



HAL
open science

Mesure simultanée aux fréquences moyennes et cartographie de la permittivité diélectrique et de la conductivité électrique du sol

Pauline Kessouri

► **To cite this version:**

Pauline Kessouri. Mesure simultanée aux fréquences moyennes et cartographie de la permittivité diélectrique et de la conductivité électrique du sol. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2012. Français. NNT : . tel-00787908

HAL Id: tel-00787908

<https://theses.hal.science/tel-00787908>

Submitted on 14 Feb 2013

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.

THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

Spécialité
Géophysique appliquée

Ecole doctorale
ED398 Géosciences et Ressources Naturelles

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE (PARIS 6)

Sujet de la thèse :

**Mesure simultanée aux fréquences moyennes
et cartographie de la permittivité diélectrique
et de la conductivité électrique du sol**

Pauline KESSOURI

Soutenue le 11 juillet 2012

Jury

Mme. Isabelle Cousin	Chargée de recherche à l'INRA d'Orléans	Rapporteur
M. Sébastien Lambot	Professeur à l'Université catholique de Louvain (Belgique)	Rapporteur
M. Bernard Bourgeois	Ingénieur au BRGM	Examineur
M. Philippe Cosenza	Professeur à l'Université de Poitiers	Examineur
M. Roger Guérin	Professeur à l'Université Paris 6	Examineur
M. Fayçal Réjiba	Maître de conférences à l'Université Paris 6	Co-directeur de thèse
M. Alain Tabbagh	Professeur à l'Université Paris 6	Directeur de thèse

Résumé

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire de thèse porte sur l'étude de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique du sol dans le domaine des fréquences moyennes (100 kHz-10 MHz), l'objectif étant de développer une nouvelle méthode de cartographie simultanée de ces paramètres électriques. La conductivité électrique et la permittivité diélectrique étant sensibles aux paramètres d'état du sol, et notamment à sa teneur en eau, le couplage des informations apportées par ces deux paramètres doit permettre d'estimer la valeur de la teneur en eau en chaque point de mesure.

Des mesures en laboratoire ont été réalisées afin de connaître l'évolution de ces deux paramètres en fonction de la fréquence. La permittivité diélectrique et la conductivité électrique d'échantillons de sable, de mélanges artificiels de sable et d'argiles (kaolinite et bentonite) en proportions variées et de sol limoneux ont été mesurées pour différentes teneurs en eau. Nous avons étudié l'effet de la teneur en argile, de la minéralogie des argiles impliquées ainsi que de la salinité de l'électrolyte. Dans le cas d'échantillons propres (sans argile), les lois de comportement existantes prédisent correctement la réponse à haute fréquence des matériaux étudiés en fonction de la teneur en eau. Des effets de polarisation d'interface s'ajoutent à la polarisation dipolaire des molécules d'eau pour des fréquences inférieures à 2 MHz. Ces effets sont d'autant plus importants que la teneur en argile augmente. Ils sont liés aux propriétés surfaciques de l'argile présente (capacité d'échange cationique, surface spécifique). Pour comprendre ces relations, des modèles complexes doivent être élaborés et testés. Nous avons privilégié une première approche qui consiste à établir une relation empirique afin de retrouver la valeur de la permittivité diélectrique liée à la polarisation dipolaire (permittivité HF due à la rotation des molécules d'eau).

En parallèle a été développé un prototype d'appareil électromagnétique de mesure *in situ*, de type Slingram, composé de deux bobines perpendiculaires (PERP), qui fonctionne à 1,56 MHz. Après avoir étalonné l'appareil et testé sa réponse à des objets de propriétés connues, plusieurs sites d'expérimentation ont été choisis : des alluvions sableuses à l'INRA d'Orléans (Centre), des luvisols limoneux de l'INRA d'Estrée-Mons (Picardie) et des calcaires fracturés du site de Grand (Vosges). Ils présentent tous des natures de sols différents ; et des contrastes de teneurs en eau, naturels ou artificiels y ont été mesurés. Si, dans le cas des alluvions sableuses, les permittivités diélectriques sont du même ordre de grandeur que les permittivités HF et permettent de retrouver la teneur en eau du sol à partir des modèles théoriques existant, il n'en est pas de même pour des sols plus riches en argile. Les relations empiriques établies à l'aide des expérimentations en laboratoire permettent alors une première estimation de la teneur en eau, conforme aux teneurs en eau massiques des échantillons prélevés.

Mots-clés :

permittivité diélectrique, conductivité électrique, fréquences moyennes (100 kHz – 10 MHz), cartographie électromagnétique, teneur en eau, teneur en argile.

Abstract

The research work submitted in this PhD dissertation deals with the study of soil electrical conductivity and dielectric permittivity in the medium frequency range (100 kHz - 10 MHz). The aim of the study is to develop a new mapping method where these two electrical parameters are simultaneously determined. The electrical conductivity and the dielectric permittivity are sensitive to the soil state parameters, and particularly to its water content. Coupling the information brought by the two electrical parameters leads to the estimation of soil water content at each measurement point.

Laboratory measurements were led in order to better understand the evolution of these two parameters contingent on the frequency. Dielectric permittivity and electrical conductivity of sand samples, artificial mixtures of sand and clay (kaolinite and bentonite) in various proportions and natural loamy soil samples were measured for different water content. We studied the effect of the clay content, clay mineralogy and electrolytic salinity. For clay free samples, existing theoretical models are well predicting the high frequency response of the studied material as a function of water content. When the frequency becomes lower than 2 MHz, other types of polarization arise. These effects are all the more important than the clay content is high. They are linked to the surface properties of the clay contained in the soil sample (cation exchange capacity, specific surface area). If complex modeling must be considered in order to physically understand these relations, we first choose to establish an empirical relation that allows the discrimination of the dielectric permittivity linked to the dipolar polarization (HF permittivity due to the rotation of water molecules).

An *in situ* electromagnetic prototype was developed in parallel. It is composed of two fixed perpendicular coils (Slingram geometry) and worked at 1.56 MHz. After calibration, we tested the response of the prototype to objects with known properties. The first *in situ* measurements were led on experimental sites with different types of soils and different water content variations (artificially created or natural): sandy alluvium on a plot of INRA (French National Institute for Agricultural Research) in Orléans (Centre, France), a clay-loam soil on an experimental site in Estrée-Mons (Picardie, France) and fractured limestone at the vicinity of Grand (Vosges, France). In the case of the sandy alluvium, the values of dielectric permittivity measured are closed to those of HF permittivity and allow the use of existing theoretical models to determine the soil water content. For soils containing higher amount of clay, empirical relations established using the laboratory experimentations are used to calculate a first estimation of the water content. These values are confirmed by the measured mass water contents.

Key words:

dielectric permittivity, electrical conductivity, medium frequency range (100 kHz – 10 MHz), electromagnetic mapping, water content, clay content.

Remerciements

Ce mémoire de thèse n'aurait jamais pu voir le jour sans l'aide et le soutien de toute une équipe que je souhaite remercier ici :

Alain Tabbagh, qui a guidé mes premiers pas dans la géophysique de subsurface et m'a accordé sa confiance en acceptant de diriger cette thèse. J'ai appris beaucoup à vos côtés et je tâcherai d'appliquer vos conseils toujours avisés.

Fayçal Réjiba, mon co-directeur de thèse, qui a su me remettre dans le droit chemin lorsque je le perdais de vue. Merci de m'avoir supporté jusqu'au bout.

Bernard Bourgeois qui m'a donné le goût et la curiosité d'aller fouiller le domaine des fréquences moyennes. Nos discussions interminables jusqu'à la tombée de la nuit m'ont fait aimer la recherche !

Isabelle Cousin et Sébastien Lambot qui ont accepté d'être les rapporteurs de mon travail de thèse. Merci pour toutes les heures que vous avez passé à relire ce mémoire.

Roger Guérin et Philippe Cosenza qui ont accepté d'examiner cette thèse. Merci pour vos commentaires et remarques avisés.

Merci à l'ensemble de l'équipe de l'INRA d'Estrée-Mons, et en particulier Hubert Boisard et Nicolas Brunet, pour leurs conseils et leur disponibilité lors de mes missions sur le terrain, qu'il pleuve, neige ou vente...

Merci à toute l'équipe Science du sol de l'INRA d'Orléans et en particulier à Isabelle Cousin et Maud Séger pour avoir rendu les prospections sur leur parcelle aussi aisées, tant d'un point de vue logistique qu'humain.

Merci à Bertrand Maillot, Pauline Souloumiac et l'ensemble du Département Géosciences et Environnement de l'université de Cergy-Pontoise pour m'avoir fait découvrir le monde des maquettes en sable et pour avoir rendu possible mes mesures à l'aide de la semeuse.

Ces années de thèse n'auraient pas été les mêmes sans l'ensemble des équipes de l'UMR Sisyphe. Merci à Pierre Ribstein pour m'avoir accueilli au sein de son unité pendant ces quatre années. Mes pensées vont particulièrement à l'ensemble des géophysiciens de l'UMR Sisyphe et notamment à Roger Guérin, Christian Camerlynck, Nicolas Florsch et Ludovic Bodet. Nos échanges m'ont permis d'élargir mes horizons à la fois scientifiques et pédagogiques. Merci à Julien Thiesson pour son intérêt et son enthousiasme. Merci pour avoir partagé ton expérience en terme de développement d'appareils EM et tes interrogations qui m'ont souvent aidée à clarifier mes idées. Merci à Blaise Souffaché pour avoir éveillé ma curiosité concernant la caractérisation physique des pierres de monument.

Merci également aux dream-team techniques, administratives et informatiques du laboratoire : Sébastien Flageul, Jean-Pierre Pencole, Maya Sitruk, Valérie Girard, Nora Roger, Dominique Daloz et tous les autres. Sisyphe ne marcherait pas aussi aisément sans vous.

Comment ne pas remercier non plus tous mes compagnons de thèse, anciens et nouveaux doctorants qui sont devenus bien plus que des collègues. Dans le désordre, je pense à Gonca Okay et ses ondes positives, Amine Dhemaied et ses bons plans, Claire Brinon et ses dosettes (bien utiles en cas de prospection hivernale). Sans vous, les longues soirées au laboratoire auraient été bien solitaires. Merci également à Cyril Schamper, ses codes et ses encouragements ; à Rémi Valois et sa bonne humeur ainsi qu'à Marie Pétronille et ses imitations. Merci à Samir Seladji et Assal Sirhan pour nos discussions scientifiques et culturelles. Merci à Solène Buvat, Quentin Vitale et Sylvain Pasquet, la nouvelle équipe du bureau des doctorants. Votre soutien pendant la phase terminale de ma rédaction a été plus qu'important !

Je n'oublie pas non plus les stagiaires qui m'ont secondé efficacement au cours des expérimentations en laboratoire et sur le terrain. Leur motivation n'a jamais faibli, malgré des conditions parfois difficiles. Merci à Min Than Vu, Duc Manh Nguyen et Julie Rodrigues.

Pour leur soutien et leur présence, je tiens à remercier mes amis alsaciens, théâtraux, polytech'iens ou d'autres provenances.

Enfin, merci à ma famille d'avoir toujours été présente. Merci pour votre soutien, votre confiance et vos encouragements. Sans vous cette aventure n'aurait pu voir le jour.

« S'il n'y a pas de solution, c'est qu'il n'y a pas de problème. »

Devise Shadok, J. Rouxel

Sommaire

Chapitre 1 : Eléments d'électromagnétisme	5
1. Introduction.....	7
2. Eléments de la théorie de l'électromagnétisme	7
3. Equation d'onde et domaine de fréquences étudié	12
4. Mécanismes de conduction et de polarisation	16
4.1. La conduction électrique	16
4.2. Mécanismes de conduction électrique dans un sol	17
4.3. La polarisation diélectrique	19
4.4. Mécanismes de polarisation diélectrique dans les sols	21
5. Lois de comportement électriques et diélectriques	25
5.1. Modèles phénoménologiques.....	25
5.2. Modèles empiriques.....	31
5.3. Modèles volumiques : lois de mélanges.....	33
5.4. Théorie des milieux effectifs	36
5.5. Conclusions.....	40
6. Conclusions.....	41

Chapitre 2 : Mesures en laboratoire	43
1. Introduction.....	45
2. Présentation des appareils utilisés.....	45
2.1. Mesure de permittivité diélectrique complexe.....	45
2.1.1. Principe.....	45
2.1.2. Caractéristiques du voltmètre vectoriel.....	47
2.1.3. Etude de la cellule capacitive	48
2.1.4. Calibration	53
2.2. Mesure de la conductivité électrique.....	55
2.2.1. Principe.....	55
2.2.2. Etudes des résistivimètres.....	55
2.2.3. Etude du quadripôle électrique.....	61
2.3. Calibration	65
3. Caractéristiques des matériaux employés	67
3.1. Sable de Nemours	68
3.2. Argiles	68
3.3. Sols naturels	69
3.4. Eau employée	70
4. Protocole expérimental.....	71
4.1. Mélange de la phase solide et de l'électrolyte.....	71
4.2. Mélange des constituants de la phase solide.....	72
4.3. Mode de dépôt de l'échantillon	72
4.4. Tests sur l'hétérogénéité de l'échantillon	73
5. Mesures sur des échantillons de sable.....	74
5.1. Influence de la teneur en eau.....	74
5.2. Influence de la salinité de l'eau	76
5.3. Influence de la structure de l'échantillon.....	79
5.4. Conclusion	80
6. Influence de la présence d'argiles.....	82
6.1. Influence de la dessiccation des argiles sur la mesure des paramètres électriques.....	82
6.2. Influence de la teneur en argile et du type d'argile présent.....	82
7. Mesures sur des sols naturels du site de l'INRA d'Estrée-Mons	91
8. Modèle empirique permettant de restituer la permittivité diélectrique dipolaire	95
9. Conclusions.....	101

Chapitre 3 : Développement d'un nouvel appareil de mesure <i>in situ</i>	103
1. Introduction.....	105
2. Modélisation – Choix du dispositif le plus adapté.....	105
2.1. Configurations envisagées.....	106
2.2. Estimation des seuils de bruit	107
2.3. Méthodes de calcul	110
2.4. Réponse pour un terrain homogène	112
2.5. Réponse à un terrain tabulaire à 2 couches.....	120
2.6. Estimation de la profondeur d'investigation.....	125
2.7. Conclusion	130
3. Inversion du couple (σ ; ε).....	131
4. Réalisation technique et étalonnage du prototype	135
4.1. Caractéristiques techniques du prototype.....	135
4.2. Etalonnage à la boule	139
4.3. Etude de l'influence de la hauteur du dispositif.....	142
5. Mesures <i>in situ</i>	143
5.1. Présentation des appareils géophysiques employés	143
5.2. Mesures sur les alluvions sableuses, site de l'INRA à Orléans (Ardon).....	145
5.3. Mesures sur les luvisols limoneux de l'INRA d'Estrée-Mons.....	154
5.4. Mesures sur les calcaires fracturés de Grand (Vosges).....	176
6. Conclusions.....	182
Conclusions	185
Références bibliographiques	191
Listes des Figures	201
Annexes	215

Introduction et objectifs

Parmi les méthodes géophysiques utilisées pour la description détaillée de la structure du proche sous-sol, les méthodes électriques et électromagnétiques occupent une place privilégiée, justifiée à la fois par la facilité de leur mise en œuvre et par la sensibilité des propriétés électriques aux variables d'état que l'on cherche à caractériser.

Alors que la prospection électrique *stricto sensu* peut être mise en œuvre à toutes les échelles géométriques, le rayon du volume investigué étant de l'ordre de grandeur de l'écartement entre les électrodes, le domaine des méthodes électromagnétiques est beaucoup plus complexe : il n'existe pas de loi de similitude simple valable pour toutes les fréquences et toutes les échelles géométriques. Les appareils disponibles sur le marché, répondant chacun à un besoin différent, se classent en deux catégories : les radars-sols (ou Ground Penetrating Radar), qui utilisent des fréquences comprises entre 20 MHz et 1 GHz, et les appareils basse fréquence, appelés couramment EMI (Electromagnetic Induction), dont la fréquence de fonctionnement ne dépasse pas 100 kHz. Il existe donc une lacune dans la pratique exploratoire centrée sur la gamme des fréquences moyennes (MF pour Medium Frequencies) comprises entre 300 kHz et 3 MHz.

Cette lacune s'explique par l'histoire du développement des méthodes d'exploration d'une part et par la complexité des phénomènes électromagnétiques présents dans les sols et les roches dans cette gamme de fréquences d'autre part.

Les méthodes EMI se sont en effet développées dans les années 1930 à partir des besoins de la prospection minière. Tout en pouvant se satisfaire d'une faible résolution spatiale, elles nécessitaient une profondeur de pénétration importante (supérieure à 20 m). La conductivité électrique des milieux superficiels mesurée par les méthodes EMI, qui s'étend sur une gamme importante de valeurs, est nettement dominante aux basses fréquences. Les phénomènes de polarisation peuvent donc être négligés en première approximation et on se retrouve dans une situation où les champs mesurés peuvent être exprimés uniquement à l'aide de la conductivité électrique.

Le développement des radars-sols, plus tardif, a débuté dans les années 1970 par des études portant sur les pergélisols. Si ces ondes hautes fréquences fournissent une image précise des interfaces, elles sont également caractérisées par une profondeur d'investigation plus faible, ne dépassant pas 3 m dans la plupart des terrains de surface. Dans ce domaine, les phénomènes de polarisation, traduits par la permittivité diélectrique, sont prédominants et associés à la propagation des courants de déplacement plutôt que des courants de conduction. La conductivité électrique, qui n'intervient plus que dans l'amortissement du signal en profondeur, joue alors un rôle moindre. On a rapidement observé que la permittivité mesurée dans cette gamme de fréquence était très dépendante du contenu volumique en eau liquide. Une méthode de détermination de ce paramètre, la TDR (Time Domain Reflectometry), a alors été développée et est aujourd'hui couramment utilisée. Il est ensuite apparu que la principale limite à l'utilisation des radars-sols, malgré les possibilités d'amplification du signal jusqu'à 90 dB, était la teneur en argile des sols.

Compte-tenu de l'état des connaissances dans le domaine des hautes et des basses fréquences, une profondeur d'investigation métrique peut être envisagée pour un appareil fonctionnant dans le domaine des fréquences moyennes. Les publications, très peu nombreuses, s'intéressant au développement d'un appareil dans cette gamme de fréquences (Tabbagh, 1994 ; Stewart *et al.*, 1994) confirment cette estimation. Les courants de conduction s'ajoutant aux courants de déplacement en MF, aucune simplification dans les équations n'est attendue et la conductivité électrique et la permittivité diélectrique peuvent être mesurées simultanément. Ces paramètres étant dispersifs, il est nécessaire de les étudier sur l'ensemble de cette gamme de fréquences. Des mesures au laboratoire en conditions contrôlées sont donc nécessaires pour déterminer l'influence des différents paramètres d'état d'un sol ou d'une roche sur ses propriétés électriques à une fréquence donnée. La littérature concernant les mesures sur échantillons, plus abondante (Smith et Rose, 1933 et 1935 ; Scott *et al.*, 1967 ; Kutrubes, 1986 ; Olhoeft, 1987 ; Knight et Nur, 1987 ; Knoll et Knight, 1994), reste néanmoins incomplète.

L'objectif de ce travail de thèse est donc double :

- Apporter une contribution à l'étude des variations de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique sur l'ensemble du domaine des fréquences moyennes en contrôlant les principaux paramètres d'état du matériau étudié : nature des différents composants de la matrice solide, teneur en argile, porosité, teneur en eau, salinité de l'électrolyte ...
- Développer un prototype d'appareil de mesure fonctionnant dans le domaine des fréquences moyennes permettant de cartographier la conductivité électrique et la permittivité diélectrique d'un sol sur le premier mètre de profondeur. Ces mesures trouvent un intérêt particulier dans la détermination du contenu en eau d'un sol, les deux paramètres électriques étudiés ne possédant pas la même sensibilité aux variations de teneur en eau.

Ce mémoire de thèse se structure en trois chapitres autour de ces objectifs.

Le chapitre 1 introduit la signification physique des paramètres électriques étudiés : la conductivité électrique et la permittivité diélectrique. On décrit également les phénomènes de conduction et de polarisation ainsi que leurs relations avec les constituants et caractéristiques du milieu poreux. Enfin, on évoque les différents modèles proposés afin de simuler le comportement de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique dans le domaine fréquentiel compris entre quelques millihertz et plusieurs gigahertz.

Le chapitre 2 s'intéresse à l'étude expérimentale menée en laboratoire sur plusieurs types de milieux poreux afin de comprendre l'influence de différents paramètres d'état sur la mesure des paramètres électriques. Après une description des outils utilisés et une étude de leurs limites, les résultats expérimentaux sont présentés dans le cas d'un sable et de mélanges artificiels argilo-sableux. La relation entre les paramètres électriques et la teneur en eau volumique est étudiée en fonction de l'argilosité de l'échantillon et de la salinité de l'eau. Enfin, des échantillons de sols naturels provenant du site de l'INRA d'Estrée-Mons sont étudiés suivant la même méthodologie. L'objectif de ce chapitre est de proposer une première relation empirique simple reliant les paramètres électriques mesurés à la teneur en eau volumique du sol en fonction de ses caractéristiques intrinsèques et de la fréquence de mesure employée.

Le chapitre 3 présente l'ensemble du processus de construction du prototype de mesure permettant de cartographier simultanément la conductivité électrique et la permittivité diélectrique dans le domaine des fréquences moyennes. Après une étude des caractéristiques géométriques optimales d'un appareil adapté à la mesure des paramètres électriques sur un volume d'investigation métrique, les tests effectués sur des objets simples de propriétés connues sont présentés. Ils permettent de contrôler le bon fonctionnement de l'appareil et sont utilisés pour son étalonnage. Enfin, les premières expérimentations *in situ* sur différents terrains, présentant des contrastes de texture et de teneur en eau, sont analysées. Une première interprétation en terme de cartographie de teneur en eau, tracée à partir des relations établies au chapitre 2 est proposée.

Chapitre 1 : **Eléments d'électromagnétisme**

1. Introduction

Dans ce chapitre sont présentés les paramètres électriques qui pourront être mesurés aux fréquences moyennes. Les relations existantes entre la conductivité électrique, la permittivité diélectrique et les champs électromagnétiques appliqués sont décrites à l'aide des équations de Maxwell. Ces paramètres étant dispersifs, i.e. variables avec la fréquence, leur influence respective dans la mesure du champ secondaire se manifeste au travers du nombre d'induction, dont l'expression dépend de la gamme de fréquence étudiée.

Une description des différents mécanismes de polarisation et de conduction présents dans les sols, en fonction de la fréquence de mesure employée, est ensuite proposée.

Enfin, différentes lois de comportement permettant de modéliser les variations des paramètres en fonction des caractéristiques du sol étudié (modèles empiriques, volumiques et modèles issus de la théorie des milieux effectifs) et de la fréquence de mesure (modèles phénoménologiques) sont présentées.

2. Eléments de la théorie de l'électromagnétisme

Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, l'électricité, le magnétisme et l'induction étaient considérés comme indépendants et différentes lois (Gauss, Ampère et Faraday) étaient utilisées afin de décrire le comportement des champs dans ces différents domaines. C'est en 1865 que le physicien écossais James Clark Maxwell propose l'unification de ces théories sous la forme d'un système de vingt équations différentielles à vingt inconnues (Maxwell, 1865), bientôt réduites à quatre (Maxwell, 1873). Ces relations permettent de décrire le comportement du champ électromagnétique et son interaction avec la matière, et fixent un cadre mathématique précis au concept fondamental de champ introduit par Faraday dans les années 1830.

Dans la suite du développement, les lettres minuscules représentent les grandeurs dans le domaine temporel (fonctions du temps) et les lettres majuscules représentent les grandeurs dans le domaine de Fourier (fonctions de la fréquence).

La forme locale de ces équations en milieu localement homogène, en dehors des sources, s'écrit :

Equation de Maxwell-Gauss :

$$\operatorname{div}(\vec{d}) = q_V \quad (I-1)$$

Equation de Maxwell-Thomson (conservation du flux) :

$$\operatorname{div}(\vec{b}) = 0 \quad (I-2)$$

Equation de Maxwell-Faraday :

$$\overline{\operatorname{rot}}(\vec{e}) = -\frac{\partial \vec{b}}{\partial t} \quad (I-3)$$

Equation de Maxwell-Ampère

$$\overline{\operatorname{rot}}(\vec{h}) = \vec{J}_C + \frac{\partial \vec{d}}{\partial t} = \vec{J}_C + \vec{J}_D \quad (I-4)$$

- Avec \vec{e} : champ électrique [V/m]
 \vec{d} : induction électrique (ou déplacement diélectrique) [C/m²]
 \vec{h} : champ magnétique [A/m]
 \vec{b} : induction magnétique en tesla [T]
 q_V : densité volumique de charge électrique [C/m³]. On peut démontrer que $q_V = 0$ car il y a autant de charges positives que de charges négatives à l'échelle macroscopique
 \vec{J}_C : densité de courant de conduction [A/m²]
 \vec{J}_D : densité de courant de déplacement (ou de polarisation) [A/m²] : $\vec{J}_D = \partial \vec{d} / \partial t$

On définit également la densité totale de courant \vec{J}_t comme étant la somme de la densité de courant de conduction et de la densité de courant de déplacement :

$$\vec{J}_t = \vec{J}_C + \vec{J}_D$$

Afin de résoudre entièrement le système des équations de Maxwell, il est nécessaire de disposer d'informations complémentaires. Dans le domaine fréquentiel, pour un milieu linéaire, des relations constitutives sont introduites entre :

- la densité de courant de conduction et le champ électrique :

$$\vec{J}_C = \sigma^*(x, y, z, \omega, \dots) \cdot \vec{E} \quad (1-5)$$

- l'induction électrique et le champ électrique :

$$\vec{D} = \varepsilon^*(x, y, z, \omega, \dots) \cdot \vec{E} \quad (1-6)$$

- l'induction magnétique et le champ magnétique :

$$\vec{B} = \mu^*(x, y, z, \omega, \dots) \cdot \vec{H} \quad (1-7)$$

Si, en théorie, ces relations peuvent prendre n'importe quelle forme, les expérimentations ont montré que l'introduction des paramètres complexes σ^* , ε^* et μ^* représentait une bonne solution. Ces paramètres constitutifs sont représentatifs d'une réalité physique et dépendent en particulier de la position (x, y, z) du point de mesure dans l'espace, de la fréquence (ω est la pulsation associée), de la valeur des champs émis E et H et des conditions du milieu (pression P, température T,...). On définit ces trois paramètres tels que :

μ^* est la perméabilité magnétique complexe : $\mu^* = \mu' + i\mu''$ avec μ' et μ'' en [H/m]

La perméabilité magnétique complexe peut également s'exprimer en terme de susceptibilité magnétique : $\mu^* = \mu_0 \cdot \mu_r^* = \mu_0 \cdot (1 + \kappa^*)$ avec κ^* susceptibilité magnétique volumique complexe ($\kappa^* = \kappa' - i\kappa''$) et μ_0 perméabilité magnétique du vide ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$) dans tous les cas. Ici, on considérera que la perméabilité magnétique de l'ensemble des matériaux étudiés est égale à celle du vide.

σ^* est la conductivité électrique complexe : $\sigma^* = \sigma' + i\sigma''$ avec σ' et σ'' en [S/m]

On peut parler indifféremment en termes de conductivité électrique, exprimée en S/m, ou de résistivité électrique, exprimée en $\Omega \cdot m$, l'un étant l'inverse de l'autre : $\rho^* = 1/\sigma^*$.

