characterization of geological profiles. Application to the improvement of the study of the moisture of grounds by radiometry.**

ICMS 2005 22-24 Novembre 2005 Marrakech, Maroc

[CI8]

H.Rmili, A.Mouhsen, Jl ; Miane, F. Demontoux, V. Vigneras, D. Michau, M. Maglione

**Study of frequency tunable resonators based on ferroelectric materials**

ICONIC 2005, 8-10 Juin 2005, Barcelona, Spain

[CI7]

L. Oyhenart, V. Vigneras, F. Demontoux, J. P. Parneix

**Numerical study of defects in cubic 3D Photonic Band Gap Structures**

28th general assembly of international union of radio science (URSI) New Delhi-2005

**2004**

**[CI6]**

L.Oyhenart, V. Vigneras, F.Demontoux, Jp. Parneix

**“EBG structures using conducting polymers: a step to tunability”**

27th ESA Antenna Technology Workshop on Innovative Periodic Antennas: Electromagnetic

Bandgap, Left-handed Materials, Fractal and Frequency Selective Surfaces

9-11 March 2004, Santiago de Compostela

**2002**

**[CI5]**

Heggy E., Ph.Paillou , F.Costard, N. Mangold, G. Ruffie,F. Demontoux

**"Geoelectrical models and radar echo simulation for shallow radar subsurface water exploration on Mars"**

LPSC 33, Houston , USA, March 2002.

**[CI4]**

Heggy E., Ph. Paillou, G. Ruffie, F. Demontoux, G.Grandjean

**"Water detection in the Martian subsurface "**

GPR 02 proceedings, Santa Barbara, USA, April 2002.

**2001**

**[CI3]**

F. Demontoux V. Vignéras-Lefebvre

**"3D Complex Networks with or without default: a multiple scattering study "**

COMPUMAG-Evian

2-5 Juillet 2001

**[CI2]**

E. Heggy. - P. Paillou - N. Mangold - G. Ruffie - F. Demontoux-

F. Costard - J.M. Malezieux

**"Geophysical models for optimal sounding radar performances on Mars"**

Congrès EXOBIO, La Colle sur Loup

Septembre 2001

**1999**

**[CI1]**

F. Demontoux, J. Bows, R. Blindt, Cl. Marzat

**"Use of the FDTD and finite volumes methods to study resonant applicator with creates strong perturbation . Application to flash pasteurisation "**

7th International Conference on Microwave and High Frequency Heating - Technical University of Valencia - 13-17 Septembre 1999

## Conférences Nationales à Comité de Lecture (29)

2011

[CN29]

**Développement d'un outil d'évaluation non destructive des bétons par ondes EM - Simulation et validation expérimentale.**

M. Sbartai, F. Demontoux, A. Dulac, Sylvain Bernadet

XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011, Algérie

[CN28]

**Développement d'un appareil portatif de mesure des propriétés des bétons – Application au diagnostic de structures de génie civil**

François Demontoux, Mehdi Sbartai, Adrien Dulac, Sylvain Bernadet

17èmes Journées Nationales Microondes, 18-19-20 Mai 2011 - Brest

2010

[CN27]

**Caractérisation électromagnétique de matériaux non usinables. Application a l'étude d'éclats de météorites**

Demontoux F., Bonnaud F., Duffour C., Ruffié G., Mora P., Beaudin G., Encrenaz P., Gulkis S.

Dans **actes de JCMM'2010 : Les 11èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux - JCMM'2010 : Les 11èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux**, France (2010)

2009

[CN26]

**Caractérisation électromagnétique in-situ de sols en bande L. Application à l'identification de profils géologiques.**

Demontoux F., Ruffié G., Medina Hernandez D.

Dans **Actes du colloque JFFMA-TELECOM 2009 - congrès JFMMA - TELECOM 2009**, Maroc (2009)

[CN25]

**Modélisation des effets de la rugosité sur l'étude de l'humidité des sols par radiométrie micro-ondes. Application a la mission spatiale SMOS.**

Demontoux F., Lawrence H., Wigneron J. P.

Dans **actes du colloque JFFMA & TELECOM 2009 - colloque JFFMA & TELECOM 2009**, Maroc (2009)

2007

[CN24]

**Julien Lahoudere, Philippe Paillou, François Demontoux, Gilles Ruffie**

Influence de la disposition d'antennes pour l'étude de paramètres géophysiques. Application à la mission spatiale ExoMars

**JNM07 Toulouse**

**[CN23]**

Y. Lasne, Ph. Paillou, G. Ruffie, C. Serradilla, F. Demontoux, J.-M. Malezieux  
Impact de la salinité sur les propriétés diélectriques des matériaux géologiques : implication pour la détection d'humidité par télédétection active hyperfréquences : cas terrestre et martien  
JNM07 Toulouse

**[CN22]**

F. Demontoux, B. Le Crom, G. Ruffie, Jp. Wigneron, J.P. Grant Heather Lawrence  
**Etude d'un modèle d'inversion liant l'émissivité à l'humidité des sols. Contribution a la mise au point de l'algorithme de la mission SMOS**  
Jfmma-telecom 2007 – Fes, Maroc

**[CN21]**

B. Le Crom, F. Demontoux, G. Ruffie, Jp. Wigneron, J.P. Grant  
**Caractérisation électromagnétique de matériaux géologiques en vue du suivi de l'humidité des sols par radiométrie micro-ondes**  
Jfmma-telecom 2007 – Fes, Maroc

**[CN20]**

F. Demontoux, G. Ruffie, Ph. Paillou, C. Caruncho, Julien Lahoudere  
**Etude des signaux recueillis par un radar embarqué sur un véhicule en déplacement. Application a l'interprétation des signaux récoltés par le radar wisdom de la mission spatiale exomars**  
Jfmma-telecom 2007 – Fes, Maroc

**2006**

**[CN19]**

Demontoux F., Ruffie G., Wigneron J.P., Escorihuela M.-J.  
**Caractérisation électromagnétique de milieux hétérogènes naturels - Application à la mesure de l'humidité du sol par radiométrie micro-onde**  
JCMM 2006 St Etienne

**2005**

**[CN18]**

F.Demontoux, F.Bonnaudin, Miane J.L.  
**Modélisation de la propagation dans une structure fermée surdimensionnée**  
JNM 2005, Nantes

**[CN17]**

Demontoux F, Ruffie G., J.P. Wigneron, M.J Escorihuela  
**Amélioration de l'étude de l'humidité de sols par radiométrie. Caractérisation et modélisation diélectriques de profils géologiques.**  
JNM 2005, Nantes, 2005

**[CN16]**

L.Oyhenart, V.Vigneras, F. Demontoux, Jp.Parneix  
**la méthode de la matrice de diffraction appliquée aux cristaux photoniques 3D**  
JNM 2005, Nantes, 2005

[CN15]

L.Oyhenart, V.Vigneras, F. Demontoux, Jp.Parneix

**détermination du seuil de conductivité d'un polymère conducteur pour la réalisation d'un bip métallique**

JNM 2005, Nantes, 2005

**2004**

[CN14]

L.Oyhenart, T.Olinga, V. Vigneras, F.Demontoux, Jp. Parneix,

**Les cristaux photoniques 3D à base de polymères conducteur**

JCMM2004, La Rochelle, 2004

[CN13]

Oyhenart, V. Vigneras, F.Demontoux, Jp. Parneix, Modélisation Par Multidiffusion De Défauts Dans **Les cristaux photoniques.**

JCMM2004, La Rochelle, 2004

**2003**

[CN12]

Demontoux F., Vigneras-Lefebvre V.

**Réalisation et caractérisation de BIPs 3D en vue de la conception de nouveaux matériaux.**

JNM 2003 Mai 2003 Lille

[CN11]

Demontoux F., Vigneras-Lefebvre V.

**Multidiffusion des ondes électromagnétiques dans les structures BIP. Etude paramétrique de réseaux tridimensionnels.**

JNM 2003 Mai 2003 Lille

[CN10]

Rmili H., Miane J.L., Olinga T., Demontoux F., Zangar H.

**Caractérisation et modélisation d'une antenne plaquée en polyaniline**

JS.2003, Tunis, TUNISIE, 2003

[CN9]

L.Oyhenart, Vigneras-Lefebvre V., Demontoux F., Jp. Parneix

**Cristaux photoniques en polymères conducteurs - une voie vers l'agilité en fréquence**

Journées interférences d'ondes, 8-10 Décembre 2003 – Marseille

[CN8]

Laurent Oyhenart, Valerie Vigneras, Francois Demontoux, Jean-Paul Parneix

**Propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux hétérogènes: applications aux BIPs et aux métamatériaux**

Journées interférences d'ondes, 8-10 Décembre 2003 – Marseille

## 2002

### [CN7]

V. Vigneras-Lefebvre, L. Carrara, E. Leheurteux, F. Demontoux, J.P. Parneix  
**" BIPs 3D à maille cubique ou diamant : étude paramétrée en vue de la conception de nouveaux matériaux "**

7ème Journées de Caractérisation Micro-ondes et Matériaux JCMM'2002  
22-24 Mars 2002

### [CN6]

E. Heggy, P. Paillou, G. Ruffie, F. Demontoux, F. Costar  
**" Etude de performance des sondeurs radar : détection de l'eau dans la subsurface de Mars "**

7ème Journées de Caractérisation Micro-ondes et Matériaux JCMM'2002  
22-24 Mars 2002

## 2001

### [CN5]

F. Demontoux B. Mansour Cl. Marzat  
**" Amélioration des caractéristiques d'antennes à fentes en champ proche. Application au chauffage microondes "**

12ème Journées Nationales Micro-ondes JNM2001  
16-18 Mai 2001

### [CN4]

F. Demontoux V. Vigneras - Lefebvre  
**" Optimisation des caractéristiques d'un BIP3D par multidiffusion "**

12ème Journées Nationales Micro-ondes JNM2001  
16-18 Mai 2001

### [CN3]

Vigneras-Lefebvre V., Demontoux F., Parneix J.P.  
**Réalisation de matériaux absorbants dans le domaine des microondes à l'aide de cristaux photoniques**

2ème J.F.M.M.A., Casablanca, Maroc, 2001, octobre (Oral)

## 2000

### [CN2]

F. Demontoux  
**" Correction de mesures de permittivité diélectrique en cavité résonante par utilisation d'un modèle numérique employant la méthode FDTD "**

6ème Journées de Caractérisation Micro-ondes et Matériaux JCMM'2000  
22-24 Mars 2000



[CN1]

F. Demontoux

**"Visualisation des distorsions de la répartition du champ électrique engendré par l'introduction d'un produit de forte permittivité dans une cavité résonante cylindrique - Application à la pasteurisation flash "**

6ème Journées de Caractérisation Micro-ondes et Matériaux JCMM'2000

22-24 Mars 2000

## **F. Conférences Pédagogiques (10)**

**2012**

[CP10]

**Online technology learning on web accessibility**

V. Lespinet-Najib, C. Belio, V. Liquete, F. Demontoux, B. Le Blanc, N. Pinede

IEEE International conference EDUCON 2012, 17-20 Avril 2012 Marrakesh, Maroc (soumise)

**2011**

[CP9]

**La télé participation aux enseignements. Un outil pour l'accès à tous les enseignements pour les étudiants handicapés**

F. Demontoux, A. Dicky, F. Eydon, K. Verdeau, E. Woïrgard

Dans actes du 9<sup>e</sup> Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes aura lieu du 23 au 26 octobre 2011 à l'Université du Québec à Trois-Rivières.

**2010**

[CP8]

**La télé participation aux enseignements de travaux pratiques. Application à l'accès à tous les enseignements pour les étudiants handicapés**

Demontoux F., Belliard E., Dicky A., Verdeau K., Woïrgard E.

Dans **actes des 11<sup>e</sup> Rencontres Mondiales du Logiciel Libre - 11<sup>e</sup> Rencontres Mondiales du Logiciel Libre**, France (2010)

[CP7]

**Mise en place d'une pédagogie d'apprentissage par problèmes au département GEII de l'IUT Bordeaux**

Fremont H., Moutault S., Bord I., Caillard B., Demontoux F., Grauby S., Sentenac P., Tarisien M. Dans **8ème Colloque sur l'enseignement des Technologies et des Sciences de**

**l'Information et des Systèmes - 8ème Colloque sur l'enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes**, France (2010)

**2008**

[CP6]

**L'Enseignement de l'Electronique Accessible aux étudiants Handicapés**

Demontoux F., Woïrgard E., Belliard E., Verdeau K., Bernou C.

Dans **Acte du colloque CETSIS 2008 - 7<sup>e</sup> Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des sciences de l'Information et des Systèmes**, Belgique (2008)

**2007**

**[CP5]**

Demontoux François, Rafael Hidalgo Muñoz

**Approche pédagogique sur l'innocuité des technologies de réseaux sans fil**

CETSIS 2007 - Bordeaux

**2005**

**[CP4]**

F. Demontoux, Jl. Miane

**Travaux pratiques sur les réseaux locaux de type WIFI utilisant des simulations numériques des phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques**

CETSIS 2005, Nancy

**2004**

**[CP3]**

J.L. Miane F. Demontoux

**Mise au point de travaux pratiques d'étude des structures micro-rubans associant des mesures et des simulations informatiques**

CETSIS EEA , Toulouse, 2003

**2002**

**[CP2]**

F. Demontoux V. Vigneras-Lefebvre

**"Projet de travaux pratiques en télécommunication associant un banc de mesure à des simulations numériques"**

CETSIS EEA 2001

29-30 Octobre 2001

**1999**

**[CP1]**

F. Demontoux

**"Visualisation des phénomènes de propagation d'ondes électromagnétiques "**

Colloque CETSIS EEA 4-5 Octobre 1999 - Montpellier

## **G. Autres communications et réunion de projets Industriels (14)**

**2011**

**[AC14]**

**Adaptation d'un poste de travaux pratiques en électronique pour un étudiant tétraplégique**

F. Demontoux, A. Dicky, E. Woïrgard, E. Belliard, K. Verdeau, C. Bernou

1<sup>o</sup> journée nationale d'échange de pratiques sur l'adaptation des enseignements, 28 Juin 2011, Bordeaux

[AC13]

**La télé participation aux enseignements. Un outil pour l'accès à tous les enseignements pour les étudiants handicapés**

F. Demontoux, A. Dicky, F. Eydon, K. Verdeau, E. Woirgard

1<sup>o</sup> journée nationale d'échange de pratiques sur l'adaptation des enseignements, 28 Juin 2011, Bordeaux

**2009**

[AC12]

**Estimation de la permittivité des sols et simulation des comportements électromagnétiques des structures pédologiques. Application à l'algorithme LMEB de la mission SMOS**

F. Demontoux, H. Lawrence, J-P Wigneron, G. Ruffié, A. Mialon, Y. Kerr, V. Mironov

journée thématique OASU - télédétection du 21 octobre 2009

**2008**

[AC11]

**Modélisation électromagnétique des réponses des structures géologiques**

F. Demontoux, G. Ruffie, V. Vigneras, Ph. Paillou, Jp. Wigneron, J. Lahoudere, G. Lunet, H. Lawrence

First-pass system success – Application workshops for high-performance electronic device – Paris 22/01/2008

**2007**

[AC10]

F. Demontoux, B. Le Crom, G. Ruffie, Jp. Wigneron, J.P. Grant, Heather Lawrence

**Contribution à la prise en compte des effets de litière et de rugosité dans l'algorithme de la mission spatiale SMOS.**

GDR Ondes 2451 – 21-23 Novembre 2007 – Bordeaux

[AC9]

Julien Lahoudere, Philippe Paillou, François Demontoux, Gilles Ruffie

**Préparation à l'étude de l'interaction d'une structure sur la rétrodiffusion d'un signal radar. Application à la mission spatiale ExoMars.**

GDR Ondes 2451 – 21-23 Novembre 2007 – Bordeaux

**2006**

[AC8]

Demontoux F., Ruffie G., Wigneron J.P., Ph. Paillou, J. Lahoudere

**Modélisation électromagnétique des réponses des structures géologiques - Application aux programmes spatiaux SMOS et ExoMars**

Leading insight –workshop ANSOFT 2006

**[AC7]**

J-P Wigneron, Y. Kerr, P. Waldteufel, P. Richaume, K. Saleh, J. P. Grant, A. Van De Griend, F. Demontoux, G. Ruffie, P. Ferrazzoli, P. De Rosnay, M-J Escorihuela, J-C Calvet, J. Fenollar, E. Lopez-Baeza

**Recent Advances in estimating the L-band microwave signature of natural land surface covers**

1st Workshop on Remote Sensing and Modeling of Surface Properties 20-22 June 2006 , Paris, France

**2001**

**[AC6]**

Vignerat-Lefebvre V., Carrara L., Leheurteux E., Demontoux F., Parneix J.P.

**BIPs 3D à maille cubique ou diamant : étude paramétrée en vue de la conception de nouveaux matériaux**

Journées du GdR "micro cavités et cristaux photoniques" 6 Décembre - Montpellier

**2000**

**[AC5]**

"Firing / Sintering of ceramic materials by multiple frequency microwave radiation-modelling of the heating of materials with electric and magnetic fields" **Part 2**

**F. Demontoux Cl. Marzat**, Réunion de projet Européen- Modena, Italie, 25-27/11/2000

**[AC4]**

"Firing / Sintering of ceramic materials by multiple frequency microwave radiation-modelling of the heating of materials with electric and magnetic fields" **Part 1**

**F. Demontoux Cl. Marzat** Réunion de projet Européen- San Sebastien, Espagne 18-19/05/2000

**1999**

**[AC3]**

Modelling of the temperature in a 3D structure- Coupling between Maxwell's equations and thermal equation

**F. Demontoux** Laboratoire de recherche Unilever-Colworth Laboratory United KINGDOM 31/08-4/09/1999

**[AC2]**

Modélisation de la température dans un produit chauffé par micro-ondes

**O. Paulien F. Demontoux** Journées du club rayonnement 1999 ENSCPB-Pessac

**[AC1]**

PO3- Applications de la modélisation de la température dans un produit chauffé par micro-ondes

**F. Demontoux O. Paulien** Journées du club rayonnement 1999 ENSCPB-Pessac

## **H. Rapports de contrats**

**[R2]**

"Firing / Sintering of ceramic materials by multiple frequency microwave radiation" (MW Sint)

F. Demontoux, B. Mansour, Cl. Marzat Rapports de contrat Européen Brite Euram BR PR 98 0668  
– Mars 2000, Novembre 2000 et Mars 2001

**[R1]**

"Mise au point d'un modèle numérique en vue de développer un applicateur micro-ondes dédié à la pasteurisation flash"

F. Demontoux Rapport de contrat – UNILEVER – 1996-1999

## **ANNEXE 2 – Exemples de publications**

# Evaluation of a Numerical Modeling Approach Based on the Finite-Element Method for Calculating the Rough Surface Scattering and Emission of a Soil Layer

Heather Lawrence, François Demontoux, Jean-Pierre Wigneron, *Senior Member, IEEE*, Philippe Paillou, Tzong-Dar Wu, and Yann H. Kerr, *Senior Member, IEEE*

**Abstract**—We evaluate a new 3-D numerical modeling approach for calculating the rough-surface scattering and emission of a soil layer. The approach relies on the use of Ansoft's numerical computation software High-Frequency Structure Simulator, which solves Maxwell's equations directly using the finite-element method. The interest of this approach is that it can be easily extended to studies of heterogeneous media. However, before being applied in this way, it must first be validated for the rough-surface case. In this letter, we perform this validation by comparing the results of rough-surface scattering and emission with the results of the method of moments (MoM) for a range of different roughness and permittivity conditions and with both Gaussian and exponential rough-surface autocorrelation functions. For the scattering case, we obtain results that are in agreement with the MoM to within approximately 1–3 dB for angles up to and including 40° and 2–4 dB for angles from 50° to 70°. Agreement for emissivity is to within 3.2 and 3.6 K for low and high roughness conditions, respectively. We then illustrate the application of the new approach by calculating the emission of a two-layer system with rough surfaces, representing the soil-litter system in forests.

**Index Terms**— Electromagnetic scattering by rough surfaces, microwave emissivity, numerical simulation.

## I. INTRODUCTION

**C**URRENTLY, there is great interest in numerical studies of rough-surface scattering and emission with applications

Manuscript received July 27, 2010; revised December 7, 2010 and March 9, 2011; accepted March 15, 2011. Date of publication May 12, 2011; date of current version August 26, 2011. This work was supported in part by the Centre National d'Études Spatiales–Terre, Océans, Surfaces Continentales, Atmosphère and in part by the Aquitaine Region in France.

H. Lawrence is with the Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système UMR5218, University of Bordeaux 1, 33607 Pessac, France, and also with the Ecologie Fonctionnelle et Physique de l'Environnement Laboratory, Institut National de la Recherche Agronomique, 33883 Villenave d'Ornon, France (e-mail: heather.lawrence@ims-bordeaux.fr).

F. Demontoux is with the Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système UMR5218, University of Bordeaux 1, 33607 Pessac, France.

J.-P. Wigneron is with the Ecologie Fonctionnelle et Physique de l'Environnement laboratory, Institut National de la Recherche Agronomique, 33883 Villenave d'Ornon, France.

P. Paillou is with the Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers, Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux UMR5804, University of Bordeaux 1, 33270 Floirac, France.

T.-D. Wu is with the Department of Electrical Engineering, National Central University, Chung-Li 32054, Taiwan.

Y. Kerr is with the Centre d'Études Spatiales de la Biosphère, 31401 Toulouse Cedex 4, France.

Digital Object Identifier 10.1109/LGRS.2011.2131633

to both passive and active microwave remote sensing of the earth, including satellite missions such as the current soil moisture and ocean salinity mission [1] or the upcoming soil moisture active/passive mission [2]. It is also of interest to extend such studies to include the scattering and emission of heterogeneous media such as forests or ice packs. Scattering and emission of these media involve rough surface effects and volume effects from multilayers or permittivity gradients and/or inclusions such as buried rocks. Numerical studies would provide a good approach for studying the scattering or the emission of these media, allowing us to control the many parameters involved.

Currently, the most widely used numerical methods for studying rough-surface scattering and emission are method of moments (MoM)-based fast methods, e.g., [4]–[6], due to their high accuracy coupled with implementation of a fast solution method. Such methods are particularly well suited to the rough-surface case since they solve surface integral equations. However, they are not well suited to studies of heterogeneous media, whose permittivity values horizontally or vertically vary (e.g., forests or ice packs) [7]. Numerical methods that utilize volume meshing such as the finite-element method (FEM), on the other hand, are well suited to studies of heterogeneous materials [7] but are not considered as accurate as the MoM for the rough-surface case.

In this letter, we present a new numerical modeling approach for calculating the rough-surface scattering and emission of a dielectric layer using Ansoft's High-Frequency Structure Simulator (HFSS) (version 12.1) simulation software [8], which is based on the FEM. The advantage of the HFSS as a numerical computation tool is that it allows us to vary many parameters, including the incident angle and the dielectric permittivity constants, without having to repeatedly restart simulations. The interest of the approach is that it can be extended to calculate the emissivity of heterogeneous media with rough surfaces, such as forest layers or permafrost. However, before being applied in this way, it must be first validated for the rough-surface case, particularly since there are very few studies of rough-surface scattering calculated by the FEM in the literature, and there are none of rough-surface emissivity. In this letter, we aim to carry out this validation by comparing the results of the FEM approach with the MoM predictions.

In Section II, we present the FEM approach using the HFSS, and in Section III, we present a comparison of the results with the MoM predictions for the rough-surface case. To illustrate the interest of the FEM approach and potential future applications, we also present results of the emissivity of a two-layer structure representing the soil and litter layers found in forests. Concluding remarks are given in Section IV.

## II. MATERIALS AND METHOD

### A. Numerical Modeling Approach

The FEM numerical modeling approach presented in this letter relies on the use of the HFSS and comprises the following three main stages: 1) creating many solid structures with rough surfaces and importing each of these into an HFSS project; 2) using the HFSS to calculate the electric field scattered off from each structure; and 3) finally, calculating the values of the bistatic scattering coefficient, backscattering coefficient, and emissivity from the scattered electric field, averaging over the ensemble of rough surfaces. Here, we briefly describe the FEM and then each of the three stages.

*Finite-Element Method:* In the FEM calculations, the structure to be studied is divided into a mesh of many small regions, which are called cells, and then, Maxwell's equations are solved in their differential form for the electric and magnetic fields in each cell. The mesh used by the HFSS software consists of tetrahedral cells.

Once a solution has been found, the mesh is refined many times, with progressively smaller cells, and a new solution is obtained. With each refinement (iteration), the change in the calculated energy value  $\Delta E$  of each solution, or the change in the reflection coefficient matrix  $\Delta S$ , is obtained. A final solution is obtained by imposing a convergence criterion on  $\Delta E$  or  $\Delta S$ .

*Creating Structures With Rough Surfaces:* The 3-D structure to be studied is created and imported into the HFSS by the procedure described here. Randomly rough surfaces are generated in the form of  $\{x, y, z\}$  points using "R" statistical software, employing the "Random Fields" package in particular [12], [13]. These rough surfaces have standard deviation of surface heights  $\sigma$  and autocorrelation functions in the following form:

$$\rho(r) = \exp \left[ - \left( \frac{r}{L_c} \right)^n \right]. \quad (1)$$

$L_c$  is the autocorrelation length, and  $n$  determines the form of the autocorrelation function: For the special cases of exponential and Gaussian autocorrelation functions, it is equal to 1 and 2, respectively.  $r$  is given by

$$r^2 = x^2 + y^2. \quad (2)$$

The rough surfaces are then transformed into volumes using C4W's "3-D Shop Model Design" software [14]. First, the  $\{x, y, z\}$  points that form the rough surface are joined by B-spline curves to create a continuous rough surface, which is then vertically extended, creating volumes above or below the

surface. These volumes represent the vacuum above the rough surface and a dielectric slab below the rough surface. Note that when studying the rough-surface case, we do not require the dielectric slab.

*Numerical Calculation Conditions:* Once the required structure has been created, it is imported into the HFSS where the permittivity constants are applied, and the calculation conditions are defined. A polarized incident wave is selected, either a wave of Gaussian form or a plane wave, at an incident angle  $\theta$  in the range of  $0^\circ$  to  $90^\circ$ , and an azimuth angle  $\phi = 0^\circ$ . The calculation can be done for the H or V polarization, for both the incident and scattered beams. An impedance boundary condition is applied below the structure to simulate an infinitely deep lower layer, preventing any reflections at the lower boundary. These are also applied at the sides of the dielectric slab, for volume studies. Radiation boundary conditions are applied at the top and sides of the vacuum area, which also prevent reflections and provide "virtual surfaces" for the near-to-far field calculation.

The scattered electric field is calculated inside the calculation area, and then, the electric field in the far field region  $E_{pj}^s(\theta_s, \phi_s)$  is extrapolated from this value at a distance  $R$  from surface  $j$ , at polarization  $p$ , and at discrete values of scattering angles  $\theta_s$  and  $\phi_s$ .

*Data Analysis:* Numerical simulations are performed for  $N$  different rough surfaces ( $N$  different structures) where each surface has the same autocorrelation functions, value of sigma, and value of  $L_c$  as all the other surfaces. The bistatic scattering coefficient  $\sigma_{pq}^0$  was then calculated for incident polarization  $q$  and scattered polarization  $p$  from the scattered electric field in the far field region, which are averaged over all  $N$  surfaces. This averaging process is done in order to approach the value that would be obtained for the case of an infinitely large rough surface. The bistatic scattering coefficient is calculated from the following:

$$\sigma_{pq}^0(\theta_s, \phi_s; \theta, \phi) = \frac{4\pi R^2}{A_{\text{eff}} |E_q^i(\theta, \phi)|^2} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |E_{p,j}^s(\theta_s, \phi_s)|^2 \quad (3)$$

where  $\theta, \phi$  are the incidence angles,  $\theta_s, \phi_s$  are the angles of the scattered wave,  $N$  is the number of surfaces to be averaged over,  $A_{\text{eff}}$  is the effective area of the surface illuminated, and  $E_q^i$  is the incident electric field with polarization  $q$ , which, for a Gaussian incident wave, has the following form:

$$E_q^i = \exp \left[ - \frac{(x - x_{\text{center}})^2 \cos^2 \theta + (y - y_{\text{center}})^2}{g^2} \right]. \quad (4)$$

$(x, y)$  is a point on the surface,  $(x_{\text{center}}, y_{\text{center}})$  is the center of the surface, and  $g$  is a measure of the beam width. For this type of incident wave, the effective area is given by  $A_{\text{eff}} = \pi g^2 / (2 \cos \theta)$  [15], and in the case of a plane wave, it is simply the total area of the surface illuminated.

The bistatic scattering coefficient calculated by (3) contains both coherent and noncoherent components. The noncoherent



component is isolated as follows:

$$\sigma_{pq}^0(\theta_s, \phi_s; \theta, \phi)_{\text{noncoh}} = \frac{4\pi R^2}{A_{\text{eff}} |E_q^i(\theta, \phi)|^2} \times \left[ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |E_{p,j}^s(\theta_s, \phi_s)|^2 - \frac{1}{N^2} \left| \sum_{j=1}^N E_{p,j}^s(\theta_s, \phi_s) \right|^2 \right]. \quad (5)$$

The values of  $g$  and  $N$  must be carefully chosen: This is further discussed in Section II-B. The backscattering coefficient is the bistatic scattering coefficient for the monostatic case of  $(\theta_s, \phi_s) = (\theta_s, \phi_s + \pi)$ , i.e., the reflection angle is equal to the incident angle. The emissivity of the surface measured at polarization  $p$ ,  $e_p(\theta, \phi)$  can be calculated by integrating the bistatic scattering coefficient over half-space (Peake 1959) as follows [16]:

$$e_p(\theta, \phi) = 1 - \Gamma_p(\theta, \phi). \quad (6)$$

$\Gamma_p(\theta, \phi)$  is the reflectivity at polarization  $p$  given by

$$\Gamma_p(\theta, \phi) = \frac{1}{4\pi} \iint_{\text{upper hemisphere}} \frac{1}{\cos\theta} \times [\sigma_{pp}^0(\theta_s, \phi_s; \theta, \phi) + \sigma_{pq}^0(\theta_s, \phi_s; \theta, \phi)] \sin\theta_s d\theta_s d\phi_s \quad (7)$$

where  $\sigma_{pp}^0$  and  $\sigma_{pq}^0$  are the like- and cross-polarized bistatic scattering coefficients, respectively. Since these are calculated for the discrete values of  $\theta_s$  and  $\phi_s$ , we approximate (7) to a sum over  $\theta_s$  and  $\phi_s$ . For the emissivity calculations, the step in the discrete values of  $\theta_s$  and  $\phi_s$  at which the electric field is calculated must be small enough that the errors due to this approximation are negligible.

## B. Numerical Calculations

A comparison between the FEM and the MoM approaches was performed for the rough-surface case. The results of the bistatic scattering and backscattering coefficients calculated using the FEM approach were compared with the MoM results presented in [9]–[11], respectively, for surfaces of Gaussian autocorrelation function, low roughness values and low permittivity values (equivalent to dry soil conditions). Results of the emissivity of rough surfaces with exponential autocorrelation functions, high permittivity values (equivalent to wet soil conditions), and low-to-high roughness values were compared with the MoM results presented in [5].

In order to illustrate the interest of the approach presented in this letter, the emissivity of a rough surface covered by a dielectric layer, also with a rough surface, was then calculated using the FEM approach. This structure represented a rough soil surface covered by forest litter. The permittivity of the litter layer was fixed at  $8.712+2.301i$ , equivalent to a moderately wet grass litter [17], and a litter depth of 8 cm was chosen. Calculations were performed for permittivity values of  $5.313+0.443i$ ,  $10.288+1.025i$ , and  $16.893+1.837i$  for the lower soil rough surface, equivalent to dry-to-wet soil moisture conditions. Soil roughness was fixed at a low value, and calculations were

performed for two litter roughnesses at the H polarization and an angle of  $\theta = 40^\circ$  and  $\phi = 0^\circ$ .

All FEM calculations were performed at 1.4 GHz and at both the H and V polarizations, on a 64-bit machine with 64 GB of available random access memory. For the comparison with the MoM, we studied the surface case only; thus, the layer thickness was set to zero, i.e., the structure studied consisted of a vacuum with a lower rough surface. However, it was found that results were almost unaffected by increasing the depth up to 20 cm. For the soil-litter study, the structure consisted of a lower rough surface covered by a dielectric layer with a rough surface and topped by a volume representing a vacuum.

The surface size  $L$  was chosen to be  $12\lambda \times 12\lambda$  ( $= 2.55 \text{ m} \times 2.55 \text{ m}$ ). This amply satisfies the specification given in [5] that surfaces must be at least  $8\lambda \times 8\lambda$  in size. The surface size chosen was also much larger than the autocorrelation length. In all cases it was equivalent to  $12L_c \times 12L_c$  or higher. The surfaces created using the R software had a resolution of  $256 \times 256$  points.

The simplest incident beams for numerical calculations are either the tapered Gaussian beam or the plane wave. The Gaussian beam allows us to avoid errors due to the edge effects from the sides of the calculation area but does not exactly satisfy Maxwell's equations and is therefore only considered an approximation to an electromagnetic wave. Better approximations exist but are more difficult to implement with the HFSS. The incident plane wave exactly satisfies Maxwell's equations but may introduce errors due to the edge effects. We chose to use the tapered (Gaussian) beam for scattering calculations, in order to reduce edge-effect errors, as is common practice. For the emissivity calculations, we chose to use a plane incident beam because it is not an approximation, and tests indicated that the edge-effect errors were smoothed in the integration of the bistatic scattering coefficient, becoming negligible in the emissivity calculation.

The tapering parameter  $g$  for the incident Gaussian beam must be small enough to reduce the edge effects and large enough so that enough of the surface is illuminated to provide an accurate representation of the bistatic scattering coefficient. This parameter should also depend on the incident angle since higher angles lead to a spreading in the beam focal width in the  $x$ -direction. The values commonly used vary from  $L/10$  to  $L/4$  [3]. For simplicity, we chose to use the same value of  $g$  for all the angles. We chose to use a high value of  $L/4$  ( $= 63 \text{ cm}$ ) in order to maximize the illuminated surface area since, on the whole, the angles considered in this letter are low, and all are far from grazing. This value may be somewhat high for the higher angles considered; however, the results obtained do not indicate that errors due to the edge effects are significant. Calculations were performed for 20 different surfaces ( $N = 20$ ) for the scattering case since increasing calculations beyond this value led to very little change in results. Similarly, calculations were performed for  $N = 40$  for emissivity.

The step in  $\theta_s$  and  $\phi_s$  was chosen to be  $0.2^\circ$  for the emissivity calculations. To test the adequacy of this, we reduced this value to  $0.1^\circ$  but found that this had little effect on the results of the emissivity. A step of  $1^\circ$  was used for the scattering calculations.

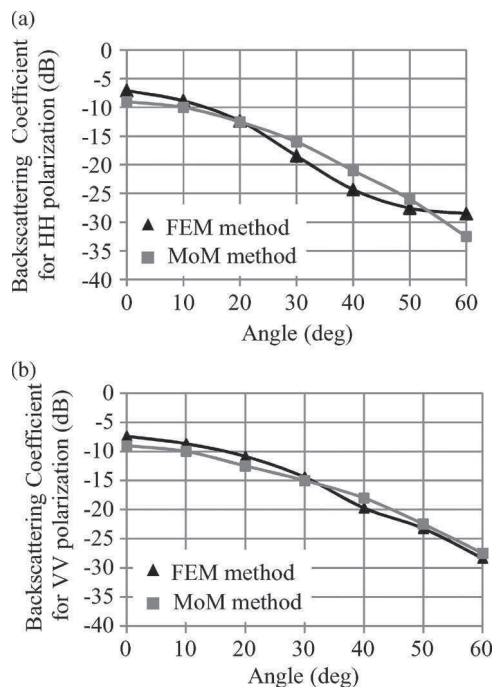


Fig. 1. Backscattering coefficient for the MoM and FEM models calculated at 1.4 GHz for  $\epsilon_r = 3 + 0.1i$  and  $[\sigma, L_c] = [1.22 \text{ cm}, 8.57 \text{ cm}]$  at the (a) HH and (b) VV polarizations.

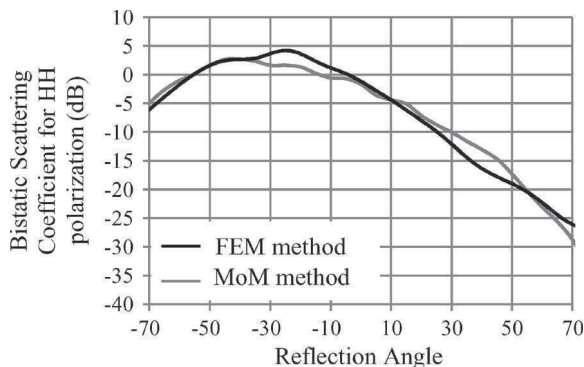


Fig. 2. Bistatic scattering coefficient for the MoM and the FEM models calculated at 1.4 GHz for  $\epsilon_r = 4 + 1i$  and  $[\sigma, L_c] = [3.41 \text{ cm}, 20.5 \text{ cm}]$  with an incident angle of  $30^\circ$ .

It is usual to perform an energy conservation check for the case of rough-surface emission; however, this was not possible since the HFSS only calculates the scattered field in the upper hemisphere. Instead, we performed a calculation of reflectivity for the angles of  $30^\circ$ – $50^\circ$  and with a perfect electrical reflector boundary condition (permittivity = infinity), replacing the impedance boundary condition on the rough surface. This condition ensures no transmission across the rough surface, and therefore, the reflectivity must be equal to unity for energy conservation to be true. Note that the scattered field across the whole sphere surrounding the structure was included in this calculation, therefore including any downward scattering due to the edge effects since the aim was to check that the total calculated energy was conserved.

TABLE I  
EMISSIVITY FOR THE MoM AND FEM MODELS, CALCULATED AT 1.4-GHz H AND V POLARIZATIONS FOR A SURFACE OF  $\sigma = 0.4 \text{ cm}$  AND  $L_c = 8.4 \text{ cm}$ , EXPONENTIAL AUTOCORRELATION FUNCTION, AND PERMITTIVITY OF  $\epsilon_r = 15.57 + 3.71i$

polarization	angle	MoM emissivity	FEM emissivity	$T_B(\text{FEM-MoM})$
H	30	0.5891	0.5920	0.8
H	40	0.5465	0.5535	2.0
H	50	0.4930	0.4987	1.6
V	30	0.6951	0.7020	2.0
V	40	0.7397	0.7467	2.0
V	50	0.7997	0.8107	3.2

TABLE II  
EMISSIVITY FOR THE MoM AND FEM MODELS, CALCULATED AT 1.4-GHz H AND V POLARIZATIONS FOR A SURFACE OF  $\sigma = 1.12 \text{ cm}$  AND  $L_c = 8.4 \text{ cm}$ , EXPONENTIAL AUTOCORRELATION FUNCTION, AND PERMITTIVITY OF  $\epsilon_r = 15.34 + 3.66i$

polarization	angle	MoM emissivity	FEM emissivity	$T_B(\text{FEM-MoM})$
H	30	0.6351	0.6296	1.6
H	40	0.5944	0.5836	3.1
H	50	0.5338	0.5365	0.8
V	30	0.7380	0.7270	3.2
V	40	0.7658	0.7726	2.0
V	50	0.8140	0.8266	3.6

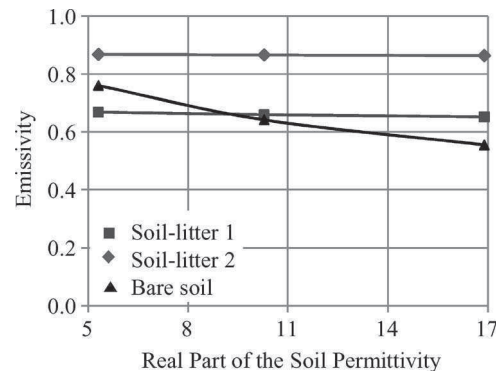


Fig. 3. Emissivity of the soil-litter forest system calculated using the FEM approach at 1.4-GHz H polarization and with an incident angle  $\theta = 40^\circ$  ( $\phi = 0^\circ$ ). Litter permittivity was  $8.712 + 2.301i$ . The soil surface roughness was  $\sigma = 0.44 \text{ cm}$ ,  $L_c = 9 \text{ cm}$ , with an exponential autocorrelation function, and litter roughnesses were of Gaussian autocorrelation function with the following values: 1) soil-litter1 with  $\sigma = 0.4$  and  $L_c = 12.4$  and 2) soil-litter2 with  $\sigma = 0.8$  and  $L_c = 12.4$ .

### III. RESULTS

The results of the comparison with the MoM for the scattering case [bistatic scattering and backscattering coefficients calculated from (2)] are presented in Figs. 1 (a) and (b) and 2. In Fig. 2, the results of the bistatic scattering coefficient are illustrated at the H polarization (very similar results were achieved at the V polarization). The results of the emissivity comparison with the MoM are presented in Tables I and II. The final columns in these tables show the difference in brightness temperature  $T_B$  between the two methods (FEM–MoM). These values are calculated from the difference in emissivity multiplied by a physical temperature of 290 K. The results of the soil-litter study are shown in Fig. 3.

The central processing unit (CPU) and memory requirements for each HFSS calculation (one surface only) varied from approximately 2 h and 3 GB and 12 h and 15 GB for surfaces of lower and higher roughness, respectively, not including the CPU time for near-to-far field calculations, which was negligible for an integration step of  $1^\circ$  (scattering calculations) and approximately 10 min/incident angle, for an integration step of  $0.2^\circ$  (emissivity calculations).

The energy conservation check using the perfect E-boundary condition gave a reflectivity within 0.1% and 1.2% of unity for all the angles for the lower and higher roughness, respectively. Although not conclusive, this indicates that energy conservation is good to within 1.2% or less.

The average difference between the values of the backscattering coefficient calculated by the FEM approach and those calculated by the MoM is 1.2 and 2.1 dB for the VV and HH polarizations, respectively. The maximum difference is 4 and 1.7 dB for the HH and VV polarizations, respectively. The average difference of the results of the bistatic scattering coefficient is 1.4 dB for both the HH and VV polarizations, and the maximum difference occurs at  $70^\circ$  and is equal to 3.5 and 6.3 dB for the HH and the VV polarizations, respectively. The new FEM method therefore agrees with the MoM to approximately 4 dB for the scattering case.

The average difference between the MoM and the FEM emissivity calculations, shown in Tables I and II, is 2.0 and 2.4 K for the lower and higher roughness, respectively. Tables I and II show that the agreement between the two methods for the emissivity calculations is approximately 3 K (the maximum difference is 3.2 and 3.6 K for the lower and higher roughness conditions), and agreement is slightly better for the smoother surface.

We conclude that while not as accurate as the MoM, the FEM approach provides a good complementary method.

Fig. 3 presents an example of a calculation for a multilayer structure with rough surfaces, which illustrates the interest of the new method. We see that the presence of the second covering litter layer has a clear effect on the overall emissivity, and also, the effects of surface roughness of the second layer are strong.

#### IV. CONCLUSION

An FEM approach for calculating the rough-surface scattering and emission of a soil layer, using the numerical modeling tool HFSS, has been presented, and the results have been compared with the MoM predictions. We obtained an agreement with the MoM to within approximately 4 dB for the scattering results, and approximately 3 K for the emissivity results. The interest of the approach is that it can be used to study the emission of heterogeneous media such as multilayer structures or

structures including both rough surfaces and inclusions. Future studies can focus on these applications and evaluate whether calculation time and memory requirements can be reduced and also whether the accuracy and agreement with the MoM can be further improved.

#### REFERENCES

- [1] Y. H. Kerr, P. Waldteufel, J.-P. Wigneron, J. Martinuzzi, J. Font, and M. Berger, "Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, no. 8, pp. 1729–1735, Aug. 2001.
- [2] D. Entekhabi, E. G. Njoku, P. E. O'Neill, K. H. Kellogg, W. T. Crow, W. N. Edelstein, J. K. Entin, S. D. Goodman, T. J. Jackson, J. Johnson, J. Kimball, J. R. Piepmeier, R. D. Koster, N. Martin, K. C. McDonald, M. Moghaddam, S. Moran, R. Reichle, J. C. Shi, M. W. Spencer, S. W. Thurman, L. Tsang, and J. Van Zyl, "The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission," *Proc. IEEE*, vol. 98, no. 5, pp. 704–716, May 2010.
- [3] L. Tsang, J. Kong, K.-H. Ding, and C. Ao, *Scattering of Electromagnetic Waves*. New York: Wiley, 2001.
- [4] Q. Li, L. Tsang, J. C. Shi, and C. H. Chan, "Application of physics-based two grid method and sparse matrix canonical grid method for numerical solutions of emissivities of soils with rough surfaces at microwave frequencies," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 38, no. 4, pp. 1635–1643, Jul. 2000.
- [5] L. Zhou, L. Tsang, V. Jandhyala, Q. Li, and C. H. Chan, "Emissivity simulations in passive microwave remote sensing with 3-D numerical solutions of Maxwell equations," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 42, no. 8, pp. 1739–1748, Aug. 2004.
- [6] S. Huang, L. Tsang, E. G. Njoku, and K. S. Chan, "Backscattering coefficients, coherent reflectivities, and emissivities of randomly rough soil surfaces at L-band for SMAP applications based on numerical solutions of Maxwell equations in three-dimensional simulations," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 48, no. 6, pp. 2557–2568, Jun. 2010.
- [7] K. F. Warnick and W. C. Chew, "Numerical simulation methods for rough surface scattering," *Waves Random Media*, vol. 11, no. 1, pp. R1–R30, Jan. 2001.
- [8] [Online]. Available: <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>
- [9] T.-D. Wu, K. S. Chen, J. Shi, and A. K. Fung, "A transition model for the reflection coefficient in surface scattering," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, no. 9, pp. 2040–2050, Sep. 2001.
- [10] H. T. Ewe, J. T. Johnson, and K. S. Chen, "A comparison study of the surface scattering models and numerical model," in *Proc. IGARSS*, Sydney, Australia, Jul. 13, 2001, pp. 2692–2694.
- [11] H. T. Ewe, J. T. Johnson, and K. S. Chen, "A comparison study of the surface scattering models and numerical model," presented at the Int. Geoscience Remote Sensing Symp. (IGARSS), Sydney, Australia, Jul. 13, 2001, pp. 2692–2694.
- [12] R software website. [Online]. Available: <http://www.r-project.org/>
- [13] Random Fields package. [Online]. Available: <http://cran.r-project.org/web/packages/RandomFields/RandomFields.pdf>
- [14] C4W's, 3D Shop Modeldesign. [Online]. Available: <http://www.3dshopmodeldesign.com/>
- [15] M. F. Chen and S. Y. Bai, "Computer simulation of wave scattering from a dielectric random surface in two dimensions—Cylindrical case," *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 4, no. 10, pp. 963–982, 1990.
- [16] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*. Dedham, MA: Artech House, 1985, ch. 11-1.
- [17] F. Demontoux, B. Le Crom, G. Ruffié, J.-P. Wigneron, J. P. Grant, V. L. Mironov, and H. Lawrence, "Electromagnetic characterization of soil-litter media—Application to the simulation of the microwave emissivity of the ground surface in forests," *Eur. Phys. J.-Appl. Phys.*, vol. 44, no. 3, pp. 303–315, Dec. 2008.

# Electromagnetic characterization of soil-litter media: application to the simulation of the microwave emissivity of the ground surface in forests

F. Demontoux<sup>1,a</sup>, B. Le Crom<sup>1,2</sup>, G. Ruffié<sup>1</sup>, J.P. Wigneron<sup>2</sup>, J.P. Grant<sup>2,3</sup>, V.L. Mironov<sup>4</sup>, and H. Lawrence<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Université Bordeaux 1, Laboratoire IMS-UMR 5218, 16 avenue Pey-Berland, 33607 Pessac, France

<sup>2</sup> INRA-Unité de Bioclimatologie, BP 81, 33883 Villenave d'Ornon Cedex, France

<sup>3</sup> Faculty of Earth and Life Sciences, Vrije Universiteit Amsterdam, 1085 De Boelelaan, Holland

<sup>4</sup> Radiophysics of Remote Sensing Laboratory, Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Russian

Received: 29 March 2007 / Received in final form: 3 December 2007 / Accepted: 25 August 2008  
Published online (Inserted Later) – © EDP Sciences

**Abstract.** In order to improve our knowledge of the emitted signal of forests at *L*-band (1.4 GHz) we focused this study on permittivity measurements of heterogenic natural media such as soil or litter consisting of plant debris and organic matter. This study was done in the context of the upcoming SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) satellite mission that will attempt to map surface soil moisture from *L*-band (1.4 GHz) passive microwave measurements. In the field of passive microwaves, very little information exists about the behaviour of the *L*-band signal of forests especially when litter is included in the soil-vegetation system. To date very few analyses have investigated the dielectric behaviour of the litter layer and its influence on the microwave emission of forests is generally neglected.

**PACS.** 06.20.Dk Measurement and error theory – 77.22.-d Dielectric properties of solids and liquids – 93.90.+y Other topics in geophysical observations, instrumentation, and techniques (restricted to new topics in section 93)

1 This paper describes a technique used to measure the per-  
2 mittivity of soil and litter with a rectangular waveguide  
3 taking into account the heterogeneity of the media. The  
4 study was based on soil and litter samples collected in the  
5 coniferous forest of Les Landes, near Bordeaux, France.  
6 Particular attention was given to the impact of measure-  
7 ment errors on the calculation of permittivity. The mea-  
8 surements of the soil and litter dielectric constants were  
9 then used in a numerical model to simulate the microwave  
10 emissivity of the soil-litter system. As an example, it is  
11 shown that error in measurements lead to variations in  
12 the emissivity calculations of up to 0.025 at maximum  
13 (for an emissivity of 0.73,  $SM = 30\%$ ), which equals a  
14 total error of 3.36% of the calculated soil-litter emissivity.