ε^* est la permittivité diélectrique complexe : $\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon''$ avec ε' et ε'' en [F/m]

La permittivité diélectrique réelle est généralement exprimée en termes de permittivité diélectrique relative à la permittivité diélectrique du vide telle que $\varepsilon' = \varepsilon_0 \varepsilon_r'$ où ε_0 représente la permittivité diélectrique du vide égale à $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

La permittivité diélectrique imaginaire traduit la dissipation d'énergie liée au déplacement ou à la réorientation des porteurs de charges. On parle de pertes diélectriques pour ε'' .

Les signes des parties réelles et imaginaires des trois propriétés sont choisis de manière à obtenir des valeurs positives pour chaque valeur mesurée.

Si en outre on considère le matériau isotrope et homogène, alors les relations constitutives peuvent s'écrire :

$$\vec{J}_C = \sigma^*(\omega) \cdot \vec{E} = [\sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega)] \cdot \vec{E} \quad (I-8)$$

$$\vec{D} = \varepsilon^*(\omega) \cdot \vec{E} = [\varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega)] \cdot \vec{E} \quad (I-9)$$

$$\vec{B} = \mu^*(\omega) \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (I-10)$$

On considère les parties réelles et imaginaires des paramètres étudiés dispersives. Une dépendance fréquentielle est en effet nécessaire pour les systèmes causaux mettant en jeu des paramètres complexes (Fuller et Ward, 1970).

En prenant en compte les relations constitutives, les équations de Maxwell en milieu homogène, dans le domaine de Fourier s'écrivent :

Equation de Maxwell-Gauss :

$$\varepsilon^*(\omega) \cdot \text{div}(\vec{E}) = 0 \quad (I-11)$$

Equation de Maxwell-Thomson (conservation du flux) :

$$\mu_0 \cdot \text{div}(\vec{H}) = 0 \quad (I-12)$$

Equation de Maxwell-Faraday :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -i\omega\mu_0 \cdot \vec{H} \quad (I-13)$$

Equation de Maxwell-Ampère

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \sigma^*(\omega) \cdot \vec{E} + i\omega\varepsilon^*(\omega) \cdot \vec{E} \quad (I-14)$$

L'expression de la densité totale de courant peut également s'exprimer à partir des considérations précédentes comme :

$$\begin{aligned}\vec{J}_t &= \vec{J}_C + \vec{J}_D = [\sigma^*(\omega) + i\omega\varepsilon^*(\omega)].\vec{E} \\ \vec{J}_t &= [(\sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega)) + i\omega(\varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega))].\vec{E} \\ \vec{J}_t &= \left[(\sigma'(\omega) + \omega\varepsilon''(\omega)) + i\omega\left(\varepsilon'(\omega) + \frac{\sigma''(\omega)}{\omega}\right) \right].\vec{E}\end{aligned}\quad (I-15)$$

En pratique, on mesure les parties réelles et imaginaires de la densité totale de courant. On introduit une conductivité électrique réelle effective et une permittivité diélectrique réelle effective qui permettent d'exprimer ces grandeurs :

$$\begin{aligned}\sigma'_{eff}(\omega) &= \sigma'(\omega) + \omega\varepsilon''(\omega) \\ \varepsilon'_{eff}(\omega) &= \varepsilon'(\omega) + \frac{\sigma''(\omega)}{\omega}\end{aligned}\quad (I-16)$$

Ces deux paramètres sont ceux réellement mesurés. Ils caractérisent le comportement du milieu lorsqu'un champ électrique \vec{E} lui est appliqué. La conductivité électrique réelle effective σ'_{eff} permet d'exprimer la partie de la densité de courant totale mesurée en phase avec le champ électrique \vec{E} appliqué et la permittivité diélectrique réelle ε'_{eff} celle en quadrature avec le champ \vec{E} .

En fonction des méthodes employées, on mesure la partie réelle de la densité de courant ou sa partie réelle et sa partie imaginaire. Dans le cas de la mesure de la densité de courant complexe, on définit un coefficient complexe unique qui qualifie la relation de proportionnalité entre \vec{J}_t et \vec{E} .

Selon la convention adoptée, on peut parler indifféremment en terme de conductivité effective complexe (aussi appelée admittivité complexe) ou de permittivité diélectrique effective complexe, définies telles que :

$$\begin{aligned}\sigma^*_{eff}(\omega) &= \sigma'_{eff}(\omega) + i\omega\varepsilon'_{eff}(\omega) \\ \varepsilon^*_{eff}(\omega) &= \varepsilon'_{eff}(\omega) - i\frac{\sigma'_{eff}(\omega)}{\omega}\end{aligned}\quad (I-17)$$

avec :

$$\sigma'_{eff}(\omega) = \sigma'(\omega) + \omega\varepsilon''(\omega) \quad (I-18)$$

$$\varepsilon''_{eff}(\omega) = \frac{\sigma'_{eff}(\omega)}{\omega} = \varepsilon''(\omega) + \frac{\sigma'(\omega)}{\omega} \quad (I-19)$$

$$\varepsilon'_{eff}(\omega) = \varepsilon'(\omega) + \frac{\sigma''(\omega)}{\omega} \quad (I-20)$$

$$\sigma''_{eff}(\omega) = \omega\varepsilon'_{eff}(\omega) = \sigma''(\omega) + \omega\varepsilon'(\omega) \quad (I-21)$$

La densité de courant totale pourra donc s'exprimer, en fonction du champ électrique appliqué \vec{E} , par :

$$\vec{J}_t = \sigma^*_{eff}(\omega) \cdot \vec{E} = i\omega \varepsilon^*_{eff}(\omega) \cdot \vec{E} \quad (I-22)$$

La conductivité électrique effective complexe et la permittivité diélectrique effective complexe dépendent de la fréquence. En fonction de la gamme de fréquences employée et des phénomènes étudiés, l'un ou l'autre de ces paramètres sont utilisés : aux basses fréquences, il est courant de parler en terme de conductivité électrique effective complexe (ou de résistivité électrique effective complexe), alors qu'aux hautes fréquences, le terme de permittivité diélectrique effective complexe est préféré.

On dispose donc de la mesure des parties réelle et imaginaire de la densité totale de courant \vec{J}_t pour retrouver les quatre paramètres intrinsèques caractérisant le milieu étudié σ' , σ'' , ε' et ε'' . Dans le cas général, et sans autre hypothèse, il n'est pas possible de séparer σ' et ε'' d'une part et ε' et σ'' d'autre part. En fonction des propriétés du milieu étudié et de la fréquence de mesure employée, il est cependant possible d'effectuer des simplifications dans les expressions (16) à (19) précédentes.

3. Equation d'onde et domaine de fréquences étudié

Le couplage des quatre équations de Maxwell dans le domaine temporel permet de retrouver l'équation dite de propagation-diffusion, vérifiée aussi bien par le champ magnétique \vec{H} que par le champ électrique \vec{E} :

$$\Delta \vec{H} - \mu^* \cdot \sigma^* \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu^* \cdot \varepsilon^* \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (I-23)$$

En régime sinusoïdal de pulsation ω , l'équation de propagation-diffusion peut s'écrire sous forme d'équation de Helmholtz :

$$\Delta \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (I-24)$$

k est le nombre d'onde complexe défini, pour une dépendance temporelle en $e^{+i\omega t}$, tel que :

$$\begin{aligned} k^2 &= -i\mu^*(\omega)\sigma^*(\omega) \cdot \omega + \mu^*(\omega)\varepsilon^*(\omega) \cdot \omega^2 \\ k^2 &= -i\omega \cdot \mu^*(\omega)[\sigma^*(\omega) + i\omega \cdot \varepsilon^*(\omega)] \end{aligned} \quad (I-25)$$

En utilisant les mêmes hypothèses que pour établir les relations (I-11) à (I-14), et en reprenant les définitions des paramètres effectifs précédemment établis (eq. (I-17) à (I-20)), l'expression du nombre d'onde s'écrit :

$$k^2 = -i\omega\mu_0 \cdot \sigma^*_{eff}(\omega) = -i\omega\mu_0 \cdot \sigma'_{eff}(\omega) \cdot \left(1 + i \frac{\omega \cdot \varepsilon'_{eff}(\omega)}{\sigma'_{eff}(\omega)}\right) \quad (I-26)$$

Afin d'étudier les effets des mécanismes de conduction et de polarisation, il est intéressant d'étudier l'évolution du rapport η défini tel que :

$$\eta = \frac{\omega \cdot \varepsilon'_{eff}(\omega)}{\sigma'_{eff}(\omega)} \quad (I-27)$$

Il représente la tangente de l'angle de pertes lorsqu'on étudie la conductivité.

Le nombre d'onde k peut être décomposé en partie réelle et imaginaire $k = a - ib$ avec :

$$\begin{aligned} a = Re(k) &= \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \varepsilon'_{eff}}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma'_{eff}}{\omega \varepsilon'_{eff}}\right)^2} + 1 \right)} \\ b = -Im(k) &= \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \varepsilon'_{eff}}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma'_{eff}}{\omega \varepsilon'_{eff}}\right)^2} - 1 \right)} \end{aligned} \quad (I-28)$$

Les solutions de l'équation de propagation-diffusion (eq. (I-23)) sont de la forme :

$$H(\vec{r}, t) = H_0(\vec{r}) \cdot e^{i(\omega t - kr)} \quad (I-29)$$

avec $H_0(\vec{r})$ fonction des variations géométriques du champ selon la nature de la source et la composante étudiée (Bourgeois et Lenain, 2002).

En décomposant le nombre d'onde en parties réelles et imaginaires, on obtient :

$$H(\vec{r}, t) = H_0(\vec{r}) \cdot e^{-br} e^{i(\omega t - ar)} \quad (I-30)$$

D'après la relation (I-28), la partie réelle a du nombre d'onde correspond à une propagation sinusoïdale sans amortissement. On définit alors la longueur radian comme la longueur associée à un déphasage de 1 radian :

$$\delta_R = \frac{1}{\text{Re}(k)} \quad (\text{I-31})$$

On remarque également que la partie imaginaire b du nombre d'onde est associée, par l'intermédiaire d'une exponentielle décroissante, à l'atténuation de l'onde. On définit l'épaisseur de peau du milieu conducteur comme la distance au bout de laquelle l'amplitude de l'onde est divisée par e :

$$\delta_I = -\frac{1}{\text{Im}(k)} \quad (\text{I-32})$$

Les solutions de l'équation de propagation-diffusion prennent alors la forme de :

$$H(\vec{r}, t) = H_0(\vec{r}) \cdot e^{-\frac{r}{\delta_I}} \cdot e^{i\left(\omega t - \frac{r}{\delta_R}\right)} \quad (\text{I-33})$$

Le nombre d'onde k , et par extension la longueur radian δ_R et l'épaisseur de peau δ_I dépendent de la conductivité électrique effective σ'_{eff} , de la permittivité diélectrique effective ε'_{eff} et de la fréquence (ou de la pulsation ω) en proportions variables. Dans l'expression (I-24) du nombre d'onde, la conductivité électrique effective est liée à ω , alors que la permittivité diélectrique effective dépend de ω^2 . En fonction de la fréquence de mesure, l'un ou l'autre terme pourra être négligé :

- aux basses fréquences, lorsque le paramètre $\eta \ll 1$, le terme contenant ε'_{eff} devient négligeable devant celui contenant σ'_{eff} .
- aux hautes fréquences, lorsque le paramètre $\eta > 1$, c'est le terme contenant σ'_{eff} qui est faible devant celui contenant ε'_{eff} .
- aux fréquences moyennes, lorsque le paramètre η est voisin de 1 ($\eta \in [0,1; 10]$), aucune simplification n'est possible.

Les expressions des différents paramètres d'étude en fonction de la gamme de fréquences employée sont rappelées dans le tableau I-1.

	Régime diffusif (ou conductif)	Régime général	Régime propagatif (ou diélectrique)
	$\eta \ll 1$	$\eta \in [0,1; 10]$	$\eta > 1$
Fréquences d'application	$f \leq 100 \text{ kHz}$	$100 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$f \geq 10 \text{ MHz}$
Nombre d'onde	$k^2 = -i\mu\sigma\omega$ $k = (1 - i)\sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}}$	$k^2 = -i\mu\sigma\omega + \varepsilon\mu\omega^2$ $k = (1 - i)\sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}}\sqrt{1 + i\varepsilon\omega/\sigma}$	$k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}\left(1 - i\frac{\sigma}{2\varepsilon\omega} + \dots\right)$
Longueur radian	$\delta_R = \delta_I = \delta_{\text{diff}}$	$\delta_R = 1/\omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}\left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon\omega}\right)^2}\right)}$	$\delta_R \approx 1/\omega\sqrt{\varepsilon/\mu}$
Épaisseur de peau	$\delta_{\text{diff}} = \sqrt{2/\mu\sigma\omega}$ $\delta_{\text{diff}} \approx 503\sqrt{\rho/f}$	$\delta_I = 1/\omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}\left(-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon\omega}\right)^2}\right)}$	$\delta_I \approx 2\rho\sqrt{\varepsilon/\mu}$

Tableau I-1 : Expressions des paramètres caractérisant les différents régimes. Les paramètres σ et ε désignent respectivement σ'_{eff} et ε'_{eff} .

En régime diffusif, δ_R et δ_I sont égaux, ce qui entraîne que le déphasage et l'atténuation sont reliés de manière invariable dans ce domaine. En effet, pour un accroissement de distance de δ , lorsque l'amplitude de l'onde est atténuée de $1/e$, parallèlement, celle-ci sera déphasée de 1 rad (ou 57°).

En régime diélectrique, le nombre d'onde peut quasiment être considéré comme un réel positif, surtout si le milieu est isolant ($\sigma = 0$). Cette caractéristique traduit un effet de propagation peu ou pas atténué. Si la conductivité est non nulle, un terme d'atténuation existe et les performances du RADAR géologique deviennent alors limitées, mais sans déformation des signaux en fonction de la fréquence puisque la distance d'atténuation δ_I ne dépend pas de la fréquence pour σ et ε constant. En présence de pertes diélectrique (pour des sols en présence d'argile), l'atténuation et la déformation des signaux seront dépendantes de la fréquence.

En pratique, la conductivité électrique et la permittivité diélectrique sont des paramètres dispersifs. Différents types de mécanismes de polarisation et de conduction, portant sur des objets différents, apparaissent en fonction de la gamme de fréquence employée. Ces mécanismes sont fonction des caractéristiques du milieu étudié, donc du sol.

Officiellement, le domaine des fréquences moyennes est égale à [300 kHz ; 3 Mhz]. Par extension, dans ce manuscrit, nous définirons les fréquences moyennes comme étant comprises entre 100 kHz et 10 MHz.

4. Mécanismes de conduction et de polarisation

Lors de l'application d'un champ électrique, plusieurs mécanismes de conduction et de polarisation apparaissent en fonction de la nature du matériau étudié. Après une description générale des mécanismes de conduction et de polarisation, le cas des sols, apparentés à des milieux poreux, est étudié. La nature des différents constituants du milieu et leurs interactions interviennent de façon différente dans la mesure de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique.

Un sol est en effet constitué de trois phases différentes (Coussy, 1991) :

- une phase solide composée des grains de la matrice. Ceux-ci sont constitués de minéraux de nature différente (argile, quartz, oxyde de fer,...)
- une phase liquide contenant des ions, également appelée électrolyte. Dans les sols, l'électrolyte présent sera généralement de l'eau présentant différents degrés de salinité.
- une phase gazeuse présente dans les pores du milieu si le sol n'est pas saturé en liquide.

La constitution de ces trois phases et les interactions entre elles permettent ou non l'apparition des différents processus de conduction et de polarisation décrits ci-dessous.

4.1. La conduction électrique

Les mécanismes de conduction électrique rendent compte du déplacement macroscopique des charges libres dans un milieu lorsqu'un champ électrique lui est appliqué.

La conductivité électrique, mesurée à l'aide de la densité de courant \vec{J}_c (eq. (I-8)), permet de quantifier ces mécanismes. Elle est influencée par le nombre de charges électriques présentes par unité de volume, leur vitesse de déplacement et, dans le cas des ions, leur valence. On peut distinguer deux mécanismes de conduction différents, liés à des charges électriques de nature différentes :

- **la conduction électrolytique** où les ions se déplacent au sein de l'électrolyte. Ce mécanisme dépend principalement de la salinité de l'électrolyte ainsi que de la température du fluide.
- **la conduction électronique** pour laquelle on observe un déplacement d'électrons. Ce type de conduction peut être lié à la fois à la présence de réactions électrochimiques qui induisent des transferts de charges (Olhoeft, 1985) et à un phénomène de diffusion (encore appelée conduction faradique), observé dans le cas milieux polarisables possédant des fréquences de relaxation comprises entre 10^{-4} et 10^6 Hz. La conduction électronique peut être très importante en présence de conducteurs métalliques de type oxydes ou sulfures.

La description de ces deux types de mécanisme de conduction mérite d'être précisée dans le cas des sols, considérés comme des milieux poreux.

4.2. Mécanismes de conduction électrique dans un sol

Les trois phases d'un sol apportent chacune une contribution différente à la conductivité électrique globale du milieu.

Grains solides

La plupart du temps, les minéraux constitutifs des sols sont isolants et possèdent une conductivité de l'ordre de 10^{-10} S/m. Aucun mécanisme de conduction ne peut donc se produire dans les grains solides à l'exception des conducteurs métalliques (or, cuivre,...), des semi-conducteurs tels les oxydes ou les sulfures ou encore des défauts présents dans le réseau cristallin des minéraux qui engendrent une conduction ionique au sein ou à la surface des minéraux impliqués.

Réseau poreux

Les mécanismes de conduction présents dans un sol sont liés aux caractéristiques de son réseau poreux et notamment à la présence d'eau. En effet, l'eau présente dans les pores permet :

- le transport des ions,
- l'échange de cations avec certains minéraux composant la matrice rocheuse
- la mise en place des processus d'adsorption/désorption à la surface des minéraux

La conductivité électrique de l'eau est fortement liée à sa salinité et à sa température. En effet, plusieurs types de cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ...) et d'anions (HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} ...) sont présents en quantité plus ou moins importante dans l'eau. Une augmentation de la force ionique et/ou de la température au sein de l'électrolyte impliquent une augmentation de la conductivité électrique mesurée.

Le degré de saturation en eau du milieu est également un facteur important dans la détermination de sa conductivité électrique. En effet, la conductivité électrique augmente avec la teneur en eau. De plus, il existe une teneur en eau minimale au-dessous de laquelle le film d'eau dans le réseau poreux n'est plus continu. Globalement, la forme et la connectivité du réseau poreux sont deux facteurs influençant de manière significative la conductivité électrique.

En plus de la conductivité volumique, liée aux effets de volume précédemment décrits, des phénomènes de conduction se produisent à la surface séparant la phase solide de la phase liquide.

Interface solide/liquide

A l'interface entre les grains solides et l'électrolyte, une conductivité de surface, liée à la présence d'une double couche électrochimique (ou DCE), se développe. En effet, à la surface de certains minéraux (notamment les minéraux argileux), on observe la présence d'anions adsorbés. Afin de rétablir l'électro-neutralité, des cations libres présents dans l'électrolyte migrent vers la surface des minéraux et se déplacent de façon tangentielle à la surface des grains.

Gouy (1910) et Chapman (1913) ont décrit ce phénomène par une couche électrochimique diffuse proche de la surface des grains où la concentration en ions présents dans l'électrolyte est supérieure à celle observée dans l'électrolyte à une distance supérieure de la surface des grains.

Stern (1924) propose le principe d'une double couche où la taille des ions en solution est prise en compte. Une première couche (couche de Stern) est ainsi définie entre la surface du minéral et le plan de Helmholtz où la modification du potentiel est la plus importante (Figure I-1). A cette première couche succède la couche diffuse où la concentration en ions est comprise entre celle de la couche de Stern et celle de l'électrolyte libre.

Cette conduction de surface est d'autant plus importante que l'interface solide/liquide est étendue, i.e. que la surface spécifique des minéraux est grande. Cette dernière observation est notamment valable dans le cas des minéraux argileux qui possèdent une structure en feuillets.

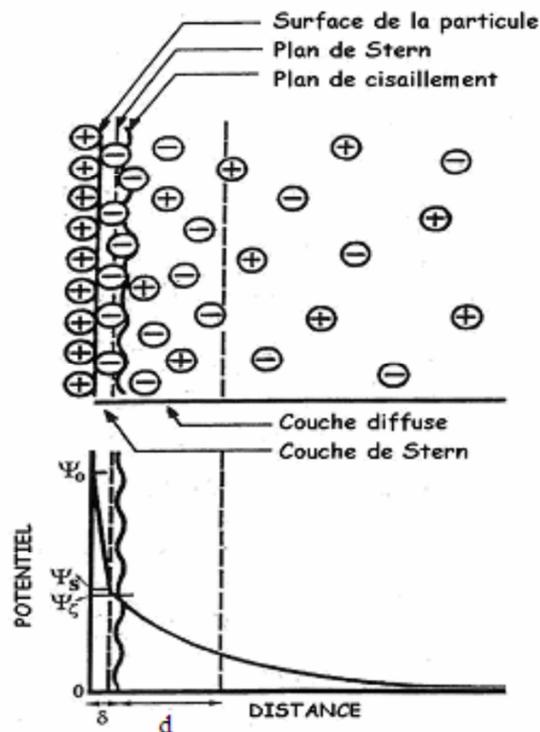


Figure I-1 : Modèle de Stern de la double couche électronique (d'après Shaw, 1992). Les Ψ_j représentent les potentiels (en V) : i) sur la surface du minéral (Ψ_0), ii) sur le plan de Helmholtz (couche de Stern), potentiel entre la couche de Stern externe et la solution électrolytique libre (Ψ_s), iii) entre la surface de cisaillement et l'électrolyte libre (Ψ_j), qui est supposé identique à Ψ_s .

4.3. La polarisation diélectrique

La polarisation diélectrique est un mécanisme qui rend compte du déplacement local ou de la réorientation des charges liées lorsqu'on applique un champ électrique.

La permittivité diélectrique, mesurée à l'aide de l'induction électrique \vec{D} (eq. (I-9)), permet de quantifier ces mécanismes

En régime sinusoïdal, les mécanismes de polarisation dépendent fortement de la fréquence du champ électrique appliqué. En effet, plus la fréquence de mesure augmente, c'est-à-dire plus la période du signal diminue, plus il est difficile pour les charges liées de suivre les variations du champ, et ce d'autant plus que la masse des éléments concernés (particule chargée) est importante.

En fonction des types de charges impliqués, on peut différencier plusieurs mécanismes de polarisation présents sur des gammes de fréquences différentes. A chaque mécanisme est associée une fréquence de relaxation qui détermine la gamme de fréquence jusqu'à laquelle ce type de polarisation peut être observé. Pour des fréquences inférieures à la fréquence de relaxation, la contribution du mécanisme de polarisation étudié à la permittivité diélectrique devient constante. La présence d'un phénomène de relaxation marque l'existence d'un délai de réponse du système soumis à une excitation extérieure comme l'application d'un champ électrique.

Dans le cas des milieux poreux, Olhoef (1976, 1979a et 1979b), Chelidze et Guéguen (1999) Chelidze *et al.* (1999) et Comparon (2005) décrivent les processus suivants :

Polarisation électronique

Lorsqu'un atome neutre est soumis à un champ électrique extérieur, on observe une distorsion de ses couches électroniques dans la direction du champ appliqué. L'atome impliqué possède alors un moment dipolaire qui se traduit macroscopiquement par une polarisation électronique du matériau.

La masse d'un électron étant très faible, ce mécanisme de polarisation pourra être observé jusqu'à des fréquences très élevées. La fréquence de relaxation associée à la polarisation électronique se situe autour de 10^{15} Hz.

Lorsque la fréquence de mesure est inférieure à 10^{15} Hz, la part de la permittivité liée à ce type de polarisation devient constante et proportionnelle au nombre d'électrons présents par unité de volume.

Polarisation atomique

L'application d'un champ électrique extérieur sur une molécule crée un réarrangement de la position des atomes les uns par rapport aux autres. En fonction de la nature des atomes présents et de leurs interactions, l'amplitude de la permittivité diélectrique varie.

La masse des atomes au sein de la molécule étant plus importante que celle des électrons au sein d'un atome, la fréquence de relaxation associée aux mécanismes de polarisation atomique est plus faible et comprise entre 10^{12} et 10^{13} Hz.

Polarisation dipolaire (ou moléculaire)

Certaines molécules sont porteuses d'un moment électrique permanent, lié à l'organisation et la nature des atomes présents. L'agitation thermique naturellement présente tend à désorienter ces molécules de façon aléatoire. L'application d'un champ électrique au milieu crée une réorientation de ces molécules dipolaires dans le sens du champ appliqué. Ce type de polarisation est fortement lié avec la température du milieu.

La masse d'une molécule dipolaire étant plus importante que la masse d'un atome au sein d'une molécule, les fréquences de relaxation associées à ce phénomène sont plus faibles que celles des polarisations électroniques et atomiques : elles sont comprises entre 10^9 et 10^{11} Hz.

Polarisation d'interfaces (ou polarisation de charges d'espace)

Dans le cas d'un milieu hétérogène contenant un électrolyte, l'application d'un champ électrique va provoquer la migration des porteurs de charges sur une distance limitée par des potentiels chimiques et électriques locaux. Ce type de polarisation dépend notamment de la nature et de l'arrangement des matériaux constitutifs du milieu.

Ses effets sont mesurables en dessous de 10^6 Hz et les fréquences de relaxation associées s'étendent sur une large gamme de fréquences car la taille des porteurs de charges est assez variable et il existe une multiplicité de type d'interfaces possibles (notamment dans un sol humide). Il existe donc une multitude de fréquences de relaxation associées à ces effets, variant selon une loi de distribution qui n'est que très mal connue.

Parmi les polarisations d'interface, lorsque la fréquence diminue, on peut observer successivement l'apparition d'une polarisation de type Maxwell-Wagner, d'une polarisation d'électrode ou d'une polarisation de membrane (présence d'une double-couche électrochimique à la surface de certains grains solides chargés).

Dans ce mémoire, nous nous intéressons aux fréquences moyennes comprises entre 100 kHz et 10 MHz. Les polarisations électroniques et atomiques seront donc présentes et intégrées dans la mesure de la permittivité diélectrique comme une constante. La polarisation dipolaire introduira également une constante, liée à la quantité de molécules dipolaires présentes dans le matériau (dans le cas d'un sol, au nombre de molécules d'eau), dans la valeur de la permittivité diélectrique. Les fréquences de relaxation de la polarisation d'interface sont, quant à elles, situées dans la gamme de fréquences de notre étude, ce qui va complexifier les réponses EM.

4.4. Mécanismes de polarisation diélectrique dans les sols

Les différents constituants d'un sol interviennent de manière différente dans la mesure de la permittivité diélectrique :

Grains solides

Si l'on considère uniquement les différents minéraux constituant la matrice solide du sol, seuls les mécanismes de polarisation électronique et atomique sont présents. En dessous de 10^{12} Hz, la permittivité diélectrique relative associée sera donc constante et faible (inférieure à 7).

Réseau poreux

Plusieurs mécanismes de polarisation différents sont liés aux composants du réseau poreux.

En effet, la molécule d'eau est une des seules molécules dipolaires présentes dans les sols. Lors de l'application d'un champ électrique, les molécules d'eau vont tourner et créer une polarisation d'orientation. Cette caractéristique est surtout intéressante aux hautes fréquences où seule la polarisation dipolaire liée à la rotation de la molécule d'eau s'ajoute aux polarisations électroniques et atomiques, qui sont constantes au-dessous de 10^{12} Hz. La mesure de la permittivité diélectrique à haute fréquence ($f > 10$ MHz), à l'aide de radar-sol ou de sondes TDR, est intéressante car elle permet d'estimer directement la teneur en eau du sol. Cette estimation est possible car le contraste entre la permittivité diélectrique relative de l'eau ($\epsilon_r = 80,1$ à 20°C) et celle des autres composants du sol (pour la plupart des minéraux, $\epsilon_r < 5$) est important. Différents modèles permettent de rendre compte de ces relations (cf. chapitre 1-5).