15 It was found that variations in the litter dielectric con-  
16 stant and layer thickness have a strong influence on the  
17 calculation of forest ground emissivity. As an example a  
18 3 cm litter thickness can lead to a change of  $\sim 0.15$  between  
19 the soil and the soil-litter system emissivity (which equals  
20 an increase of about 20.4% in terms of surface emissivity).

## 21 1 Introduction

22 The SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) mission,  
23 which is scheduled for launch in 2008, is the second Earth

24 Explorer mission to be developed as part of ESA's Living  
25 Planet Program. The project is a collaboration between  
26 three European Agencies: the European Space Agency  
27 (ESA) [1], the French National Centre of Space Studies  
28 (CNES) [2] and the Spanish Centre for Technical and In-  
29 dustrial Development (CDTI). SMOS will carry the first-  
30 ever polar orbiting 2-D interferometric radiometer which  
31 will provide spatial and temporal maps of surface soil  
32 moisture over land surfaces and salinity over the oceans.  
33 The data acquired from the mission will contribute to im-  
34 prove our knowledge of the Earth's water cycle. The ap-  
35 plications of SMOS data are numerous: better weather  
36 and extreme-event forecasting, a contribution to seasonal-  
37 climate forecasting, observations over regions of ice and  
38 snow, etc. [3,4].

39 Over the land surfaces, it comes as no surprise that  
40 the amount of water in the soil has an influence on climate  
41 variables, as soil moisture is a key variable in the exchange  
42 of water and thermal energy between the land surface and  
43 the atmosphere.

44 The maps of soil moisture and ocean salinity will  
45 be derived from the SMOS measurements of the emit-  
46 ted microwave radiation around the frequency of 1.4 GHz  
47 (*L*-band). Over land surfaces, the microwave emission re-  
48 sponds to change in the dielectric constant of materials,  
49 which is mainly a result of variation in their water content.

<sup>a</sup> e-mail: francois.demontoux@ims-bordeaux.fr

The SMOS pixel is approximately  $40 \text{ km} \times 40 \text{ km}$  and one image obtained by the radiometer will generally include a mixture of various cover types. In particular, it will often include forests since a large fraction of the land surface is covered by this vegetation type. Very few experimental campaigns over forests have been carried out to date and few studies have investigated their microwave signatures [5,24]. Furthermore, in many temperate and boreal forests, a distinct litter layer (consisting of plant debris and organic matter) is present between the soil and the vegetation. Over low vegetation covers such as grass, it was found that this layer has strong effects. It attenuates the soil emission and has a strong self-emission. The presence of this layer generally leads to an important increase in the surface microwave emission [6–8,25]. The effect of this layer has until now generally been neglected in the computation of soil microwave emission and very few experimental data sets are available to validate modelling approaches such as that used for SMOS [9,10].

This study aims at investigating a method for measuring the complex permittivity of soil and litter. Tests were done using samples of soil and litter taken from a coniferous forest stand in the *Les Landes* forest (near Bordeaux, France). These dielectric properties were then used in a multilayer ground model simulating the microwave emission of the soil-litter medium. The objective was to analyse the influence of the litter characteristics – in terms of layer thickness (0–10 cm) and moisture content (0–37.5% for the soil moisture) on the surface emission.

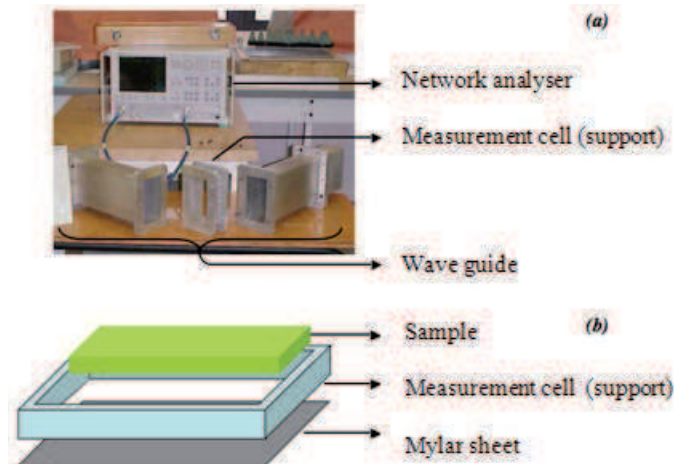
This study presents the technique used for measuring the dielectric properties of the soil and litter samples. The measurements were compared with simulation of a dielectric mixing model and ranges of permittivity were defined in order to take into account the errors of measurement or the heterogeneity of the considered medium. Next, a numerical model which was developed in order to calculate the emissivity of a multilayer system is presented. This model was used to evaluate the effect of the litter layer. More specifically, the impact of errors made in the measurements of soil-litter dielectric properties on the computed soil-litter emissivity was evaluated.

## 2 Material and methods

### 2.1 Measurements

Changes in the dielectric constant of the soil or the litter, which are mainly due to variations in water content, produce a variation in the soil-litter system emission. Knowledge of the electromagnetic properties of these two materials is thus fundamental when computing the system emissivity.

The objective of this study was to estimate an equivalent permittivity of soil and litter which are strongly heterogeneous mediums. A modelling approach using a dielectric mixing method (e.g. [17]) could have been considered. However, measurements on samples of sufficient size ( $83.85 \text{ mm}^3$  and  $167.7 \text{ mm}^3$ ) make it possible to obtain a



**Fig. 1.** (Color online) Measurement instruments (a) with details of the measurement cell (b).

direct estimate of the influence of actual heterogeneities on the equivalent permittivity of the medium.

#### 2.1.1 Measurements with a wave guide technique

All dielectric measurements presented in this study were done using a wave-guide technique (see Fig. 1) in an air-conditioned room ( $22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) and using the frequency of the SMOS mission radiometer (1.4 GHz). This method enabled us to work on samples large enough to account for the layer heterogeneity, in order to measure the effective permittivity of the soil and litter media. The samples were inserted inside a section of the wave guide which was used as a support containing the sample (Fig. 1). At the bottom of this wave guide section, a sheet ( $100 \mu\text{m}$  thick Mylar sheet), was used to hold the sample in place. This sheet was considered to be quasi-transparent for the electromagnetic waves. According to rough estimates of the permittivity values of each material, and of the attenuation of the wave, two kinds of support were used:

- a 1 cm thick support for the soil (high permittivity);
- a 2 cm thick support for the litter (weak permittivity).

Manual pressure was applied to the sample to reproduce as much as possible its density in real conditions.

The electromagnetic parameters of the samples were determined using the Nicolson, Ross and Weir method (NRW) [12] for rectangular waveguides. This calculation process is based on reflection and transmission measurements and the network analyzer is well suited for this type of measurement. The principle of the calculation is based on the fact that introduction of the sample into the guide produces a change of impedance. The waveguide is a two ports system (each port is an input and an output of the system) in which multiple reflections within the material are taken into account by the coefficients  $S_{11}$  and  $S_{21}$ . These latter are the coefficients of the scattering matrix which represents the various exchange coefficients between all the inputs and outputs of the system. This makes it

1 possible to calculate  $\Gamma$  ( $|\Gamma| \leq 1$ ), the coefficient of the first  
 2 reflection and  $T$ , the coefficient of transmission, using the  
 3 following equations [13,14]:

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (1)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (2)$$

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}}. \quad (3)$$

4 Because it concerns a non magnetic sample, its electro-  
 5 magnetic characteristics are given by:

$$\begin{cases} \mu^* = 1 \\ \varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \frac{\gamma_g \lambda_{0g}}{j2\pi} \frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \end{cases} \quad (4)$$

6 where:

$$\gamma_g = \frac{-1}{2d} \ln(T) = \frac{-1}{2d} (\ln(|T|) + j\phi) \quad (5)$$

7 and:

$$\lambda_{0g} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (6)$$

8 with:  $\gamma_g$  guided propagation constant in the rectangular  
 9 waveguide filled with the sample;  $\lambda_{0g}$  (mm) wavelength in  
 10 the empty guide;  $\lambda_0$  (mm) vacuum wavelength;  $\lambda_c$  (mm)  
 11 rectangular guide cut-off wavelength;  $\lambda_c = 2b$  (mm) where  
 12  $b$  is the characteristic waveguide width. For 1.4 GHz band  
 13 the waveguide dimensions are: height  $a = 65$  mm; width  
 14  $b = 130$  mm;  $d$  (mm) sample thickness.

15 From the above equations (Eqs. (1–6)), the average  
 16 values of the real and imaginary parts of the dielectric  
 17 constant,  $\varepsilon'$  and  $\varepsilon''$  respectively, are computable from mea-  
 18 surements of the coefficients  $S_{11}$  and  $S_{21}$ . These computa-  
 19 tions were made in the 1.3–1.5 GHz measurement domain  
 20 considered in the experimental setup.

21 In this study, the measurements of the complex co-  
 22 efficients  $S_{11}$  and  $S_{21}$  of the scattering matrix were done  
 23 with a network analyzer ANRITSU 37325A [18] which was  
 24 controlled by a computer for the acquisition and process-  
 25 ing of the data. The measurement process began with the  
 26 measurement of the  $S_{21}$  coefficient from the empty wave  
 27 guide followed by a short-circuit measurement of the  $S_{11}$   
 28 coefficient in the support plan, in order to define a refer-  
 29 ence plane to calibrate the system. Next the dry sample  
 30 was weighed, and then placed in the support of the wave-  
 31 guide. For each measurement, a given quantity of distilled  
 32 water was sprayed over the sample using a syringe, then  
 33 after a certain time (so as to allow for the diffusion of wa-  
 34 ter in the sample) the measurements of  $S_{11}$  and  $S_{21}$  were  
 35 made. At the end of the measurements the sample was  
 36 weighed again, so as to make an additional verification of  
 37 the total quantity of water injected in the sample.

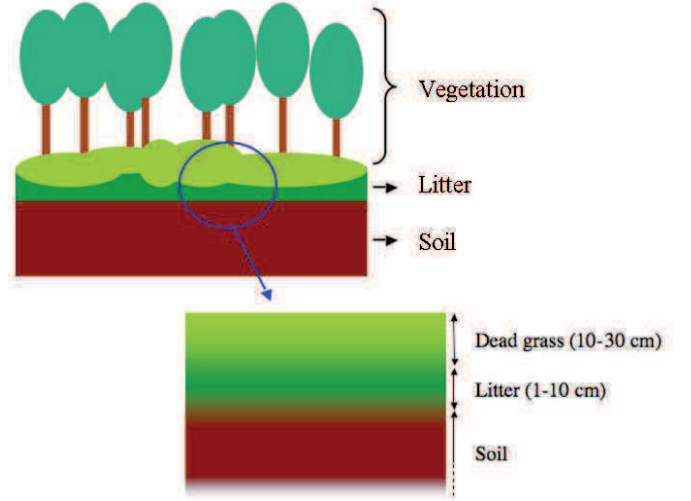


Fig. 2. (Color online) In situ configuration of the collected samples.

### 2.1.2 Sample preparation

The measurements presented in this study were done using soil and litter samples collected on February 15th, 2006 at the INRA site of Bray in the coniferous forest of *Les Landes* (southwest France). A geometric representation of the soil-litter system over the site is given in Figure 2. In certain cases, the soil-litter system can be overlain by a layer of dead grass (mainly *Molinia caerulea* L. Moench). In this study, we focus our investigations on the effect of the litter layer, and the dead grass layer will not be considered.

Before carrying out the dielectric measurements at 1.4 GHz, the soil and litter samples were dried for one day (24 h) at 105 °C for soil and for three days (72 h) at 65 °C for litter. These protocols were specifically designed not to denature the soil or litter material [11,17]. During the measurement process, the samples were gradually moistened and the change in weight due to the increase in moisture content was monitored continuously.

In this study the classical calculation methods of soil and litter moisture content were used [11]. Volumetric soil ( $SM$ ) and gravimetric litter ( $LM$ ) moisture content were defined by:

$$SM = \frac{W_W^S}{W_{Dry}^S} \rho_b \quad (7)$$

$$LM = \frac{W_W^L}{W_{Dry}^L + W_W^L} \quad (8)$$

where  $W_W^I$  is the water weight in the sample (g) with  $I = S$  for soil and  $I = L$  for litter;  $W_{Dry}^I$  is the weight of the dry sample (g) and  $\rho_b$  is the soil bulk density (g/cm<sup>3</sup>).

## 2.2 Modelling

The emissivity  $e$  of an object is the ratio of energy radiated by this object to the energy radiated by a black body of the

1 same temperature. It is a measure of a material's ability  
 2 to absorb and radiate energy. This emissivity depends on  
 3 configuration parameters such as polarization, wavelength  
 4 and emission angle. According to the Rayleigh-Jeans ap-  
 5 proximation, emissivity in the microwave region may be  
 6 expressed as [11]:

$$e_S = \frac{T_B}{T_S} \quad (9)$$

7 where  $e_S$  is the surface emissivity,  $T_B$  is the brightness  
 8 temperature and  $T_S$  is the physical temperature of the  
 9 surface.  $T_B$  can be measured with a microwave radiome-  
 10 ter which is a passive and highly sensitive microwave sen-  
 11 sor [15].

12 Soil emissivity is related to reflectivity through the  
 13 equation:

$$e_S = 1 - \Gamma_S \quad (10)$$

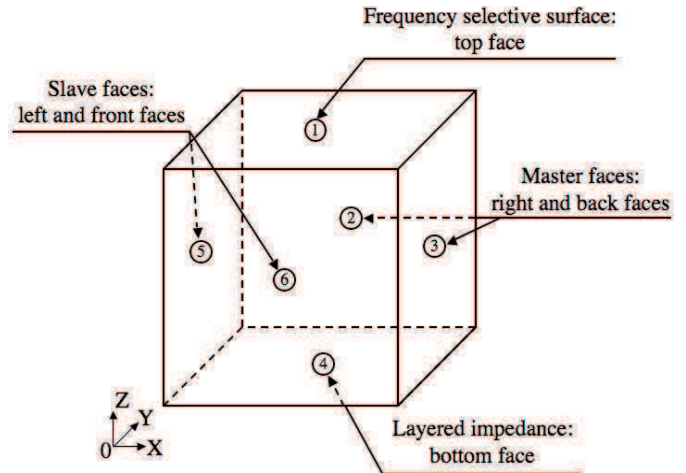
14 where  $\Gamma_S$  is the reflectivity of the soil which depends  
 15 mainly on soil permittivity and roughness.

### 16 2.2.1 Microwave models

17 In this study, two models were used to simulate the mi-  
 18 crowave emissivity of the soil-litter medium in the *Les*  
 19 *Landes* forest:

- 20 (i) a simple radiative transfer model considering a three-  
 21 layer medium (soil-litter-air) and accounting for reflec-  
 22 tion of the microwave intensity at the soil-litter and  
 23 litter-air interfaces. Detailed equations can be found  
 24 in (Ulaby et al. [21]). This model will be referred to as  
 25 the “incoherent” model in the following, since coherent  
 26 effects are neglected in that modelling approach;
- 27 (ii) a numerical model based on a finite elements method  
 28 which was developed with the ANSOFT's HFSS (High  
 29 Frequency Structure Simulator) [16] simulation soft-  
 30 ware. The HFSS radiobrightness model was used to  
 31 compute the reflectivity and the microwave emissiv-  
 32 ity of a multilayer system, accounting for the moisture  
 33 content of its different components. Characteristics of  
 34 the simulations are given in Figure 3.

35 A plane wave polarized along the  $OY$  axis with propaga-  
 36 tion vector  $\vec{k}$  in direction  $OZ$  is generated. The frequency  
 37 selective surface allows for the calculation of  $S_{11}$  coeffi-  
 38 cients of the model by describing the relationship between  
 39 the incoming and outgoing fields of the system. The mas-  
 40 ter and slave faces make it possible to impose conditions  
 41 of periodicity to model an infinite medium in plane  $XY$ .  
 42 Through this condition the model is free of edge effects.  
 43 A layered impedance boundary condition makes it possi-  
 44 ble to simulate a succession of layers of different materi-  
 45 als and variable thicknesses. During these simulations conver-  
 46 gence criteria were imposed on the scattering matrix, one  
 47 of which was the variation  $\Delta S$  of the elements of the scat-  
 48 tering matrix. A value of 0.01 (1%) was chosen and had to  
 49 be obtained on 2 consecutive iterations of calculation. This  
 50 model, which accounts for possible coherent effects during  
 51 the microwave radiation propagation within the soil and



**Fig. 3.** Presentation of the simulation and the boundary conditions with HFSS.

litter medium, will be referred to as the “coherent” model  
 in the following.

For both models and in order to simplify the analysis,  
 the medium was characterized by plane surfaces at the  
 soil-litter and litter-air interfaces, a uniform structure,  
 and no thermal or moisture gradients. The measured equi-  
 valent permittivity of both the soil and the litter media  
 was integrated in the two “coherent” and “incoherent”  
 models so that any phase shifts within the materials  
 themselves were thus neglected. However, using the  
 “coherent” model, phase shifts will occur at the  
 transition between the two media (air-soil and soil-  
 litter). This can involve resonance phenomena. These  
 phenomena are attenuated in a natural litter media  
 due to its heterogeneity and thickness variation. For  
 particular layer sizes, avoiding resonant effects, both  
 the “coherent” and “incoherent” models may produce  
 very similar results (Ulaby et al. [21]).

The main advantage of the “incoherent” model is that  
 it is very simple. However simulations based on that  
 model are not sensitive to coherent effects. Even if  
 coherent effects in natural media are probably atten-  
 uated due to (i) heterogeneities within the medium,  
 (ii) roughness characteristics (at the soil-litter and  
 litter-air interfaces) and (iii) litter thickness varia-  
 tions (in relation with rough interfaces), as noted  
 above, these effects may not be negligible and their  
 effects have already been observed from experimental  
 data (Jackson et al., for instance [22]).

Conversely, the coherent model based on the HFSS  
 simulations is much more complex and simulations may  
 be time-consuming for some specific medium configu-  
 rations. Moreover, for media with plane-interfaces,  
 which are considered in this study, simulations of  
 coherent interference effects are probably over-esti-  
 mated in comparison to what actually happens in  
 natural media. However, this approach is more  
 powerful than analytical approaches since it can also  
 take into account many characteristics of natural  
 media, such as surface roughness, moisture gradients,  
 thickness variation or the presence of structural  
 heterogeneities. These different variables were not  
 accounted for in the present study but will be the  
 focus of further

studies for which the advantages of the HFSS model will be very interesting.

In the present study, simulations were mainly based on the coherent modelling approach. However, for some specific cases, simulations using both the “coherent” and “incoherent” models were compared. By comparing simulations based on a model which neglects completely all possible coherent effects (the “incoherent” model) and on a model which overestimates these effects for the specific plane-interface configuration considered in this study (the “coherent” model), we attempted to estimate the possible effects of coherent interferences within natural media.

### 2.2.2 Dielectric models

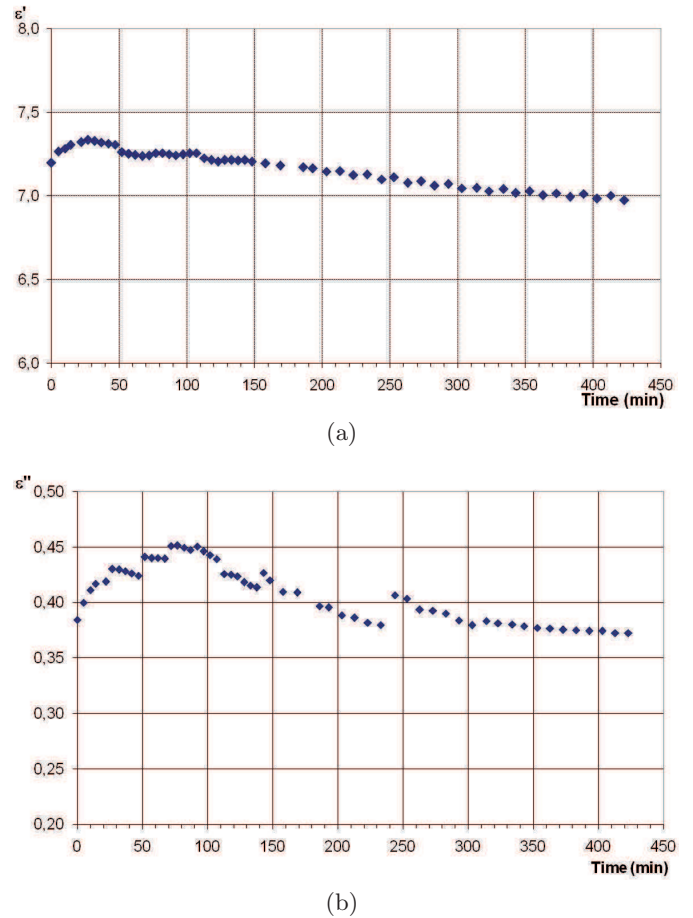
The model of Dobson [17] is used currently in the forward model (*L*-MEB) of the SMOS Level 2 algorithm [9]. However, this model was developed from experimental data acquired over a limited range of soil texture and temperature conditions. Recent results by Mironov et al. [20] showed that the Dobson model simulations could not be extrapolated: they may provide poor (or even non physical) results for soils with a large fraction of clay or sand (for fractions of sand larger than about 30% for instance). However, these soil types represent a very large area at global scale, considering only the semi-arid and arid regions. Recently, a new approach to model the dielectric properties of soils as a function of soil moisture has been proposed and developed by Mironov [23] and will be referred to as the Mironov model. The approach is based on the dielectric spectrum of soil water, which is measured in situ for both free and bound soil water types. It allows the development of a physically based dielectric model for moist soils as the soil water molecules relaxation characteristics can be accurately measured and introduced as physically proven parameters. The Mironov model was used in this study to compute the dielectric properties of soil, considering that this model is more accurate for soils with a large percentage of sand as it is the case for our soil samples (the percentage of sand exceeding generally ~70% in the *Les Landes* forest).

## 3 Results and discussion

In this section, the dielectric measurements of the soil and litter samples are analysed as a function of their moisture content. In a preliminary step of the current study, the possible perturbing effects of the water diffusion in the soil and vegetation samples were investigated before further detailed measurements were made. Then, an analysis of the measurement errors was carried out in order to determine the uncertainties associated with the estimation of  $\epsilon'$  and  $\epsilon''$  due to the sample heterogeneity.

### 3.1 Influence of water diffusion in the sample

The quantity of water injected into the sample was fixed and the sample was also weighed after the measurement



**Fig. 4.** Time variations in the measurement of  $\epsilon'$  (a) and  $\epsilon''$  (b) after water spraying over the soil sample.

to compute its water content. In this way, it was possible to verify that the sample did not dry out during the whole measurement period. The injection of a fixed quantity of water produced a variation of the water content in the sample. However, water diffusion from the surface to the whole volume of the sample may have a significant effect on the measurements. A specific study was carried out to investigate this effect for the soil and litter material. As an illustration, the time variation in the measured permittivity after spraying water over a sample, for a volumetric moisture content of 15.54% (see Eq. (7)) is shown in Figures 4a–4b.

From these two figures, it can be seen that the measured values undergo a transitional stage whose duration is ~300 min. After this delay, the measured values are almost stable, as seen in Table 1.

The same procedure was used for litter and results are illustrated for a sample of 16.9 g with a gravimetric moisture content of 44.95% in Figures 5a–5b.

An analysis similar to that illustrated in Figures 4a–4b and 5a–5b was made for several specific soil and litter samples. From these measurements and the results of the measured standard deviations (presented in Tab. 2), the time we must wait between each measurement

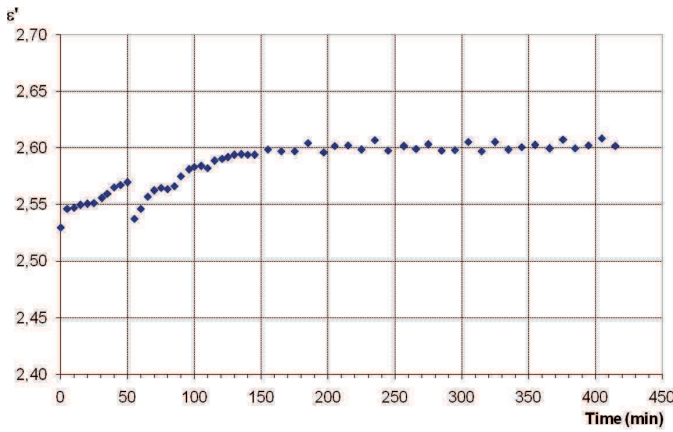


**Table 1.** Summary of the results within the soil samples.

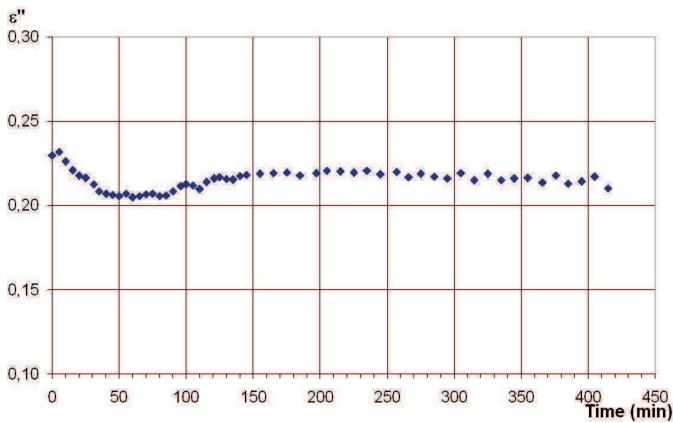
		Average value	Standard deviation	Error on the average value (%)
Based on the entire experiment	$\epsilon'$	7.16	0.122	1.71%
	$\epsilon''$	0.41	0.029	7.14%
Based on measurements from 300 mn to the end	$\epsilon'$	7.02	0.023	0.33%
	$\epsilon''$	0.38	0.003	0.91%

**Table 2.** Summary of the results within a litter samples.

		Average value	Standard deviation	Percentage deviation based on the average value (%)
Based on the entire experiment	$\epsilon'$	2.58	0.026	1.00%
	$\epsilon''$	0.22	0.006	2.74%
Based on measurements from 200 mn to the end	$\epsilon'$	2.60	0.003	0.13%
	$\epsilon''$	0.22	0.003	1.24%



(a)



(b)

**Fig. 5.** Time variations in the measurement of  $\epsilon'$  (a) and  $\epsilon''$  (b) after water spraying over the litter sample.

1 was estimated. The analysis showed that a time of about  
 2 300 min for soil and 200 min for litter was necessary be-  
 3 fore a stabilization of the measured values can be obtained  
 4 (see Figs. 4 and 5). This stabilized value, obtained af-

ter diffusion processes within the sample were almost finished, was considered as the best estimate of the sample permittivity. This preliminary study highlights a transitory phenomenon in the measurements. It shows that water absorption is not instantaneous and will thus influence the sample permittivity value which is monitored by the continuous measurements. It is therefore necessary to wait for a sufficiently long time until the resulting error is small enough. It is likely that such transitory phenomena may have an effect on the microwave signature of the soil-litter system at the beginning of rainfall events in the real environment.

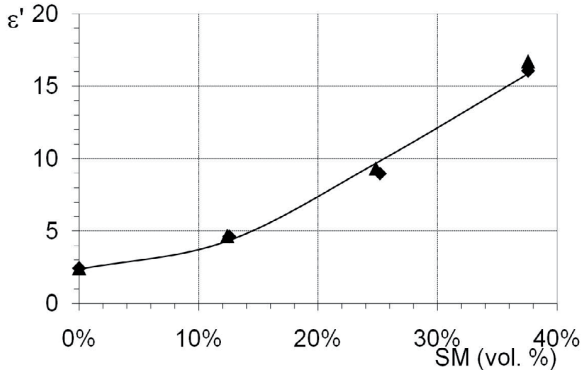
Under natural conditions, volumetric soil moisture usually varies between 0% and 40% and saturation values are generally close to 50% [17]. For this reason the measurements were limited to the 0–40% *SM* range. Based on the preliminary study described above, all further measurements were carried out according to the following protocol for the soil samples:

- 1) wave guide calibration;
- 2) measurement of the sample dry weight;
- 3) introduction of a given quantity of water; weighing of the sample; “instantaneous” measurement of the permittivity (the sample was left for 2 min between the introduction of the water and the “instantaneous” measurement);
- 4) waiting for 300 min (for soil);
- 5) waveguide measurement; weighing of the sample.

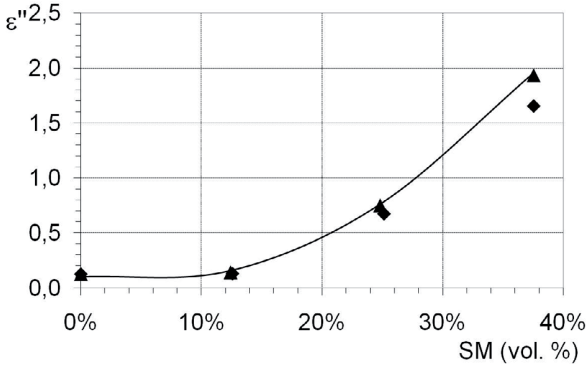
Steps 3–5 were carried out for three soil moisture contents: 12.5%, 25% and 37.6%. The results are presented in Figures 6a–6b. A significant increase in both  $\epsilon'$  and  $\epsilon''$  with soil moisture can be seen in these figures.

Contrary to the soil, the litter remains wet for a long time and is therefore rarely completely dry in forests. Its gravimetric moisture generally varies between 15% and 80%, which is the range of litter moisture which will be considered in this study.

The measurements were carried out for litter using a similar protocol to that described above for the soil, but with a waiting period (step 4) of 200 min. Steps 3–5 were



(a)



(b)

**Fig. 6.** (a) Real part of the soil permittivity, (b) imaginary part of the soil permittivity.  $\blacklozenge$  instantaneous measurements,  $\blacktriangle$  measurements after waiting 300 min, — fitted curve.

1 carried out for five litter moisture contents: 16.6%, 31.7%,  
2 44.5%, 57.3% and 66.8%.

3 Results are given in Figures 7a–7b. As in the case of  
4 soil, a significant increase in both  $\epsilon'$  and  $\epsilon''$  with moisture  
5 content can be seen in the figures for litter. A difference  
6 between the two types of measurements (instantaneous  
7 and after a waiting time of 200 min) is observed mainly  
8 for  $\epsilon'$  at rather high moisture contents.

9 According to the measurements, the relationship be-  
10 tween permittivity and moisture content for the soil and  
11 the litter media was approximated by the following ana-  
12 lytical formulas (see Figs. 6a–6b and 7a–7b):

13 for soil:

$$\epsilon'_{\text{soil}} = 6.5 \tanh(8(SM - 0.26)) + 6.5 SM + 8.67 \quad (11)$$

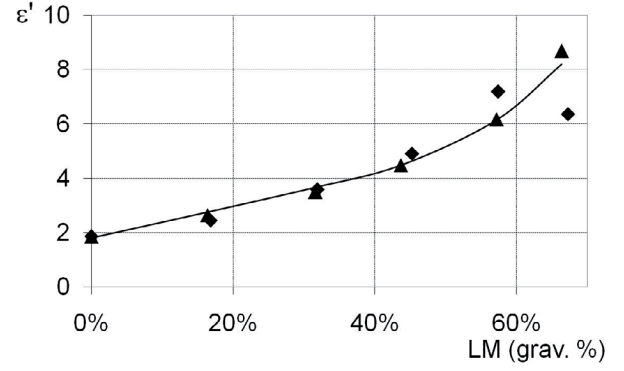
$$\epsilon''_{\text{soil}} = \tanh(12(SM - 0.28)) + 0.1 SM + 1.1 \quad (12)$$

14 for litter:

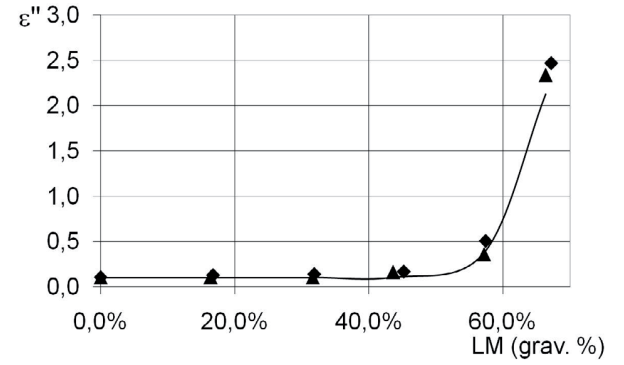
$$\epsilon'_{\text{litter}} = 2.3 \tanh(8(LM - 0.65)) + 5.8 LM + 4.1 \quad (13)$$

$$\epsilon''_{\text{litter}} = 1.25 \tanh(18(LM - 0.63)) + 1.35 \quad (14)$$

15 where  $\tanh$  is the hyperbolic tangent;  $SM$  the volumetric  
16 soil moisture ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ );  $LM$  the gravimetric litter moisture  
17 ( $\text{kg}/\text{kg}$ ).



(a)

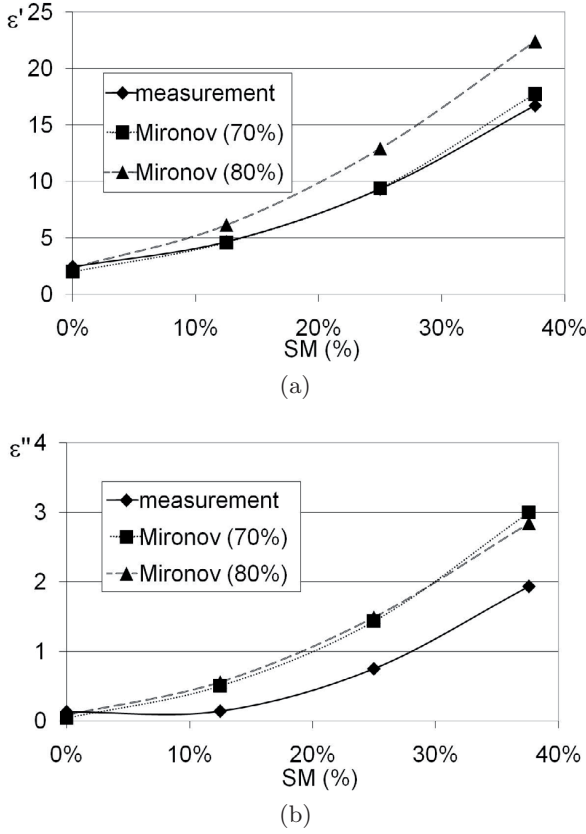


(b)

**Fig. 7.** (a) Real part of the litter permittivity, (b) imaginary part of the litter permittivity.  $\blacklozenge$  instantaneous measurements,  $\blacktriangle$  measurements after waiting 200 min, — fitted curve.

18 These equations will be used in the following to com-  
19 pute the soil and litter permittivity values as input data  
20 for the “coherent” and “incoherent” model simulations.

21 For soil, the measurements were compared with simu-  
22 lations made using the Mironov soil dielectric model [20]  
23 which computes the soil dielectric constant over a wide  
24 range of soil moisture, texture and mineral content. The  
25 results of this comparison are given in Figures 8a–8b. We  
26 used two values for sand percentage (70 and 80%) as in-  
27 puts for the dielectric model corresponding to values gen-  
28 erally found in soil samples collected at the Bray site [5]. A  
29 good agreement was obtained between measured data and  
30 simulations for sand percentage of 70% for the real part  
31 of soil permittivity (Fig. 8a), while the simulations of the  
32 imaginary part of the permittivity are similar for both  
33 sand contents (70 or 80%) and are larger by about 30%  
34 than the measured data. Possible explanations for the dis-  
35 crepancies between measured and simulated values could  
36 be related to the effects of the material density (within  
37 the measurement cell it was difficult to reproduce exactly  
38 the compactness of the original material which was sam-  
39 pled in situ), heterogeneities in the sample which are not  
40 accounted for by the Mironov model and measurement er-  
41 rors. To improve our knowledge of these different aspects,  
42 an evaluation of the effects of the measurement errors and



**Fig. 8.** (a) Real part of the soil permittivity vs. Mironov model. (b) Imaginary part of the soil permittivity vs. Mironov model.

1 sample heterogeneity on the measured permittivity values  
 2 was carried out. It is given in the following paragraph.

### 3 3.2 Measurement errors

4 Errors occurring during the measurement procedure of the  
 5 soil and litter permittivity may have several causes. They  
 6 are due to the weighing of the sample and support, to the  
 7 methods of measurement and calculation of the permittiv-  
 8 ity, and to the sample heterogeneity. These different types  
 9 of errors are analysed in the following sections.

#### 10 3.2.1 Instrumental errors

11 As for the uncertainties due to the measurement method,  
 12 the calibration of the network analyzer corrects for some  
 13 imperfections of the system but other errors still remain.  
 14 This kind of measurement uncertainty is random, intrinsic  
 15 to the apparatus and is due to phenomena such as errors  
 16 in the measurement of the standards, measurement noise  
 17 (interfering signals), various drifts (thermics, atmospheric,  
 18 electronic) or connections.

19 Other uncertainties related to the method of calcula-  
 20 tion are due to rounding approximations during numeri-  
 21 cal calculations. These two types of errors are difficult to

22 quantify, nevertheless, we estimate their influence on the  
 23 measurement results to be approximately 5% [18].

#### 24 3.2.2 Calculation errors in the sample weighing

25 The error in the calculation of moisture is mainly due to  
 26 errors in sample weighing. The standard deviation of the  
 27 measured values is  $\pm 0.05$  g.

28 The maximum uncertainty of a function  $y$  with several  
 29 variables  $x, z$  is calculated in the following way:

$$\begin{cases} y = f(x, z) \\ \Delta y = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \Delta z. \end{cases} \quad (15)$$

It then follows from equation (7) that:

$$\Delta SM = \left| \frac{SM}{W_W^S} \right| \Delta W_W^S + \left| \frac{SM}{W_{Dry}^S} \right| \Delta W_{Dry}^S \quad (16)$$

and from equation (8) that:

$$\begin{aligned} \Delta LM = & \left| \frac{LM(1-LM)}{W_W^L} \right| \Delta W_W^L \\ & + \left| \frac{LM(1-LM)}{W_{Dry}^L} \right| \Delta W_{Dry}^L. \end{aligned} \quad (17)$$

36 Taking into account the measurements considered in this  
 37 study, we obtain the following ranges for each variable:

$$\text{Soil} : \begin{cases} 0 \leq SM \leq 0.30 \\ 0 \leq W_W^S \leq 78.50 \text{ g} \\ 0 \leq W_{Dry}^S \leq 23.60 \text{ g} \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{Litter} : \begin{cases} 0 \leq LM \leq 0.66 \\ 0 \leq W_W^L \leq 34.10 \text{ g} \\ 0 \leq W_{Dry}^L \leq 17.30 \text{ g} \end{cases} \quad (19)$$

42 Using the above values together with equations (16)  
 43 and (17) we assume an error of  $\pm 0.10$  g on the weights,  
 44 because the water and dry weights are calculated, respec-  
 45 tively, by differences between the wet and dry weights,  
 46 and between the weight of the sample and the support  
 47 and the weight of the support alone. For soil and litter,  
 48 this results in errors in soil and litter moisture of  $\pm 0.17\%$   
 49 and  $\pm 0.58\%$ , respectively.

#### 50 3.2.3 Sample heterogeneity

51 As an attempt to account for the heterogeneity of the  
 52 medium in our results, we tested five different types of  
 53 measurements:

**Table 3.** Average values and standard deviations of the measured permittivity for specific moisture contents of the litter or soil sample.

	Moisture	Average value	Standard deviation
$\epsilon'$ soil	40%	19.66	0.4
$\epsilon''$ soil	40%	2.95	0.14
$\epsilon'$ litter	16.6%	2.53	0.1
$\epsilon''$ litter	16.6%	0.16	0.02

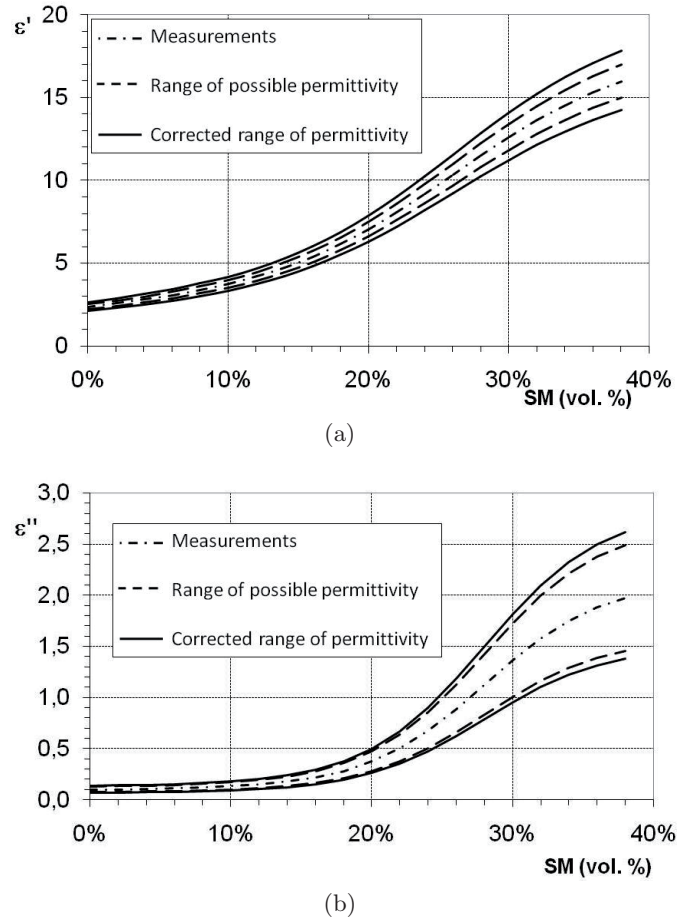
- 1 – No. 0: initial measurement;
- 2 – No. 1: the sample is taken out of the guide and reinstalled in the guide before measuring the permittivity;
- 3 – No. 2: the sample is taken out of the guide, turned 180° and positioned back in the guide before measuring the permittivity;
- 4 – No. 3: the sample is modified (the material is mixed inside the guide) before measuring the permittivity;
- 5 – No. 4: the sample is modified, taken out of the guide and reinstalled in the guide before measuring the permittivity;
- 6 – No. 5: the sample is mixed, taken out of the guide, turned 180° and reinstalled in the guide before measuring the permittivity.

The tests were made for various moisture conditions. Examples of the results obtained for one moisture content for the litter and for soil samples are given in Table 3.

Taking the results of all moisture conditions together, it was possible to estimate the standard deviation due to the heterogeneity of the medium. This value was then considered in the final result through the form of a range around each measured value of permittivity.

### 3.3 Permittivity ranges

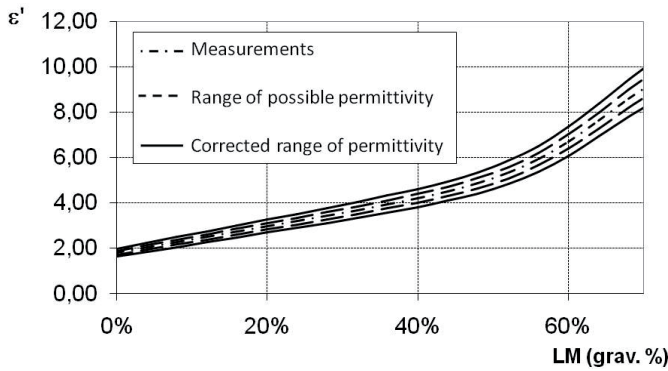
The various errors or measurement variations presented above led to the definition of a range of permittivity which changes according to the moisture content of the considered medium, instead of a sole curve describing the permittivity changes as a function of the sample moisture content. Two ranges were defined, the first one was called the range of possible permittivities and the second the corrected range of permittivity. The first range includes the observed measurement fluctuations (accounting for the heterogeneity of the medium) while the second additionally includes the measurement errors. The first range is obtained by adding the estimated standard deviation to the measured values (see Sect. 3.2.3). Then the second range is obtained by adding the instrumental error (see Sect. 3.2.1) and the error due to the sample weighing procedure (see Sect. 3.2.2) to this first range. These results are presented in Figures 9 and 10. In these figures, the dashed lines are the boundaries of the range of possible permittivities and the continuous lines represent the permittivity range including all the listed errors. The measurements were done at different moisture contents (see



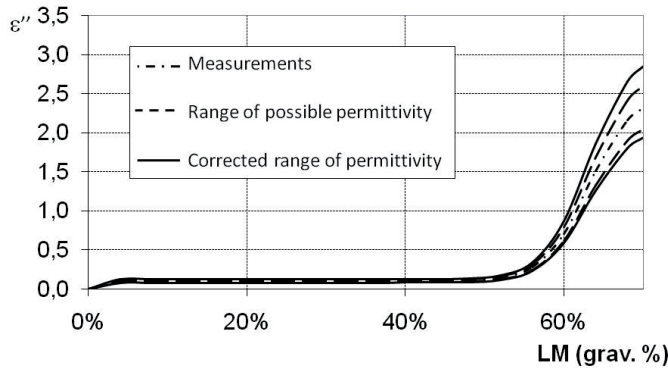
**Fig. 9.** (a) Range of the real part of the soil permittivity. (b) Range of the real and imaginary part of the soil permittivity.

previous study in Sect. 3.1) and the curves were obtained by interpolating computed values between two successive moisture contents.

Now that ranges of permittivity have been computed taking into account measurement errors and sample heterogeneities, measured values were again compared against simulated values using the Mironov soil dielectric model [20] in Figures 11a–11b. It can be seen that the estimated range of the measured values of  $\epsilon'$  are in good agreement with the Mironov simulations using a sand fraction of 70% (Fig. 11a). Also, it can be seen (Fig. 11b) that the higher limit of the range of measured values of  $\epsilon''$  is relatively close to the Mironov simulations using a sand fraction of 70% or 80%. Differences between measured and simulated values of  $\epsilon''$  could be due to the effects of soil heterogeneities (for instance the presence of organic matter) and density (the sample compactness may affect the value of the measured  $\epsilon''$ ), which are not taken into account in the simulations.



(a)



(b)

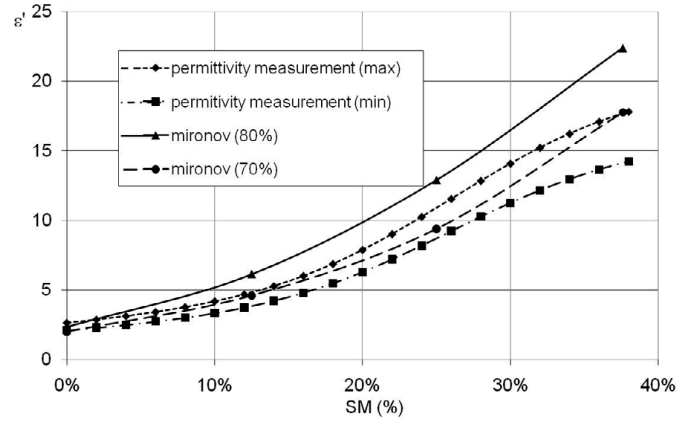
**Fig. 10.** (a) Range of the real part of the litter permittivity. (b) Range of the imaginary part of the litter permittivity.

### 3.4 Simulation of the “Les Landes” surface microwave emissivity

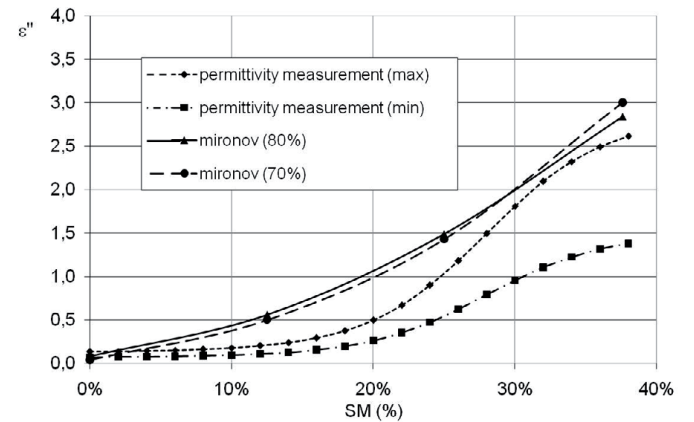
In this section, we investigated the effect of litter on the surface microwave emissivity. Simulations were made with the coherent and incoherent models for soil and litter conditions corresponding to those of the Les Landes forest. We used the dielectric measurements made over soil and litter and described in the previous section. The simulations were made for a system of one or two layers (soil or soil-litter) whose thicknesses is semi-infinite for soil and varies between 3 and 10 cm for litter. Ground measurements made at the same test site during a 6 month period and for varying wetness conditions made it possible to compute an approximate relationship between the volumetric moisture of the soil ( $SM$ ) and the gravimetric moisture of litter ( $LM$ ) [5]:

$$LM(\text{grav. \%}) = 2.7201 SM(\text{vol. \%}) - 8.6223. \quad (18)$$

This relationship was used in the current study and changes in  $LM$  were directly derived from changes in  $SM$ . In the simulations, the volumetric soil moisture content varied between 0% and 30%, resulting in litter moisture contents between 0% and 73%. We used both the coherent and incoherent models, defined in the previous sections, to compute the emissivity of the soil-litter system. The re-



(a)



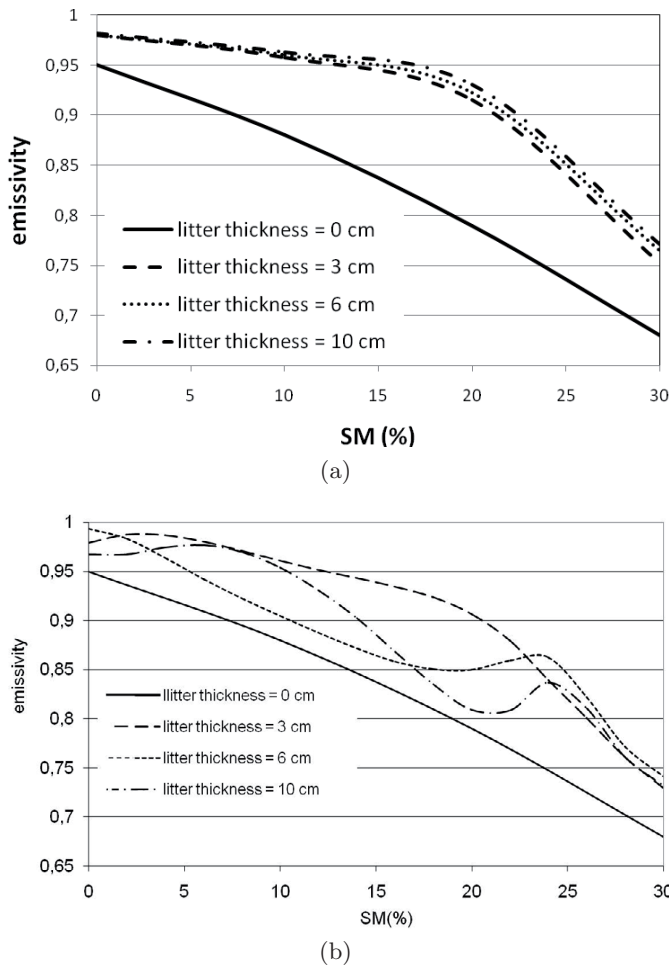
(b)

**Fig. 11.** (a) Range of the real part of the soil permittivity vs. Mironov model. (b) Range of the imaginary part of the soil permittivity vs. Mironov model.

sulting effects of the litter layer thickness on the emissivity of the soil-litter system are illustrated in Figures 12a–12b.