De plus, des mécanismes interviennent aux interfaces entre les différents composants du milieu poreux ; ces phénomènes peuvent être regroupés d'un point de vue macroscopique sous le nom d'effet Maxwell-Wagner. D'après différentes modélisations, ce phénomène de polarisation se produit pour des fréquences comprises entre quelques kHz et quelques MHz (Leroy *et al.*, 2008 ; Tabbagh *et al.*, 2009).

Un premier processus observé est le déplacement local, en sens opposé, des cations et des anions présents dans l'électrolyte jusqu'à atteindre les interfaces grains solides/électrolyte. On observe alors une accumulation de charges positives d'une part et négatives d'autre part aux interfaces (Chen et Or, 2006b) (Figure I-2).

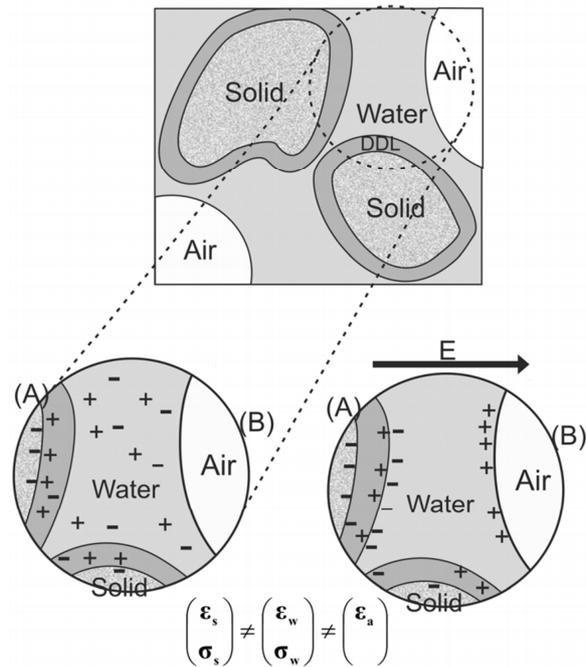


Figure I-2 : Représentation des effets Maxwell-Wagner dans un sol : (A) Alignement des cations de la double couche électrique (DDL) à l'interface solide/liquide ; (B) Accumulation des ions à l'interface liquide/air provoqué par le fort contraste de propriétés électriques entre les différentes phases. La permittivité apparente ϵ_a du milieu ne peut plus être calculée à partir d'une combinaison linéaire des permittivités de la phase solide ϵ_s et de la phase liquide ϵ_w (Chen et Or, 2006a).

De même, l'application d'un champ électrique peut modifier la répartition des ions dans la double-couche électronique lorsque des particules chargées sont présentes en surface des minéraux. Une polarisation d'interfaces de type électrochimique apparaît alors. La mesure de la permittivité diélectrique liée à ce type de polarisation est influencée par la nature des particules chargées, et notamment leur surface spécifique et leur capacité d'échange cationique (CEC). Les argiles, qui possèdent une surface spécifique et une CEC importantes présentent des caractéristiques favorables au développement de cette polarisation d'interface électrochimique.

D'autres mécanismes de polarisation d'interface, qui ne seront pas détaillés ici, apparaissent à plus basses fréquences :

- en présence de minéraux à conduction électroniques, une polarisation d'électrode se met en place pour des fréquences de mesure inférieures ou égale à quelques Hz.
- en présence de minéraux chargés, une polarisation de membrane se développe au niveau de la double couche électrochimique pour des fréquences de relaxation proches du mHz.

Les différents mécanismes de polarisation présents dans les sols ainsi que leurs caractéristiques sont rappelés dans le tableau I-2 et la figure I-3

	Description du mécanisme	Fréquence de relaxation	Matériaux concernés	Gamme de permittivité diélectrique relative
Polarisation électronique	Distorsion des couches électroniques par rapport au noyau atomique	10^{15} Hz	Tous	
Polarisation atomique	Déplacement des atomes les uns par rapport aux autres au sein d'une molécule	10^{12} - 10^{13} Hz	Tous	Matériaux isolants : $\epsilon_r \in [2,7]$
Polarisation dipolaire	Réorientation des molécules dipolaires	10^9 - 10^{11} Hz	Tous sauf matériaux isolants	Eau : $\epsilon_r = 80,1$ à 20°C
Polarisations d'interface	Déplacement local des porteurs de charges jusqu'à atteindre un piège électronique ou chimique	$< 10^7$ Hz	Matériaux hétérogènes	Sol argileux : $\epsilon_r > 100$

Tableau I-2 : Caractéristiques des différents mécanismes de polarisation présents dans les milieux poreux.

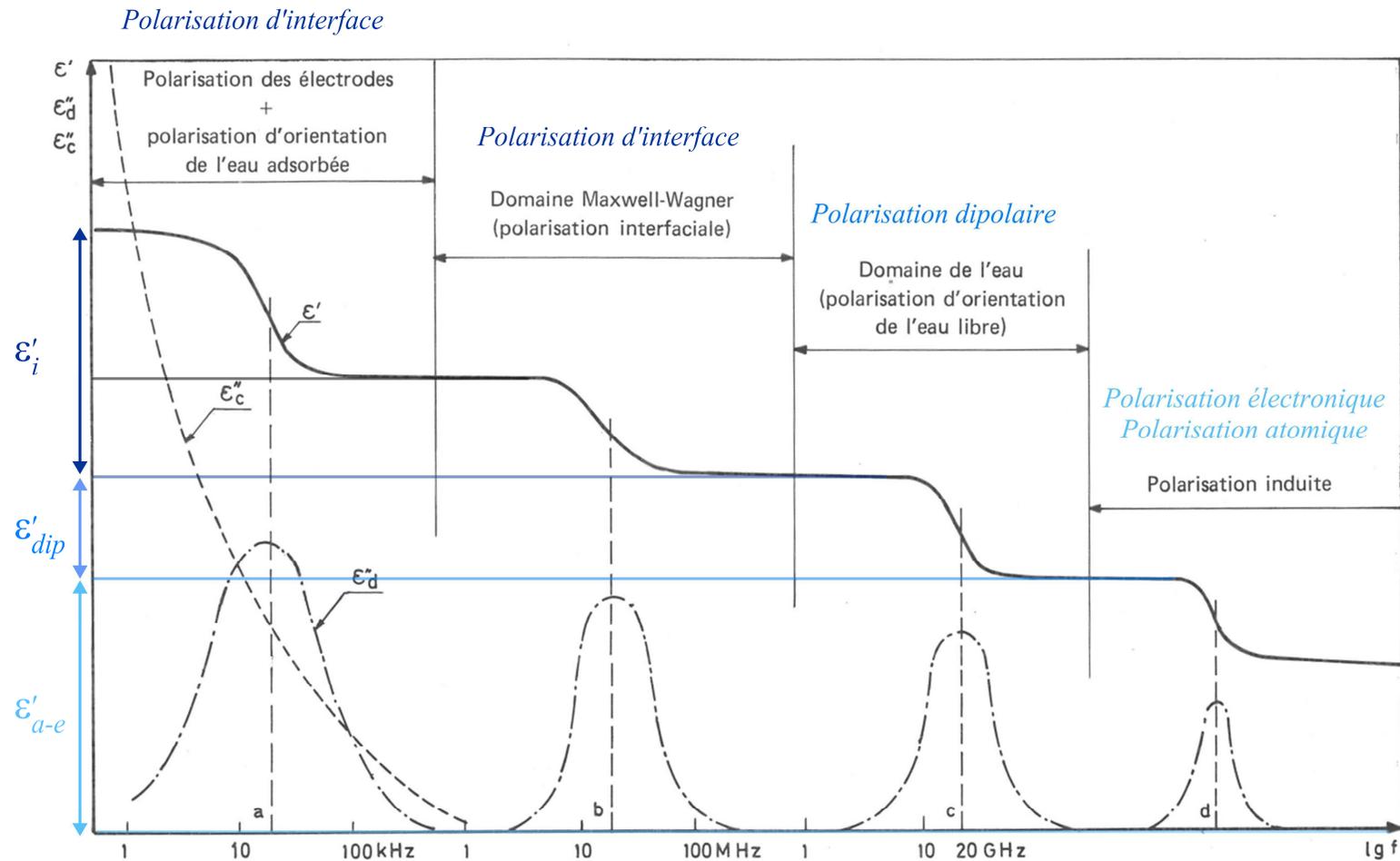


Figure 1-3 : Représentation schématique des variations de permittivité diélectrique réelle ϵ' et imaginaire ϵ''_d (pertes diélectrique) et ϵ''_c (influence de la conductivité) en fonction de la fréquence. Lors de l'apparition de chaque nouveau mécanisme de polarisation, une nouvelle permittivité est additionnée à la permittivité apparente avec : ϵ'_{a-e} permittivité liée aux polarisations électronique et atomique, ϵ'_{dip} permittivité liée à la polarisation dipolaire et ϵ'_i permittivité liée aux polarisations d'interface (polarisation de Maxwell-Wagner, polarisation d'électrode, de membrane...)
(d'après Tran Ngoc Lan et al., 1972).

5. Lois de comportement électriques et diélectriques

Différents types de modèles ont été élaborés afin de rendre compte des variations de conductivité électrique et de permittivité diélectrique en fonction des paramètres choisis pour la mesure (champ appliqué et fréquence) et des paramètres d'état du sol (porosité, saturation, argilosité...).

En effet, les différents mécanismes de polarisation possédant chacun leur propre fréquence de relaxation, la permittivité diélectrique est dispersive. En présence de phénomènes électrochimiques, la conductivité électrique est également dépendante de la fréquence de mesure. Les variations des paramètres électriques en fonction de la fréquence de mesure sont étudiées à l'aide de modèles phénoménologiques.

D'autres types de modèles ont alors été élaborés afin d'étudier le comportement des paramètres électriques relatif à différents paramètres d'état du sol. S'ils ne prennent pas en compte directement la fréquence de mesure dans leur expression, ils sont valables pour des gammes de fréquences données. Ainsi, la permittivité diélectrique haute fréquence a notamment été modélisée en fonction des teneurs volumiques des différentes phases (modèle de CRIM, loi de Topp,...).

Dans le domaine des fréquences moyennes, des polarisations d'interface de type Maxwell-Wagner apparaissent. Il est donc nécessaire d'étudier la permittivité diélectrique complexe à partir de lois de comportement traduisant un phénomène de relaxation. Un modèle phénoménologique a été employé dans ce but.

De plus, la teneur en eau étant un paramètre important dans cette étude, nous avons comparé les mesures obtenues aux lois de comportement classiques de la permittivité diélectrique et de la conductivité électrique représentant sa variation. Des modèles empiriques et volumiques ont ainsi été établis à haute fréquence pour la permittivité diélectrique et à basse fréquence pour la conductivité électrique. Leur extension dans le domaine des fréquences moyennes reste à établir.

Enfin, d'autres modèles reposant sur des bases physiques plus importantes, mais nécessitant un traitement plus long sont abordés dans ce chapitre. Ils ne sont pas utilisés dans le cadre de ce mémoire mais constituent une ouverture intéressante pour pousser encore plus loin l'interprétation des mesures obtenues.

5.1. Modèles phénoménologiques

La permittivité diélectrique et la conductivité électrique étant des paramètres dispersifs, il est nécessaire de modéliser leur comportement en fonction de la fréquence. Des fonctions analytiques permettent de décrire les spectres de conductivité électrique et de permittivité diélectrique à l'aide d'un nombre limité de paramètres ou en utilisant des circuits électroniques équivalents (Pelton *et al.*, 1983). Dans ce mémoire, nous appuierons notre raisonnement sur les fonctions analytiques décrites ci-dessous.

Modèle de Debye (1929)

L'expression la plus simple permettant de modéliser la relaxation d'un milieu homogène a été établie par Debye (1929) pour des liquides dipolaires. Elle exprime les parties réelles $\varepsilon'(\omega)$ et imaginaires $\varepsilon''(\omega)$ de la permittivité diélectrique complexe en fonction de la fréquence :

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + i\omega\tau_0)} \quad (I-34)$$

Où :

- ω représente la pulsation de mesure : $\omega = 2\pi f$
- ε_s est la permittivité diélectrique aux plus basses fréquences (permittivité diélectrique statique, pour une fréquence nulle)
- ε_∞ est la permittivité diélectrique aux plus hautes fréquences (pour une fréquence infinie)
- τ_0 est la constante de relaxation du milieu homogène qui s'exprime (Debye, 1929), en fonction de l'agitation thermique du système pour les molécules dipolaires d'un liquide par :

$$\tau_0 = \frac{4\pi\eta a^3}{kT} \quad (I-35)$$

avec η [*Pa.s*] la viscosité dynamique du liquide, T [*K*] sa température, k la constante de Boltzmann et a la rayon de la molécule dipolaire sphérique présente.

Si les parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique peuvent être représentées en fonction de la fréquence, l'étude de la variation de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle à l'aide d'un diagramme d'Argand peut s'avérer utile. Dans le cas du modèle de Debye, cette variation s'exprime telle que :

$$\left| \frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - \varepsilon_\infty} \right| = \omega\tau_0 \quad (I-36)$$

En fonction de la géométrie du milieu, un même mécanisme de polarisation pourra être observé avec un petit retard par rapport à la constante de temps de relaxation (ou la fréquence de relaxation). Une dispersion centrée autour de la fréquence de relaxation du mécanisme en jeu est alors observée. Le modèle de Debye ne permettant pas de prendre en compte ce facteur, Cole et Cole (1941) ont proposé une modification de l'équation (I-34).

Modèle Cole-Cole (1941)

Le modèle proposé par Cole et Cole (1941) s'appuie sur une relaxation de Debye, en ajoutant un coefficient α représentant la distribution des temps autour du temps de relaxation du mécanisme :

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + (i\omega\tau_0)^{1-\alpha})} \quad (I-37)$$

Le coefficient α possède une valeur comprise entre 0 et 1. Plus sa valeur s'approche de 1 et plus la distribution de temps de relaxation est large (Figure I-4).

La relation entre la partie réelle et la partie imaginaire de la permittivité diélectrique, représentée par le diagramme d'Argand, est alors égale à :

$$\left| \frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - \varepsilon_\infty} \right| = (\omega\tau_0)^{1-\alpha} \quad (I-38)$$

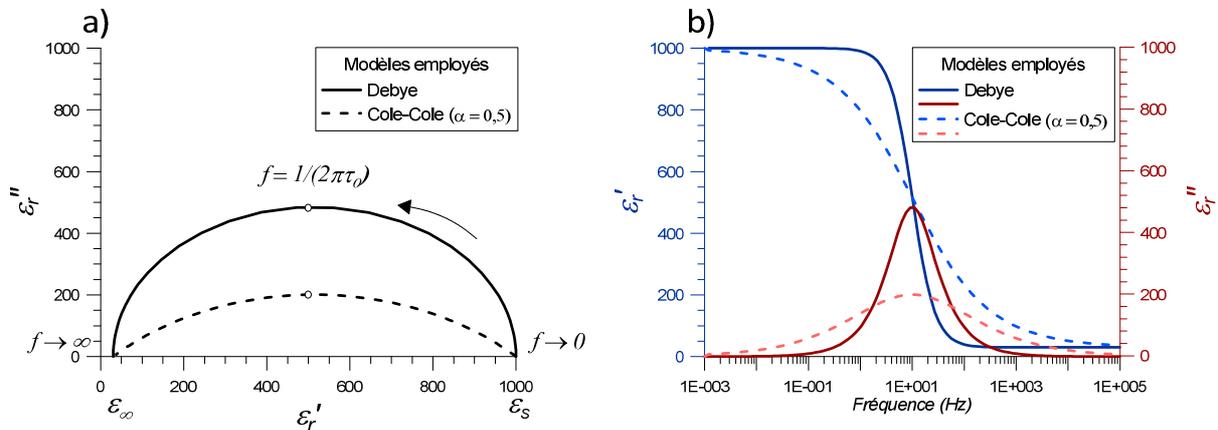


Figure I-4 : Comparaison des modèles de Debye et Cole-Cole pour une fréquence de relaxation centrale égale à 10 Hz ($\tau_0 \approx 0,016$ s), un coefficient α égal à 0,5 et des permittivités diélectriques effectives relatives statique et infinie égales à : $\varepsilon_s = 1000$ et $\varepsilon_\infty = 30$. Ces modèles sont représentés sous forme de diagramme d'Argand **a)** et en terme de partie réelle (bleue) et partie imaginaire (rouge) de la permittivité diélectrique effective en fonction de la fréquence **b)**.

Le modèle Cole-Cole ne prend cependant pas en compte le cas d'une distribution dissymétrique des temps autour d'un temps de relaxation « central ». Cette dissymétrie a été observée pour la première fois dans le cas de mesures sur du glycérol à basse température (Davidson et Cole, 1951) et serait liée à la réorientation des groupes hydroxyles, accompagnée de cassures de liaison, provoquant un élargissement de la distribution des temps de relaxation aux plus hautes fréquences.

Modèle Davidson-Cole (1951)

Davidson et Cole (1951) proposent d'introduire un coefficient β dans l'expression du modèle de Debye afin de rendre compte de cette dissymétrie :

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{(1 + i\omega\tau_0)^\beta} \quad (I-39)$$

Le coefficient β , appelé constante de Davidson-Cole, est compris entre 0 et 1. Le comportement dissymétrique est accentué lorsque la valeur de β s'approche de 0 (Figure I-5).

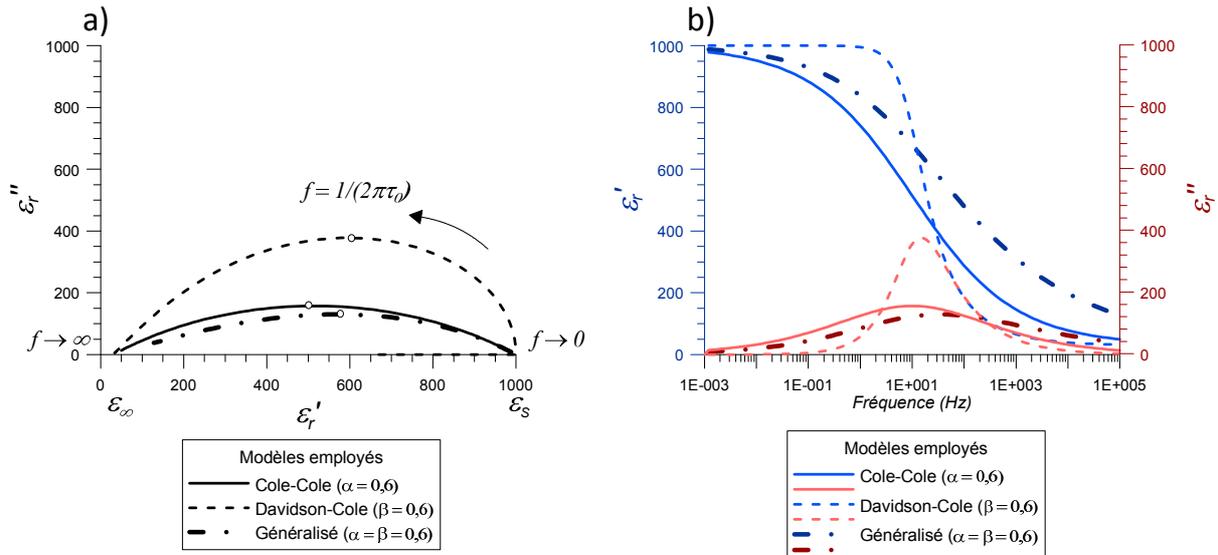


Figure I-5 : Comparaison des modèles Cole-Cole, Davidson-Cole et généralisé pour une fréquence de relaxation centrale égale à 10 Hz ($\tau_0 \approx 0,016$ s), pour des coefficients α et β égaux à 0,6 et des permittivités diélectriques effectives relatives statique et infinie égales à : $\varepsilon_S = 1000$ et $\varepsilon_\infty = 30$. Ces modèles sont représentés sous forme de diagramme d'Argand **a)** et en terme de partie réelle (bleue) et partie imaginaire (rouge) de la permittivité diélectrique effective en fonction de la fréquence **b)**.

Modèle généralisé

Afin de prendre en compte à la fois la distribution des temps autour du temps de relaxation du mécanisme de polarisation étudié et le caractère dissymétrique de cette dispersion, Havriliak et Negami (1966) proposent d'intégrer les coefficients α et β dans une même expression :

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{(1 + (i\omega\tau_0)^{1-\alpha})^\beta} \quad (I-40)$$

Ce modèle ne rend toutefois pas bien compte des processus observés dans le cas de milieux hétérogènes où différents diélectriques sont présents.

Dans ce cas, il existe plusieurs mécanismes de polarisation différents, possédant des fréquences de relaxation différentes. Ils sont liés à la présence de :

- porteurs de charges de nature et/ou de taille différentes,
- différents mécanismes de relaxation présents sur une même gamme de fréquences.

La permittivité diélectrique complexe peut alors être modélisée par l'expression suivante :

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{(1 + (i\omega\tau_j)^{1-\alpha_j})^{\beta_j}} \quad (I-41)$$

Un exemple d'application de cette forme généralisée peut être trouvé en figure I-7 où les parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique relative sont représentées en fonction de la fréquence lorsque trois mécanismes de relaxation différents sont présents.

Modèle de dispersion de la conductivité électrique

Un modèle phénoménologique peut être appliqué à la conductivité électrique lorsque le milieu étudié est le siège de réactions électrochimiques. On observe alors un mécanisme de relaxation par diffusion (Olhoeft, 1979b). Ce type de mécanisme apparait notamment dans le cas de roches contenant une minéralisation métallique. La conductivité électrique possède alors une partie imaginaire et sa partie réelle augmente avec la fréquence (Figure I-6). Son expression en fonction de la fréquence est donnée par :

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_{DC} \left[\frac{m(i\omega\tau_0)^n}{1 + (i\omega\tau_0)^n(1-m)} + 1 \right] \quad (I-42)$$

avec :

- m : chargeabilité ($m \in [0 ; 1]$), paramètre couramment utilisé en polarisation provoquée (ou PP) afin de décrire l'amplitude de l'effet PP (polarisation électrique variable dans le temps, apparaissant après injection d'un courant électrique) (Pelton *et al.*, 1983 ; Duckworth et Calvert, 1995).

$$m = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{DC}}{\sigma_\infty}}$$

où : σ_{DC} représente la conductivité électrique pour une fréquence nulle (en courant continu)

σ_∞ représente la conductivité électrique à haute fréquence ($f \rightarrow +\infty$)

n : constante possédant un rôle analogue au coefficient α du modèle Cole-Cole ($n \in [0 ; 1]$). $n = 0,5$ correspond au cas de processus de diffusion pure.

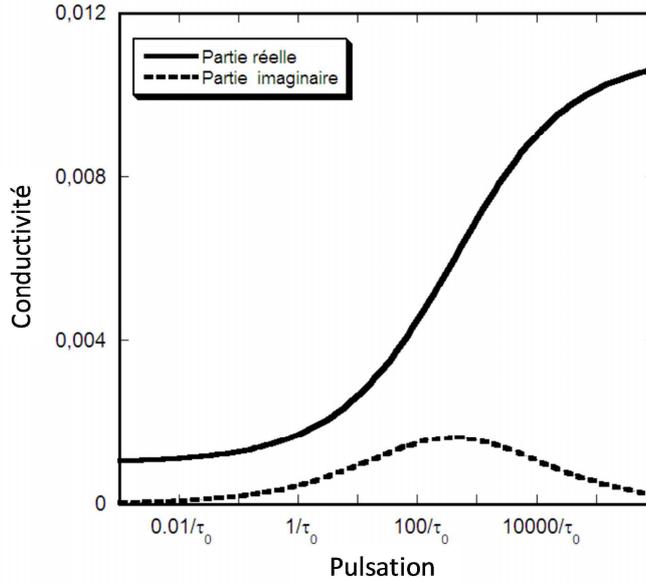


Figure I-6 : Représentation du modèle de dispersion de la conductivité électrique pour $\tau_0 = 1$ s, $m = 0,9$ et $\sigma_{DC} = 10^{-3} S/m$ (d'après Comparon, 2005).

Lorsque le milieu étudié ne présente pas de réactions électrochimiques, la conductivité électrique n'est plus dispersive et est égale à la conductivité pour une fréquence nulle (en courant continu) :

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_{DC}$$

Influence de la conductivité DC sur le spectre de permittivité complexe

Au chapitre 1-2 (eq. (I-18) à (I-21)), on a vu que seuls les paramètres électriques effectifs peuvent être mesurés et il est alors impossible de séparer les processus de conduction et de polarisation sans autres hypothèses. Ainsi, la partie réelle de la conductivité électrique intervient dans la mesure de la permittivité diélectrique effective imaginaire. Dans le cas où aucune réaction électrochimique n'a lieu, il est possible de prendre en compte la conductivité σ_{DC} dans la modélisation de la partie imaginaire de la permittivité diélectrique effective. Le modèle de la permittivité diélectrique effective complexe s'écrit alors :

$$\varepsilon_{eff}^*(\omega) = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{(1 + (i\omega\tau_j)^{1-\alpha_j})^{\beta_j}} + \frac{\sigma_{DC}}{i\omega} \quad (I-43)$$

Sur la figure I-7 sont présentées la partie réelle et la partie imaginaire de la permittivité diélectrique effective complexe modélisées à partir de l'équation (I-43) pour trois valeurs de conductivité électrique σ_{DC} ($\sigma_{DC} = 0$; $\sigma_{DC} = 10^{-6} S/m$; $\sigma_{DC} = 10^{-4} S/m$). On observe que les phénomènes de polarisation ne sont plus visibles dans les variations de la partie imaginaire aux plus basses fréquences. En effet, l'influence de la conductivité électrique σ_{DC} devient prédominante par

rapport aux variations liées aux pertes diélectriques. Cette influence de σ_{DC} est d'autant plus importante que sa valeur est grande.

De même, si des processus faradiques apparaissent dans le milieu étudié, la partie imaginaire de la conductivité électrique peut influencer la permittivité diélectrique effective réelle. Cette influence est toutefois moins importante et n'a pas été observée dans notre étude.