For both models, it can be seen in these figures that the litter characteristics, in terms of moisture content and thickness, have a strong influence on the emissivity of the soil-litter system. The emissivity of a soil surface overlaid by a litter layer is always higher than that of a bare soil, considering both model simulations and all possible configurations in terms of soil moisture or litter thickness. When the litter thickness increases, two inverse effects affect the soil-litter emission: (i) a decrease in soil contribution due to an increased attenuation of the soil emission by the litter layer and (ii) an increase in litter emission due to the increase in litter biomass [9]. It seems that the effects of litter self-emission are the most important so that the emissivity of the soil-litter system is larger than that of the soil surface alone.

However, except for this result, predictions given by both models are generally quite different. Using the incoherent model, simulations for a litter thickness of 3, 6 or 10 cm produced almost the same emissivity values and



**Fig. 12.** Emissivity of the soil-litter system computed as a function of soil moisture for several values of the litter thickness (0, 3, 6 and 10 cm) using the incoherent (a) and coherent (b) model.

emissivity is found to be a decreasing function of soil moisture (and litter moisture through Eq. (18)).

Conversely, using the coherent model, the emissivity is not a decreasing or increasing function of the litter thickness or moisture content. For instance, for  $SM \leq 20\%$ , the emissivity of the soil-litter system for a litter thickness of 3 cm is predicted to be larger than for a litter thickness of 6 or 10 cm. Also, small “peaks” in the function relating emissivity to  $SM$  can be seen for values of  $SM$  close to 25% (for a litter thickness of 6 or 10 cm). It is likely that all these effects obtained with the coherent model are due to coherent interference effects. The pattern of oscillation corresponding that these “peaks” is similar to that predicted by coherent radiative transfer models for a layered media with sharp dielectric boundaries [21,22], such as the soil-litter and litter-air interfaces considered in this study.

It is likely that such coherent interference effects are not so marked in natural environment as such “sharp” interfaces do not exist, in relation with the natural spatial variations in litter characteristics (in terms of thickness, moisture content, composition, structure, etc.). However

they might not be completely absent, as predicted by the incoherent model, which neglects all possible coherent interference effects.

In a second step the soil-litter emissivity was simulated accounting for heterogeneities of the litter and soil media and for uncertainties in the measurements of the litter and soil dielectric constants as shown in Figures 9 and 10. To do this, each measured permittivity range was introduced into the models (coherent and incoherent) and then the resulting emissivity range was computed. A value of 3 cm for the litter layer thickness was used as this value is close to the actual (spatially averaged) value measured in the *Les Landes* forest. The resulting soil-litter emissivity trend as a function of  $SM$  is given in Figure 13.

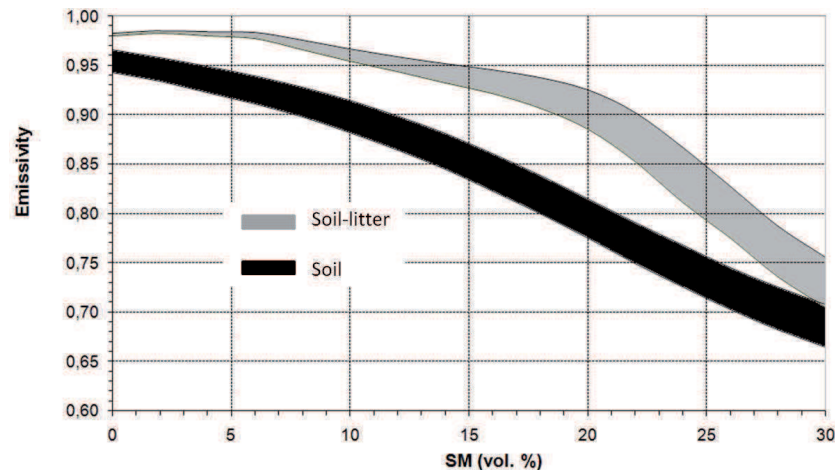
In this figure, the ranges of computed emissivity for the soil-litter (grey zone) and bare soil (black zone) system are presented. The large effects of the litter on the global soil-litter emissivity can be noted. Errors on litter and soil permittivity measurements lead to variations in the emissivity calculations (grey zone) up to  $\sim 0.025$  (at  $SM = 30\%$ ), which corresponds to an error of 3.7% relatively to the value of the soil-litter emissivity ( $\sim 0.68$ ). This value is small in comparison with effects of litter overlying the bare soil surface.

For instance, the presence of the litter layer (for  $SM = 30\%$  and a 3 cm litter layer thickness) lead to an increase in emissivity of about 0.09, compared to the value for the bare soil surface. This increase corresponds to a variation of 6.5% relatively to the average value for this soil moisture ( $SM = 30\%$ ) of the calculated soil and soil-litter emissivity. In the worst case (minimum value of soil emissivity and maximum value of the soil-litter emissivity computed for the same soil moisture) this increase in emissivity due to the presence of litter may reach  $\sim 0.153$ , corresponding to a relative variation of emissivity of  $\sim 20.4\%$  ( $SM \approx 22\%$ ).

## 4 Summary and conclusion

In this study, a technique for measuring the permittivity of soil and litter media was investigated. This technique was based on a rectangular waveguide containing the soil or litter sample and takes into account the heterogeneity of natural media. In this study, the measurements were carried out over soil and litter samples which were collected in a coniferous forest in the region of *Les Landes*. The measurements of the soil and litter dielectric constants were used in two models (an incoherent and a coherent numerical model) to simulate the microwave emissivity of the soil-litter system. Using a specific relationship between litter moisture and soil moisture, estimated from ground measurements over the same forest type these simulations allowed us to evaluate the effects of soil moisture content, litter moisture content and litter thickness on the emissivity of such a system.

It was found that variations in the dielectric constant of the litter and soil media had a strong influence on the resulting soil-litter emissivity. Using the incoherent model, the simulations showed that the soil-litter emissivity generally increases as a function of litter thickness. This trend



**Fig. 13.** Soil-litter and bare soil emissivity computed accounting for the permittivity ranges computed in the previous sections – coherent model simulation.

1 results from two inverse effects that affect the soil-litter  
 2 emission: (i) a decrease in the soil contribution due to  
 3 an increased attenuation of the soil emission by the lit-  
 4 ter layer and (ii) an increase in litter emission due to the  
 5 increase in litter moisture content. The fact that the emis-  
 6 sivity of the soil-litter system generally increases as a func-  
 7 tion of litter layer thickness indicates that the effects of  
 8 litter self-emission are important. However, using the co-  
 9 herent model, the soil-litter emissivity was found to be a  
 10 non monotonous function of litter thickness. This result  
 11 could be explained by resonance effects parameterized by  
 12 the ratio of the radiation wavelength (around 20 cm at  $L$ -  
 13 band in free space) and the litter thickness. In particular,  
 14 the general decreasing form of the relationship relating the  
 15 emissivity to the soil moisture content ( $SM$ ) was affected  
 16 by small peaks close to the value  $SM = 25\%$ . Consider-  
 17 ing the disagreements between the simulations based on  
 18 the two modelling approaches (coherent and incoherent),  
 19 more studies based on experimental measurements are re-  
 20 quired to define which modelling approach is best suited to  
 21 simulate the emissivity of the soil-litter system in natural  
 22 environment.

23 In a second step of the study, particular attention was  
 24 given to measurement errors in the calculation of per-  
 25 mittivity and emissivity. Uncertainties in the values of  
 26 soil-litter emissivity, computed as a function of  $SM$ , were  
 27 evaluated. It was found that these uncertainties were rela-  
 28 tively low in comparison with the range of emissivity vari-  
 29 ations due to the effects of soil moisture (between dry and  
 30 wet surface conditions) or litter thickness (between 3 and  
 31 10 cm in this study).

32 All the simulations carried out in this study were done  
 33 for uniform conditions of the soil-litter system, i.e. assum-  
 34 ing no heterogeneities in the soil structure, no soil or litter  
 35 roughness (the soil-litter and litter-air interfaces were as-  
 36 sumed to be plane) and no moisture or thermal gradients  
 37 in the soil and litter media. Future studies will consider  
 38 more realistic conditions of soil and litter heterogeneity.  
 39 In the present study a uniform litter layer was consid-  
 40 ered (of 3, 6 or 10 cm thickness) although it was shown

that the thickness of this layer significantly influenced the  
 emissivity of the soil-litter system. In the natural envi-  
 ronment, changes in the litter thickness from  $\sim 1$  cm to  
 $\sim 15$  cm generally occurred in the forest at small spatial  
 scales ( $\sim 1$  m) due to natural changes in soil roughness, to-  
 pography, tree density, etc. Therefore, further studies will  
 consist of studying long-term variations of the soil-litter  
 emission and will account for a variety of conditions in  
 terms of thermal and moisture gradients within the soil  
 and litter layers, as well as specific effects such as frost.

## References

1. ESA website: <http://www.esa.int/esaLP/LPsmos.html> 52
2. CNES website: <http://www.cnes.fr/web/821-smos.php> 53
3. EADS Space website: <http://www.space.eads.net/>.  
Link: Press centre/Press documents/Flight Model of the  
SMOS payload, built by EADS Astrium in Spain, ready  
for final testing at ESA, January 16, 2007 54-57
4. ESA, *Algorithm Theoretical Based Document (ATBD),  
SMOS level 2 processor for soil moisture*, Prepared  
by the Expert Support Laboratories (CESBIO,  
IPSL-Service d'Aéronomie, INRA-EPHYSE, Reading  
University, Tor Vergata University, 2006), p. 34,  
<http://www.cesbio.ups-tlse.fr/us/indexsmos.html> 58-63
5. J.P. Grant, J.P. Wigneron, A.A. Van de Griend, A.  
Kruszewski, S.S. Søbjaerg, N. Skou, *Remote Sens. Environ.*  
**109**, 10 (2007) 64-66
6. T.J. Jackson, T.J. Schmugge, *Remote Sens. Environ.* **36**,  
203 (1991) 67-68
7. T.J. Schmugge, J.R. Wang, G. Asrar, *IEEE Trans. Geosci.  
Remote Sens.* **26**, 590 (1988) 69-70
8. K.Saleh, J.-P. Wigneron, P. de Rosnay, J.-C. Calvet, M.-  
J. Escorihuela, Y.H. Kerr, P. Waldteufel, *Remote Sens.  
Environ.* **101**, 127 (2006) 71-73
9. J.-P. Wigneron, Y.H. Kerr, P. Waldteufel, K. Saleh, M.-  
J. Escorihuela, P. Richaume, P. Ferrazzoli, P. De Rosnay,  
R. Gurney, J.-C. Calvet, J.P. Grant, M. Guglielmetti, B.  
Hornbuckle, C. Mätzler, T. Pellarin, M. Schwank, *Remote  
Sens. Environ.* **107**, 639 (2007) 74-77

- 1 10. J.P. Wigneron, J.-C. Calvet, T. Pellarin, A.A. Van de  
2 Griend, M. Berger, P. Ferrazzoli, *Remote Sens. Environ.*  
3 **85**, 489 (2003)
- 4 11. F.T. Ulaby, R.K. Moore, A.K. Fung, *Microwave remote*  
5 *sensing: Active and passive, From theory to Applications*,  
6 Vol. III (Artech House Inc., 1986), p. 2099
- 7 12. W.B. Weir, *Proc. IEEE* **62**, 33 (1974)
- 8 13. F. Demontoux, G. Ruffié, J.P. Wigneron, Amélioration  
9 de l'étude de l'humidité de sols par radiométrie.  
10 Caractérisation et modélisation diélectriques de profils  
11 géologiques, *Journées Nationales Microondes*, Nantes,  
12 2005
- 13 14. P. Sabouroux, Ph.D. thesis, University of Bordeaux 1,  
14 1992, pp. 34–36
- 15 15. F.T. Ulaby, R.K. Moore, A.K. Fung, *Microwave remote*  
16 *sensing: Active and passive, Microwave Remote Sensing,*  
17 *Fundamentals and Radiometry*, Vol. I (Addison-Wesley  
18 Publishing Company, 1981), pp. 238–244
- 19 16. Ansoft website: <http://www.ansoft.com>. HFSS online  
20 help, assigning boundaries
- 21 17. M.C. Dobson, F.T. Ulaby, M.T. Hallikainen, M.A. El-  
22 Rayes, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **23**, 44 (1985)
- 23 18. Operation Manual “Vector Network Analyser Model  
24 373XX” Appendix C, Performance Specifications P/N  
25 10410-00183 (Anritsu CO, Nov. 1998 ©1996)
19. J.P. Wigneron, Doctorat Université P. Sabatier (Toulouse,  
26 1993), pp. 17–20 27
20. V.L. Mironov, M. Craig Dobson, V.H. Kaupp, S.A.  
28 Koramov, V.N. Kleshchenko, *IEEE Trans. Geosci. Remote*  
29 *Sens.* **42**, 773 (2004) 30
21. F.T. Ulaby, R.K. Moore, A.K. Fung, *Microwave remote*  
31 *sensing: Active and passive, From Theory to applications,*  
32 Vol. III (Addison-Wesley Publishing Company, 1981),  
33 pp. 1524–1531 34
22. T.J. Jackson, T.J. Schmugge, P.E. O'Neill, M.B.  
35 Parlange, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **36**, 1376  
36 (1998) 37
23. V.L. Mironov et al., *Physically and Mineralogically Based*  
38 *Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils*, *IEEE*  
39 *Trans. Geosci. Remote Sens.*, accepted for publication  
40 (2008) 41
24. M. Guglielmetti, M. Schwank, C. Mätzler, C. Oberdörster,  
42 J. Vanderborght, H. Flübler, *IEEE Trans. Geosci. Remote*  
43 *Sens.* **46**, 3 (2008) 44
25. M. Schwank, M. Guglielmetti, C. Mätzler, H. Flübler,  
45 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **46**, 7 (2008) 46



# Evaluating an Improved Parameterization of the Soil Emission in L-MEB

Jean-Pierre Wigneron, *Senior Member, IEEE*, André Chanzy, Yann H. Kerr, *Senior Member, IEEE*, Heather Lawrence, Jiancheng Shi, *Senior Member, IEEE*, Maria Jose Escorihuela, Valery Mironov, *Member, IEEE*, Arnaud Mialon, François Demontoux, *Member, IEEE*, Patricia de Rosnay, and Kauzar Saleh-Contell

**Abstract**—In the forward model [L-band microwave emission of the biosphere (L-MEB)] used in the Soil Moisture and Ocean Salinity level-2 retrieval algorithm, modeling of the roughness effects is based on a simple semiempirical approach using three main “roughness” model parameters:  $H_R$ ,  $Q_R$ , and  $N_R$ . In many studies, the two parameters  $Q_R$  and  $N_R$  are set to zero. However, recent results in the literature showed that this is too approximate to accurately simulate the microwave emission of the rough soil surfaces at L-band. To investigate this, a reanalysis of the PORTOS-93 data set was carried out in this paper, considering a large range of roughness conditions. First, the results confirmed that  $Q_R$  could be set to zero. Second, a refinement of the L-MEB soil model, considering values of  $N_R$  for both polarizations (namely,  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$ ), improved the model accuracy. Furthermore, simple calibrations relating the retrieved values of the roughness model parameters  $H_R$  and ( $N_{RH} - N_{RV}$ ) to the standard deviation of the surface height were developed. This new calibration of L-MEB provided a good accuracy (better than 5 K) over a large range of soil roughness and moisture conditions of the PORTOS-93 data set. Conversely, the calibrations of the roughness effects based on the Choudhury approach, which is still widely used, provided unrealistic values of surface emissivities for medium or large roughness conditions.

**Index Terms**—Microwave remote sensing, radiometry, roughness, soil moisture (SM), Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), soil surface.

## I. INTRODUCTION

THE EUROPEAN Space Agency’s Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission was recently launched (November 2009), and it provides global microwave brightness temperature observations at L-band, in dual polarization, and under a range of viewing angles both over land and water surfaces [1]. For the purpose of relating the observed brightness temperatures to soil moisture (SM), the L-band microwave emission of the biosphere (L-MEB) model has been specifically developed to simulate the L-band microwave emission over land surfaces [2]. L-MEB is the result of an exhaustive review of the “state-of-the-art” modeling approaches in the field of passive microwaves, with the objective of being accurate while remaining simple enough for operational use at global scale. It is the forward model used in the SMOS level-2 processor in order to produce geophysical products, e.g., SM and vegetation characteristics (the optical thickness  $\tau$  and the single scattering albedo  $\omega$ , for instance). Over vegetation, the core of L-MEB is the  $\tau - \omega$  approach which takes into account the attenuation and scattering effects within the canopy layer overlaying the ground.

To simulate soil emission, L-MEB was initially based on a semiempirical equation based on three parameters: the roughness height ( $H_R$ ), a polarization mixing parameter  $Q_R$ , and the exponent  $N_R$  [3]. This approach was a refinement of the one that is only based on the  $H_R$  and  $Q_R$  parameters [4], which is extensively used in the literature [5]–[7]. The authors in [8] carried out a detailed analysis of the large PORTOS-93 data set, which was obtained during a three-month experiment covering seven surface roughness conditions (representing the total range which can be expected on agricultural fields) and a large range in SM and temperature conditions. They found out that both  $Q_R$  and  $N_R$  could be set to zero at L-band. This result was generally in good agreement with most of the studies based on a large experimental data set, including multiangular measurements at L-band.

Since the study in [8], several important results have been obtained. First, based on model simulations, the study in [9] showed that emissivity decreases with increasing roughness conditions at V polarization and at large angles (in this paper, large incidence angles will be referred to as angles  $\theta \geq 40^\circ$ ).

Manuscript received January 13, 2010; revised May 20, 2010 and July 23, 2010; accepted August 22, 2010. Date of publication November 9, 2010; date of current version March 25, 2011. This work was supported in part by Terre Océan Surfaces Continentales et Atmosphère (TOSCA) [Centre National d’Etudes Spatiales (CNES), France], by the Russian Foundation for Basic Research under Project No. 09-05-91061, and by the European Space Agency in the framework of the preparation and cal/val activities of the Soil Moisture and Ocean Salinity mission.

J.-P. Wigneron is with the Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), UR1263 Ecologie Fonctionnelle et Physique de l’Environnement (EPHYSE), 33140 Villenave d’Ornon, France (e-mail: wigneron@bordeaux.inra.fr).

A. Chanzy is with the Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes (EMMAH), Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), 84914 Avignon Cedex 9, France.

Y. H. Kerr and A. Mialon are with the Centre d’Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO), 31401 Toulouse, France.

H. Lawrence is with the Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), UR1263 Ecologie Fonctionnelle et Physique de l’Environnement (EPHYSE), 33140 Villenave d’Ornon, France, and also with the Laboratoire de l’Intégration du Matériau au Système (IMS), Bordeaux, France.

J. Shi is with the University of California Santa Barbara, Santa Barbara, CA 93106 USA.

M. J. Escorihuela is with the isardSAT, 08042 Barcelona, Spain.

V. Mironov is with the Kirensky Institute of Physics, 660036 Krasnoyarsk, Russia.

F. Demontoux is with the Laboratoire de l’Intégration du Matériau au Système (IMS), Bordeaux, France.

P. de Rosnay is with the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, RG2 9AX Reading, U.K.

K. Saleh-Contell was with the Centre d’Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO), 31401 Toulouse, France. She is now with Centre for the Development of Industrial Technologies (CDTI), Madrid, Spain.

Digital Object Identifier 10.1109/TGRS.2010.2075935

The simulations were based on a parameterization of an advanced version of the integral equation model (IEM) [10], which is a physical approach that seeks solutions to Maxwell's equations by considering the boundary conditions on a rough surface. This result could not be reproduced with the L-MEB soil module if the  $Q_R$  parameter was set to zero. The conclusion in [9] was solely based on theoretical analyses and was not validated against the experimental data, but they clearly contradict the assumptions made in [8], which considered that  $Q_R = 0$ . The authors in [11] also found out that IEM led to increasing reflectivity (i.e., decreasing emissivity), with increasing roughness at V polarization and at large angles. They noted that increasing reflectivity with IEM simulations can be explained as arising from polarization crosstalk effects, which change a horizontally or a vertically polarized wave into an elliptically polarized wave. Polarization crosstalk is thought to be most pronounced with vertical polarization and with observation angles close to the Brewster angle ( $\theta \geq 50^\circ$ ). However, they could not confirm these results based on experimental data or simulations with the air-to-soil transition model. They assumed that the effects of polarization crosstalk might be overrated by the IEM model. Thus, the sensitivity of the soil reflectivity at V polarization and at large angles to increasing roughness still appears to be an open question to date.

Another new and important result was recently published [12]. The latter study was based on long-term measurements acquired over a rather smooth bare field during the SMOSREX experiment [13]. The study showed that the values of the  $N_R$  coefficient for both polarizations (i.e.,  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  at V and H polarizations) should be distinguished, and the calibration of  $N_R$  provided the following values:  $N_{RH} \approx 1$  and  $N_{RV} \approx -1$ . Accounting for these new results, the authors in [2] calibrated the L-MEB soil module based on the experimental data sets acquired over a variety of crop fields by different remote sensing groups. They confirmed that, by considering that the exponent  $N_R$  depends on polarization, it led to improved results in the SM retrieval studies.

In this paper, we carried out a reanalysis of the PORTOS-93 data set accounting for these recent results. As mentioned earlier, this multiangular data set at L-band includes a very large range of soil conditions (roughness, temperature, etc.), which has no equivalent, to our knowledge. The objectives of this paper are the following:

- 1) to analyze the changes in soil emissivity with increasing surface roughness conditions, particularly at V-polarization and at large angles, to test the conclusion in [9] against the experimental data set;
- 2) to calibrate the parameters of the L-MEB soil module (i.e.,  $H_R$ ,  $Q_R$ ,  $N_{RV}$ , and  $N_{RH}$ ) and to evaluate their sensitivity to the soil characteristics in terms of roughness, moisture content, etc. (the previous study in [8] over the same data set did not distinguish between  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$ , as mentioned earlier);
- 3) to evaluate different approaches in calibrating the L-MEB soil module over the PORTOS-93 data set. In particular, we will attempt to relate the L-MEB soil parameters to the standard deviation of the height ( $S_D$ ) for operational

purposes.  $S_D$  is the most common parameter in characterizing the soil surface roughness. It could be estimated directly or indirectly from the soil properties and tillage operation calendar.

The study in the following will follow these main three steps before concluding.

## II. MATERIAL AND METHOD

### A. Experimental Data Set

The study was based on measurements acquired by the PORTOS radiometer over seven bare field plots at the Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) Avignon Remote Sensing test site during the spring of 1993 (from April 20 to July 10). The fields were totally bare: there were no litter or vegetation elements at the surface. The surface roughness conditions varied from a rough freshly plowed field to a very smooth surface by preparing the fields using different combinations of several tillage tools (Table I). Field 17 corresponded to very specific artificial conditions: it was crushed and compressed by a roadroller to obtain a surface as smooth as possible. Over each field, a large range in the SM conditions was obtained by irrigating the plots and then by letting them dry out. A very detailed description of the data set was made in [8], and we will quickly summarize here the main characteristics of the used data set.