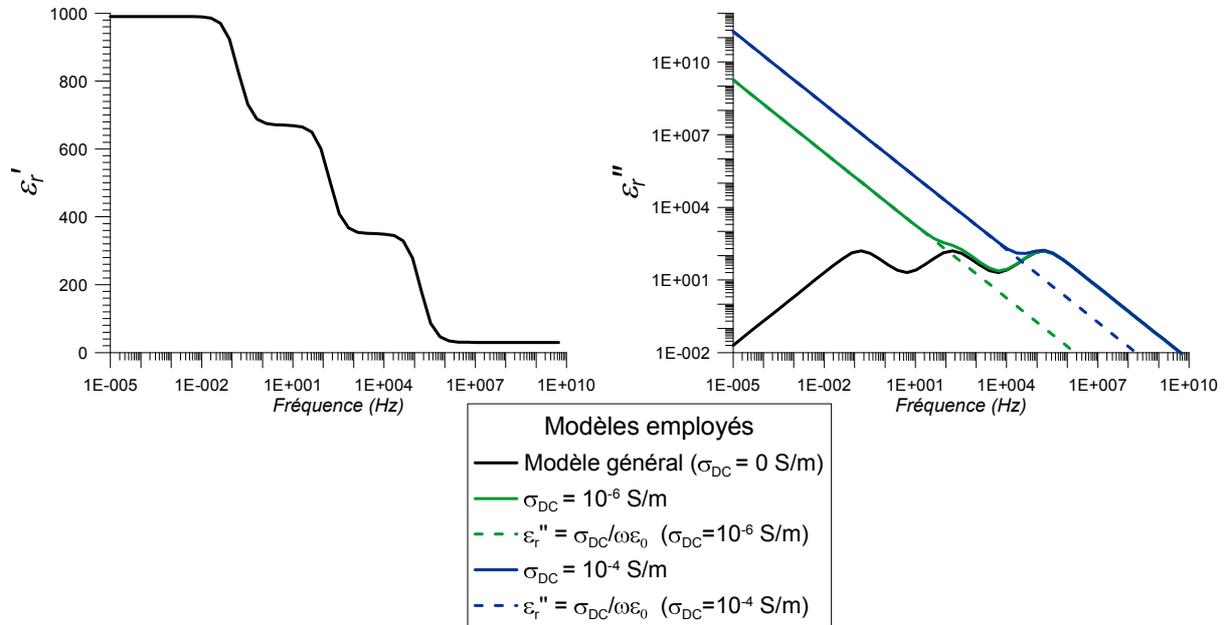


Figure 1-7 : Parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective relative représentées à l'aide du modèle général (eq. (I-43)) dans le cas de trois processus de polarisation différents, associés à trois fréquences de relaxation, pour trois coefficients α égaux à 0, trois coefficients β égaux à 1, trois coefficients C égaux à 0,33, une permittivité diélectrique relative statique ϵ_s égale à 1000 et une permittivité diélectrique relative infinie ϵ_∞ égale à 30, pour trois valeurs différentes de conductivité électrique ($\sigma_{DC} = 0 \text{ S/m}$, 10^{-6} S/m et 10^{-4} S/m), comparées avec un modèle prenant en compte uniquement σ_{DC} ($\epsilon''_{eff,r} = \sigma_{DC}/\omega\epsilon_0$).

5.2. Modèles empiriques

Les modèles empiriques sont des descriptions mathématiques de la relation entre les propriétés diélectriques et d'autres caractéristiques d'un milieu, en particulier sa teneur en eau volumique et sa texture. Des informations de nature physique ne sont pas nécessaires à une telle description. Par conséquent, un modèle empirique est dépendant de la série de données utilisée pour définir la relation. Cependant, la validité des modèles présentés a été éprouvée sur de nombreux jeux de données expérimentales.

Le modèle empirique le plus employé pour représenter la conductivité électrique basse fréquence (en courant continu : σ_{DC}) est la loi d'Archie. Dans le cas de la permittivité diélectrique haute fréquence, ne dépendant que de la polarisation dipolaire liée à la rotation de la molécule d'eau, Topp *et al.* (1980) ont établi expérimentalement le polynôme de Topp qui permet d'exprimer la permittivité diélectrique en fonction de la teneur en eau volumique de l'échantillon.

Loi d'Archie

A partir de données expérimentales mesurées sur un grand nombre d'échantillons provenant de différentes formations sableuses saturées en eau saline, Archie (1942) a montré que la conductivité électrique du milieu mesurée à basse fréquence (en fait en courant continu ou DC = Direct Current) obéissait à la relation suivante :

$$\frac{\sigma}{\sigma_w} = \frac{S_w^n}{F} = S_w^n \cdot \phi^m \quad (I-44)$$

avec :

- σ : conductivité électrique du milieu
- σ_w : conductivité de l'eau interstitielle
- S_w : degré de saturation de l'échantillon, égal au rapport entre le volume de l'eau et le volume des vides de l'échantillon, soit encore au rapport entre sa teneur en eau volumique θ et sa porosité : $S_w = V_w/V_v = \theta/\phi$
- F : facteur de formation défini comme le rapport entre la conductivité du fluide et la conductivité de l'échantillon : $F = \phi^{-m}$
- ϕ : porosité de l'échantillon
- m : exposant de cimentation avec $1,3 \leq m \leq 4$ pour la majorité des roches. Ce facteur varie en fonction du degré de consolidation, de l'argilosité ...
- n : exposant de saturation (pris égal à 2 en général)

Si cette relation peut être démontrée dans les cas les plus simples (réseau poreux représenté sous forme de tubes), un certain nombre de données expérimentales (Waxman et Smits, 1968), ainsi que des calculs théoriques et des simulations numériques (Roberts et Schwartz, 1985 ; Sen, 1987 ; Tabbagh *et al.*, 2002) ont montrées que cette loi était vérifiée dans un grand nombre de cas.

Loi de Topp

Le modèle classique de Topp (Topp *et al.*, 1980) utilise un polynôme du troisième degré pour décrire la relation entre la teneur en eau volumique du sol θ et la permittivité diélectrique relative apparente ϵ_r , sans tenir compte de la fréquence de relaxation de l'eau (qui correspond à une constante de temps beaucoup plus courte que les périodes de la gamme de fréquences considérée) :

$$\epsilon_r = 3,03 + 9,30 \cdot \theta + 146,00 \cdot \theta^2 - 76,70 \cdot \theta^3 \quad (I-45)$$

La formule, valable sur une gamme de fréquences de 100 MHz à 1 GHz, a donné de très bons résultats pour une large gamme de sols et d'humidités.

Cependant, aux fréquences plus élevées et à teneur en eau proche de la saturation ($\theta \sim 40\%$), le modèle de Topp peut surestimer la permittivité relative jusqu'à 20%. De même, aux très faibles teneurs en eau, le modèle de Topp ne fonctionne pas bien, surtout pour les sols ayant une teneur en argile élevée (Dirksen et Dasberg, 1993).

La masse volumique apparente, ainsi que la porosité des sols ont également un effet important sur la relation entre θ et ϵ_r . De même, le pourcentage en MO (matière organique du sol) joue un rôle non négligeable. Ainsi, des mesures diélectriques sur des échantillons à haute teneur en matière organique montrent que l'équation de Topp peut sous-estimer la teneur en eau d'environ 30% en écart relatif. La teneur en argile a aussi un effet significatif sur la permittivité diélectrique.

La relation inverse, permettant de retrouver la teneur en eau à partir de la mesure de la permittivité diélectrique relative apparente s'écrit :

$$\theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_r - 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_r^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon_r^3 \quad (I-46)$$

Les modèles empiriques sont ainsi une première approche permettant de relier les paramètres électriques mesurés à certaines caractéristiques du sol étudié. Cependant, leur application reste limitée aux types de sols pour lesquels ils ont été établis et ne permettent pas d'intégrer l'ensemble des paramètres constituant le sol. D'autres modèles, comme par exemple les modèles volumiques, ne présentant pas ces limitations ont donc été élaborés.

5.3. Modèles volumiques : lois de mélanges

Une autre approche utilisée pour modéliser la permittivité diélectrique d'un milieu est de la relier à la permittivité effective de chacun de ses composants, pondérés par leur fraction volumique. La matrice solide, l'espace des pores et la teneur en eau volumique du sol sont les paramètres d'entrée de base pour tous les modèles.

La dépendance fréquentielle n'est, quant à elle, pas prise en compte. De plus, certaines hypothèses sur l'arrangement géométrique des différents composants du milieu sont nécessaires au développement de cette approche (forme des grains ...).

Modèle « alpha »

Le modèle « alpha » (Lichtenecker, 1926) représente la forme la plus générale de ces modèles volumiques permettant d'exprimer la permittivité diélectrique relative du milieu ϵ_r en fonction de celle de ses différents constituants $\epsilon_{r,i}$, pondérée par leur fraction volumique V_i .

$$\epsilon_r^\alpha = \sum_{i=1}^N V_i \epsilon_{r,i}^\alpha \quad (I-47)$$

L'exposant α est un facteur géométrique qui dépend de l'angle formé entre la direction du litage des différents composants et celle du champ électrique appliqué. On considère ici une organisation tabulaire des différents composants les uns par rapport aux autres. Le coefficient α peut prendre des valeurs comprises entre -1 (arrangement en série des constituants) et 1 (arrangement en parallèle des constituants) (Figure I-8).

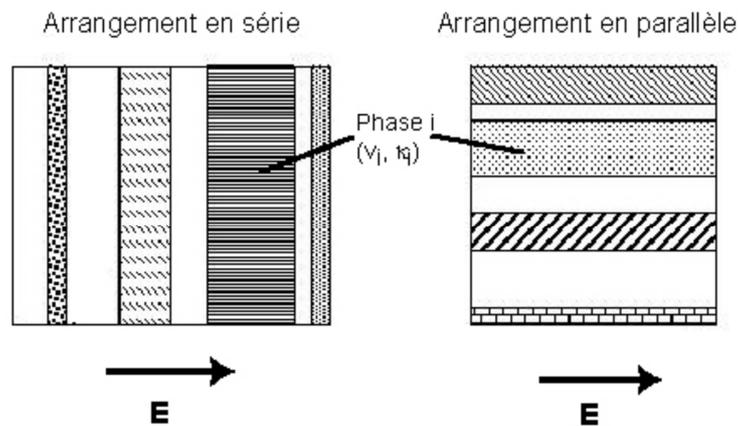


Figure I-8 : Organisations des différents diélectriques composant le milieu étudié, dans le cas d'un modèle « alpha », pour lesquelles le coefficient α est égal à -1 (arrangement en série des constituants par rapport à la direction du champ électrique appliqué \vec{E}) ou à 1 (arrangement en parallèle des constituants par rapport à la direction du champ \vec{E}) (d'après Comparon, 2005).

Modèle de CRIM

Le modèle de CRIM (Complexe Refractive Index Model) est un cas particulier du modèle « alpha » pour lequel le coefficient α est égal à $\frac{1}{2}$. Dans le cas d'un sol représenté par un milieu à trois phases, la formule CRIM s'écrit :

$$\sqrt{\varepsilon_r} = \theta \sqrt{\varepsilon_w} + (\phi - \theta) \cdot \sqrt{1} + (1 - \phi) \cdot \sqrt{\varepsilon_s} \quad (I-48)$$

Où ϕ est la porosité du sol,
 θ sa teneur en eau volumique,
 ε_r la permittivité diélectrique relative réelle du sol,
 ε_w la permittivité diélectrique relative de l'eau ($\varepsilon_w = 80,1$ à $20^\circ C$),
 ε_s la permittivité diélectrique relative de la phase solide, proche de 5 pour un grand nombre de sols (Knoll, 1996),

On considère que la permittivité diélectrique de l'air est égale à celle du vide ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} F/m$).

Ce modèle ne sera que très peu employé dans ce manuscrit car les valeurs de permittivités diélectriques obtenues sont très proches de celles calculées avec la loi de Topp. Elle n'apporte donc pas d'informations supplémentaires concernant l'allure et l'amplitude de nos courbes expérimentales.

Modèle de conductivité électrique

Zakri (1997) propose l'utilisation du même paramètre α pour retrouver la valeur de la conductivité électrique σ en fonction de la teneur en eau volumique θ de l'échantillon de sol étudié, qui varie entre un état sec ($\theta = 0$) et un état saturé ($\theta = \theta_{max} = \phi$) :

$$\frac{\sigma(\theta)}{\sigma(\theta_{max})} = \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right)^{1/\alpha} \quad (I-49)$$

On peut noter qu'en posant le paramètre α comme étant égal à 0,5, on retrouve la loi d'Archie pour $n = 2$.

Les modèles volumiques constituent donc une première approche de modélisation physique des paramètres électriques à l'aide des teneurs volumiques des différentes phases constituant le milieu. Ces modèles sont valables dans le cas d'agencement simple entre les différents constituants du milieu. L'hétérogénéité des milieux étudiés et l'agencement des phases les unes par rapport aux autres dans le cas d'un sol sont plus complexes. Des modèles semi-analytiques, issus de la théorie des milieux effectifs, peuvent alors palier en partie ces faiblesses.

5.4. Théorie des milieux effectifs

Une grande partie des explications sur la théorie des milieux effectifs présentées ci-dessous est issue de l'article de synthèse de Cosenza *et al.* (2009), ainsi que de la thèse de Comparon (2005).

Même si les modèles empiriques sont encore très utilisés, ils présentent le gros désavantage de ne reposer sur aucune base physique. Si les modèles volumiques représentent une première approche physique de modélisation, depuis plusieurs décennies, d'autres modèles de type semi-analytique ou numérique sont également développés.

Bien qu'ayant été utilisées avec succès pour modéliser la conductivité électrique DC (Adler *et al.*, 1992) ou la permittivité diélectrique (Tabbagh *et al.*, 2000), les méthodes numériques sont lourdes, et donc longues à implémenter.

Les modèles semi-analytiques, et plus particulièrement ceux utilisant les théories des milieux effectifs, représentent donc un bon compromis. Ils sont basés sur les équations fondamentales de Maxwell et possèdent une rapidité d'exécution intéressante. Contrairement aux méthodes numériques, on ne considère en effet qu'un volume élémentaire représentatif du milieu à modéliser. L'ensemble de la géométrie du milieu n'a donc pas besoin d'être connu.

Le principe de base de la théorie des milieux effectifs est de considérer le milieu étudié comme la somme d'une matrice et d'inclusions de forme connue (sphérique ou ellipsoïdale), ayant des paramètres électriques σ ou ε fixés. La différenciation entre les différents modèles issus de cette théorie va se faire dans la manière qu'ils ont d'inclure les interactions entre les différents constituants du milieu.

Différents types d'approximations existent dans le cadre de la théorie des milieux effectifs : approximation non auto-cohérente, approximation auto-cohérente, approximation auto-cohérente différentielle, ... Elles se distinguent les unes des autres par les hypothèses faites sur la valeur de la permittivité diélectrique de la substance encaissante.

Pour simplifier le discours et les expressions, on considère le cas d'un milieu à deux phases. Les différentes approches sont récapitulées dans le tableau I-3. Seul le raisonnement employé pour le modèle DEM est développé ci-dessous car il intègre les autres approches en prenant en compte les interactions électromagnétiques entre les grains du matériau.

	Expressions	Principes
Approximation non-auto-cohérente	$\frac{\varepsilon^* - \varepsilon_1}{\varepsilon^* + 2\varepsilon_1} = \phi \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1}$	On choisit un des composants comme étant le milieu encaissant → valable lorsqu'il y a peu d'interactions entre les champs dus aux différents composants
Approximation auto-cohérente (EMA = Effectif-medium approximation)	$\phi \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon^*}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon^*} + (1 - \phi) \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon^*}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon^*} = 0$	La permittivité de l'encaissant est égale à la permittivité macroscopique du milieu global → même rôle pour les différents composants
Approximation auto-cohérente différentielle (DEM = Differential effective medium)	$\left(\frac{\varepsilon^* - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}\right) \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon^*}\right)^d = 1 - \phi$	Prise en compte de l'interaction entre les inclusions
Modèle auto-similaire (Sen <i>et al.</i> , 1981)	$\left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon^*}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}\right) \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon^*}\right)^d = \phi$	Prise en compte de la continuité de l'espace poral

Tableau I-3 : Comparaison des différentes approximations effectuées dans le cadre de la théorie des milieux effectifs, dans le cas d'un mélange à deux phases où ε^* correspond à la permittivité effective du milieu, ε_1 est égale à la permittivité diélectrique de la matrice solide, ε_2 à la permittivité des inclusions (phase fluide), ϕ correspond à la porosité et d est un paramètre prenant en compte la forme des inclusions ($d = 1/3$ dans le cas d'inclusions sphériques).

Modèle DEM

Le modèle DEM considère un milieu poreux à plusieurs phases composé d'une matrice de permittivité fixée au sein de laquelle on ajoute pas à pas de petites inclusions, en faibles concentrations (diluées), ayant chacune une permittivité connue. Comparées aux autres méthodes, le modèle DEM permet de mieux prendre en compte les interactions électromagnétiques présentes entre les grains. Une étude basée sur la forme des grains est également possible (Cosenza et Tabbagh, 2004 ; Cosenza *et al.*, 2009). Nous n'aborderons pas cette problématique ici. Les résultats théoriques développés sont issus de l'article de Cosenza *et al.* (2003).

Dans la suite du raisonnement, on se placera dans le cas d'inclusions sphériques. Soit un milieu à trois phases α , β et γ . On considère un milieu γ , dans lequel on ajoute une suspension diluée des inclusions α et β , de volume respectif δV_α et δV_β (Figure I-9). On suppose le milieu incompressible : on retire donc autant de phase γ qu'on ajoute de δV_α et δV_β (Norris *et al.*, 1985).

La permittivité du milieu passe donc de $(\epsilon_r)_\gamma$ à $(\epsilon_r)_2$.

On ajoute alors à nouveau une suspension diluée des inclusions α et β , etc. Ce processus de construction se poursuit jusqu'à ce que les fractions volumiques des phases α et β (ϕ_α et ϕ_β) soient atteintes.

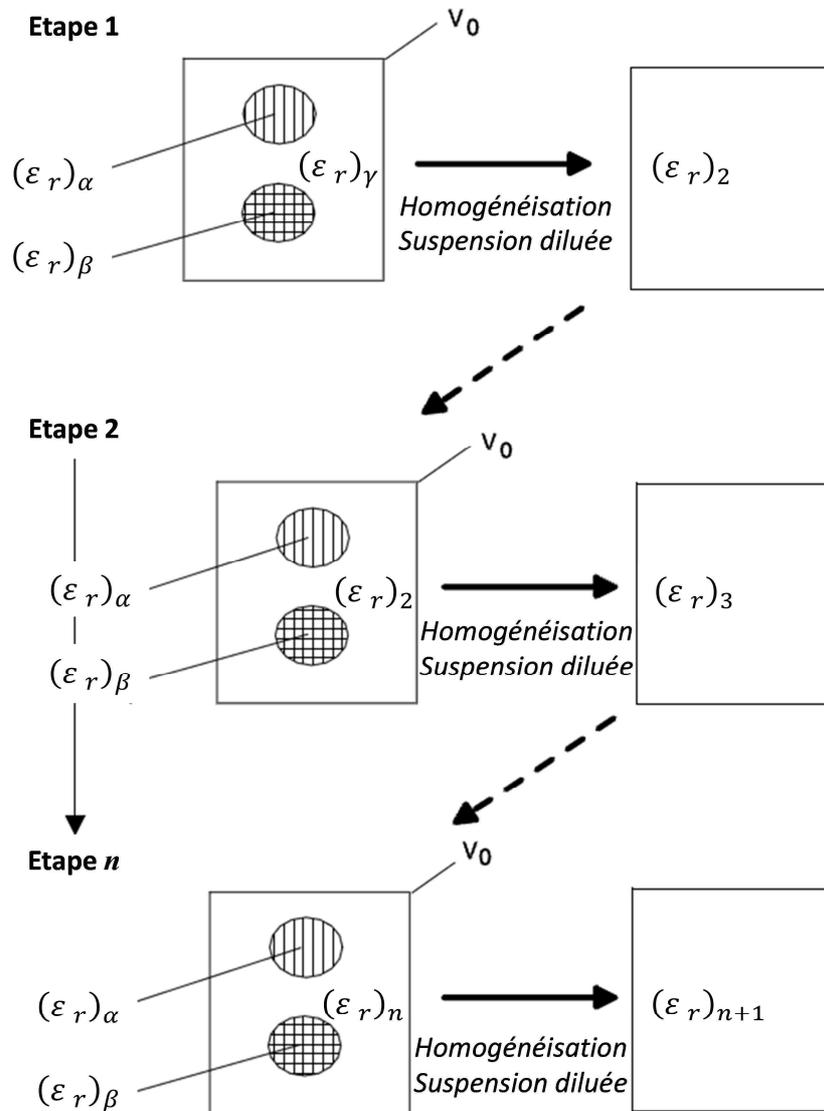


Figure I-9 : Schéma du processus itératif de la théorie DEM (d'après Cosenza et al., 2003).

A l'étape i , on utilise la relation de Maxwell-Garnett (1904) :

$$\frac{(\epsilon_r)_i - (\epsilon_r)_{i-1}}{(\epsilon_r)_i + 2(\epsilon_r)_{i-1}} = \frac{\delta V_\alpha (\epsilon_r)_\alpha - (\epsilon_r)_{i-1}}{V_0 (\epsilon_r)_\alpha + 2(\epsilon_r)_{i-1}} + \frac{\delta V_\beta (\epsilon_r)_\beta - (\epsilon_r)_{i-1}}{V_0 (\epsilon_r)_\beta + 2(\epsilon_r)_{i-1}}$$

(I-50)

$$\Rightarrow \frac{\delta \epsilon_r}{3(\epsilon_r)_{i-1}} = \frac{\delta V_\alpha (\epsilon_r)_\alpha - (\epsilon_r)_{i-1}}{V_0 (\epsilon_r)_\alpha + 2(\epsilon_r)_{i-1}} + \frac{\delta V_\beta (\epsilon_r)_\beta - (\epsilon_r)_{i-1}}{V_0 (\epsilon_r)_\beta + 2(\epsilon_r)_{i-1}}$$

Avec : $(\varepsilon_r)_i$: permittivité du milieu à l'étape i
 $(\varepsilon_r)_\alpha$, resp. $(\varepsilon_r)_\beta$: permittivité de la phase α , resp. β
 δV_α , resp. δV_β : volume ajouté de la phase α , resp. β
 $\delta \varepsilon_r = (\varepsilon_r)_i - (\varepsilon_r)_{i-1}$

Etant donné l'hypothèse d'incompressibilité, des relations existent entre les volumes ajoutés des phases α et β , soient δV_α , et δV_β , et les fractions volumiques associées : $\delta \phi_\alpha$, et $\delta \phi_\beta$ (Norris *et al.*, 1985). Le processus de construction ne dépend alors plus que du couple $(\phi_\alpha, \phi_\beta)$.

On peut déterminer la valeur de la permittivité relative finale du milieu par intégration de l'équation (I-50). Le résultat obtenu va dépendre du chemin d'intégration (ou chemin d'homogénéisation) choisi. Un chemin 2 PHP ou 3 PHP (Phase Homogenisation Path) peut être envisagé.

L'approche dite 2 PHP consiste à ajouter dans un premier temps la phase α , puis dans un second temps la phase β . Ce chemin d'intégration revient à appliquer deux fois la formule MWBH (Maxwell-Wagner-Bruggeman-Hanai ; cf. Wagner, 1924 ; Bruggeman, 1935 ; Hanai, 1968) :

$$\frac{\varepsilon_r - (\varepsilon_r)_\alpha}{(\varepsilon_r)_\gamma - (\varepsilon_r)_\alpha} \left(\frac{(\varepsilon_r)_\gamma}{\varepsilon_r} \right)^{1/3} = 1 - \phi_\alpha \quad (I-51)$$

avec ε_r permittivité du milieu après ajout de l'ensemble de la phase α

$$\frac{(\varepsilon_r)_f - (\varepsilon_r)_\beta}{\varepsilon_r - (\varepsilon_r)_\beta} \left(\frac{\varepsilon_r}{(\varepsilon_r)_f} \right)^{1/3} = 1 - \phi_\beta \quad (I-52)$$

avec $(\varepsilon_r)_f$ permittivité finale du milieu, après ajout de l'ensemble des phases α puis β

L'approche 2 PHP a été utilisée par Wobschall (1977), Alharthi et Lange (1987) et Cosenza *et al.* (2003). Cosenza *et al.* (2009) considèrent une combinaison linéaire de deux 2 PHP permettant de pondérer les résultats :

$$\varepsilon_r = (1 - S_w)(\varepsilon_r)_{ls} + S_w \cdot (\varepsilon_r)_{hs} \quad (I-53)$$

avec : S_w degré de saturation en eau du système

$(\varepsilon_r)_{ls}$ permittivité relative du milieu pour les faibles saturations en eau, calculée en considérant une matrice solide à laquelle on ajoute des inclusions d'eau, puis d'air.

$(\varepsilon_r)_{hs}$ permittivité relative du milieu pour les fortes saturations en eau, calculée en considérant une matrice d'eau à laquelle on ajoute des inclusions d'air, puis de solide.

5.5. Conclusions

Si les modèles issus de la théorie du milieu effectif permettent une meilleure prise en compte de la structure du matériau étudié et de la géométrie des grains qui peuvent ne plus être assimilés à des sphères, ils n'intègrent pas les interactions entre le fluide et la matrice solide. L'effet de la double couche électrochimique présente aux interfaces est en effet négligé. Ces effets peuvent pourtant changer de façon importante l'allure des courbes des paramètres électriques effectifs, notamment dans le domaine des basses fréquences. L'effet de la double couche électrochimique est d'autant plus important que la teneur en particules argileuses est élevée. Différents modèles, développés dans le cadre de l'étude de colloïdes, peuvent être appliqués aux argiles et décrivent les processus intervenant dans les mécanismes de polarisation d'interface de la double-couche électrochimique. On peut citer les modèles de Schwarz (1962) et Schurr (1964) qui décrivent la polarisation de la couche de Stern ou encore le modèle de Fixman (1980 et 1983) qui permet de modéliser la polarisation de la couche diffuse.

Dans le cas des fréquences moyennes, l'influence de cette polarisation de la double-couche électrochimique n'est pas mesurée. Les modèles issus de la théorie des milieux effectifs semblent donc bien adaptés à l'interprétation des résultats. La comparaison de ces modèles avec les données n'est toutefois pas présentée dans ce mémoire car elle n'est pas nécessaire à l'accomplissement des objectifs fixés. En effet, le but des expérimentations en laboratoire est d'établir un modèle simple reliant la permittivité diélectrique effective d'un échantillon à sa teneur en eau pour différentes argilosités. Il n'est alors pas nécessaire d'explicitier les relations pouvant exister entre les paramètres d'état et les paramètres électriques microscopiques, même si ceux-ci constituent une perspective de développement importante.

6. Conclusions

Lors de l'application d'un champ électrique à un milieu donné, des mécanismes de conduction et de polarisation peuvent être observés. Ils dépendent des caractéristiques électriques du milieu qui sont représentées par la conductivité électrique et la permittivité diélectrique.

En fonction du domaine de fréquences étudié, différents mécanismes de conduction et/ou de polarisation sont présents dans le milieu. Dans le domaine des fréquences moyennes, la permittivité diélectrique effective d'un sol cumule les permittivités liées aux polarisations électroniques, atomiques, dipolaires et d'interfaces. Si les trois premières contributions sont constantes dans le domaine des fréquences moyennes (leur fréquence de relaxation est nettement supérieure à 10 MHz), les relaxations liées aux mécanismes de polarisation d'interfaces apparaissent pour des fréquences inférieures à 10 MHz. Une dispersion de la permittivité diélectrique, liée à la présence de ce type de polarisation sera donc observée. Dans la suite du manuscrit, on qualifiera de permittivité diélectrique haute fréquence (HF) la permittivité diélectrique liée aux polarisations électronique, atomique et dipolaire, mesurée pour des fréquences supérieures à 10 MHz.

Tous ces mécanismes de polarisation sont liés aux paramètres d'état du sol. Si la polarisation dipolaire permet d'obtenir une relation directe entre la permittivité diélectrique haute fréquence et la teneur en eau du sol, les polarisations d'interfaces seront également liées à la présence de type de minéraux spécifiques comme les argiles. Des lois de comportement sont donc nécessaires afin d'étudier l'influence des différents paramètres sur les paramètres électriques.

Dans la suite de cette étude, nous comparerons les mesures de permittivité diélectrique et de conductivité électrique avec différentes lois de comportement afin de décrire :

- les variations des paramètres électriques avec la fréquence : modèle phénoménologique de type Cole-Cole
- les variations des paramètres électriques avec les caractéristiques intrinsèques du sol (notamment sa teneur en eau) : modèle empirique de Topp ...

Pour aller plus loin dans l'interprétation physique des résultats, un modèle issu de la théorie des milieux effectifs semble bien adapté. Si ce type de modèle n'est pas étudié dans le cadre de notre étude, il sera intéressant à appliquer dans le futur.

Chapitre 2 : **Mesures en laboratoire**

1. Introduction

Afin de déterminer l'influence des différents paramètres d'état du sol sur la mesure de la permittivité diélectrique et de la conductivité électrique, des mesures en laboratoire ont été entreprises. Des échantillons de sable de Fontainebleau, des mélanges argilo-sableux artificiels contenant deux types d'argile minéralogique (kaolinite et bentonite) et des échantillons provenant des luvisols limoneux du site de l'INRA d'Estrées-Mons ont été employés. Une cellule capacitive reliée à un voltmètre vectoriel nous a permis de mesurer la permittivité diélectrique complexe des échantillons sur une gamme de fréquences comprises entre 1 kHz et 10 MHz. Ces mesures ont été complétées, à chaque phase, sur le même échantillon, par des mesures de conductivité électrique au moyen d'un petit quadripôle carré placé sur l'une des faces de la cellule capacitive.

Après une étude des limites des appareils employés et un descriptif des matériaux et des protocoles de mesure choisis, l'influence de différents paramètres est commentée : i) la teneur en eau de l'échantillon, ii) la salinité de l'électrolyte, iii) la structure de l'échantillon, iv) sa teneur en argile et v) la minéralogie de l'argile impliquée.

Le chapitre se conclue sur des propositions de formules empiriques permettant de retrouver la teneur en eau volumique à l'aide de la permittivité diélectrique mesurée. Une tentative de généralisation de ces expressions est proposée grâce à l'utilisation combinée de la permittivité diélectrique effective totale mesurée et de la conductivité électrique afin de retrouver la part de la permittivité diélectrique mesurée liée à la rotation de la molécule d'eau (polarisation dipolaire).

2. Présentation des appareils utilisés

Afin de mesurer la conductivité électrique et la permittivité diélectrique aux fréquences moyennes, plusieurs résistivimètres et voltmètres vectoriels ont été mis en œuvre avec la cellule capacitive et le quadripôle électrique.

2.1. Mesure de permittivité diélectrique complexe

2.1.1. Principe

Une cellule capacitive est utilisée dans le but de déterminer la permittivité diélectrique complexe (Féchant, 1996 ; Féchant *et al.*, 1999) à partir de la mesure de la capacité d'un condensateur plan C où le diélectrique est l'échantillon dont on souhaite faire la mesure :

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (\text{II-1})$$

avec : ε_r : permittivité diélectrique relative complexe du diélectrique
 ε_0 : permittivité diélectrique du vide ($\varepsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$)
 S : surface du condensateur
 d : épaisseur du diélectrique

Afin de prendre en compte les pertes diélectriques, on modélise la cellule capacitive par un circuit RC parallèle :

$$C = \varepsilon'_{eff} \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad \text{et} \quad 1/R = \omega \cdot \varepsilon''_{eff} \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (\text{II-2})$$

Où ε'_{eff} et ε''_{eff} représentent, par abus de notation, les parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique relative effective

Le diélectrique n'est donc plus considéré comme un diélectrique parfait et possède une permittivité diélectrique effective complexe exprimée telle que : $\varepsilon_{eff}^* = \varepsilon'_{eff} - i \varepsilon''_{eff}$ (cf. chapitre 1-2, eq. (I-18) à (I-21)).

Les mesures de permittivité diélectrique complexe sont effectuées à l'aide de la cellule capacitive et d'un voltmètre vectoriel de caractéristiques connues telles que l'ensemble du dispositif peut être représenté par un circuit électronique équivalent (Figure II-1).

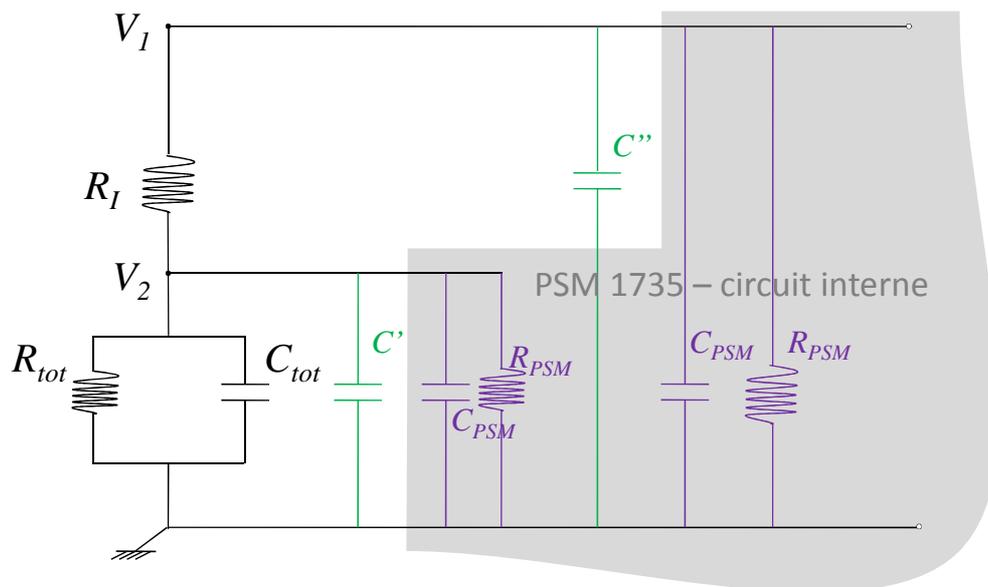


Figure II-1 : Circuit électronique équivalent au dispositif de mesure utilisant un multimètre vectoriel (composants violets) à une cellule capacitive représentée par un circuit RC (R_{tot} et C_{tot}).

On définit les différents composants du circuit tels que :

- R_{PSM} et C_{PSM} sont les caractéristiques d'entrée du voltmètre vectoriel : dans notre cas $R_{PSM} = 1 \text{ M}\Omega$ et $C_{PSM} = 30 \text{ pF}$
- C' et C'' sont les capacités parasites liées au dispositif de mesure, incluant une capacité linéique des câbles coaxiaux utilisés (100 pF/m). C' correspond à la capacité à l'entrée de la voie 2 et C'' à celle de la voie 1

- R_I correspond à la résistance de référence, permettant la mesure de l'intensité d'entrée dans le circuit, choisie en fonction des caractéristiques d'entrée du système. On prendra ici $R_I = 1,6 \text{ k}\Omega$ (cf. chapitre 2-2.1.4)
- R_{tot} et C_{tot} sont la résistance et la capacité de la cellule capacitive à déterminer.

A partir de la mesure du rapport complexe de la tension V_1 sur la tension V_2 , en utilisant les lois de Kirchhoff, on peut exprimer la capacité et la résistance de la cellule telles que :

$$C_{tot}(\omega) = \frac{u_2(\omega)}{R_I \omega} - C_{PSM} - C'(\omega) \quad (\text{II-3})$$

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1 - u_1(\omega)}{R_I} + \frac{1}{R_{PSM}}$$

où u_1 et u_2 sont les parties réelles et imaginaires du rapport de tensions mesuré :

$$V_1/V_2 = u_1 + i u_2 \quad (\text{II-4})$$

Le calcul de la capacité C_{tot} et de la résistance R_{tot} permet alors de retrouver les valeurs des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique relative complexe effective.

2.1.2. Caractéristiques du voltmètre vectoriel

L'instrument de mesure utilisé dans cette étude est le multimètre PSM1735 (NumetriQ) (Figure II-3). Il possède l'avantage de pouvoir être utilisé à la fois comme voltmètre et comme générateur de tensions sur une large gamme de fréquences : entre 1 μHz et 35 MHz. Nous utilisons le mode analyseur de réponse en fréquence (ou FRA = Frequency Responce Analyser) pour des fréquences comprises entre 1 kHz et 10 MHz. Ce mode permet de mesurer les rapports entre les gains et les phases des tensions V_1 et V_2 . Ses caractéristiques sont rappelées dans le tableau II-1.

PSM 1735 – Mode analyseur de réponse en fréquence	
Fréquence	10 μHz à 35 MHz (utilisation du générateur interne)
Précision de la mesure du gain	0,01 dB + 0,001 dB/kHz pour $f < 1\text{MHz}$ 0,1 dB + 0,04 dB/MHz pour $f \in [1 \text{ MHz} ; 35 \text{ MHz}]$
Précision de la mesure de la phase	0,01° pour $f < 10\text{kHz}$ 0,05° + 0,0001°/kHz pour $f \in [10 \text{ kHz} ; 35 \text{ MHz}]$
Impédance de sortie	1 M Ω // 30 pF

Tableau II-1 : Caractéristiques du multimètre vectoriel PSM1735 de NumetriQ utilisé en mode analyseur de réponse en fréquence (FRA).

2.1.3. Etude de la cellule capacitive

Caractéristiques

La cellule capacitive (Figure II-2) est composée de deux plaques conductrices en aluminium qui constituent les armatures du condensateur, entre lesquelles on vient insérer l'échantillon de sol qui sert de diélectrique et dont on veut mesurer la capacité et la résistance. Le condensateur plan est construit de telle sorte que le volume de l'échantillon soit représentatif des propriétés observées et le rapport S/d soit élevé. On choisit des armatures carrées de 20 cm de côté.

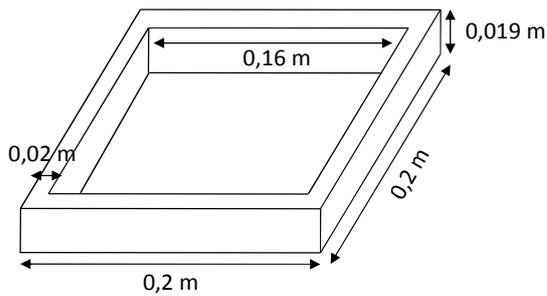


Figure II-2 : Dimensions des bords en plexiglass de la cellule capacitive.

Nous souhaitons caractériser des échantillons de sol meubles. Un porte-échantillon non conducteur et de faible permittivité diélectrique est donc utilisé pour contenir les échantillons. Le matériau choisi dans notre étude est un plexiglas de permittivité diélectrique relative égale à 2,5 et de conductivité électrique égale à 10^{-17} S/m. Le porte-échantillon est un parallélépipède rectangle de dimensions $20 \times 20 \times 1,9$ cm³ qui contient un volume de sol de dimensions égales à $16 \times 16 \times 1,9$ cm³.

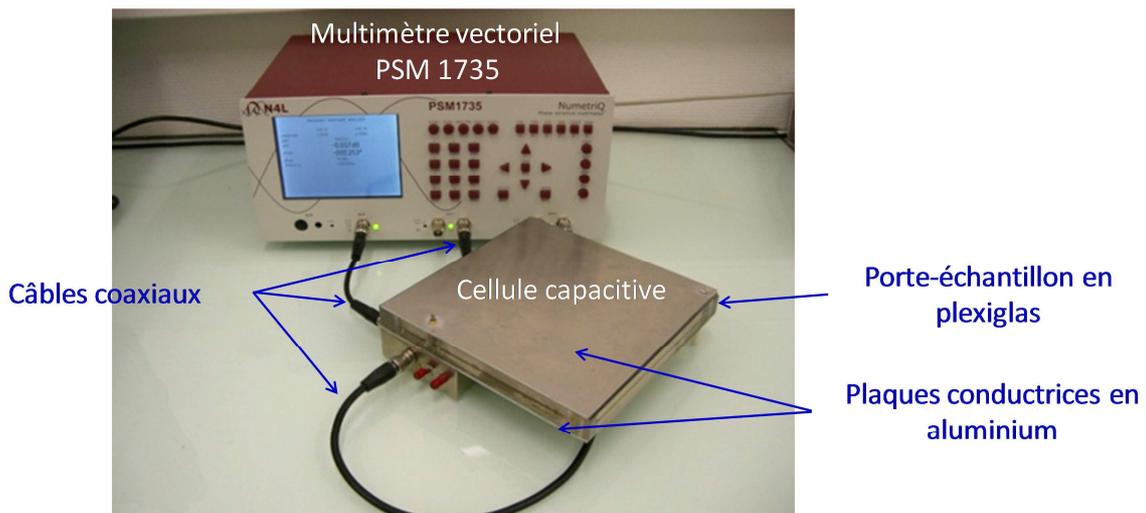


Figure II-3 : Dispositif de mesure employé pour mesurer la permittivité diélectrique complexe d'un échantillon de sol placé dans une cellule capacitive reliée au voltmètre vectoriel.

A l'aide du voltmètre vectoriel, on mesure la capacité de l'ensemble porte-échantillon en plexiglas et échantillon de sol. Il faut donc estimer l'apport du porte-échantillon à la mesure globale et le retrancher pour retrouver la permittivité diélectrique relative complexe de l'échantillon de sol. Etant donné la très faible conductivité du plexiglas, les bords n'interviendront pas dans la mesure de la résistance du dispositif, mais peuvent avoir un effet non négligeable dans la mesure de sa capacité.

Prise en compte de la capacité des bords en plexiglass

Pour obtenir la capacité induite par les bords en plexiglas de la cellule à partir de la capacité totale mesurée C , on retranche la capacité d'un échantillon de plexiglas C_a à la capacité totale obtenue pour un diélectrique constitué uniquement de plexiglas C_p :

- Capacité de la cellule remplie de plexiglas :

$$C_p = 2,5 * 8,85. 10^{-12} * \frac{0,2 * 0,2}{0,019} = 46,58 \text{ pF} \quad (\text{II-5})$$

- Capacité d'un échantillon de plexiglas :

$$C_a = 2,5 * 8,85. 10^{-12} * \frac{0,16 * 0,16}{0,019} = 29,81 \text{ pF} \quad (\text{II-6})$$

- Capacité des bords de la cellule (comptés parallèles à l'échantillon) :

$$C_b = C_p - C_a = 16,77 \text{ pF} \quad (\text{II-7})$$

D'où, la capacité C_e de l'échantillon de sol est égale à :

$$C_e = C_{tot} - C_b = C_{tot} - 16,77 \text{ pF} \quad (\text{II-8})$$

La capacité C_e et la résistance R_{tot} de l'échantillon de sol peuvent donc être déterminées à partir de la pulsation de mesure ω , des caractéristiques du multimètre (R_{PSM} et C_{PSM}), des tensions mesurées u_2 et u_1 , ainsi que de la capacité liée aux bords du porte-échantillon en plexiglas C_b . La capacité parasite C' n'est pas une donnée *a priori*, mais doit être mesurée à partir d'un étalonnage effectué avec des échantillons de caractéristiques connues. Elle permet de tenir compte des erreurs liées au système de mesure (couplage capacitif des câbles, rayonnement des composants,...). Sa détermination est détaillée plus loin.

Un dernier composant doit être pris en compte dans la mesure de la permittivité diélectrique de l'échantillon : la couche de vernis isolant déposée sur la face interne des deux armatures qui bloque les courants de conduction.

Influence du vernis isolant

Afin de mesurer les pertes diélectriques, les courants de conduction circulant entre les deux armatures du condensateur doivent être limités (Howell et Licastro, 1961 ; Simandoux, 1963). Un vernis isolant en polyuréthane est déposé sur les faces internes des plaques en aluminium dans ce but. Le circuit $R_{tot}C_{tot}$ peut alors se décomposer en circuit RC représentant la capacité et la résistivité du diélectrique mis en série avec la capacité K de la couche isolante (Figure II-4).

Deux permittivités différentes sont alors considérées :

- la permittivité diélectrique effective relative complexe de l'ensemble matériau diélectrique et couche isolante : $\varepsilon_{tot}^* = \varepsilon'_{tot} - j\varepsilon''_{tot}$, dont les parties réelles et imaginaires sont exprimées à partir de la capacité totale C_{tot} et de la résistance totale R_{tot} :

$$C_{tot} = \varepsilon'_{tot} \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad \text{et} \quad 1/R_{tot} = \omega \cdot \varepsilon''_{tot} \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (\text{II-9})$$

- la permittivité diélectrique relative complexe de l'échantillon de sol considéré : $\varepsilon_{eff}^* = \varepsilon'_{eff} - j\varepsilon''_{eff}$, dont les parties réelles et imaginaires sont exprimées à partir de la capacité du diélectrique, de sa résistance R et de C_{air} :

$$C = \varepsilon'_{eff} \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad \text{et} \quad 1/R = \omega \cdot \varepsilon''_{eff} \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (\text{II-10})$$

La permittivité diélectrique complexe de l'ensemble matériau diélectrique et couche isolante

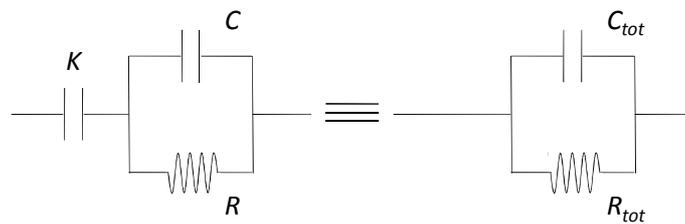


Figure II-4 : Circuit électronique équivalent à la cellule capacitive représentée par un circuit RC mis en série avec la capacité K du vernis isolant.

D'après Simandoux (1963), les paramètres électriques R_{tot} et C_{tot} peuvent s'exprimer tels que :

$$K - C_{tot} = \frac{K}{\xi \varepsilon_i + \varepsilon'_{eff}} \xi \varepsilon_i \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (\text{II-11})$$

$$\frac{1}{R_{tot} \omega} = \frac{K}{\xi \varepsilon_i + \varepsilon'_{eff}} \xi \varepsilon_i \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

où:

ε_i est la permittivité diélectrique relative de la couche isolante,

ξ représente le rapport entre les capacités d'un échantillon d'air C_{air} ($C_{air} = \varepsilon_0 \cdot S/d$) et des parois isolantes K/ε_i pour un volume équivalent d'air : $\xi = \frac{K/\varepsilon_i}{C_{air}}$,

$\tau = \frac{\xi \varepsilon_i + \varepsilon'_{eff}}{\omega \varepsilon''_{eff}}$ est une constante de temps exprimée en seconde.

Les valeurs de R_{tot} et C_{tot} peuvent alors être calculées à partir de la connaissance de la fréquence de travail ($f = \omega/2\pi$), des caractéristiques de l'échantillon de sol considéré (ε'_{eff} et ε''_{eff}) et de celles de la couche de vernis isolante (ε_i et ξ , ou K). Afin de comprendre l'influence de la capacité K de la couche isolante sur les mesures, on modélise les variations des paramètres R_{tot} et C_{tot} en fonction de la valeur de K (Figure II-5).

La permittivité diélectrique complexe de l'échantillon de sol est alors fixée à l'aide d'un modèle Cole-Cole (Cole et Cole, 1941) :

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_0)^c} \quad (\text{II-12})$$

avec ε_∞ la permittivité diélectrique hautes fréquences, ε_s la permittivité diélectrique statique (basses fréquences), τ_0 le temps de relaxation et c une constante liée à la distribution des temps de relaxation (plus la valeur de c est faible, plus la distribution des temps de relaxation est large).

Les paramètres définissant le modèle Cole-Cole sont choisis à partir des valeurs expérimentales observées à l'aide de la cellule capacitive dans cette gamme de fréquences. Les conclusions relatives à ces modélisations sont déduites à partir des variations observées pour les intervalles suivants :

- $1 \leq \varepsilon_\infty \leq 10$
- $20 \leq \varepsilon_s \leq 200$
- $1.10^{-4} \leq \tau_0 \leq 1.10^{-7}$
- $0.1 \leq c \leq 1$

Lorsque la valeur de la capacité de la couche isolante K augmente, son influence sur les valeurs de R_{tot} et C_{tot} se fait de moins en moins sentir. On définit la capacité K_0 comme la limite au-dessus de laquelle les valeurs de R_{tot} et C_{tot} sont considérées comme constantes, i.e. lorsque l'écart-type de chaque valeur est inférieur à 10 %. On remarque que cette limite diminue lorsque la fréquence de mesure augmente. L'influence de K est finalement négligeable sur l'ensemble de la gamme de fréquences étudiée lorsque sa valeur est supérieure à 10^{-8} F. Dans cette gamme de capacités K , l'écart-type de C_{tot} est toujours inférieur à 5 % (valeur obtenue pour $f = 1$ kHz), et celui de $1/R_{tot}$ toujours inférieur à 10 %. Pour les paramètres Cole-Cole représentés sur la figure II-5 ($\varepsilon_\infty = 5$, $\varepsilon_s = 100$, $\tau_0 = 2.10^{-6}$ s et $c = 1$), l'écart-type de C_{tot} est inférieur à 2,7 % et celui de $1/R_{tot}$ est inférieur à 5,3 %.

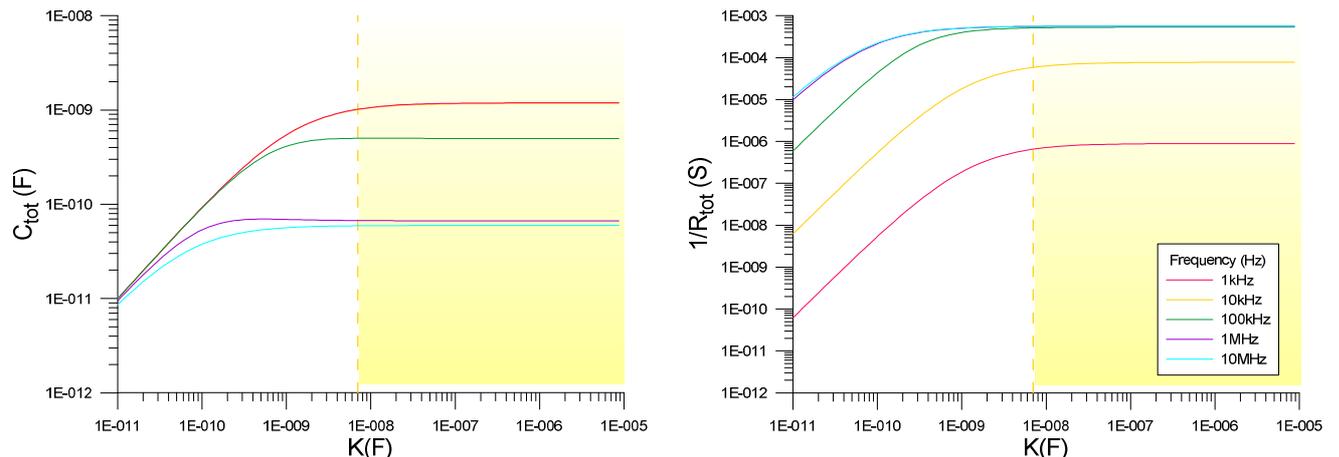


Figure II-5 : Paramètres électriques C_{tot} et $1/R_{tot}$ calculés à partir du modèle Cole-Cole possédant les caractéristiques suivantes : $\varepsilon_\infty = 5$, $\varepsilon_s = 100$, $\tau_0 = 2.10^{-6}$ s et $c = 1$.

Afin de déterminer l'influence de la capacité de la couche isolante K dans notre dispositif de mesure, sa valeur peut être estimée à l'aide d'un calcul théorique, puis contrôlée expérimentalement.

D'un point de vue théorique, connaissant les dimensions de la cellule capacitive, les valeurs de K et ξ peuvent être calculées comme suit :

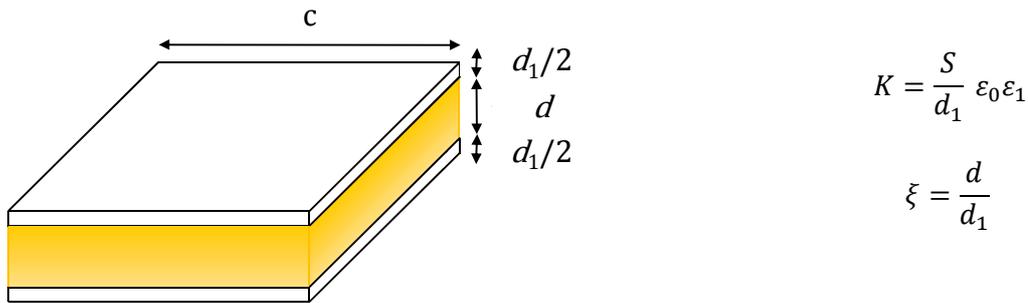


Figure II-6 : Dimensions caractéristiques de l'échantillon étudié, ainsi que de la couche isolante de vernis.

Avec

- d l'épaisseur de l'échantillon de sol ($d = 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ m}$),
- S la surface des plaques conductrices ($S = c^2 = 0,16^2 = 2,56 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$),
- ϵ_0 la permittivité diélectrique du vide ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$),
- d_1 l'épaisseur de la couche isolante de vernis prise inférieure à $100 \mu\text{m}$ (Keskin *et al.*, 2010), et mesurée à l'aide d'un micromètre (Palmer) égale à $90 \mu\text{m}$,
- ϵ_1 la permittivité diélectrique relative du vernis en polyuréthane comprise entre 3 et 10 en fonction de la fréquence de mesure (Pissis *et al.*, 2002).

En prenant en compte ces valeurs (Figure II-6), la capacité K sera toujours supérieure à $7 \cdot 10^{-9} \text{ F}$. Dans cette gamme de capacités, l'écart-type de C_{tot} sera toujours inférieur à 5 % (valeur calculée pour $f = 1 \text{ kHz}$) et celui de $1/R_{tot}$ toujours inférieur à 10 %. L'influence de la capacité K de la couche de vernis en polyuréthane pourra donc toujours être considérée comme constante sur l'ensemble de la gamme de fréquences étudiée.

D'un point de vue expérimental, l'échantillon de sol peut être remplacé par une solution très conductrice afin de mesurer la valeur de la capacité K . En effet, la présence de la solution conductrice réduit le circuit RC à un court-circuit et permet ainsi d'estimer directement la capacité K . Une solution d'eau saturée en NaCl est utilisée dans ce but. Burgess (1978) fixe à 360 g/L la solubilité du composé NaCl dans l'eau à température ambiante. A cette concentration, on mesure une conductivité de l'électrolyte égale à $11,06 \text{ S/m}$ (pour une température de $22,3^\circ\text{C}$).

Les valeurs mesurées de la capacité K sont comprises entre 2.10^{-7} et 8.10^{-9} F (Figure II-7), en fonction de la fréquence de mesure. Les parties réelles K' et imaginaires K'' peuvent être décrites par une fonction affine. On observe cependant une pente plus importante autour de 100 kHz pour K' ; correspondant à un maximum local pour K'' . Ces variations semblent marquer un processus de polarisation qui peut être apparu à l'interface entre l'électrolyte et les armatures recouvertes de vernis. Malgré la présence de cet effet, les valeurs de la capacité K mesurées sont bien supérieures à 7.10^{-9} F. On peut donc considérer l'effet de la capacité de la couche de vernis isolante comme constante sur l'ensemble de la gamme de fréquences étudiée.

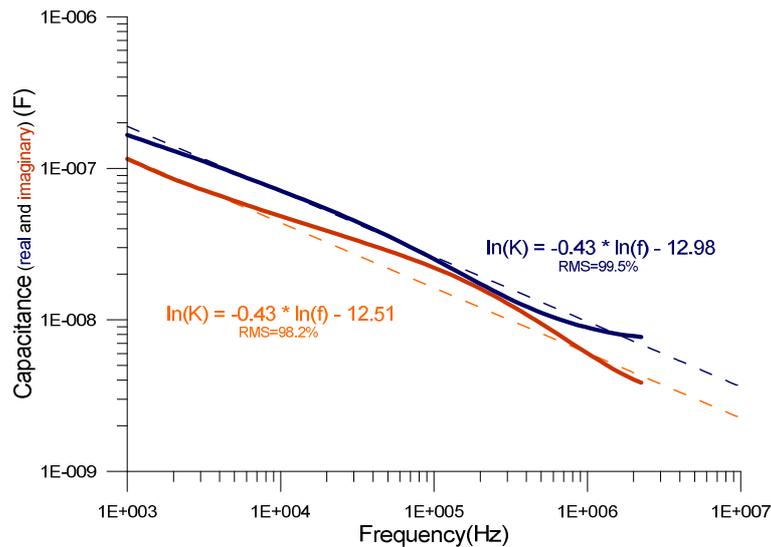


Figure II-7 : Variations de la capacité K de la couche de vernis isolante en polyuréthane pour des fréquences de mesure comprises entre 1 kHz et 10 MHz, mesurées à l'aide de la cellule capacitive contenant une solution saturée en chlorure de sodium.