The observations were acquired using the multifrequency passive microwave radiometer PORTOS which was mounted on a 20-m crane boom, and observations were carried out over  $18 \times 40$  m bare field plots. In this paper, only the data acquired at L-band (H and V polarizations) and at four incidence angles ( $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ , and  $40^\circ$ ) were considered. The 3- and 20-dB beamwidths were, respectively,  $12.5^\circ$  and  $30^\circ$ . At a height of 20 m, this corresponds to a footprint of about 10 m at nadir for the 3-dB beamwidth. Absolute calibrations were regularly made (every 2 or 3 weeks) over calm water surfaces and over eccosorb slabs either when it is at ambient temperature or when it is immersed into liquid nitrogen. Calibrations were also made using a load maintained at ambient and liquid nitrogen temperature (77 K) and connected to the antenna feed. The absolute accuracy of the measurements was estimated to be about 3 K at L-band based on a single calibration rule for the whole campaign, accounting for the temperatures of the cable (linking the antenna to the radiometer) and the antenna.

The field plots consisted of silty clay loam soil with 62% silt, 11% sand, and 27% clay. The soil variables were regularly sampled during the campaign. Concurrent with the radiometric measurements, soil temperature and moisture (SM) profiles were obtained. Due to the specific conditions of cultivation (irrigations were made during a hot and dry summer), a rather large uncertainty was associated with the gravimetric moisture measurements. This uncertainty was larger for field 17: its artificially smoothed surface and its high density favored the presence of many puddles after rainfalls or irrigations, leading to a large spatial heterogeneity in surface moisture during the drying out periods.

TABLE I  
MAIN CHARACTERISTICS OF THE SEVEN FIELD PLOTS

Field N°	Dry Bulk Density (2-4 cm) $\rho_b^*$ (g/cm <sup>3</sup> )	Roughness Characteristics				Surface Type	
		Std Deviation of height $S_D$ (mm) mean, <i>std</i>		Autocorrelation function (general type)	Correlation Length $L_C$ (mm) mean, <i>std</i>		
6	1.30	59.37	13.77	Intermediate between Gaussian & Exponential	67.32	12.54	P. (fast)
9	1.35	4.76	1.89	idem	63.05	19.01	P, R. (slow)
11	1.43	8.39	1.24	idem	31.47	20.14	P, R., H. (fast)
15	1.30	8.96	2.84	Exponential	71.5	61.9	P, R. (fast), H. (slow)
16	1.30	47.43	4.76	Intermediate	61.72	4.10	P. (fast)
17	1.42	4.57	1.98	Gaussian	206.06	51.49	P, R. (slow) , Roadrolled
18	1.30	19.15	5.08	Intermediate	65.75	45.6	P, P. (fast), H. (slow)

\* Estimated density.

P : Plowed field using a spading machine (at fast or slow speed)

H. : Harrowed field (at fast or slow speed)

R. : Rotary harrowed field (at fast or slow speed)

The surface roughness characteristics were measured with an automated laser profilometer which recorded ten height profiles with 2-mm sampling intervals along a 2-m transect over each field. The average standard deviation of the height ( $S_D$  in millimeters) and the correlation length ( $L_C$  in millimeters) computed from these height profiles are given in Table I. The types of autocorrelation functions were found to be dependent on the fields: they were close to a Gaussian type for field 17, close to an exponential type for field 15, and intermediate between Gaussian and exponential types for the other fields [14].

### B. Modeling

The roughness model parameters were estimated by comparing the emissivity measured with PORTOS and the simulated emissivity. The measured surface microwave emissivity  $e_{GP}$  ( $p = V$  or  $H$ , respectively, for the vertical or horizontal polarization) of each bare field was computed from the brightness temperature measurements ( $T_{BP}$ ) as [7], [15]

$$e_{GP} = (T_{BP} - T_B^{SKY}) / (T_G - T_B^{SKY}) \quad (1)$$

where  $T_B^{SKY}$  is the downwelling sky radiation, which includes both the atmospheric emission and extragalactic radiation, and  $T_G$  is the effective soil temperature.

$T_B^{SKY}$  was modeled very simply as a function of the site altitude (about 20 m) and the air temperature at the surface from the equations developed in [16]. The soil effective temperature  $T_G$  was computed as a function of the soil temperature at the surface and at the depth. Over the INRA Avignon soil type, it was found that  $T_G$  was very close (within  $\pm 0.5$  K) to the soil temperature measured at 5 cm ( $T_{S-5cm}$ ) below the surface [8].  $T_G$  was set to this latter value in the present study.

Surface emissivity was modeled using the very simple approach proposed in the L-MEB model as

$$e_{GP}(\theta) = 1 - r_{GP}(\theta) \quad (2)$$

where  $\theta$  is the incidence angle and the soil reflectivity  $r_{GP}$  was written as a function of the reflectivity of a plane surface ( $r_{GP}^*$  and  $r_{GQ}^*$ , with the subscripts P and Q = V or H for the vertical and horizontal polarizations) and the roughness model parameters  $Q_R$ ,  $H_R$ , and  $N_R$  as [3]

$$r_{GP}(\theta) = [(1 - Q_R)r_{GP}^*(\theta) + Q_R r_{GQ}^*(\theta)] \exp(-H_R \cos^{NR}(\theta)). \quad (3)$$

In this equation,  $H_R$  parameterizes the intensity of the roughness effects (soil reflectivity decreases as  $H_R$  increases),  $Q_R$  parameterizes the polarization mixing effects (the difference between the reflectivity of the H and V polarizations decreases as  $Q_R$  increases), and  $N_R$  is a parameter that makes it possible to modulate the trend of the reflectivity  $r_{GP}$  as a function of the incidence angle  $\theta$ . The reflectivity of a plane surface  $r_{GP}^*$  was computed using the Fresnel equations as a function of the incidence angle  $\theta$  and the soil dielectric permittivity. The latter was computed as a function of SM, measured over a 0–2-cm surface layer, soil bulk density  $\rho_b$ , and percentage of sand and clay using the model of Dobson *et al.* [17] and a new version of the model of Mironov *et al.*, accounting for the effect of soil temperature [18], [19]. The authors in [8] considered that both  $Q_R$  and  $N_R$  could be set to zero at L-band. This result was generally in good agreement with most of the studies based on a large experimental data set, including multiangular measurements. Initial studies have considered that  $N_R = 2$  [4], [20]. In a more detailed study, the authors in [21] showed that the data set used in [4] was not adequate in testing the  $\theta$  dependence of the surface roughness and that the  $\cos^2(\theta)$  dependence (i.e.,  $N_R = 2$ ) was much too strong. In [21],  $N_R = 0$  was found to be consistent with the measurements over a  $\theta$  range of  $10^\circ$ – $60^\circ$  at three frequencies (1.4, 5, and 10.7 GHz). The authors in [22] also considered that  $N_R = 0$  for rough surfaces at L- and C-bands. Considering that  $Q_R = 0$  at L-band is also in agreement with most of the published studies based on a large experimental data set [21], [22]. Note that the value of  $Q_R$  was found to increase with frequency, and it was a nonzero parameter in the studies in [3] and [21] at higher frequencies. Considering that both  $Q_R$  and  $N_R$  could be set to zero led to the following equations used in [8]:

$$r_{GP}(\theta) = r_{GP}^*(\theta) \cdot \exp(-H_R). \quad (4)$$

However, as noted in the introduction, using this equation, the emissivity of a rough soil (i.e., for  $H_R > 0$ ) will always be higher than that of a “Fresnel” surface. The  $Q_R$  parameter has to be used, as in (3), to simulate the possible decrease in emissivity with increasing surface roughness at V polarization and at large angles ( $\theta \geq 40^\circ$ ), as found in [9] based on IEM simulations. Also, the authors in [12] showed that the values of the  $N_R$  coefficient for both polarizations (i.e.,  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  at V and H polarizations, respectively) should be distinguished. This result was initially found from measurements over the bare soil of the SMOSREX experiment [12] and was confirmed from microwave measurements acquired over a large variety of crop fields [2]. In the following, we accounted for the results found in [9] and [12], and the soil emission was modeled using (3), considering that the  $N_R$  coefficient should be distinguished for both polarizations (i.e., using  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  at V and H polarizations).

In order to illustrate the effect of the  $N_{RP}$  parameter at both polarizations, soil emissivity is shown as a function of the incidence angle in Fig. 1(a) and (b) using  $S_M = 0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$  for three values of  $H_R$  ( $H_R = 0$  for smooth soil,  $H_R = 0.2$  for small roughness effects, and  $H_R = 0.6$  for large roughness

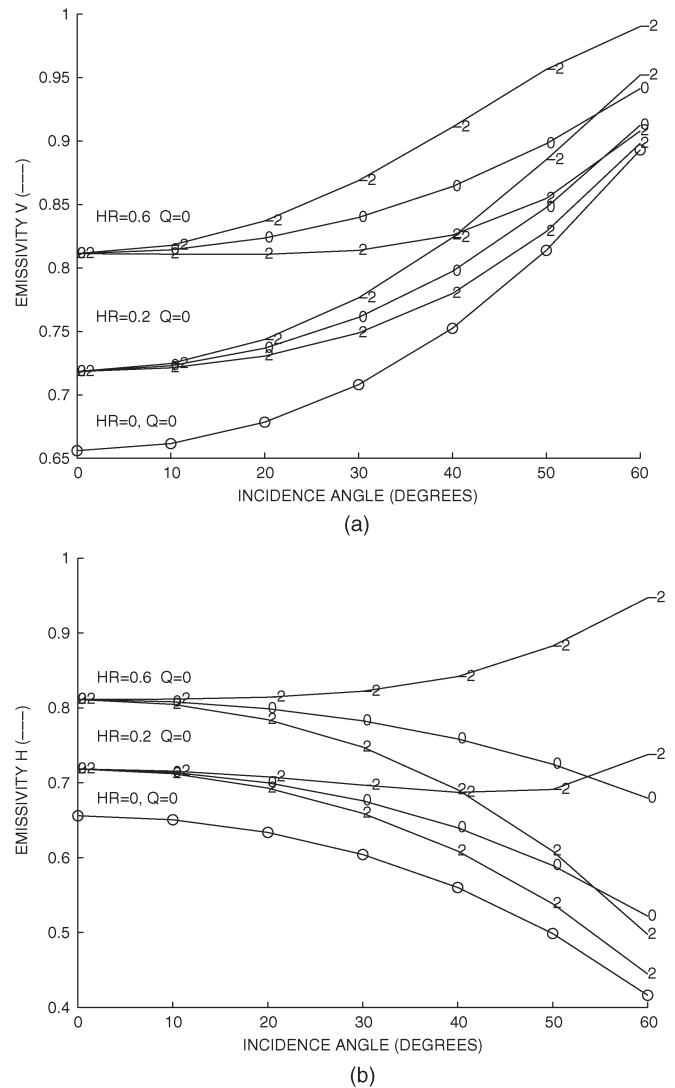


Fig. 1. (a)–(b) Simulation of emissivity as a function of the incidence angle at both (a) V and (b) H polarizations for three values of  $H_R$  ( $H_R = 0, 0.2,$  and  $0.6$ ) and for three values of  $N_{RP}$  ( $N_{RP} = -2, 0,$  and  $2$ ).  $Q_R$  was set to zero, and we used the soil conditions of the INRA Avignon test site ( $\rho_b = 1.3 \text{ g/cm}^3$ , sand =  $0.11$ , and clay =  $0.27$ ) and  $S_M = 0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . The value of  $N_{RP}$  is given in the plot, and the case  $H_R = 0$  (for “Fresnel” surfaces) is indicated by the symbol “O.”

effects) and for three values of  $N_{RP}$  (at both V and H polarizations;  $N_{RP} = -2, 0,$  and  $2$ ). In these figures,  $Q_R$  was set to zero. Therefore, the simulations for  $H_R = 0$  correspond to the “Fresnel” emissivity of a perfectly flat surface. It can be seen, as discussed previously, that whatever values of  $H_R$  or  $N_R$  are used, the modeled emissivity is always higher than the “Fresnel” emissivity if  $Q_R = 0$  using (3). It can also be seen that both the  $H_R$  and  $N_{RP}$  parameters have a very strong impact on the simulated soil emissivity. For instance,  $e_{GP}$  may increase by about  $\pm 0.2$  (i.e., about  $\pm 60 \text{ K}$  in terms of brightness temperature), depending on the value of  $H_R$ . Similarly, the value of  $N_{RP}$  may lead to very significant changes in emissivity at rather large incidence angles. For instance, emissivity increases by about  $0.25$  and  $0.1$ , at H and V polarizations, respectively, as  $N_{RP}$  decreases from  $2$  to  $-2$  (at  $\theta = 50^\circ$  and for  $H_R = 0.6$ ).

### C. Methodology

Over each field and for each date of measurements, the four roughness model parameters  $Q_R$ ,  $H_R$ , and  $N_{RP}$  ( $p = V$  or  $H$ ) were simultaneously retrieved from the observations. The retrievals were generally made from eight observations (referred to as an “observation phase”), which included both polarizations and four incidence angles ( $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ , and  $40^\circ$ ). It was based on the minimization of a cost function  $C_F$ , estimating the quadratic difference between the measured ( $e_{GP}^M$ ) and simulated ( $e_{GP}$ ) emissivities. The minimization routine is based on a generalized Marquardt least-square iterative algorithm, which was modified to account for uncertainties associated with model input parameters. The routine provides theoretical estimates of the standard deviations on retrieved parameters, assuming that the observed data (emissivity) and the model input parameters are affected by a Gaussian random error with a given standard deviation. The cost function  $C_F$  was computed as

$$C_F = \frac{\sum (e_{GP}^M - e_{GP})^2}{\sigma(e_{GP})^2} + \sum_i \frac{\sum (P_i^{\text{ini}} - P_i^*)^2}{\sigma(P_i)^2} \quad (5)$$

where the sum of the difference was computed using both polarizations and all available incidence angles ( $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ , and  $40^\circ$ );  $\sigma(e_{GP})$  is the standard deviation associated with the emissivity measurements;  $P_i^*$  ( $i = 1, \dots, N$ ) is the value of the retrieved parameter [ $Q_R$ ,  $H_R$ , and  $N_{RP}$  ( $p = V$  or  $H$ )];  $P_i^{\text{ini}}$  ( $i = 1, \dots, N$ ) is the initial value of each parameter in the retrieval process, which corresponds to an *a priori* estimate of the parameter  $P_i$ ; and  $\sigma(P_i)$  is the standard deviation associated with this estimate. The second term in the cost function makes it possible to account for the *a priori* information on the value of the retrieved parameters: if they are known *a priori*, the average value of the retrieved parameter and the uncertainty associated with this average (considered as a Gaussian distributed parameter) can be introduced in (5) to constrain the retrievals [2]. In (5), the value of  $P_i^{\text{ini}}$  was set to zero for all parameters. The values of the standard deviation  $\sigma(P_i)$  were set to the following values:  $\sigma(H_R) = 2$ ,  $\sigma(Q_R) = 0.2$ , and  $\sigma(N_{RV}) = \sigma(N_{RH}) = 5$ , which corresponds to low constraints in the values of the retrieved parameters.  $\sigma(e_{GP}^M)$  was set to 0.01. This latter value corresponds more or less to an estimated accuracy of about 3 K in terms of the measured brightness temperature.

Once the values of the four roughness model parameters were retrieved over each field and for each observation phase, they were compared to the ground-based measurements of the surface roughness characteristics: the standard deviation of the height ( $S_D$ ), the correlation length ( $L_C$ ), and the slope parameter  $m = S_D/L_C$ . In the first step, simplified formulations attempting to relate the retrieved roughness model parameters and the geophysical parameters ( $S_D$ ,  $L_C$ , and  $m$ ) were investigated.

In the second step, these formulations were used to develop several simplified forward models, simulating the soil microwave emission as a function of the geophysical parameters. These simplified models were evaluated and compared using different scores: the root-mean-square error (rmse) and the bias

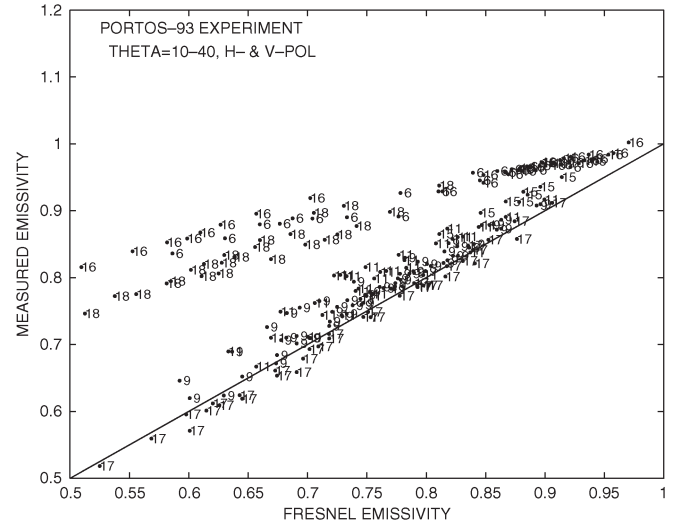


Fig. 2. Comparing the measured and Fresnel emissivities at both polarizations and for all incidence angles ( $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ , and  $40^\circ$ ). Each point is labeled by the field number.

between the measured and simulated values of the emissivity and the efficiency (or skill score), which is defined as

$$E = \left[ 1 - \left[ \frac{\sum (e_{GP} - e_{GP}^M)^2}{\sum (e_{GP} - \text{mean}(e_{GP}))^2} \right] \right] \times 100 \quad (\%) \quad (6)$$

where  $\Sigma$  denotes the sum over all values of the measured ( $e_{GP}^M$ ) and simulated ( $e_{GP}$ ) values of the soil emissivities, using all available measurements ( $N = 228$ ). Positive values of  $E$  indicate that the employed regression model is more informative than prescribing a constant value that is equal to the average of  $e_{GP}$ .

All of the values of the scores computed from the emissivity values were multiplied by a constant factor of 300 K (a rough estimation of the soil surface temperature during the campaign). This was made to provide a more concrete estimate of the model accuracy in terms of brightness temperature to the reader.

## III. RESULTS

### A. Comparing the Measured and Fresnel Emissivities

A comparison between the measured and Fresnel emissivities is shown in Fig. 2 for both V and H polarizations and all angles. The “Fresnel” emissivities were computed using the measured value of SM and the estimation of  $T_G$  at the time of the emissivity measurements. It appears that the measured emissivity values are generally higher than those of the “Fresnel” surfaces. It can be seen that some of the measured emissivity values are slightly lower than the “Fresnel” ones (by 0.03 in terms of emissivity, i.e.,  $\sim 10$  K in terms of microwave brightness temperature at the maximum). The latter generally corresponds to field 17. They were obtained for both polarizations and for all angles, and they do not correspond specifically to V polarization or to high angles.

### B. Retrievals of the Roughness Model Parameters

In the first step, all of the four roughness model parameters  $H_R$ ,  $Q_R$ ,  $N_{RV}$ , and  $N_{RH}$  were retrieved over the seven fields.

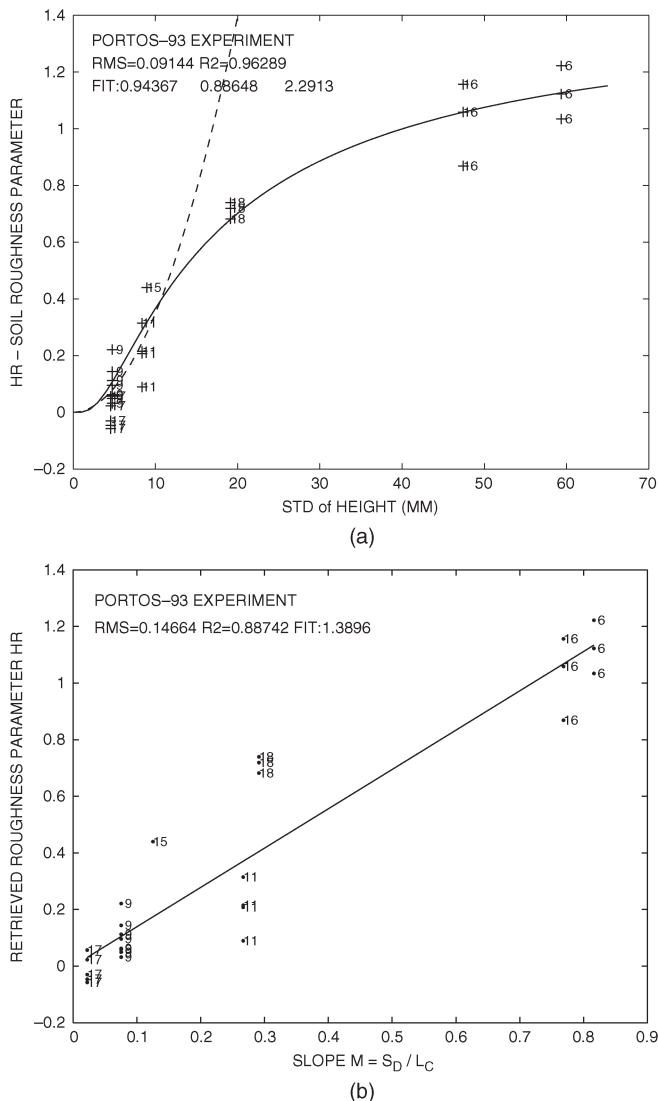


Fig. 3. (a)–(b) Retrieved values of  $H_R$  as a function of the (a) standard deviation of the height  $S_D$  and the (b) “slope parameter”  $m$  ( $m = S_D/L_C$ , i.e., the ratio between  $S_D$  and the correlation length  $L_C$ ). The best fit relation given by (7) (—) and the values of  $H_R$  computed from the formulation of [20] (----) are included in (a).

It was found that the values of the retrieved  $Q_R$  parameter were generally close to zero: they varied between  $-0.06$  and  $0.06$ , and their field average values were generally lower than  $0.02$ . For instance, a value of  $Q_R$  varying between  $0$  and  $0.06$  for field 17 was necessary to fit the observed emissivities, which were generally found to be slightly lower than the “Fresnel” ones, as shown in the aforementioned section. In the second step of the study, as further results showed that using the  $Q_R$  parameter was not useful in improving the accuracy of the emissivity simulations, only the three parameters ( $H_R$ ,  $N_{RV}$ , and  $N_{RH}$ ) were retrieved.

The retrieved values of  $H_R$  are shown in Fig. 3(a) and (b) as a function of the standard deviation of the height ( $S_D$  in millimeters) and the “slope parameter”  $m$  ( $m = S_D/L_C$ ), which are both indicators of surface roughness. The results show that  $H_R$  is very sensitive to the surface roughness, and it regularly increases as a function of  $S_D$  [Fig. 3(a)]. The

increase of  $H_R$  with  $S_D$  was fitted by a simple hyperbolic equation model, which is shown in Fig. 3(a). The equation was written as

$$H_R = (0.9437 S_D / (0.8865 + 2.2913 S_D))^6, \quad R^2 = 0.93. \quad (7)$$

In Fig. 3(a),  $H_R$  is given as a function of  $S_D$  using two different formulations: that given by (7) and that initially computed in [20]. The latter is given by  $H_R = (2kS_D)^2$ , where  $k$  is the wavenumber ( $k = 2\pi/\lambda$ , where  $\lambda$  is the wavelength). It can be seen that both formulations give a similar value of  $H_R$  for very low values of  $S_D$  ( $S_D < 5$  mm), while the formulation of Choudhury *et al.* [20] largely overestimates the calibrated values of  $H_R$  for  $S_D > 10$  mm.

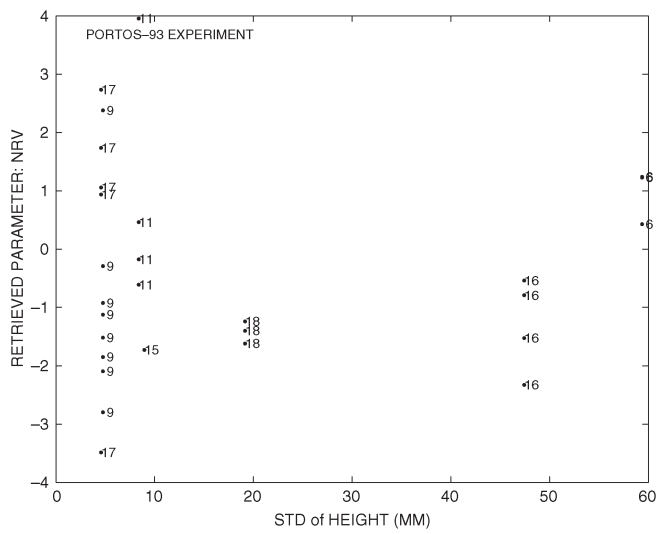
Even though the relationship was less significant than with the SD parameter ( $R^2 = 0.89$  instead of  $R^2 = 0.96$ ), a clear linear relationship could also be obtained between the  $H_R$  parameter and the “slope parameter”  $m$  [Fig. 3(b)]. The relationships relating  $H_R$  with  $S_D$  and  $m$  [Fig. 3(a) and (b)] were obtained with the Mironov model [18], [19] to estimate the soil dielectric constant. The use of the Dobson model [17] led to a larger scatter in the retrieved values of  $H_R$  (for instance, the rmse in the fit of  $H_R(S_D)$  increased from  $0.09$  with the Mironov model to  $0.11$  with the Dobson model). Therefore, all of the results presented in the following discussion of this paper were obtained with the Mironov model.