Après avoir étudié les caractéristiques du dispositif de mesure employé pour mesurer la permittivité diélectrique complexe des échantillons de sol, des mesures sur des échantillons de caractéristiques connues sont entreprises afin de calibrer l'appareil et de tester son bon fonctionnement.

2.1.4. Calibration de la cellule capacitive

Des échantillons homogènes de permittivité diélectrique connue sont utilisés afin de calibrer l'appareil, i.e. de déterminer le coefficient de calibration C' . La calibration se fait à partir d'une cellule remplie d'air, puis la permittivité diélectrique complexe d'échantillons de plexiglas, de paraffine et de solutions plus ou moins salines est mesurée afin de vérifier le bon fonctionnement du dispositif.

Détermination du coefficient de calibration C' : Réponse à l'air

Les mesures effectuées pour un échantillon d'air, de permittivité réelle relative connue et égale à 1, nous permettent d'estimer la capacité parasite C' liée au dispositif de mesure, englobant la capacité linéique des câbles ou encore le rayonnement des composants du circuit électronique. On cherche à retrancher ce coefficient au calcul de la capacité totale du système afin d'obtenir une permittivité diélectrique relative égale à 1 pour l'air. Le coefficient obtenu est égal à $6,5.10^{-11}$ F.

Cette valeur doit être confirmée par la mesure de la réponse du dispositif à un échantillon homogène de permittivité diélectrique connue. On utilisera ici le plexiglas.

Choix de la résistance R_I permettant la mesure de l'intensité du courant I : Réponse à un échantillon de plexiglas

Afin de s'assurer de la pertinence de la correction, on mesure la réponse d'un échantillon de plexiglas (Figure II-8). Les caractéristiques du plexiglas employé ne nous ayant pas été fournies, nous considérons comme admissible une permittivité diélectrique relative égale à $2,5 \pm 0,5$ (Terhzaz *et al.*, 2007).

Ces mesures permettent également de déterminer la résistance R_I , utilisée afin de déterminer l'intensité du courant, la plus adaptée à la gamme de fréquences étudiée. En effet, plus la fréquence diminue et plus la valeur optimale de la résistance R_I augmente. Des résistances comprises entre 100Ω et $100 \text{ k}\Omega$ ont été testées. La résistance de mesure permettant la mesure de la permittivité diélectrique relative la plus constante sur l'ensemble de la gamme de fréquences est égale à $1,6 \text{ k}\Omega$. On observe cependant une décroissance importante de la valeur de la permittivité lorsque la fréquence est supérieure à 10 MHz . Les fréquences étudiées étant comprises entre 1 kHz et 10 MHz , cette décroissance ne sera pas incluse dans les mesures. La permittivité diélectrique relative de l'échantillon de plexiglas, pour des fréquences de mesure comprises entre 1 kHz et 10 MHz , est comprise entre $2,2$ et $2,4$, ce qui est conforme aux valeurs théoriques.

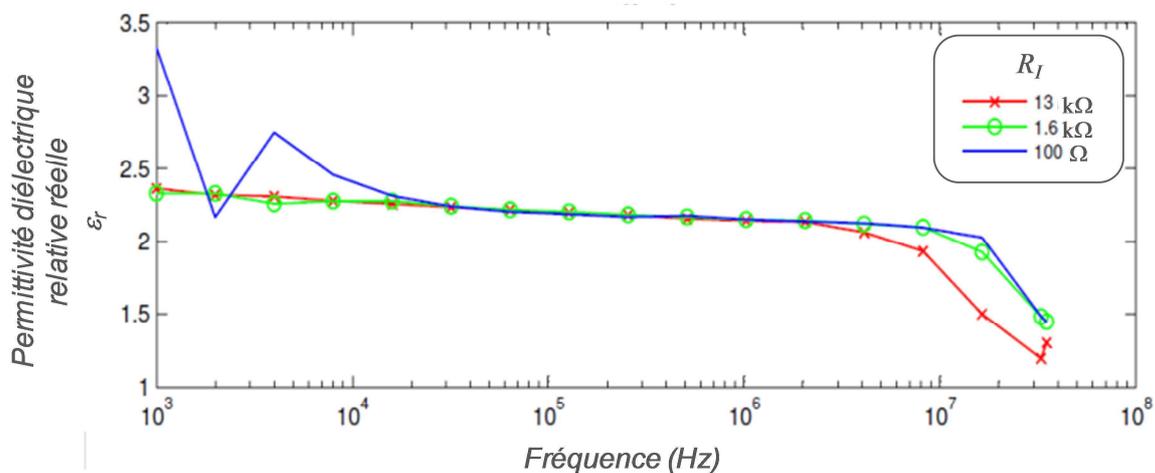


Figure II-8 : Permittivité diélectrique relative réelle d'un échantillon de plexiglas en fonction de la fréquence de mesure, pour trois valeurs de résistance électrique R_I .

2.2. Mesure de la conductivité électrique

2.2.1. Principe

Des mesures de conductivité électrique ont également été réalisées sur les mêmes échantillons à l'aide d'un quadripôle carré couplé à un résistivimètre. Si la conductivité électrique très basse fréquence a été systématiquement mesurée, des tests ont également été réalisés afin de mesurer la conductivité électrique sur la gamme de fréquences étudiées : 1 kHz – 10 MHz.

Trois résistivimètres différents ont été utilisés au cours des expérimentations : le RMCA-4 (CNRS), le SECR-1 (UMR Sisyphe) et le multimètre vectoriel PSM1735 (NumetriQ). Une comparaison de leurs caractéristiques et de leurs limites pour la mesure de la conductivité électrique est donc nécessaire afin d'interpréter l'ensemble des résultats.

De plus, les mesures ont été réalisées en utilisant le porte-échantillon de la cellule capacitive, i.e. la partie inférieure de la cellule capacitive décrite plus haut. Les effets de bord liés à la taille réduite de l'échantillon doivent donc être étudiés afin d'être pris en compte dans la mesure finale

2.2.2. Etudes des résistivimètres

Caractéristiques du RMCA-4

Le RMCA-4 (Figure II-9) est un résistivimètre développé par le CNRS qui peut être employé à la fois en laboratoire et *in situ*. Il possède les caractéristiques techniques suivantes :



Figure II-9 : Résistivimètre RMCA-4 (CNRS).

- Fréquence nominale : 122,5 Hz,
- signal sinusoïdal (échantillonnage synchrone)
- Tension délivrée : > 200 V efficace,
- Temps de réponse de la sortie analogique < 8 ms,
- Affichage 20 000 points (Voie 1 uniquement),
- Précision à $20 \pm 0,3$ °C :
 $\pm 2\%$ de la mesure,
 ± 1 digit de 10 à 100 % de l'étendue de mesure,
- Niveau de sortie maximal : $\pm 2,5$ V,
- Trois gammes de mesure à dynamiques :
0-200 Ω ; 2 k Ω ; 20 k Ω

Caractéristiques SECR-1

Le résistivimètre multifréquentiel SECR-1 a été développé au sein de l'UMR Sisyphé afin d'effectuer des mesures de résistivités spectrales par injection directe de courant aux plus basses fréquences et en électrostatique aux fréquences les plus élevées.

Il permet d'effectuer des mesures pour des fréquences comprises entre 0,9 Hz et 30 kHz, avec une tension d'entrée pouvant s'échelonner entre 16,4 V et 70,4 V.

Les circuits d'émission et de réception sont éloignés l'un de l'autre afin de limiter les effets capacitifs entre les deux circuits. On choisit de positionner l'échantillon de mesure à mi-chemin entre les deux circuits (Figure II-10).

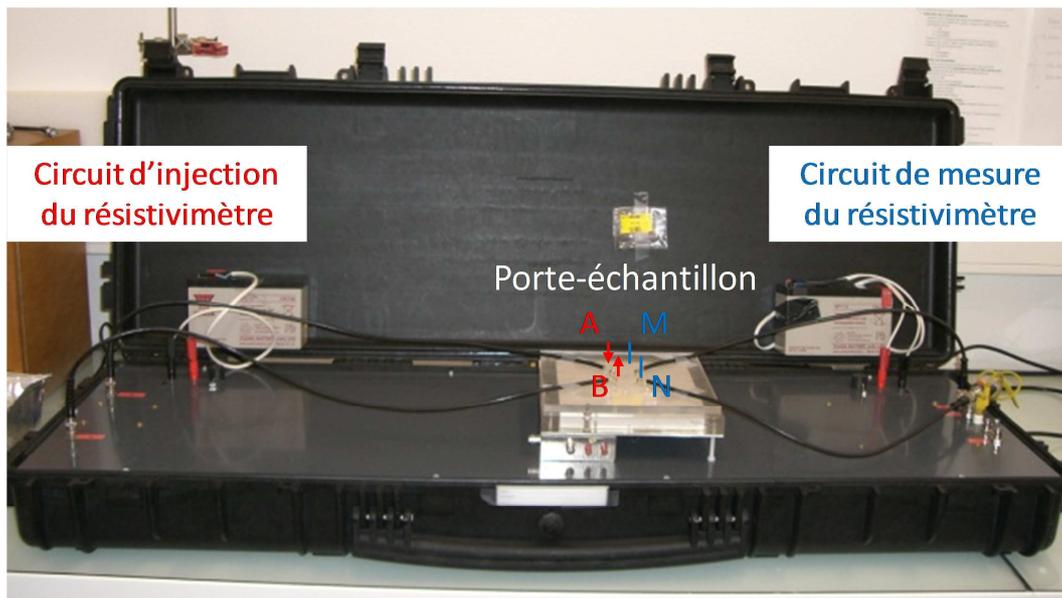


Figure II-10 : Dispositif de mesure de la résistivité électrique fréquentielle composé du résistivimètre SECR-1, du porte-échantillon (partie inférieure de la cellule capacitive) et du quadripôle carré électrique.

Caractéristiques PSM-NumetriQ

Le multimètre vectoriel PSM 1735 de NumetriQ, utilisé précédemment pour mesurer la permittivité diélectrique relative à l'aide d'une cellule capacitive, a également été employé comme résistivimètre relié au quadripôle carré de mesure. Les circuits d'émission et de réception étant géométriquement proches, un atténuateur est ajouté au dispositif afin de découpler émission et réception (Figure II-11) Le multimètre est ici utilisé en mode FRA (Tableau II-1), pour des fréquences de mesure comprises entre 1 Hz et 10 MHz avec des tensions d'entrée comprise entre 2 et 10 V crête-crête. Une résistance R_f de 100 Ω est utilisée afin de mesurer l'intensité du courant injecté.

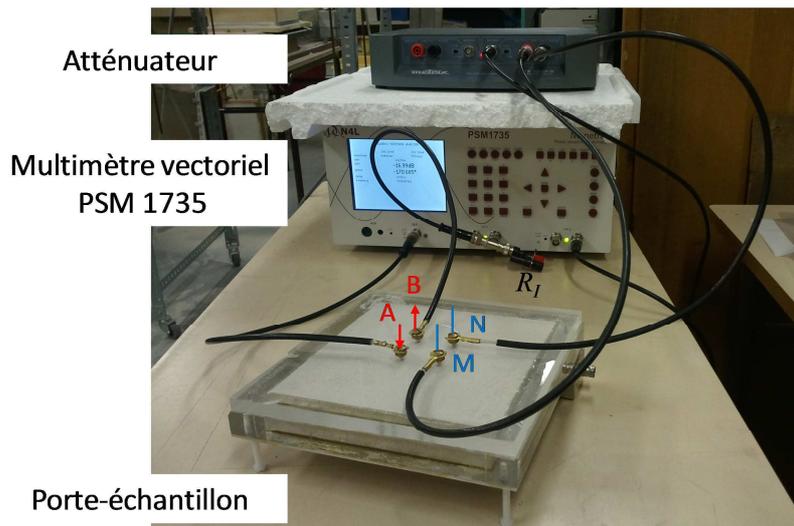


Figure II-11 : Dispositif de mesure de la résistivité électrique fréquentielle composé du multimètre vectoriel PSM 1735 (NumetriQ), de l'atténuateur, du porte-échantillon (partie inférieure de la cellule capacitive) et du quadripôle carré électrique.

Mesures avec des composants de caractéristiques connues (résistances)

Afin de déterminer la gamme de résistances mesurables par les résistivimètres, mais également de comparer les réponses des différents résistivimètres à une même résistance, la réponse de circuits comprenant une résistance de mesure R de valeur connue et deux résistances R_C simulant les résistances de contact (choisies dix fois plus élevées que la résistance de mesure) est mesurée (Figure II-12). La gamme de résistances pures est choisie de manière à couvrir une gamme plus large que celle attendue pour les échantillons.

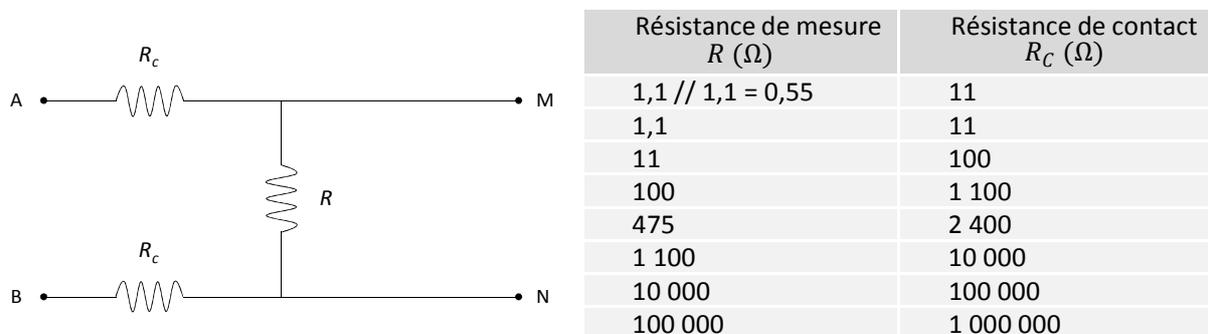


Figure II-12 : Schéma du dispositif employé et valeurs de résistances mesurées afin de tester l'aptitude des trois résistivimètres à mesurer des résistances sur une large gamme de valeurs.

Les mesures réalisées à l'aide du résistivimètre RMCA-4 ne peuvent être effectuées qu'à la fréquence de mesure nominale de 122,5 Hz. Les résultats (Figure II-13) sont donc présentés en fonction de la valeur de la résistance fournie par le fabricant. Les valeurs de résistances mesurées diffèrent de moins de 10 % par rapport à la valeur fournie lorsque la résistance est supérieure à 10 Ω . Même en utilisant la gamme de mesure la plus basse (0-200), la mesure obtenue pour une résistance égale à 1,1 Ω est incorrecte. Lorsque l'échantillon étudié devient trop conducteur, le résistivimètre RMCA-4 ne permettra donc plus de fournir une mesure correcte de sa valeur.

Le résistivimètre RMCA-4 permet donc de mesurer avec une précision supérieure à 10 %, des résistances comprises entre 10 et 500 Ω au moins. Compte tenu de la configuration du dispositif de mesure (calcul des coefficients géométriques, voir chapitre 2-2.2.3), cette gamme de résistances correspond à des résistivités comprises entre 1 et 100 $\Omega.m$. Si cette gamme peut être étendue pour des résistivités plus importantes, il n'en est pas de même pour la limite inférieure.

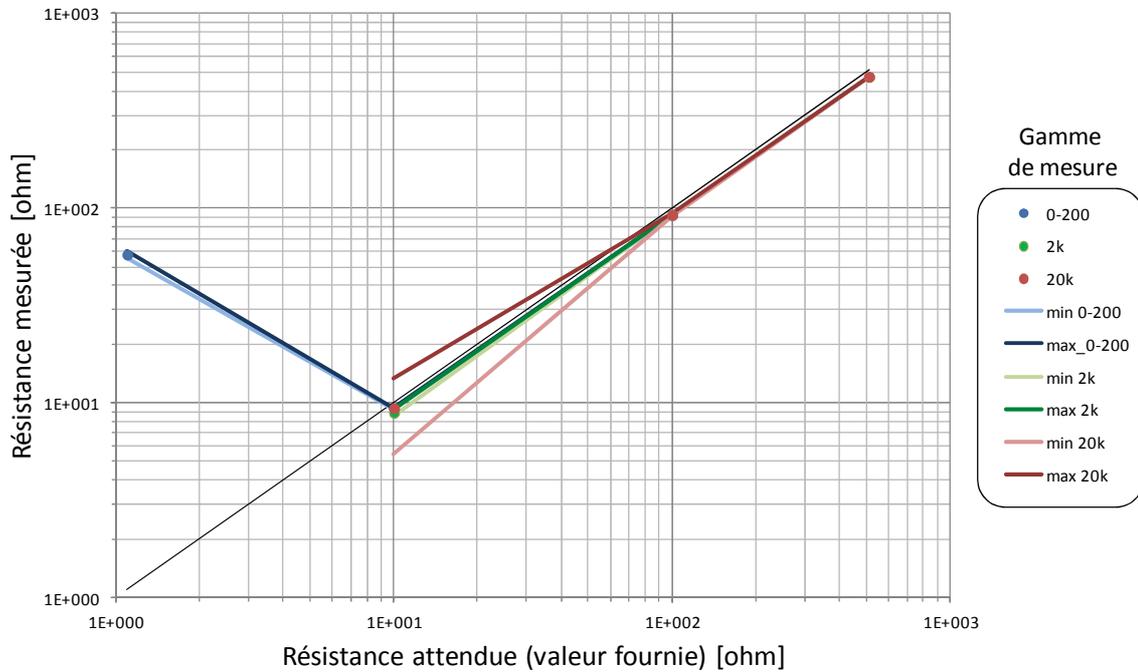


Figure II-13 : Comparaison entre les valeurs des résistances mesurées à l'aide du résistivimètre RMCA-4 et celles fournies par le fabricant.

Les mesures effectuées à l'aide du multimètre vectoriel PSM 1735 sont représentées en fonction de la fréquence de mesure sur une gamme comprise entre 1 Hz et 10 MHz (Figure II-14). On observe un effet lié à la fréquence de mesure à partir de 10 kHz. Cet effet apparait à une fréquence d'autant plus basse que la résistance mesurée est élevée. Sur une gamme de fréquences comprises entre 1 Hz et 100 kHz, les mesures de résistance sont égales à la valeur fournie avec une incertitude inférieure à 10% pour des résistances comprises entre 0,55 Ω et 1,1 k Ω et à 20 % pour l'ensemble des résistances inférieures à 10 k Ω . On peut même obtenir des valeurs exactes à 20 % près pour l'ensemble des résistances inférieures à 1,1 k Ω jusqu'à une fréquence de 1 MHz. Lorsque la résistance est supérieure à 10 k Ω , l'erreur est trop importante pour que la valeur de la résistance soit considérée comme correcte (valeur deux fois plus importante lorsque $R = 100$ k Ω).

Etant donné la configuration du dispositif de mesure, les résistivités électriques peuvent être mesurées lorsqu'elles sont comprises entre 0,1 $\Omega.m$ et 1 800 $\Omega.m$ sur une gamme de fréquences couvrant [1 Hz ; 10 kHz]. Cette gamme peut même être étendue à des valeurs de résistivités plus importantes, mais en tout état de cause inférieures à 18 000 $\Omega.m$ (correspondant à une résistance de 100 k Ω).

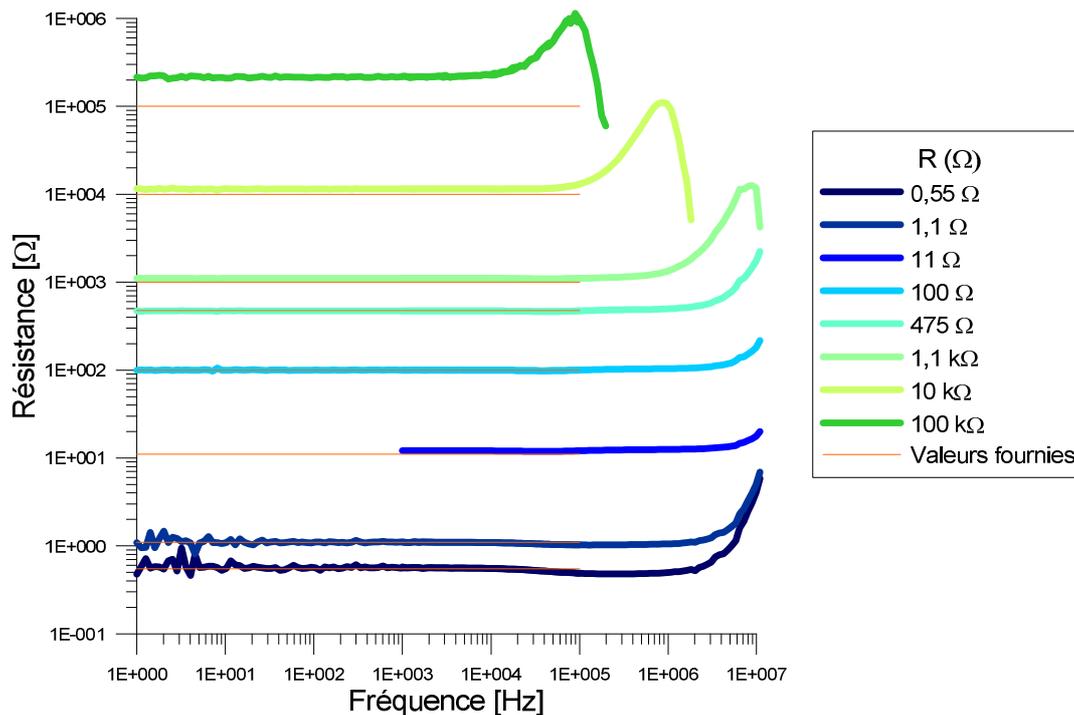


Figure II-14 : Mesures effectuées sur des résistances de valeurs connues comprises entre 0,55 Ω et 100 k Ω en fonction de la fréquence de mesure ($f \in [1 ; 10^7]$ Hz) à l'aide du multimètre PSM 1735.

La gamme de fréquences de mesure du résistivimètre SECR-1 est comprise entre 100 Hz et 30 kHz. Sur l'ensemble de la gamme de fréquence étudiée, les mesures effectuées (Figure II-15) sont correctes avec une incertitude inférieure à 10% pour les résistances comprises entre 100 Ω et 10 k Ω . On observe un effet de la fréquence de mesure à partir de 10 k Ω . Pour une résistance de 100 k Ω , la fréquence doit être choisie inférieure à 1 kHz pour que l'incertitude sur la valeur de la résistance soit inférieure à 10 %. Dans le cas de résistances plus faibles (< 100 Ω), le résistivimètre est moins performant que le multimètre PSM 1735. On peut toutefois obtenir une mesure à moins de 30 % sur l'ensemble des fréquences pour les résistances comprises entre 0,55 et 11 Ω .

L'intervalle des résistivités électriques mesurables à l'aide du résistivimètre SECR-1, avec une imprécision inférieure à 10 %, est donc égale à [2 ; 10 000] $\Omega.m$ pour des fréquences comprises entre 100 Hz et 1 k Ω et à [2 ; 1 000] $\Omega.m$ pour des fréquences pouvant atteindre 30 kHz.

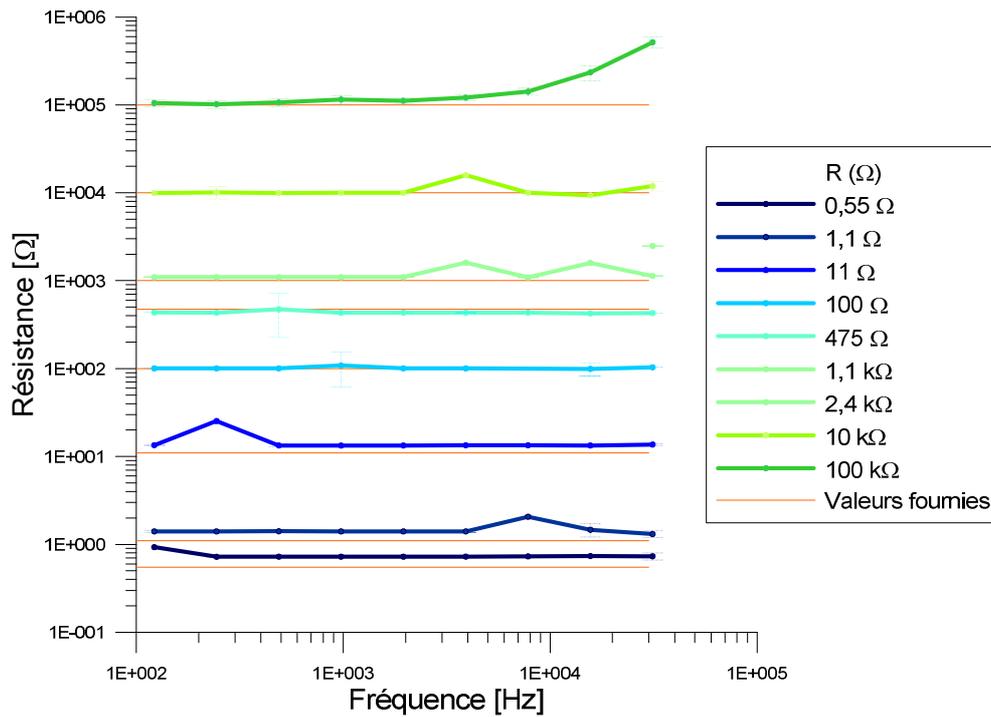


Figure II-15 : Mesures effectuées sur des résistances de valeurs connues comprises entre 0,55 Ω et 100 kΩ en fonction de la fréquence de mesure ($f \in [10^2 ; 3 \cdot 10^4]$ Hz) à l'aide du résistivimètre multifréquentiel SECR-1.

Des résistivités comprises entre 1 Ω.m et 10 000 Ω.m dans la configuration de mesure adoptées peuvent donc être mesurées pour des fréquences inférieures à 10 kHz à l'aide des trois résistivimètres étudiés. Les trois résistivimètres ayant été utilisés successivement, en fonction de leur disponibilité au cours des expérimentations, il était nécessaire de comparer leurs réponses sur une gamme de résistances connues.

2.2.3. Etude du quadripôle électrique

Un quadripôle électrique a été conçu afin de permettre une mesure de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique complexe sur un même échantillon. L'échantillon de sol meuble étant contenu dans le porte-échantillon de la cellule capacitive, la taille du quadripôle électrique carré a été adaptée à cette contrainte. Le dispositif est donc constitué de quatre clous en laiton de 3 mm de diamètre, espacés de 3 cm (Figure II-16) et vissés dans une plaque isolante en plexiglas. L'ensemble est placé sur la partie inférieure de la cellule capacitive (Figure II-16).

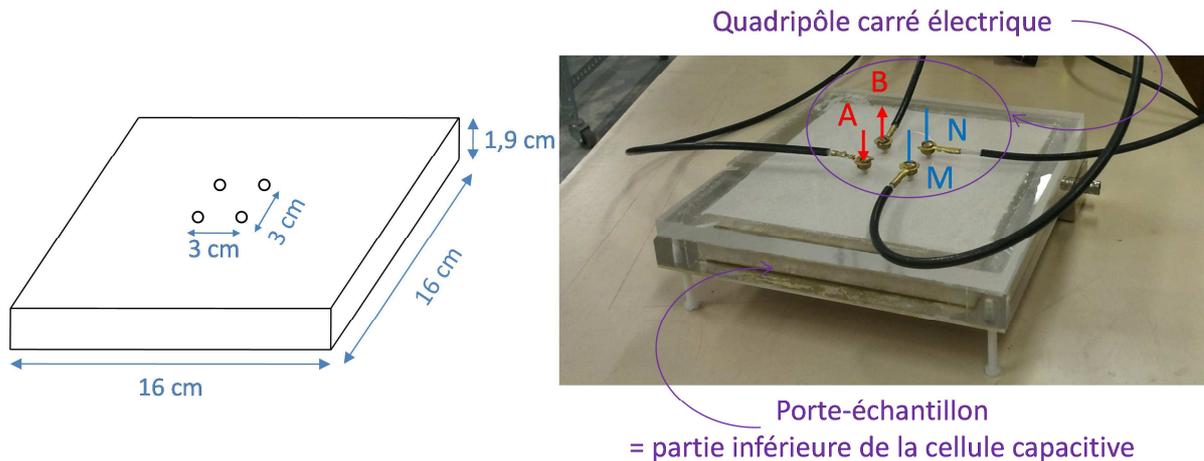


Figure II-16 : Schéma et photo du quadripôle carré électrique utilisé pour mesurer la conductivité électrique d'un échantillon de sol contenu dans le porte-échantillon de la cellule capacitive.

Au vu des caractéristiques géométriques du quadripôle et de la nature limitée de l'échantillon dont on souhaite évaluer la conductivité électrique, un coefficient géométrique doit être calculé afin de retrouver la valeur de la conductivité électrique à partir de la mesure du rapport de la tension mesurée sur l'intensité injectée.

Détermination du coefficient géométrique classique

Le coefficient géométrique est en premier lieu fonction de la géométrie du quadripôle électrique de mesure. On définit le coefficient géométrique K du dispositif tel que :

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{II-13})$$

Avec : $\rho = 1/\sigma$: résistivité électrique du matériau étudié

$\Delta V = V_M - V_N$: tension mesurée à l'aide des électrodes de mesure M et N

I : intensité du courant injecté entre les électrodes d'injection A et B

Dans le cas d'un demi-espace infini homogène, on définit les potentiels V_M et V_N en fonction de la position des électrodes les unes par rapport aux autres tels que :

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \text{ et } V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (\text{II-14})$$

On peut alors calculer la valeur du coefficient géométrique au moyen de l'expression :

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (\text{II-15})$$

Dans le cas présent, $AM = BN = 3 \text{ cm}$ et $AN = BM = \sqrt{2} \times 3 \text{ cm}$

Le coefficient géométrique lié aux dimensions du quadripôle électrique est donc égale à :

$$K = \frac{2\pi \cdot 0,03}{\sqrt{2}(\sqrt{2} - 1)} \cong 0,322 \quad (\text{II-16})$$

Prise en compte des effets de bord – Calcul du coefficient géométrique

Ce premier coefficient ne tient cependant pas compte de la géométrie de l'échantillon et notamment de sa faible épaisseur. La méthode des images généralisée est employée ici afin de prendre en compte les dimensions de l'échantillon dans le calcul du coefficient géométrique.

Méthode des images généralisée

On introduit des sources images, positionnées de façon symétrique par rapport à chaque limite de l'échantillon (Figure II-17). Dans le calcul des potentiels V_M et V_N , des potentiels perturbateurs liés à la présence des sources images sont alors introduits :

$$V_M = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} + \frac{1}{A_1 M} + \frac{1}{A_2 M} + \frac{1}{A_1' M} + \frac{1}{A_2' M} + \dots \right) - \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left(\frac{1}{BM} + \frac{1}{B_1 M} + \frac{1}{B_2 M} + \frac{1}{B_1' M} + \frac{1}{B_2' M} + \dots \right) \quad (\text{II-17})$$

$$V_N = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} + \frac{1}{A_1 N} + \frac{1}{A_2 N} + \frac{1}{A_1' N} + \frac{1}{A_2' N} + \dots \right) - \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left(\frac{1}{BN} + \frac{1}{B_1 N} + \frac{1}{B_2 N} + \frac{1}{B_1' N} + \frac{1}{B_2' N} + \dots \right)$$

On définit ρ_1 comme la résistivité électrique effective de l'échantillon que l'on cherche à calculer et ρ_a comme la résistivité apparente mesurée lorsque l'on ne tient pas compte des dimensions de l'échantillon, i.e. si l'on se place dans le cas d'un demi-espace infini homogène :

$$\rho_a = K \cdot \frac{V_M - V_N}{I} = K \cdot \frac{\rho_1}{2\pi} ((V_S)_M - (V_S)_N) \quad (\text{II-18})$$

avec $(V_S)_M = \frac{1}{AM} + \frac{1}{A_1M} + \frac{1}{A_2M} + \dots - \frac{1}{BM} - \frac{1}{B_1M} - \frac{1}{B_2M} - \dots$
 et $(V_S)_N = \frac{1}{AN} + \frac{1}{A_1N} + \frac{1}{A_2N} + \dots - \frac{1}{BN} - \frac{1}{B_1N} - \frac{1}{B_2N} - \dots$

A partir de la mesure de la résistivité électrique apparente ρ_a , on peut donc retrouver la résistivité électrique réelle de l'échantillon de sol étudié ρ_1 grâce à l'expression :

$$\rho_1 = \frac{\rho_a}{C_{cal}} \quad (II-19)$$

avec C_{cal} coefficient lié à la géométrie du quadripôle et aux dimensions de l'échantillon :
 $C_{cal} = \frac{K}{2\pi} ((V_S)_M - (V_S)_N)$.

Le coefficient géométrique calculé ici prend en compte les images jusqu'à l'ordre 8. Pour un échantillon de dimensions égales à 16×16×0,19 cm et un quadripôle carré de 3 cm de côté, C_{cal} est approximativement égal à 1,814690.

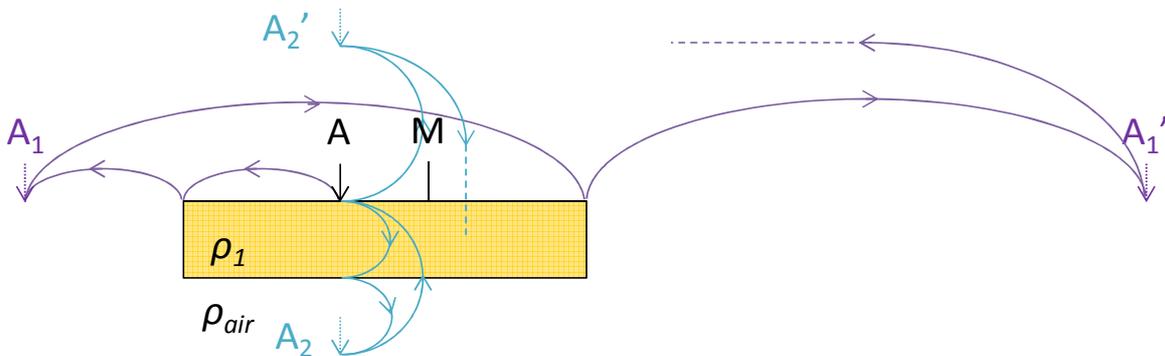


Figure II-17 : Schéma explicitant la prise en compte de sources images, symétriques à l'électrode d'injection par rapports aux bords de l'échantillon, dans le calcul du potentiel mesuré en M, réalisé par la méthode des images (toutes les images du point source A ne sont pas représentées).

Prise en compte de la plaque conductrice en aluminium

L'échantillon étant placé dans la partie inférieure de la cellule capacitive, une des deux plaques conductrices en aluminium est partie intégrante du dispositif de mesure de la conductivité électrique. Même si son influence sur la mesure est très limitée car la plaque est recouverte d'une couche de vernis isolant en polyuréthane, une étude de l'influence de la plaque conductrice est nécessaire lorsque la fréquence d'injection est différente de zéro.

La modélisation du dispositif de mesure est réalisée à l'aide d'un programme de calcul 1D prenant en compte le caractère complexe de la résistance électrique, conçu pour des mesures électrostatiques (Tabbagh et Panissod, 2000). On considère un quadripôle carré avec un contact ponctuel entre les électrodes et le milieu, modélisé par un terrain à 4 couches dont les propriétés sont présentées dans le tableau II-2. Les valeurs modélisées ne reflètent toutefois pas complètement le milieu considéré car elles ne tiennent pas compte des limites latérales de l'échantillon.

Paramètres du terrain				
	Epaisseur (cm)	Profondeur (cm)	Conductivité σ (S/m)	Permittivité relative ϵ_r ()
échantillon de sol	1,9	1,9	$10^{-3} - 1$	1 - 100
vernis en polyuréthane	100	1,91	$1 \cdot 10^{-6}$	6
plaque en aluminium	0,2	2,11	$2 \cdot 10^7$	10
air			$1 \cdot 10^{-10}$	1

Tableau II-2 : Paramètres du modèle à 4 couches utilisé pour représenter le dispositif de mesure composé de l'échantillon contenu dans la partie inférieure de la cellule capacitive.

Les calculs ont été réalisés soit en prenant en compte uniquement les résistivités (calcul statique DC), soit en effectuant un calcul électromagnétique complet à l'aide de résistivités complexes (les courants de déplacement sont pris en compte) (Figure II-18).

- **Calcul statique**

On considère alors que les résistivités électriques des 4 couches sont réelles et égales, pour la couche k , à :

$$\rho_k = \frac{1}{\sigma_k} \quad (\text{II-20})$$

Les valeurs de résistivités électriques apparentes sont supérieures à la résistivité électrique de l'échantillon. Ce résultat est lié à l'influence des couches isolantes dans le calcul. La présence de la plaque conductrice est quant à elle négligeable, car recouverte d'une couche de vernis.

- **Prise en compte de la permittivité diélectrique et calcul EM complet**

Tout en continuant de considérer les phénomènes comme statiques (solution de l'équation de Poisson), les résistivités électriques des 4 couches sont prises comme effectives, complexes et égales, pour la couche k , à :

$$\rho_k = \frac{1}{\sigma_k + i\omega \cdot \epsilon_0 \epsilon_{r,k}} \quad (\text{II-21})$$

L'influence de la permittivité diélectrique relative $\epsilon_{r,k}$ de l'échantillon ne se manifeste pas en-dessous de 1 kHz. A partir de 1 kHz, l'influence de la permittivité se fait sentir, même si celle-ci est égale à 1 (c'est le terme ω dans $\sigma/\epsilon\omega$ qui devient plus important) et il en est de même pour la présence de la couche conductrice métallique. Ces influences augmentent avec la permittivité de l'échantillon. Les résistivités électriques mesurées à l'aide de ce dispositif ne correspondent à des valeurs correctes que pour des fréquences inférieures à 1 kHz.

Le calcul EM complet, calcul numérique prenant en compte les divergences, donnent les mêmes résultats.

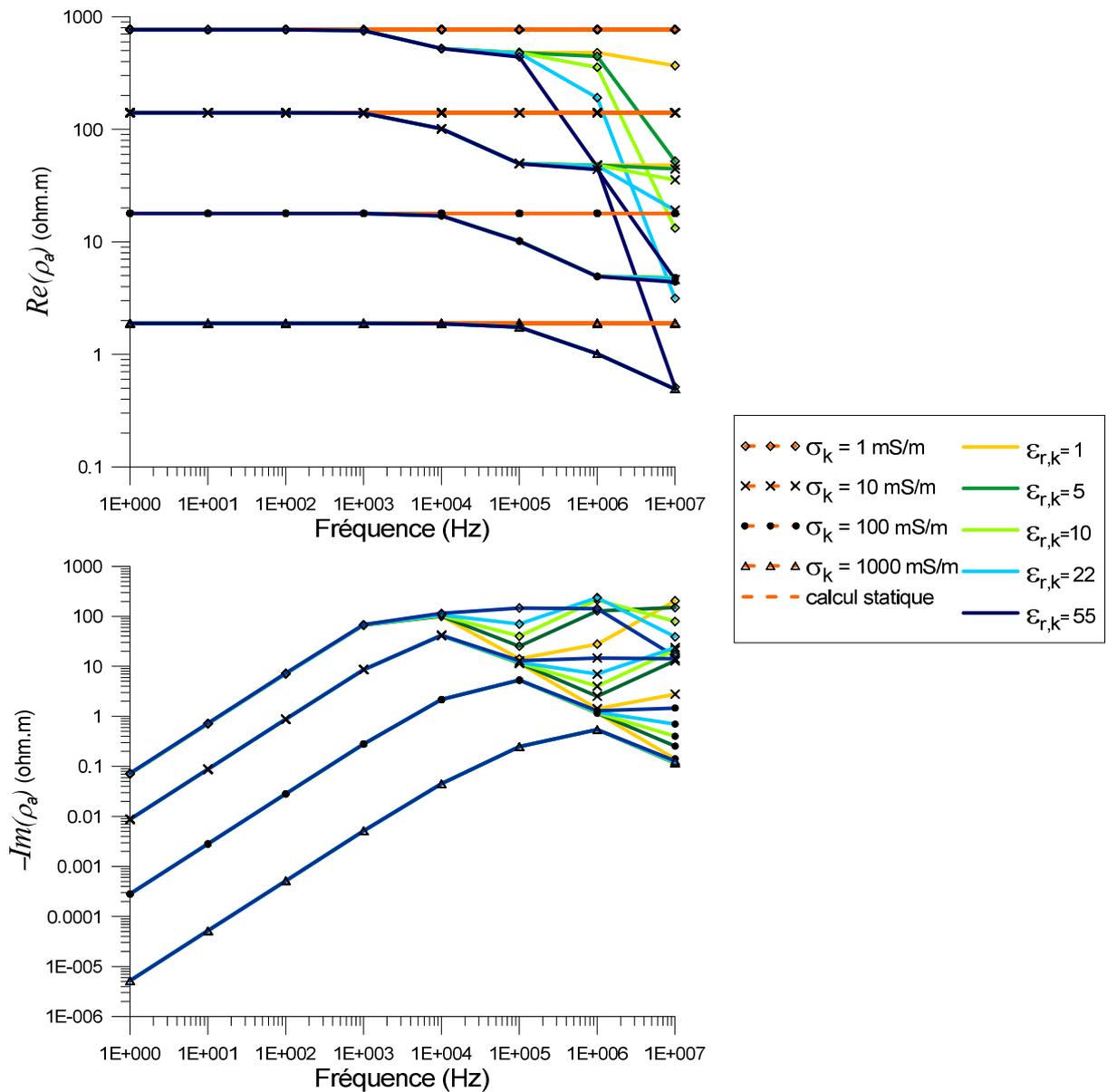


Figure II-18 : Variations des parties réelles et imaginaires de la résistivité apparente de l'échantillon modélisées en fonction de la fréquence de mesure pour différentes conductivités électriques (comprises entre 1 et 1000 mS/m) et permittivités diélectriques relatives (comprises entre 1 et 55) de l'échantillon de sol, pour un vernis isolant d'épaisseur égale à 100 μm à l'aide du calcul statique et du calcul complet.

2.2.4. Calibration du quadripôle électrique

Afin de tester le bon fonctionnement de l'ensemble du dispositif, des mesures sur des échantillons de conductivité électrique connue ont été effectuées. Des solutions d'eau déminéralisée à teneurs en chlorure de sodium variable sont utilisées dans ce but.

Mesures pour des échantillons de conductivités connues

Des mesures sont effectuées pour des solutions d'eau de concentration en chlorure de sodium variables : 0 g/L, 0,1 g/L, 1 g/l et 10 g/L. Les conductivités électriques ont été mesurées à l'aide du quadripôle électrique carré relié aux trois résistivimètres et comparées à celles obtenues à l'aide d'un conductivimètre Multi 340i WTW.

La différence entre les valeurs de conductivité électrique mesurée avec les deux dispositifs (Figure II-19) est inférieure à 15 % pour l'ensemble des fréquences inférieures à 100 kHz lorsque la conductivité de l'échantillon est supérieure ou égale à 266 $\mu\text{S/cm}$ (équivalent à une concentration de 0,1 g/L), ce qui correspond à des résistivités électriques inférieures à 50 $\Omega\cdot\text{m}$. D'après l'étude de sensibilité des résistivimètres, cette valeur peut largement être dépassée. Des mesures sur d'autres salinités plus faibles de l'eau pourraient être entreprises afin de le vérifier. Par contre, des résistivités électriques supérieures à 6000 $\Omega\cdot\text{m}$, correspondant à une conductivité de 1,6 $\mu\text{S/cm}$ (eau distillée) ne pourront être déterminées de manière précise.

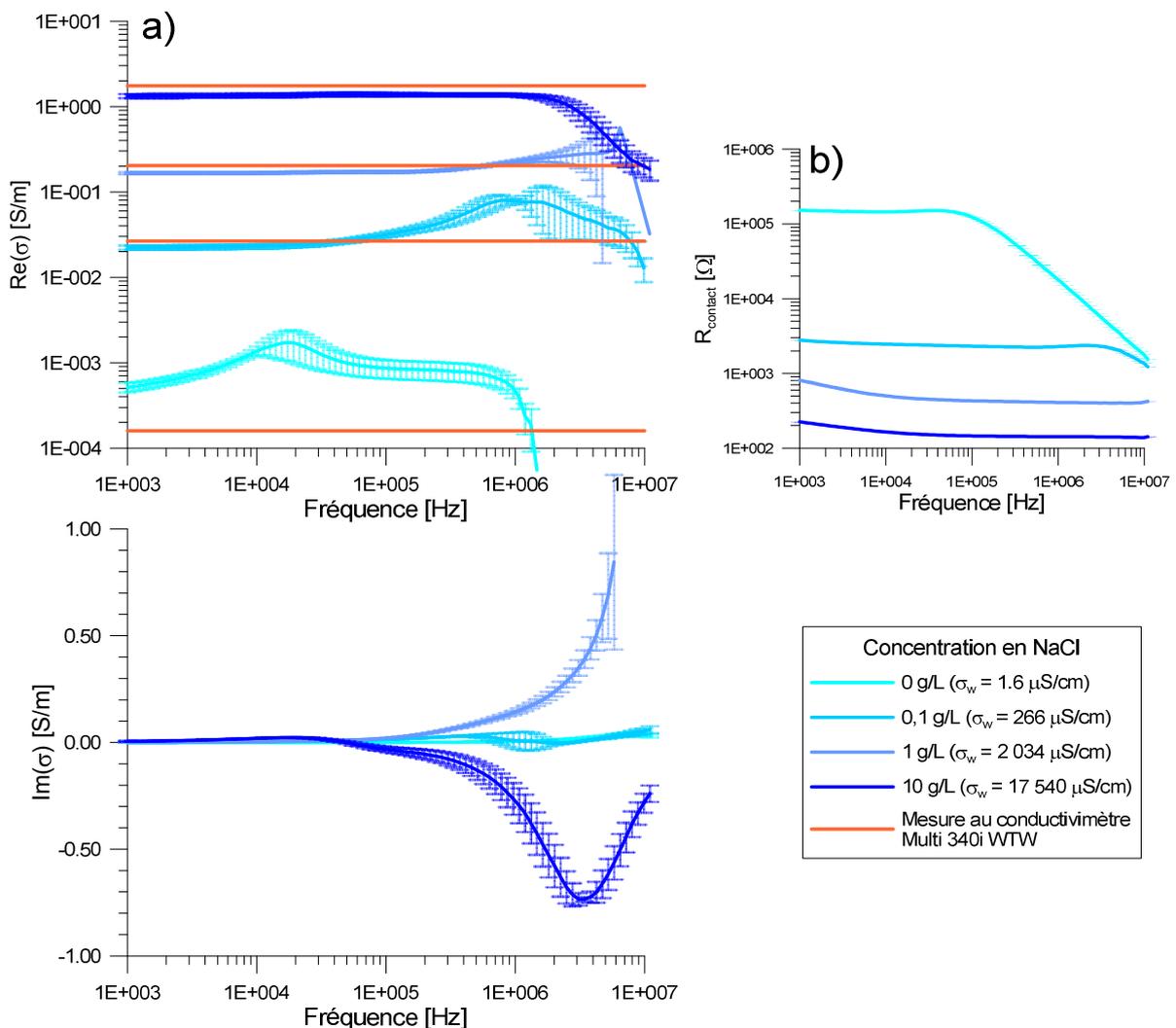


Figure II-19 : **a)** Conductivité électrique complexe mesurée à l'aide du quadripôle électrique carré pour des solutions possédant des concentrations en NaCl comprises entre 0 et 10 g/L comparées aux mesures effectuées à l'aide du conductivimètre Multi 340i WTW ; **b)** Résistance de contact calculée pour chaque mesure effectuée au PSM1735.

Coefficient de calibration

Etant données les mesures et les modélisations effectuées précédemment, l'ajout d'un coefficient de calibration supplémentaire n'est pas nécessaire. En effet, on a vu que les trois résistivimètres étudiés permettent de déterminer avec une précision supérieure à 10 % les valeurs de résistance mesurée, et des mesures à l'aide du quadripôle électrique pour des solutions de salinité plus ou moins importante montrent une bonne correspondance avec les conductivités électriques mesurées par le conductivimètre Multi 340i WTW.

3. Caractéristiques des matériaux employés

Des échantillons de sable, de mélanges argilo-sableux et de sols limoneux naturels sont étudiés dans ce mémoire. Les échantillons synthétiques ont été préparés à partir du sable de Nemours et de deux argiles en poudre de minéralogie différente : kaolinite et bentonite dont les caractéristiques sont présentées ci-dessous. Les matériaux employés ont également fait l'objet de mesure PPS (Polarisation Provoquée Spectrale) dans le cadre de la thèse de Okay (2011). Plusieurs études minéralogiques, pétrophysiques et physico-chimiques ont été réalisées afin de caractériser les matériaux utilisés :

- *Minéralogie du composant* déterminée par diffraction aux rayons X (DRX), réalisée sur des poudres d'argiles et du sable. L'interprétation des diffractogrammes (Annexe A2) permet d'évaluer la composition minéralogique du matériau, à la fois en terme qualitatif (position des pics sur les diffractogrammes des différents essais réalisés) et semi-quantitatif (hauteur des pics par rapport au bruit de fond sur l'essai glycolé) ;
- *Surface spécifique* des poudres d'argiles calculée à partir de la méthode de Brunauer, Emmet et Teller (BET) (adsorption d'azote) ;
- *Capacité d'échange cationique (CEC)* des poudres d'argiles mesurée selon la méthode de Jackson (1964)

3.1. Sable de Nemours

Des échantillons de sable de Nemours ont été choisis afin d'étudier le comportement d'un matériau propre aux fréquences intermédiaires. Ce sable présente la particularité d'avoir une granulométrie très resserrée centrée autour d'un diamètre moyen de grain égal à $207 \mu\text{m}$ (Figure II-20 et annexe A1). De plus, l'analyse des résultats obtenus par diffraction aux rayons X confirme les données fournies par le carrier (Sibelco) : le sable est composé presque uniquement de minéraux de Quartz ($\geq 99.7\%$).

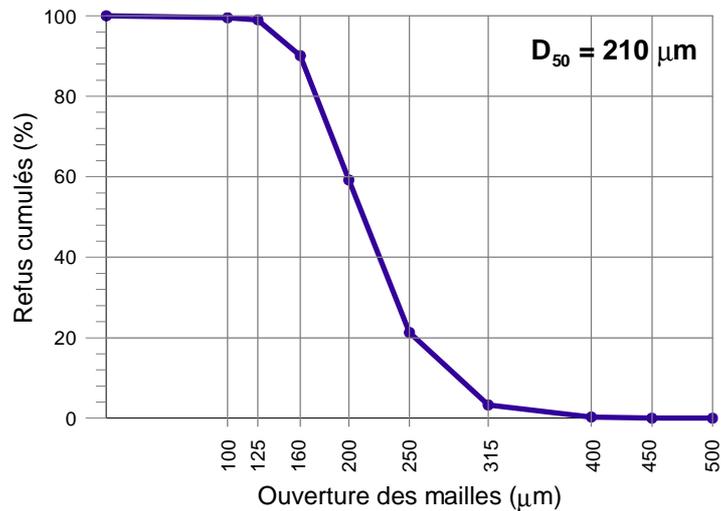


Figure II-20 : Courbe des refus cumulés du sable de Nemours NE 14 utilisé (Annexe A1).

3.2. Argiles

Des mesures sur deux types d'argiles présentant des caractéristiques différentes ont été réalisées. Les résultats des analyses minéralogiques, pétrophysiques et physico-chimiques sont décrits dans le tableau II-3. Si la fraction fine de la kaolinite étudiée est composée à 80 % de kaolinite et 15 % de smectite, la fraction fine de la bentonite est dominée par de la smectite (95 %). Ces différences de composition minéralogique vont se traduire en terme de surface spécifique et de capacité d'échange cationique : la bentonite possède une surface spécifique 3 fois plus importante que la smectite et une CEC beaucoup plus importante (34 meq/100g).

Méthodes de mesure		Kaolinite	Bentonite
Diffraction des rayons X	Echantillon brut	La kaolinite est dominante, accompagnée d'un peu de muscovite (et/ou d'illite), de quartz et d'un feldspath potassique de type microcline	L'échantillon n'est pas pur, composé de smectite alumineuse de type beidellite avec beaucoup d'opale plus ou moins bien cristallisée, du quartz, un peu de kaolinite et un peu de feldspath de type sanidine.
	Fraction argileuse	La fraction < 2 µm est très largement dominée par de la kaolinite (80 %), les 20 % restant sont à attribuer pour 5 % à de la muscovite et à de l'illite (épaulement du pic vers les petits angles correspondant à la présence d'illite), le solde de 15 % à de la smectite (pic très large centré vers 14 Å au naturel, gonflement à 16,9 Å au glycol et écrasement à 10 Å au chauffage)	La fraction < 2 µm est très largement dominée par de la smectite (95 %) et de la kaolinite (5 %). La smectite est une smectite sodique soit une Na-Montmorillonite avec une couche d'eau, soit une beidellite.
Surface spécifique (m ² /g)		9,4	30,9
Capacité d'échange cationique CEC (meq/100g)		~ 0,0	34

Tableau II-3 : Analyse DRX (échantillon brut et fraction fine), BET (surface spécifique) et CEC des poudres de kaolinite et de bentonite utilisées dans les mélanges argilo-sableux (Bartier et Blanc-Valleron, 2009).

3.3. Sols naturels

Des mesures ont également été entreprises sur des échantillons de sols naturels provenant de deux parcelles différentes du site de l'INRA d'Estrée-Mons, site sur lequel des essais ont également été réalisés avec le prototype de mesure (cf. chapitre 3-5.3). Le site est constitué d'un luvisol limoneux possédant les caractéristiques chimiques (Tableau II-4) et physiques (Tableau II-5) suivantes :

Parcelle	pH	MO	CaCO ₃	C	N	CW	P ₂ O ₅	P ₂ O ₅
		(matière organique)					(P/JH = méthode Joret-Hébert)	(POL = méthode Olsen)
P16	7,80	15,5	2,00	8,99	1,05	8,56	0,184	0,112
P8	8,00	16,5	11,00	9,58	1,13	8,48	0,253	0,114

Parcelle	K ₂ O	MgO	B	Zn	Cu	Mn	Na	Ca
P16	0,190	0,08	0,24	4,2	5,8	92,2	0,023	4,06
P8	0,280	0,11	0,18	13,7	4,2	51,6	0,019	7,35

Tableau II-4 : Composition chimique des échantillons provenant des deux parcelles P8 et P16 de l'INRA d'Estrée-Mons, exprimée en %

Parcelle	Argile	limon fin	limon grossier	sable fin	sable grossier
P16	191	278	462	61	8
P8	219	306	410	56	9

Tableau II-5 : Composition physique des échantillons provenant des deux parcelles P8 et P16 de l'INRA d'Estrée-Mons, exprimée en g/kg.