The retrieved values of  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  are shown in Fig. 4(a) and (b) as a function of the standard deviation of the height ( $S_D$  in millimeters). In these figures, no clear relationship could be detected between the  $N_{RV}$  or  $N_{RH}$  parameters and  $S_D$ : the values of  $N_{RV}$  vary in a large range of values between about  $N_{RV} = -4$  and  $N_{RV} = 4$  [Fig. 4(a)], and the values of  $N_{RH}$  for the rougher fields (fields 18, 16, and 6) are generally close to zero [Fig. 4(b)]. However, it can be noted that the values of  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  for each field are more or less gathered together so that the distinct values of  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  can be associated with different field types (the field average values of  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  are given in Table II). Moreover, two linear relationships could be found from the analysis of the retrieved values of the  $N_{RV}$  or  $N_{RH}$  parameters, which are the following.

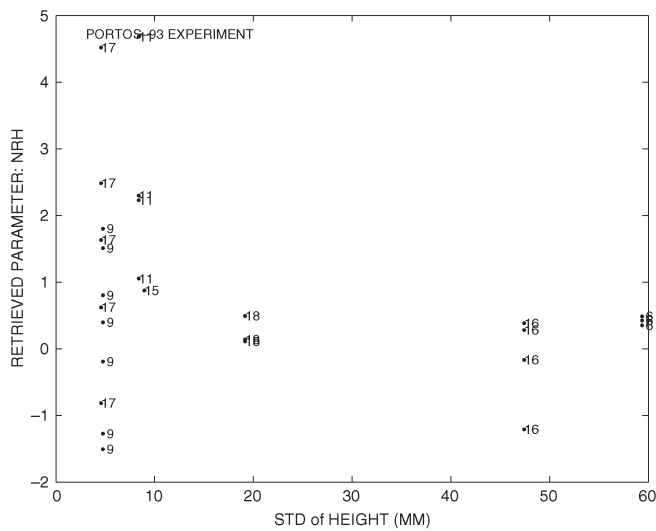
- 1) The first one relating  $N_{RH}$  and  $N_{RV}$  ( $R^2 = 0.39$ ).
- 2) The second one relating the difference ( $N_{RH} - N_{RV}$ ) and  $S_D$  ( $R^2 = 0.15$ ). This difference regularly decreased as the roughness conditions increased: it was almost two for the smoother fields (9, 17, and 11) and close to zero for the rougher fields (6 and 16).

It should be noted that the scatter in the different plots, considering the fit of (7) [Fig. 3(a)] or the retrieved values of  $N_{RP}$  ( $p = v$  or  $h$ ) for each field [Fig. 4(a) and (b)], can be partly related to the difficulties in estimating the model input variables. In particular, the measurement uncertainties were associated with the following.

- 1) The measured SM used in the inversion process. To obtain a large range in SM conditions, the irrigation phases were made during hot and sunny days. These conditions led to strong and rapid diurnal variations in SM on some days, which could not be fully captured by the gravimetric



(a)



(b)

Fig. 4. (a)–(b) Retrieved values of (a)  $N_{RV}$  and (b)  $N_{RH}$  as a function of the standard deviation of the height  $S_D$ . Note that in (b) a value for field 9 and DoY 125 ( $N_{RH} \approx 6.5$ ) was not shown for a better reading of the figure. Each point is labeled by the field number.

TABLE II  
AVERAGE RETRIEVED VALUES OF  $N_{RV}$  AND  $N_{RH}$  OVER EACH FIELD

Field N°	$S_D$ (mm)	$N_{RV}$	$N_{RH}$
6	59.37	0.96	0.42
9	4.76	-1.51	0.22
11	8.39	-0.11	1.86
15	8.96	-1.73	0.87
16	47.43	-0.70	-0.06
17	4.57	1.24	2.88
18	19.15	-1.70	0.14

\*Note:  $Q_R$  was not retrieved and was set equal to 0.

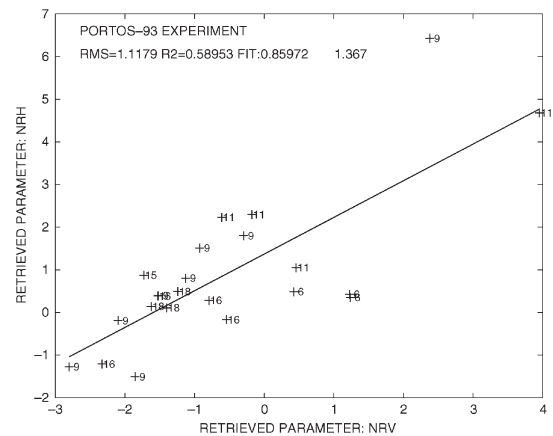


Fig. 5. Retrieved values of  $N_{RV}$  as a function of  $N_{RH}$  (field 17 was excluded in this computation). Each point is labeled by the field number.

measurements of SM. Also, these specific experimental conditions led to a large spatial variability in the SM content over the fields due, for instance, to SM nonuniformities between the measurements made over soil clods or hollows within the rough fields. As noted before, this was particularly the case for field 17.

- 2) The estimation of the surface roughness conditions. The measurements of the surface roughness were made after the first (large) irrigation, which was applied to each field, just after soil preparation. However, even after this first large irrigation, the surface roughness conditions decreased slowly after irrigation and/or rain events, and this trend was not monitored by the roughness measurements.
- 3) The uncertainties in the estimation of the effective soil temperature  $T_G$  as discussed in [23].

As the surface of field 17 does not correspond to natural surface roughness conditions (it was artificially crushed) and as large uncertainties were associated to the SM used for the retrievals, the aforementioned study was carried out again, excluding field 17 from the data set. Excluding field 17, the retrieved relationships between  $H_R$  and  $S_D$  or the slope  $m$  did not change (results not shown here). Conversely, the two relationships relating 1)  $N_{RH}$  and  $N_{RV}$  and 2) the difference ( $N_{RH} - N_{RV}$ ) and  $S_D$  were much improved: the squared correlation coefficient  $R^2$  increased from 0.39 to 0.59 for 1) and from 0.15 to 0.44 for 2). These relationships, shown in Fig. 5 ( $N_{RV}$  is shown as a function of  $N_{RH}$ ) and Fig. 6 (the difference ( $N_{RH} - N_{RV}$ ) is shown as a function of  $S_D$ ), are given by

$$N_{RV} = 0.686 N_{RH} - 1.167, \quad R^2 = 0.59 \quad (8a)$$

$$N_{RH} = 0.860 N_{RV} + 1.367, \quad R^2 = 0.59 \quad (8b)$$

$$N_{RH} - N_{RV} = -0.0361 S_D + 2.24, \quad R^2 = 0.44. \quad (9)$$

### C. Evaluating a Simple Model of the Measured Emissivities

The retrieved values of the roughness model parameters were obtained in the previous section. In this section, these latter values were used to evaluate the accuracy of simple models in the simulation of emissivity. The comparison was made

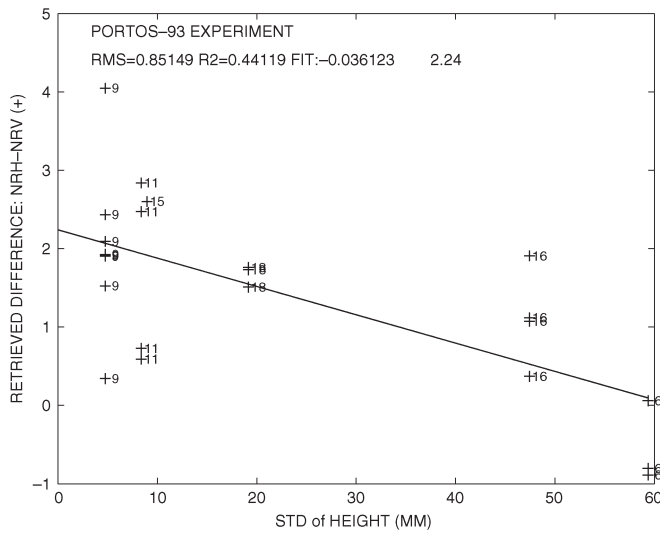


Fig. 6. Retrieved difference ( $N_{RH} - N_{RV}$ ) as a function of  $S_D$  (field 17 was excluded in this computation). Each point is labeled by the field number.

using the measured data for all dates of measurements and all measurement configurations in terms of polarization and incidence angle (the number of used data  $N = 228$ ).

Two types of results are presented in the following. First, we evaluated which roughness model parameters, among  $H_R$ ,  $Q_R$ ,  $N_{RV}$ , and  $N_{RH}$ , were the most useful in fitting the signatures of rough soils based on (3). Five models varying according to different degrees of simplification were compared (Table III), which are the following:

- 1) (M1; reference model) where the values of each retrieved parameter are used in the simulation;
- 2) (M2) idem to (M1) except that  $Q_R$  is set to zero;
- 3) (M3) idem to (M1) except that  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  are set to zero;
- 4) (M4), where only  $H_R$  is retrieved, while  $Q_R$ ,  $N_{RV}$ , and  $N_{RH}$  are set to zero (this model corresponds to that used in [8]);
- 5) (Fresnel), where all parameters ( $H_R$ ,  $Q_R$ ,  $N_{RV}$ , and  $N_{RH}$ ) are set to zero (Fresnel configuration).

The scores of these different models that are used to simulate soil emissivity are given in Table III. The results obtained for the “reference” model (M1) show that the simple parameterization given by (3) is very efficient in simulating the surface emissivity for a variety of measurement configurations in terms of incidence angle and polarizations (rmse = 1.01 K and  $E = 99.9\%$ ). The accuracy of the simulations was almost the same when  $Q_R$  was set to zero [model (M2)], i.e., using only the three parameters  $H_R$ ,  $N_{RV}$ , and  $N_{RH}$  (rmse = 1.15 K and  $E = 99.9\%$ ). The simulations that are based only on  $H_R$  or  $H_R$  and  $Q_R$  provided a lower simulation accuracy [2.57 K for (M4) and 1.52 K for (M3)], but it is still much better than using the Fresnel equation which neglects the roughness effects (rmse = 28.58 K and  $E = 8.93\%$ ), showing the large effects of surface roughness for the soil types considered in this paper.

Second, we evaluated different models based on various calibrations of the roughness model parameters. The tests (not shown here) showed that, provided that  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  were

used, the model accuracy did not decrease when considering that  $Q_R = 0$ . This is in agreement with the aforementioned results indicating that the value of  $Q_R$  was close to zero over all fields. Therefore, the following evaluation was made using only the three parameters ( $H_R$ ,  $N_{RV}$ , and  $N_{RH}$ ), while  $Q_R$  was set to zero. Moreover, this second evaluation was made with a PORTOS-93 data set, excluding field 17. This was made because we considered that the surface roughness conditions of field 17 could not be found in natural agricultural fields and that there was a rather large scatter in the retrieved values of  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  for that field (as discussed earlier, it is likely that this was due to the rather large uncertainty that is generally associated to the measurements of SM for field 17). Using this slightly restrained data set (the number of used data  $N = 188$  without field 17, instead of  $N = 228$ ), the whole range of roughness conditions of the initial data set was not modified, and we were much more confident in the following results concerning model evaluation. Note that, excluding field 17 from the data set, a very similar equation to that given by (7) was found to fit the relationship between  $H_R$  and  $S_D$ . Therefore, in this model comparison, (7) will be kept to represent this latter relationship.

Similar to the aforementioned discussion, five models varying according to different degrees of simplification were compared (Table IV), which are the following:

- 1) (MC1), where  $H_R$  is computed using (7), while the retrieved values of  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  are used in the simulations;
- 2) (MC2) idem to (MC1) except that the field average values of  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$ , given in Table II, are used in the simulations;
- 3) (MC3a) and (MC3b) idem to (MC1) except the following:  
(MC3a):  $N_{RV}$  is derived from the field average values of  $N_{RH}$  using (8a);  
(MC3b):  $N_{RH}$  is derived from the field average values of  $N_{RV}$  using (8b);
- 4) (MC4) idem to (MC1) except that  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  are set to zero;
- 5) (Choudhury), which is the model proposed by Choudhury *et al.* [20], with  $H_R = (2kS_D)^2$ ,  $N_{RV} = N_{RH} = 2$ , and  $Q_R = 0$ .

The scores of these different models are given in Table IV. The best and very similar scores were obtained for the models using the calibrated values of ( $N_{RV}$ ,  $N_{RH}$ ) or the field average values of ( $N_{RV}$ ,  $N_{RH}$ ): rmse = 4.03 K and 4.19 K for models (MC1) and (MC2), respectively (the results for (MC2) are shown in Fig. 7). Slightly lower accuracies (by about 0.5 K) were obtained from models (MC3a) and (MC3b) based on the linear relationships relating  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  [rmse  $\approx$  4.6 K for both (MC3a) and (MC3b)]. This accuracy was significantly better than that obtained with (MC4) considering that  $N_{RV} = N_{RH} = 0$  (rmse = 5.6 K). This result seems to be a good indication that the calibrated relationships between  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  are quite pertinent. As expected, the use of the Choudhury model, which produces very large values of  $H_R$  for the rougher fields, very strongly overestimated the values of



TABLE III  
SCORES OF THE DIFFERENT MODELS SIMULATING EMISSIVITY  $E_P$

Model N°	Using	N, Number of data	RMSE (K)	Bias (K)	E (%)
M1 "reference"	-retrieved values of ( $H_R$ , $Q_R$ , $N_{RV}$ and $N_{RH}$ )	228	1.01	-0.04	99.9
M2	-retrieved values of ( $H_R$ , $Q_R$ ) - $N_{RV} = N_{RH} = 0$	228	1.52	-0.08	99.7
M3	-retrieved values of ( $H_R$ , $N_{RV}$ and $N_{RH}$ ) - $Q_R = 0$	228	1.15	-0.05	99.8
M4	-retrieved values of $H_R$ - $Q_R = N_{RV} = N_{RH} = 0$	228	2.57	-0.29	99.3
Fresnel	- $H_R = Q_R = N_{RV} = N_{RH} = 0$	228	28.58	-18.02	8.93

\* Note: all the emissivity values were multiplied by a constant normalizing factor of 300K

TABLE IV  
SCORES OF THE DIFFERENT MODELS SIMULATING EMISSIVITY  $E_P$  USING CONSTRAINTS

Model N°	Using	N, Number of data	RMSE (K)	Bias (K)	E (%)
MC1	- $H_R$ from equation (7) -retrieved values of ( $N_{RV}$ and $N_{RH}$ )	188	4.03	0.72	97.6
MC2	- $H_R$ from equation (7) -field average values of $N_{RH}$ and $N_{RV}$	188	4.19	0.77	97.4
MC3a	- $H_R$ from equation (7) -field average values of $N_{RH}$ - $N_{RV}$ computed from $N_{RH}$ with linear eq. (8a)	188	4.55	0.85	96.9
MC3b	- $H_R$ from equation (7) -field average values of $N_{RV}$ - $N_{RH}$ computed from $N_{RV}$ with linear eq. (8b)	188	4.68	0.73	96.8
MC4	- $H_R$ from equation (7) - $N_{RH} = N_{RV} = 0$	188	5.56	1.09	95.46
Choudhury [20]	$H_R = (2k S_D)^2$ - $Q_R = 0$ ; $N_{RV} = N_{RH} = 2$	188	14.15	6.00	70.66

\* Note: all the emissivity values were multiplied by a constant normalizing factor of 300K

\*\*Note:  $Q_R$  was not retrieved and was set equal to 0. Data for field 17 were not used in this computation

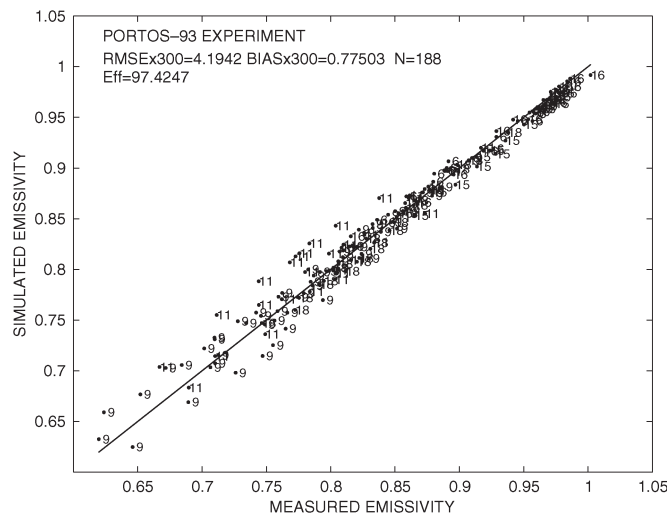


Fig. 7. Comparison between the measured and simulated emissivities using (MC2) for both polarizations and all angles (field 17 was excluded in this computation). Each point is labeled by the field number.

emissivity for field 18 and especially fields 6 and 16, where the simulated values of emissivity saturated close to unity (rmse  $\approx$  14.15 K).

#### IV. DISCUSSION AND CONCLUSION

Using a modified version of the soil module in L-MEB, a reanalysis of the PORTOS-93 data set acquired over bare soil fields in 1993 at Avignon was carried out in this paper. The main results of the study are summarized in the following.

The measured emissivities were compared to the emissivities of the “Fresnel” surfaces, assumed to be perfectly flat. The measured values of emissivities were generally higher than the “Fresnel” emissivities. Only the emissivities measured over the very smooth field 17, which was artificially crushed and compressed by a roadroller, were found to be slightly lower than the “Fresnel” emissivities. These results could not confirm the theoretical analysis of [9], which predicted that the emissivities of the rough fields were lower than those of the “Fresnel” surfaces at V polarization and at rather large angles. However, the results of this study were limited to angles of  $40^\circ$ , and it is likely that the use of experimental observations at larger angles ( $> 50^\circ$ ) (as performed in [11] and [12] over the SMOSREX site) would be required to investigate this issue.

The values of the four roughness model parameters ( $H_R$ ,  $Q_R$ ,  $N_{RV}$ , and  $N_{RH}$ ) used in the soil module of L-MEB were retrieved over each field and for each observation phase. These retrieved values were compared to the surface roughness

characteristics expressed in terms of the standard deviation of the height ( $S_D$ ), the correlation length ( $L_C$ ), and the slope parameter  $m = S_D/L_C$ . This calibration step confirmed the previous results of the literature. In particular, it was confirmed that the value of  $Q_R$  was close to zero over all fields. The nonzero values of  $Q_R$  ( $Q_R \approx 0.02$ ) had to be used to simulate the emissivities that are lower than that of the Fresnel surfaces only for field 17.

Other results were new, and the two most interesting findings of this calibration step are given in the following.

- 1) A clear nonlinear relationship, given by (7), was found between  $H_R$  and  $S_D$ . Contrary to what was obtained in the previous study in [8], no improvement in the parameterization of  $H_R$  was obtained using the slope parameter ( $m = S_D/L_C$ ) or using additional information on surface SM.
- 2) As for  $N_{RH}$  and  $N_{RV}$ , the following two relationships could be derived: 1) the first one relating  $N_{RH}$  and  $N_{RV}$  and 2) the second one relating the difference ( $N_{RH} - N_{RV}$ ) to  $S_D$ . This latter difference was found to decrease regularly from  $\sim 2$  to 0 as the roughness conditions increased.
- 3) The new physical model developed by Mironov *et al.* in computing the soil dielectric constant as a function of SM, clay content, and temperature was found to be a very promising approach. A lower scatter in the retrieved values of  $H_R$  was obtained using the Mironov model [18] rather than using the Dobson model, as performed in previous studies [2], [8].

The results of this calibration step, obtained over a very large range of roughness conditions, were in good agreement with the results published in the literature. First, the obtained relationship between  $H_R$  and  $S_D$  was found to be in agreement with the results obtained over six crop fields (soybean, corn, and wheat) considered in the study in [2]. For instance, values of  $H_R$  close to 0.1 or 0.2 were generally obtained for crops cultivated over rather smooth soils, with  $S_D < 10$  mm. Over a corn field (REBEX experiment [24]), the value of  $H_R = 0.7$  obtained in [2] is in good agreement with the value ( $H_R \sim 0.8$ ) computed from (7) and the measured values of  $S_D$  ( $S_D$  was estimated to vary in the 2.5–2.8-mm range over REBEX [24]). The values computed for the parameters ( $N_{RV}$ ,  $N_{RH}$ ) are also in good agreement with the results of the literature: the retrieved values of  $N_{RH}$  were close to zero ( $N_{RH} = 0$  or 1), and the values of  $N_{RV}$  vary between  $-2$  and 0, as found in [2]. Moreover, the difference ( $N_{RH} - N_{RV}$ ) was close to two for smooth fields, as found in [12].

In the second step of this study, several simplified modeling approaches were considered and compared (Tables III and IV). The main results of these comparisons are given in the following.

- 1) The model equation (3) used in L-MEB, setting  $Q_R$  equal to zero and based on three parameters ( $H_R$ ,  $N_{RV}$ , and  $N_{RH}$ ), was found to be very well suited in simulating the microwave signature of bare soils. When fitted over the experimental data for a large range of conditions, the simulations using model (M1) were found to be

significantly more accurate than those using model (M4) based on the sole  $H_R$  parameter [rmse = 1.0 K for (M1) and rmse = 2.6 K for (M4)].

- 2) The use of the calibrated relationships for the three roughness model parameters  $H_R$ ,  $N_{RV}$ , and  $N_{RH}$  led to a very good model accuracy over the whole data set, excluding field 17 (characterized by specific artificially compressed surface conditions). For instance, rmse = 4.2 K using (MC2), i.e., deriving  $H_R$  from (7) and using the field average values for  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$ .
- 3) The use of a relationship relating  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  [models (MC3a) and (MC3b)] also led to a very good model accuracy, which is very similar to that obtained for (MC2) [the rmse increased slightly from 4.2 K to about 4.6 K for models (MC3a)–(MC3b)].
- 4) Using only (7) to calibrate  $H_R$  and setting  $N_{RV}$  and  $N_{RH}$  to zero, the model accuracy decreased [rmse = 5.6 K for model (MC4)], but it still remained much better than using the Choudhury model [20].

In conclusion, all of these results clearly confirm the pertinence of the equation used in L-MEB to account for roughness effects, based on three parameters ( $H_R$ ,  $N_{RV}$ , and  $N_{RH}$ ) and setting  $Q_R$  to zero. The results also clearly showed the importance of accurately calibrating these three parameters. We have shown that the Choudhury model, still often used as a reference model in simulating the roughness effects, provided very poor results for intermediate or strong roughness conditions (for the standard deviation of the height  $S_D >$  about 10 mm). We have calibrated new relationships, relating  $H_R$  or ( $N_{RH} - N_{RV}$ ) with  $S_D$  and between  $N_{RH}$  and  $N_{RV}$ , which provided a very good model accuracy. These relationships were in good agreement with the previous results of the literature obtained over a lower range of roughness conditions.

These results are new, but they were derived from a unique data set, even though the PORTOS-93 data set was obtained over a very large range of roughness conditions ( $S_D$  varying from  $\sim 5$  to 60 mm). Thus, a better understanding of the physical processes at the origin of the microwave emission of the rough surfaces is still required to understand these different results and to confirm the obtained equations relating the L-MEB soil parameters  $H_R$ ,  $N_{RH}$ , and  $N_{RV}$  to the soil characteristics. Future studies combining theoretical analyses, based on numerical approaches that account for the actual soil roughness characteristics, and experimental data are currently developed [25], [26].

## REFERENCES

- [1] Y. H. Kerr, P. Waldteufel, J.-P. Wigneron, J. Font, and M. Berger, "Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, no. 8, pp. 1729–1735, Aug. 2001.
- [2] J.-P. Wigneron, Y. Kerr, P. Waldteufel, K. Saleh, P. Richaume, P. Ferrazzoli, M.-J. Escorihuela, J. P. Grant, B. Hornbuckle, P. de Rosnay, J.-C. Calvet, T. Pellarin, R. Gurney, and C. Mätzler, "L-band microwave emission of the biosphere (L-MEB) model: Results from calibration against experimental data sets over crop fields," *Remote Sens. Environ.*, vol. 107, no. 4, pp. 639–655, Apr. 2007.
- [3] C. Prigent, J.-P. Wigneron, W. B. Rossow, and J. R. Pardo-Carrion, "Frequency and angular variations of land surface microwave emissivities: Can we estimate SSM/T and AMSU emissivities from SSM/I

- emissivities?" *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 38, no. 5, pp. 2373–2386, Sep. 2000.
- [4] J. R. Wang and B. J. Choudhury, "Remote sensing of soil moisture content over bare field at 1.4 GHz frequency," *J. Geophys. Res.*, vol. 86, no. C6, pp. 5277–5282, 1981.
- [5] T. Mo, B. J. Choudhury, T. J. Schmugge, J. R. Wang, and T. J. Jackson, "A model for microwave emission from vegetation-covered fields," *J. Geophys. Res.*, vol. 87, no. C13, pp. 11 229–11 237, 1982.
- [6] Y. H. Kerr and E. G. Njoku, "A semiempirical model for interpreting microwave emission from semiarid land surfaces as seen from space," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 28, no. 3, pp. 384–393, May 1990.
- [7] T. J. Jackson, D. M. Le Vine, C. T. Swift, T. J. Schmugge, and F. R. Schiebe, "Large area mapping of soil moisture using the ESTAR passive microwave radiometer in Washita'92," *Remote Sens. Environ.*, vol. 54, no. 1, pp. 27–37, Oct. 1995.
- [8] J.-P. Wigneron, L. Laguerre, and Y. Kerr, "A simple parameterization of the L-band microwave emission from rough agricultural soils," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, no. 8, pp. 1697–1707, Aug. 2001.
- [9] J. Shi, K. S. Chen, Q. Li, T. J. Jackson, P. E. O'Neill, and L. Tsang, "A parameterized surface reflectivity model and estimation of bare-surface soil moisture with L-band radiometer," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, no. 12, pp. 2674–2686, Dec. 2002.
- [10] T. D. Wu, K. S. Chen, J. Shi, and A. K. Fung, "A transition model for the reflection coefficient in surface scattering," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, no. 9, pp. 2040–2050, Sep. 2001.
- [11] M. Schwank, I. Völksch, J.-P. Wigneron, Y. H. Kerr, A. Mialon, P. de Rosnay, and C. Mätzler, "Comparison of two surface reflectivity models and validation with radiometer measurements," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 48, no. 1, pp. 325–337, Jan. 2010.
- [12] M. J. Escorihuela, Y. Kerr, P. de Rosnay, J.-P. Wigneron, J.-C. Calvet, and F. Lemaître, "A simple model of the bare soil microwave emission at L-band," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 7, pp. 1978–1987, Jul. 2007.
- [13] P. de Rosnay, J.-C. Calvet, Y. Kerr, J.-P. Wigneron, F. Lemaître, M. J. Escorihuela, J. Muñoz Sabater, K. Saleh, J. Barrié, G. Bouhours, L. Coret, G. Cherel, G. Dedieu, R. Durbe, N. E. D. Fritz, F. Froissard, J. Hoedjes, A. Kruszewski, F. Lavenu, D. Suquia, and P. Waldteufel, "SMOSREX: A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing," *Remote Sens. Environ.*, vol. 102, no. 3/4, pp. 377–389, Jun. 2006.
- [14] L. Laguerre, "Influence de la rugosité de surface en radiométrie micro-onde des sols nus: Modélisation et inversion," Ph.D. thesis, CESBIO Toulouse, Institut National Polytechnique, Toulouse, France, Nov. 23, 1995, 161 p.
- [15] C. Mätzler, P. W. Rosenkranz, A. Battaglia, and J.-P. Wigneron, *Thermal Microwave Radiation—Applications for Remote Sensing*. London, U.K.: IET, 2006, ser. IET Electromagnetic Waves Series 52, 555 p.
- [16] T. Pellarin, J.-P. Wigneron, J.-C. Calvet, P. Ferrazzoli, H. Douville, E. Lopez-Baeza, P. Waldteufel, J. Pulliainen, L. Simmonds, M. Berger, and Y. H. Kerr, "Two-year global simulation of L-band brightness temperatures over land," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 41, no. 9, pp. 2135–2139, Sep. 2003.
- [17] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, and M. A. El-Reyes, "Microwave dielectric behavior of wet soil—Part II: Dielectric mixing models," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. GRS-23, no. 1, pp. 35–46, Jan. 1985.
- [18] V. L. Mironov and S. V. Fomin, "Temperature and mineralogy dependable model for microwave dielectric spectra of moist soils," *PIERS Online*, vol. 5, no. 5, pp. 411–415, 2009. DOI:10.2529/PIERS090220054025.
- [19] V. L. Mironov, L. G. Kosolapova, and S. V. Fomin, "Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, no. 7, pp. 2059–2070, Jul. 2009.
- [20] B. J. Choudhury, T. J. Schmugge, A. Chang, and R. W. Newton, "Effect of surface roughness on the microwave emission from soils," *J. Geophys. Res.*, vol. 84, no. C9, pp. 5699–5706, 1979.
- [21] J. R. Wang, P. E. O'Neill, T. J. Jackson, and E. T. Engman, "Multi-frequency measurements of the effects of soil moisture, soil texture, and surface roughness," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. GRS-21, no. 1, pp. 44–51, Jan. 1983.
- [22] T. Mo and T. J. Schmugge, "A parameterization of the effect of surface roughness on microwave emission," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. GRS-25, no. 4, pp. 481–486, Jul. 1987.
- [23] J.-P. Wigneron, A. Chanzy, P. de Rosnay, C. Rüdiger, and J.-C. Calvet, "Estimating the effective soil temperature at L-band as a function of soil properties," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 3, pp. 797–807, Mar. 2008.
- [24] B. K. Hornbuckle, A. W. England, R. D. De Roo, M. A. Fischman, and D. L. Boprie, "Vegetation canopy anisotropy at 1.4 GHz," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 41, no. 10, pp. 2211–2223, Oct. 2003.
- [25] A. Mialon, J.-P. Wigneron, P. de Rosnay, M. J. Escorihuela, and Y. Kerr, "Continuous monitoring of surface roughness changes over a bare soil field using L-band brightness temperature," in *Proc. 10th Spec. Meeting Microw. Radiometry Remote Sens. Environ.*, Florence, Italy, Mar. 11–14, 2008.
- [26] H. Lawrence, F. Demontoux, J.-P. Wigneron, P. Borderies, and P. Paillou, "Modeling the effect of surface roughness on the bistatic scattering coefficient and emissivity of a soil–litter medium using a numerical model," in *Proc. IGARSS*, Cape Town, South Africa, Jul. 13–17, 2009, pp. III-514–III-517.



**Jean-Pierre Wigneron** (SM'03) received the M.Sc./Engineering degree from SupAéro, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (ENSAE), Toulouse, France, in 1987 and the Ph.D. degree from the University of Toulouse, Toulouse, in 1993.

He is currently a Senior Research Scientist with the Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Villenave d'Ornon, France, where he is also the Cooordinator of the INRA remote sensing activities and the Head of the remote sensing team at the Ecologie Fonctionnelle et Physique de l'Environnement (EPHYSE), Bordeaux, France. He coordinated the development of the L-band microwave emission of the biosphere model for soil and vegetation in the level-2 inversion algorithm of the European Space Agency's Soil Moisture and Ocean Salinity mission. He is the author of more than 90 papers in international peer-reviewed journals. His research interests are microwave remote sensing of soil and vegetation, radiative transfer, and data assimilation.

Dr. Wigneron has been a member of the Editorial Board of *Remote Sensing of Environment* since 2005.



**André Chanzy** received the Ph.D. degree in physics of the environment from the "Institut National Agronomique Paris–Grignon," Paris, France, in 1991.

Since 1987, he has been with the Soil Science Laboratory, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) Research Center, Avignon, France, where he was the Head of the joint research unit Climate Soil and Environment of the INRA Institute and Avignon University, Avignon, from 1999 to 2007 and where is currently with the Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes (EMMAH). He currently leads the "Adaptation to Global Change" program of the Avignon INRA Center. His scientific fields of interest are soil water flow modeling and application of remote sensing (active and passive) and *in situ* observations to infer hydrological fluxes.



**Yann H. Kerr** (M'88–SM'01) received the B.S. degree in engineering from the Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (ENSAE), Toulouse, France, the M.Sc. degree in electronics and electrical engineering from Glasgow University, Glasgow, U.K., and the Ph.D. degree from the Université Paul Sabatier, Toulouse.

From 1980 to 1985, he was with the Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). In 1985, he joined the Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Télédétection Spatiale (LERTS), where he was the Director in 1993–1994. He spent 19 months at the Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, in 1987–1988. He has been with the Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, Centre National de la Recherche Scientifique/Centre National d'Etudes Spatiales/Institut de Recherche pour le Développement/Université Paul Sabatier, Toulouse, since 1995, where he has been the Director since 2007. He has been involved in many space missions. He was an EOS Principal Investigator (PI; interdisciplinary investigations) and PI and precursor of the use of the Scatterometer (SCAT) over land. In 1990, he started to work on the interferometric concept applied to passive microwave Earth observation and was subsequently the Science Lead on the Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis (MIRAS) project for the European Space Agency with Matra Marconi Space (MMS) and Observatoire Midi Pyrénées (OMP). He was also the Coinvestigator of IRIS, OSIRIS, and HYDROS for the National Aeronautics and Space Administration. He was the Science Advisor of the Multi-frequency Imaging Microwave Radiometer (MIMR) and the Coinvestigator of the Advanced Microwave Scanning Radiometer. He is a member of the Soil Moisture Active & Passive science definition team. In 1997, he first proposed the natural outcome of the previous MIRAS work with what was to become the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission, which was eventually selected by the European Space Agency in 1999, where he was the SMOS mission Lead Investigator and Chair of the Science Advisory Group. He is also in charge of the SMOS science activities coordination in France. His fields of interest are the theory and techniques of microwave and thermal infrared remote sensing of the Earth, with emphasis on hydrology, water resource management, and vegetation monitoring.

Dr. Kerr has organized all of the SMOS workshops, and he was a Guest Editor of two IEEE special issues.



**Heather Lawrence** received the M.Sc. degree in physics from the University of Cambridge, Cambridge, U.K., in 2005. She is currently working toward the Ph.D. degree in the Microtechnologies, Capteurs et Microondes (MCM) Department, Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS laboratory), University of Bordeaux 1, Bordeaux, France, in collaboration with the Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)–Ecologie Fonctionnelle et Physique de l'Environnement (EPHYSE) Laboratory, Bordeaux.

Her research focuses on the modeling of the L-band passive microwave emission of forests for future soil moisture retrieval, studying, in particular, the effect of a rough surface and a litter layer on the L-band forest signal.



**Jiancheng Shi** (SM'02) received the B.A. degree from the University of Lanzhou, Lanzhou, China, in 1982 and the M.A. and Ph.D. degrees in geography from the University of California Santa Barbara (UCSB), Santa Barbara, in 1987 and 1991, respectively.

He then joined the Institute for Computational Earth System Sciences, UCSB, as a Research Scientist. In 2010, he joined the State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences

and Beijing Normal University, Beijing, China. His research interests are microwave modeling of snow and soil signatures, image processing and analysis, and inversion models for retrieving the physical parameters from the remote sensing data.



**Maria Jose Escorihuela** received the Engineering degree in electronics and telecommunications from the Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, and the Ph.D. degree from the Institut National Polytechnique, Toulouse, France, in 2006.

From 2003 to 2006, she was with the Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO), Toulouse, where she was developing models of natural surface emission at L-band for soil moisture estimation in the framework of the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission preparation and was actively involved in the SMOSREX field experiment. She is currently with isardSAT, Barcelona, Spain. Her scientific fields of interest are the application of passive and active microwave remote sensing to hydrology and climate change studies.



**Valery Mironov** (M'98) received the M.S. and Ph.D. degrees in radiophysics from Tomsk State University, Tomsk, Russia, in 1961 and 1968, respectively, and the Full Professor degree in radiophysics from the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia in 1984.

He joined the Russian Academy of Sciences as a Correspondent Member in 1991. Since 2004, he has been a Laboratory Head with the Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS), Krasnoyarsk, Russia. He was a Visiting Scientist with the University of Alaska, Anchorage, in 2001, receiving a position of Affiliate Professor Geophysics. He is the author or coauthor of more than 280 scientific publications and six books. His current research interests include electromagnetic wave propagation and scattering linked to the radar and radiothermal microwave remote sensing of the land, including the studies of dielectric properties of moist soils.

Prof. Mironov is a member of the Russian Academy of Sciences. He was a recipient of the USSR State Award in Science and Engineering in 1985 and the SB RAS Award in Applied Research in 1987.



**Arnaud Mialon** received the M.S. degree in climate and physics–chemistry of the atmosphere from the Université Joseph Fourier, Grenoble, France, in 2002, the Ph.D. degree in ocean–atmosphere–hydrology from the Université Joseph Fourier de Grenoble, and the Ph.D. degree in remote sensing from the Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, in 2005.

He joined the Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO), Toulouse, France, in 2006. His fields of interest are focused on passive microwave remote sensing of continental surfaces. He is involved in the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission as well as the SMOSREX field experiment.



**François Demontoux** (M'09) received the Ph.D. degree in physics from the University of Bordeaux, Talence, France, in 1999.

He is currently a Research Scientist with the IMS Laboratory, Bordeaux, France, where he is also the Head of the Electromagnetic Characterization and Remote Sensing (CEMT) Team. He participated in the development of the forward model (L-MEB) for soil and vegetation in the SMOS level-2 retrieval algorithm. His research interests include microwave remote sensing of soil and vegetation, modeling of the electromagnetic phenomena, and electromagnetic characterization of natural materials.



**Patricia de Rosnay** received the Ph.D. degree from the University Pierre et Marie Curie (Paris 6), Paris, France, in 1999.

She is currently a Research Scientist with the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, U.K., where she works on land surface data assimilation for numerical weather prediction applications. She is a member of the Science Definition Team of the future National Aeronautics and Space Administration's Soil Moisture Active & Passive mission and a member of the Short Range Numerical Weather Prediction (SRNWP). She was involved in land surface modeling activities such as the African Monsoon Multidisciplinary Analysis Land Surface Model Inter-comparison Project (ALMIP) and the microwave component of the project ALMIP-Microwave Emission Model. She initiated the project for the validation of the future Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) soil moisture (SM) products over West Africa. She worked for five years with the French Centre National de la Recherche Scientifiques (CNRS), Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO), Toulouse, France, where she had an active contribution to the coordination of the SMOSREX field experiment in preparation of SMOS. Her research topic at the Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) from 1994 to 2001 was focused on global-scale land surface process representation in climate models. She is involved in the SMOS Validation and Retrieval Team, and she participates in the EUMETSAT H-SAF project. Her current research interests focus on improving SM and snow analysis for NWP and using passive and active microwave data for SM analysis in weather forecasts models.



**Kauzar Saleh-Contell** received the B.S. degree in physics from the University of Valencia, Valencia, Spain, and the Ph.D. degree from the Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Ecologie Fonctionnelle et Physique de l'Environnement (EPHYSE), Villenave d'Ornon, France, in 2006.

She conducted research at the University of Cambridge, Cambridge, U.K., and at the Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO), Toulouse, France, working on the retrieval of soil moisture (SM) from airborne L-band data over different land covers for the implementation of the Soil Moisture and Ocean Salinity level-2 retrieval algorithm. Since 2010, she has been with the Centre for the Development of Industrial Technologies, Madrid, Spain. She has coauthored around 20 peer-reviewed papers in passive microwaves and SM.

## **ANNEXE 3 – Exemples de projets du GTT Handicap**

date 04.10.2010  
service GTT Handicap  
Projet piloté par Cécile Rodriguez (Bordeaux IV), Alexandra Dutreil  
(Bordeaux2)

**Membres du groupe de travail :** Elise Belliard (Bordeaux1), Vincent Beurrier (B.E.M.), Christine Bouchet (IEP Bordeaux), François Demontoux (Bordeaux1 et IPB), Anne Dicky (Bordeaux 1), François Routaboul (ENSAM), Virginie Tissinier (Bordeaux2) et Karine Verdeau (Bordeaux 1). *(les groupes de travail sont ouverts à tous et leur composition n'est donc pas figée)*

## ■ L'accès aux études longues aux étudiants en situation de handicap

---

### ► Contexte

Des études montrent que les personnes en situation de Handicap sont en majorité peu qualifiées.

Il existe un besoin évident d'améliorer l'inclusion de ces personnes dans le monde du travail, il faut aider ces personnes à suivre des formations qualifiantes. Ces personnes pourraient ainsi candidater à des postes compatibles avec leur handicap (professions "intellectuelles").

Il existe donc un paradoxe entre les emplois les mieux adaptés aux personnes en situation de handicap (cadres, professions intellectuelles..) et le niveau de qualification et de formation ces personnes.

Comment venir à bout de ce paradoxe ?

**-En informant les jeunes en situation de handicap dans les collèges et lycées**

**-En améliorant l'accueil et le suivi des étudiants en situation de handicap dans les établissements de l'Université de Bordeaux.**

### ► Les objectifs du projet :

Le projet a un double objectif : la Communication et le Recensement d'informations.

→ D'une part il s'agit de faire travailler conjointement des étudiants de nos établissements sur une ou des actions de communication en direction des lycéens de la CUB (dans un premier temps) sur la thématique de la poursuite d'études longues et/ou sélectives pour les étudiants en situation de handicap. Ce travail se fera en collaboration avec le Rectorat.

→ D'autres part il s'agit de faire un état des lieux des questionnements, attentes, freins et

motivations des jeunes lycéens handicapés, de leur parents, de leurs enseignants référents, conseillers d'orientation et proviseurs sur leur orientation vers des études longues.

### ► Les acteurs du projet :

Ce projet rassemble deux groupes d'acteurs :

- Les étudiants qui seront recrutés par les différents établissements de l'Université de Bordeaux participants au projet.
- L'Université de Bordeaux par l'intermédiaire des membres du GTT handicap.
- Le Rectorat (contact Mme GRANDPRE, Conseillère du Recteur pour les questions du handicap)

### ► Organisation du projet

Impliquer des étudiants valides auxquels le groupe projet assignera des missions.

Exemples de missions :

- prendre contact avec les lycéens, leurs parents, les équipes enseignantes pour faire un état des lieux de leurs questionnements, attentes, besoins sur cette thématique.
- Participer à l'organisation d'une journée de rencontre
- préparer des supports de communication (plaquette, site web, DVD, ...)
- participer à la recherche de financement (*suivant des modalités à définir avec le PRES*)

Modalités de l'implication des étudiants :

Selon les établissements la valorisation de l'implication des étudiants pourrait être :

- crédits pour leurs unités d'enseignements
- indemnisation par le biais de contrats-étudiant ou de vacances.

### ► Les partenaires envisagés

- Groupement d'associations sur les problématiques du handicap (Droit au savoir...)
- Référents au sein des filières, enseignants référents, conseillers d'orientation
- La Région
- Les établissements de rééducation (IEM, Tour de Gassie...)

### ► Budget prévisionnel pour l'université de Bordeaux

Le budget prévisionnel part sur une hypothèse de 8 étudiants des établissements de l'Université de Bordeaux participants au projet qui ne pourraient pas bénéficier de crédits de valorisation dans l'une de leur UE.

Indemnisation forfaitaire par étudiant (pour un semestre)	200 €
<b>Total</b>	<b>1600 €</b>



Ce budget n'intègre pas l'impression des supports de communication (plaquette...) et l'organisation de la journée de rencontre

### ► Calendrier

Dans l'hypothèse d'une validation de ce projet par la commission Vie Universitaire de l'Université de Bordeaux au mois d'octobre, le calendrier de travail serait le suivant :

- réunion du comité de pilotage : mi-octobre 2010
- intervention dans les lycées et collèges durant l'année
- distribution du questionnaire et traitement des données recueillies : février 2011
- organisation d'une journée (de rencontre et d'échanges entre élèves, étudiants handicapés, acteurs et partenaires) qui pourrait avoir lieu mi mai 2011.

date 04.10.2010  
service GTT Handicap  
Projet piloté par Elise BELLIARD – Cellule PHASE – Bordeaux 1 IUT et Pascale AUBERT  
– SUAPS Bordeaux 1  
T 33 (0)5 56 84 58 92

**Membres du groupe de travail :** François DEMONTOUX (Bordeaux 1 et IPB), Karine VERDEAU (Cellule PHASE – Bordeaux 1), Anne DICKY (Cellule PHASE – Bordeaux 1), Corinne PONCE (Relais Handicap – Bordeaux 2), Bernard PEJOT (SUAPS Bordeaux 1), Vincent BALOUP (SUAPS -Bordeaux 3). *(les groupes de travail sont ouverts à tous et leur composition n'est donc pas figée)*

## ➤ HANDI'VAL

### Accès aux pratiques sportives universitaires aux étudiants et personnels en situation de handicap des universités de Bordeaux.

#### ➤ Contexte

Depuis de nombreuses années, nous observons que les étudiants en situation de handicap ne s'inscrivent pas dans des activités sportives universitaires.

Cela peut s'expliquer de plusieurs façons :

• Du côté des étudiants :

- Leurs handicaps ne leur permettent pas, à priori, de pratiquer une activité sportive,
- Les étudiants n'ont pas connaissance de la possibilité de pratiquer un sport universitaire,
- Les étudiants handicapés n'osent pas demander à pratiquer un sport universitaire,

• Du côté des services sportifs universitaires :

- Les enseignants ne souhaitent pas accueillir d'étudiants en situation de handicap sur leurs créneaux sportifs,
- Les enseignants n'ont pas assez d'informations, ni les bons interlocuteurs et appréhendent l'accueil d'un étudiant handicapé sur leurs créneaux sportifs,
- Les services des sports n'ont pas le matériel adapté à l'accueil des étudiants en situation de handicap.

Dans certaine université bordelaise, la pratique universitaire d'un sport est valorisée par l'attribution d'une note qui est ensuite incluse dans les résultats de l'étudiant.

#### ➤ Les objectifs du projet

Ce projet a un double objectif.

D'une part, d'informer les étudiants en situation de handicap de la possibilité de pratiquer un sport universitaire comme tout autre étudiant et ainsi participer pleinement à la vie universitaire.

D'autre part, de sensibiliser les équipes d'enseignants d'Education Physique et Sportive des universités bordelaises aux handicaps, ainsi que sur les possibilités sportives des personnes qui en sont porteuses.

### ➤ Les acteurs du projet

- Les étudiants en situation ou non de handicap, ainsi que les personnels des universités,
- Les Services Universitaires des Activités Physiques et Sportives (SUAPS)
- Les structures accompagnant les étudiants en situation de handicap,
- Le Comité Départemental Handisport (CDH).

L'année passée, les étudiants de l'association sportive de l'Université Bordeaux 1 se sont investis dans le projet en diffusant l'information sur la soirée et en y tenant une petite buvette.

### ➤ Définition du projet

Depuis l'année universitaire 2008/2009, le SUAPS Bordeaux 1 et la Cellule PHASE Bordeaux 1 travaillent conjointement sur la question de l'accès des étudiants en situation de handicap aux pratiques sportives universitaires. L'initiative est née lors de la journée d'accueil sportive des étudiants de l'IUT Bordeaux 1 en début d'année universitaire 2006/2007 à fin de permettre aux étudiants en situation de handicap d'y participer pleinement.

L'objectif de ce projet est de permettre aux étudiants en situation de handicap de pratiquer une activité sportive universitaire avec les autres étudiants. Le but n'est pas de créer des créneaux sportifs dédiés à l'handisport. Il est d'ailleurs prévu que l'étudiant handicapé souhaitant pratiquer un sport doit, comme tout autre étudiant, en faire la démarche auprès du SUAPS de son université.

#### Actions déjà mises en place et pérennes :

- Organisation d'une manifestation sportive annuelle dédiée au sport partagé avec des initiations de pratiques sportives handisports (basket fauteuil, rugby fauteuil, badminton, tennis de table, tir à la carabine laser,...),
- Initiation à l'handisport lors de manifestations sportives classiques (journée d'accueil sportive de l'IUT Bordeaux 1, Nuit du basket,...),
- Sensibilisation des enseignants d'EPS,
- Intégration du logo « accessible aux personnes en situation de handicap » dans les livrets d'informations sur les pratiques sportives universitaires.

#### Actions à venir :

- Achat de fauteuil de 3 handisport par la Cellule PHASE.

### ➤ Partenariat :

Une convention de partenariat est sur le point d'être conclue avec le Comité Départemental Handisport Gironde.

Cette convention aura pour objet :

- L'intervention annuelle du CDH 33 sur des séances de sensibilisation aux pratiques de l'handisport auprès des enseignants d'EPS souhaitant y participer,
- Intervention ponctuelle sur l'activité pour des conseils d'adaptation de pratique sportive, à la demande de l'enseignant d'EPS,
- Participation à des manifestations sportives universitaires,
- Diffusion de l'information sur l'accès aux pratiques sportives universitaires.

### ➤ Budget 2010/2011

Achat fauteuil (X3)	3200 €
Intervention CDH 33	1000 €
Reprographie (affiche et flyers)	800 €
<b>TOTAL</b>	<b>5000 €</b>

### ➤ Calendrier

La prochaine réunion du groupe de travail HANDI'VAL se tiendra le 05 octobre 2010. Elle aura pour objets :

- Convention de partenariat avec le CDH 33,
- Achat de fauteuils handisport,
- Présentation du projet à l'échelle du PRES,
- Soirée HANDI'VAL et autres soirées à thème sportif.

La prochaine soirée HANDI'VAL se tiendra fin du mois de mars à la Hall des sports du Campus.

**Ce projet sera porté conjointement par les Groupes de Travaux Thématiques (GTT) Sport et Handicap.**