3.4. Eau employée

Les mesures sur les différents échantillons sont effectuées sur l'ensemble des teneurs en eau mesurables variant entre un état saturé et un état sec. Les mesures ont été effectuées dans un premier temps en utilisant de l'eau du robinet en tant qu'électrolyte, puis les mesures sur les différents échantillons ont été répétées pour des eaux de salinité différente (eau déminéralisé et chlorure de sodium en concentration variable).

Afin de contrôler la validité des résultats obtenus avec l'eau du robinet, des tests ont été réalisés avec une solution électrolytique composée d'eau distillée et de chlorure de sodium possédant la même conductivité électrique que l'eau du robinet. Sur l'ensemble de la gamme de fréquence, les résultats des mesures de permittivité diélectrique complexe et de conductivité électrique présentent moins de 10 % de variations.

Afin de contrôler la variabilité de l'eau du robinet employée comme électrolyte, sa conductivité électrique et sa température sont systématiquement mesurées à l'aide du conductivimètre Multi 340i WTW. Entre 2009 et 2011, la conductivité de l'eau du robinet utilisée vaut en moyenne 536 µS/cm à 25°C et diffère de plus ou moins 4% de cette valeur.

Une analyse chimique de la composition minéralogique de l'eau du robinet est fournie régulièrement par l'agence régionale de santé d'Ile de France. Le tableau II-6 présente les concentrations des différents minéraux présents dans l'eau en septembre 2010 et janvier 2012. On observe que la concentration des différents minéraux varie de moins de 10 % en un an et demi. On peut donc considérer les caractéristiques de l'eau du robinet comme stables au cours des différentes expérimentations menées.

Minéraux	Concentration (mg/L)	Concentration Unité Centre	
		09/2010	01/2012
Calcium	90	104	115.0
Magnésium	6		
Sodium	10	8.9	9.3
Potassium	2	2.0	1.9
Bicarbonates	220	261	276.0
Sulfates	30	19.9	19.8
Chlorures	20	23.7	23.6
Pesticides : Nitrates/Atrazine	29/0	32.5/0	37.1/0
Fluor	0.17	0.1	0.1
Minéralisation totales Extrait à sec à 180°C	420	452.1	482.8
Conductivité	536 $\mu\text{S}/\text{cm} \pm 4\%$ Mesurée à 25°C	565 $\mu\text{S}/\text{cm} \pm 6\%$ 17.0°C $\pm 3^\circ\text{C}$	587 $\mu\text{S}/\text{cm} \pm 6\%$ 13.9°C $\pm 3^\circ\text{C}$

Tableau II-6 : Composition minéralogique de l'eau du robinet utilisée dans les mesures de permittivité diélectrique et de conductivité électrique (rapport de l'agence régionale de santé d'Ile de France).

4. Protocole expérimental

Les paramètres électriques de mélanges artificiels argilo-sableux ont été mesurés pour différentes teneurs en eau. Le choix d'un protocole expérimental afin de réaliser ces mélanges dans des conditions de reproductibilité est donc nécessaire.

4.1. Mélange de la phase solide et de l'électrolyte

Après plusieurs tests, nous avons choisi de faire varier les teneurs en eau d'un état saturé à un état sec par paliers de dessiccation. L'échantillon peut ainsi être conservé dans le porte-échantillon pour l'ensemble du cycle de mesure. Sa structure est donc préservée.

L'échantillon est donc saturé avant d'être introduit dans la cellule capacitive. Il est ensuite séché à l'étuve à 40°C par palier de 2 heures. Les mesures sont effectuées après avoir vérifié que la température de la cellule est à nouveau proche de la température ambiante.

Si la structure de l'échantillon est ainsi préservée, on ne peut garantir l'homogénéité du séchage, celle-ci étant cependant favorisée par la faible épaisseur de l'échantillon.

4.2. Mélange des constituants de la phase solide

Dans le cas d'échantillons argilo-sableux, il est nécessaire d'obtenir un mélange aussi homogène que possible. Nous avons procédé à plusieurs étapes successives dans ce but :

Préparation de l'argile

- Séchage de l'argile à 105° pendant 24 h
- Broyage de l'argile à l'aide d'un mortier et d'un pilon
- Tamisage à 2 mm

Mélange de l'argile et du sable

- Mélange manuel à sec du sable et de l'argile, un test avec un mixeur ne s'étant pas révélé plus efficace.
- Tamisage à 2 mm
- Saturation de l'échantillon ainsi formé et nouveau mélange manuel

4.3. Mode de dépôt de l'échantillon

Dépôt manuel

Au vue du matériel à disposition au laboratoire, les échantillons ont été déposés dans la cellule capacitive par tassement manuel de couches successives à l'aide d'une spatule, puis homogénéisation de l'ensemble en effectuant des mouvements transversaux répétés sur la cellule de mesure. Le sol étant initialement saturé en eau, voire sursaturé, l'homogénéisation de l'ensemble de l'échantillon est possible, même manuellement. Les bords du porte-échantillon étant transparents, on observe cependant la présence de pores de taille très variée. Lors du séchage, on peut alors se poser la question de la présence de phénomènes d'effondrement granulaire au sein de l'échantillon modifiant sa structure, notamment lorsque l'échantillon est composé principalement de sable.

Dépôt à l'aide de la semeuse

Il nous est apparu intéressant de déterminer l'importance de cette pratique sur la mesure des paramètres électriques. Afin d'obtenir une répartition du sable constante pour l'ensemble de l'échantillon, un distributeur de sable, appelé semeuse et développé par B. Maillot au laboratoire Géoscience et Environnement de Cergy-Pontoise a été utilisé (Benahmed *et al.*, 2004 ; Cubas, 2009 ; Souloumiac, 2009). La semeuse de sable (Figure II-21) est composée d'un bac percé de trous réguliers dans lequel le sable est versé. Une plaque métallique, possédant le même réseau de trous, mais décalés par rapport au compartiment supérieur, est placée sous le bac. L'ouverture des trous du bac par le déplacement de cette plaque métallique permet de libérer le sable qui s'écoule à travers un tamis placé sous la plaque métallique. Ce dernier tamis permet de produire un flux de sable diffus et homogène.

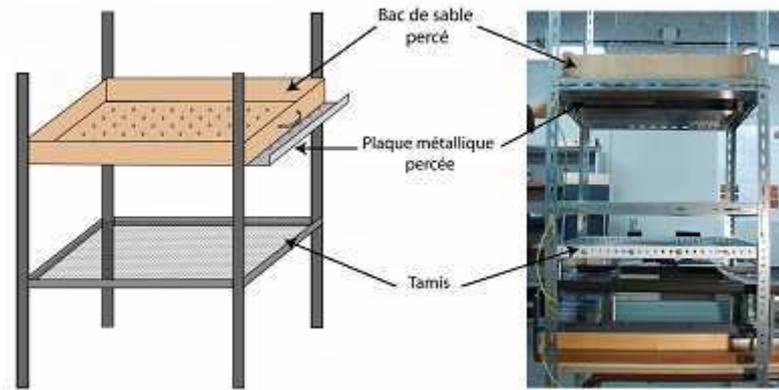


Figure II-21 : Principe de la semeuse employé afin d'obtenir une répartition du sable constante sur l'ensemble de l'échantillon (d'après Cubas, 2009).

La semeuse pouvant être utilisée uniquement pour des matériaux secs, l'échantillon est placé dans la cellule capacitive à son état sec dans cette variante de préparation. Une nouvelle technique de saturation de l'échantillon a donc été mise en place : nous avons utilisé un « goutte-à-goutte » (Figure II-22) pour saturer l'échantillon. La même procédure de dessiccation par pallier est alors utilisée par la suite. Afin de limiter un maximum l'introduction de paramètres différents dans la mesure, le sable et l'eau employés à Cergy sont identiques à ceux des autres mesures.

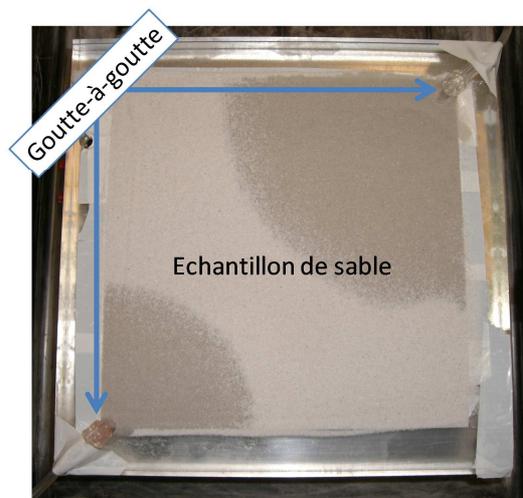


Figure II-22 : Echantillon de sable en cours de saturation à l'aide d'un « goutte-à-goutte » placé à deux extrémités de la cellule.

4.4. Tests sur l'hétérogénéité de l'échantillon

La taille de l'échantillon étant limitée, les hétérogénéités dans le milieu sont elles-mêmes peu présentes. Cependant, afin de s'en assurer, les mesures à l'aide du quadripôle électrique carré sont effectuées sur un ensemble de quatre configurations ABMN différentes. Les résultats sont présentés sous forme de médianes.

5. Mesures sur des échantillons de sable

Les variations de la permittivité diélectrique et de la conductivité électrique en fonction de la fréquence de mesure et des caractéristiques du milieu sont d'abord étudiées dans le cas d'un sol « propre » (sans argile). L'influence de la teneur en eau, de la salinité de l'électrolyte et de la structure de l'échantillon est mesurée en fonction de la fréquence.

5.1. Influence de la teneur en eau

La teneur en eau étant la grandeur que l'on souhaite quantifier lors des mesures *in situ*, il est impératif d'étudier son influence sur la valeur de la permittivité diélectrique. Les mesures ont été réalisées à l'aide de sable non saturé en utilisant une eau de conductivité proche de $550 \mu S/cm$ (cf. chapitre 2-3.4). Les variations de teneur en eau sont étudiées à partir d'un état saturé (voire sursaturé), par phases de dessiccation successives afin de conserver la structure de l'échantillon.

Un même type de mesure est répété sur au moins trois échantillons différents. On choisit de représenter un jeu de données réel, accompagné d'une barre d'erreur correspondant à l'écart-type calculé pour l'ensemble des données des échantillons de même type, pour une même teneur en eau.

Si l'on étudie la permittivité diélectrique complexe en fonction de la fréquence (Figure II-23), on distingue clairement un phénomène de relaxation pour l'ensemble des teneurs en eau sauf dans le cas d'un échantillon sec. La fréquence de relaxation, qui correspond au maximum de la partie imaginaire de la permittivité diélectrique, décroît lorsque la teneur en eau diminue. La valeur de la permittivité diélectrique effective réelle de l'échantillon pour une même teneur en eau augmente donc lorsque la fréquence diminue (ajout d'un terme lié au nouveau mécanisme de polarisation).

Des variations similaires ont par exemple été observées par Breede *et al.* (2010) à plus basse fréquence. Ils ont en effet étudié en laboratoire les relations entre les paramètres PPS et l'état hydrique d'échantillons synthétiques argilo-sableux saturés à l'aide d'eau du robinet ($\sigma_w = 450 \mu S/cm$). Les valeurs des phases mesurées augmentent avec la saturation de l'échantillon et un déplacement du pic de phase (correspondant à une fréquence de relaxation) est visible lorsque l'échantillon contient une fraction argileuse. Chelidze *et al.* (1977) et Hoekstra et Doyle (1971) expliquent ces variations par les différents états physiques de l'eau : la présence d'eau adsorbée lorsque la saturation de l'échantillon est faible présente des fréquences de relaxation plus faibles que ceux de l'eau libre.

Nous observons ici une variation de la fréquence de relaxation lorsque la teneur en eau diminue également dans le cas d'un sol propre. Si cette polarisation est également liée à l'interaction entre l'eau et les grains solide de l'échantillon, le processus physique responsable de cette relaxation mériterait une étude microscopique plus approfondie. Notre objectif restant l'application pratique *in situ*, nous nous limiterons à une observation macroscopique des relations.

L'interprétation de ces observations peut être approfondie en appliquant aux données un modèle généralisé de type Cole-Cole qui permet de quantifier la fréquence de relaxation, ainsi que les permittivités haute et basse fréquence. L'utilisation d'un modèle possédant deux temps de relaxation différents permet de modéliser les variations des permittivités diélectriques relatives réelles et imaginaires avec un écart de moins de 10 %. Ce deuxième temps de relaxation se traduit par une augmentation de la partie imaginaire de la permittivité diélectrique aux plus basses fréquences. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau II-7. La première relaxation est caractérisée par des fréquences de relaxation qui varient entre 3 MHz et 20 kHz lorsque la teneur en eau volumique est comprise entre 31 % et 1 %. Si à haute fréquence, ϵ_{∞} ne dépasse pas 7, il n'en est pas de même pour la permittivité basse fréquence dont les valeurs sont comprises entre 40 et 90. La seconde relaxation apparaît pour des fréquences inférieures à 10 kHz. Ses caractéristiques sont moins aisées à déterminer car le palier correspondant à la permittivité statique ϵ_s n'est pas atteint dans la gamme de fréquences étudiées.

Le cas saturé ($\theta_v = 38\%$) constitue un cas particulier. Ses variations, tant en termes d'amplitude que de fréquence de relaxation, ne sont pas corrélées avec celles des autres teneurs en eau : sa fréquence de relaxation est égale à 3.10^5 Hz et la valeur de la permittivité diélectrique réelle atteint rapidement des valeurs supérieures à 100 pour des fréquences inférieures. Ces observations pourraient être reliées aux mécanismes apparaissant à l'interface entre les plaques conductrices de la cellule capacitive et l'échantillon. Dans le cas saturé, où l'échantillon est généralement même en légère sursaturation, une fine pellicule d'eau peut se former à la surface des armatures métalliques. Cet effet ne serait donc pas directement lié avec les caractéristiques intrinsèques de l'échantillon.

On représente également les permittivités diélectriques relatives réelle et imaginaire en fonction de la teneur en eau volumique pour différentes fréquences de mesure (Figure II-23b). Quelle que soit la fréquence de mesure, les parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique augmentent avec la teneur en eau volumique. Les valeurs sont comparées avec celles du polynôme de Topp. Pour des fréquences comprises entre 2 et 10 MHz, les valeurs mesurées s'écartent de moins de 20 % de celles calculées à l'aide du polynôme de Topp. On peut donc considérer que les lois établies à haute fréquence sont applicables jusqu'à 2 MHz dans le cas d'un sol propre, pour une conductivité de l'électrolyte proche de $500 \mu S/cm$.

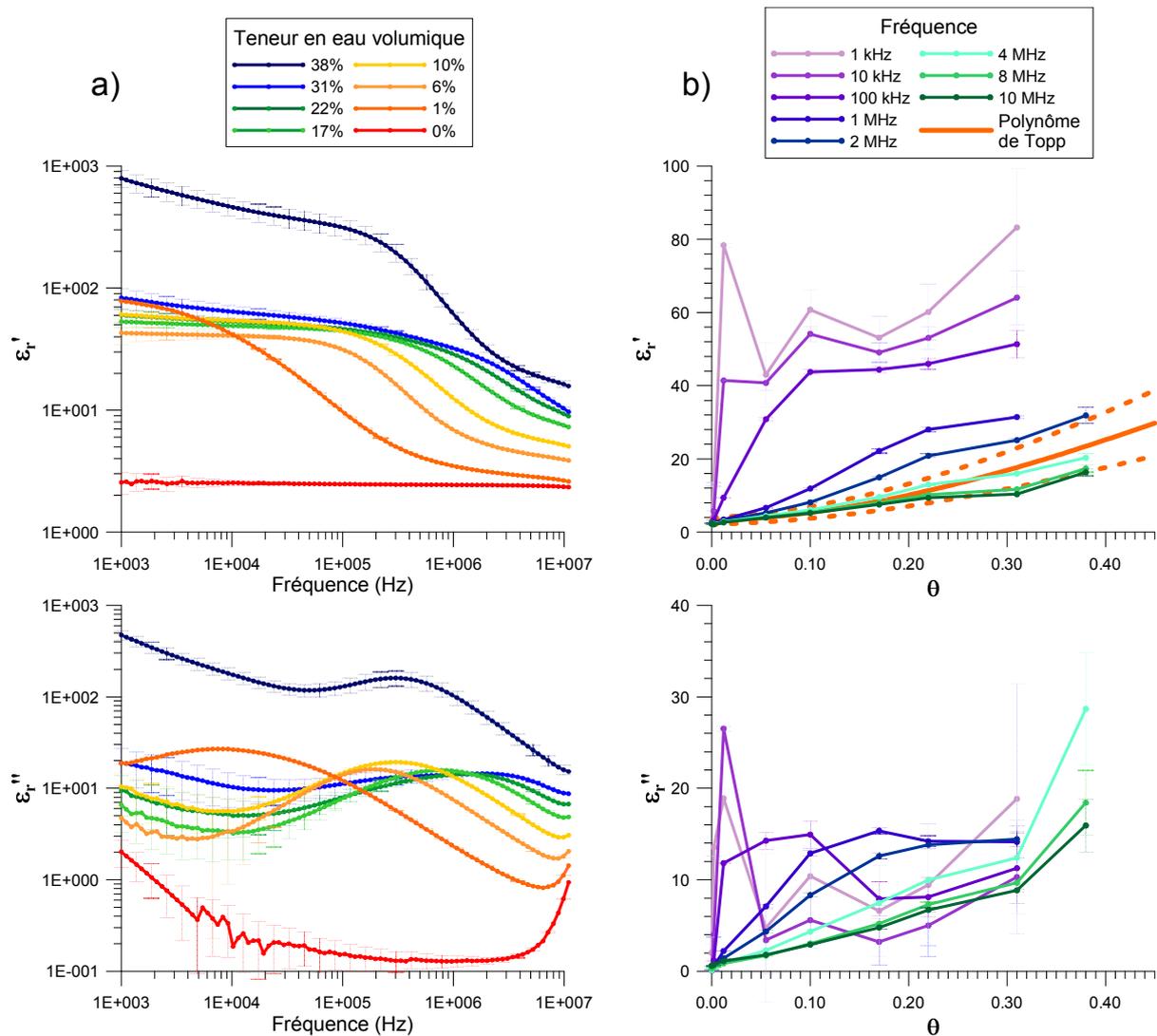


Figure II-23 : Variations de la permittivité diélectrique effective relative réelle et imaginaire en fonction de : a) la fréquence pour différentes teneur en eau volumique et b) la teneur en eau volumique pour différentes fréquences de mesure, comparées avec la permittivité diélectrique donnée par le polynôme de Topp.

5.2. Influence de la salinité de l'eau

La salinité de l'électrolyte joue également un rôle non négligeable dans la mesure des paramètres électriques du sol. Des mesures ont été réalisées sur des échantillons de sables de Fontainebleau plus ou moins saturés en eau de conductivité comprise entre $1,5 \mu S/cm$ (eau déminéralisée) et $1 S/m$ (par addition de chlorure de sodium), suivant toujours le même protocole de dessiccation de l'échantillon.

Si la résistivité électrique mesurée en statique varie fortement en amplitude avec la salinité de l'électrolyte (Figure II-24), il n'en est pas de même pour la permittivité diélectrique complexe. En effet, l'influence de la salinité sur les mesures n'implique pas de variations notables d'amplitude pour les parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique relative (Figure II-25). Cependant, elles se distinguent clairement par une fréquence de relaxation différente : plus la salinité du fluide

augmente, plus la fréquence de relaxation observée est grande. Cette variation est présente pour l'ensemble des teneurs en eau étudiées.

Pour une teneur en eau volumique égale à 6 %, dans le cas d'une conductivité électrique de l'eau égale à 559 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (à 20°C), la permittivité diélectrique réelle ne semble pas atteindre de palier aux plus basses fréquences. Cette variation est liée à un effet de température. Pour cet échantillon, le temps de latence entre la sortie du four et la mesure à l'aide de la cellule capacitive n'a pas été respecté. La température de l'échantillon étant supérieure à la température moyenne au cours de l'enregistrement, la permittivité diélectrique aux plus basses fréquences a été perturbée par ce facteur supplémentaire.

Pour les plus faibles teneurs en eau ($\theta_w \cong 6\%$), la fréquence de relaxation de la permittivité diélectrique dans le cas d'un sable est donc inférieure $2,2 \cdot 10^5$ Hz et dépendante de la salinité du fluide. Pour une teneur en eau volumique égale à 22 %, la fréquence de relaxation sera comprise entre $1,7 \cdot 10^5$ et $1,9 \cdot 10^6$ Hz pour des conductivités électrolytiques inférieures ou égales à celle de l'eau du robinet. Dans le cas d'une conductivité électrolytique très élevée, $\sigma_w = 1 \text{ S}/\text{m}$, la gamme de fréquence de notre étude ne permet pas de déterminer la fréquence de relaxation qui est supérieure à 10 MHz. Dans le cas d'une teneur en eau importante ($\theta_w \cong 32\%$), la fréquence de relaxation du système est supérieure ou égale à $3 \cdot 10^5$ Hz (eau déminéralisée). Les fréquences de relaxation sont donc toujours croissantes avec la teneur en eau.

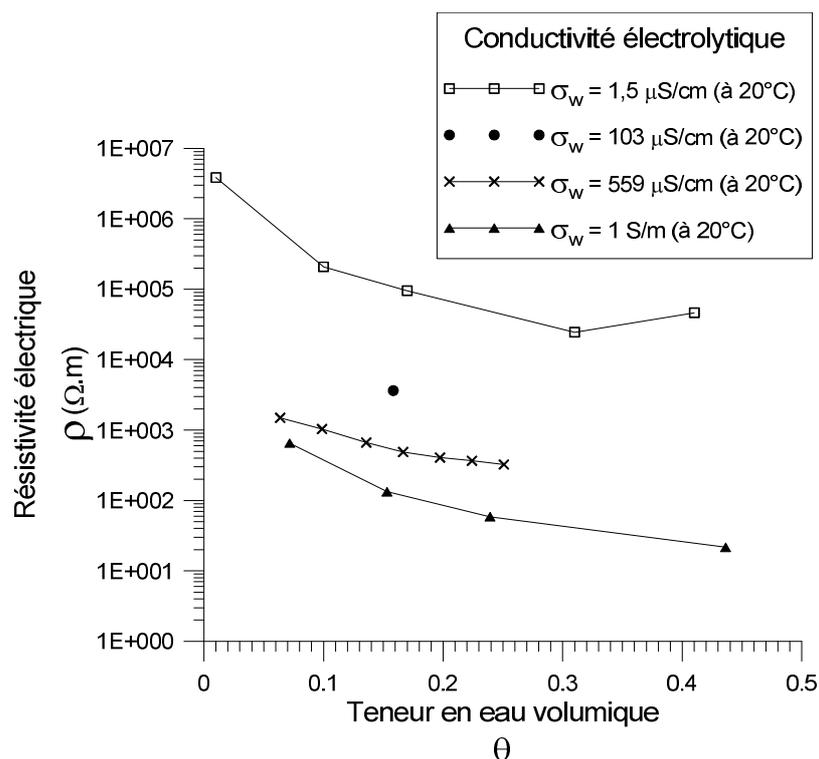


Figure II-24 : Variations de résistivité électrique DC en fonction de la teneur en eau volumique pour quatre échantillons possédant des électrolytes de conductivité électrique différente. Les résistivités ont été toutes mesurées avec le résistivimètre RMCA-4 à l'exception de celle pour laquelle $\sigma_w = 1,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ où le PSM 1735 a été employé.

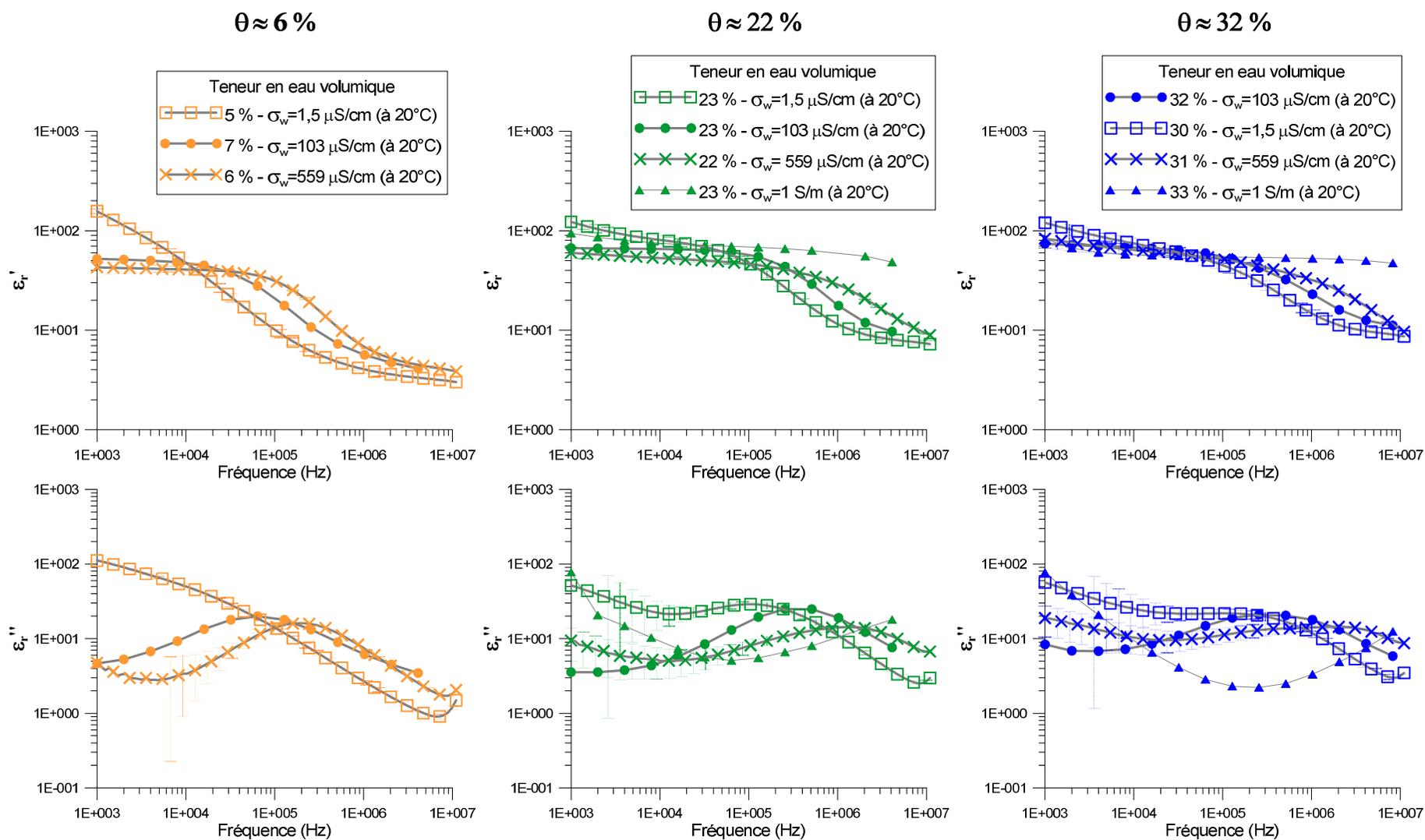


Figure II-25 : Variations des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective en fonction de la fréquence, représentée pour trois teneurs en eau volumiques différentes (6 %, 22 % et 32 %) et quatre conductivités électrolytiques : 1,5 $\mu\text{S/cm}$ (eau déminéralisée), 103 $\mu\text{S/cm}$, 559 $\mu\text{S/cm}$ (eau du robinet) et 1 S/m.

5.3. Influence de la structure de l'échantillon

Dans les mesures précédentes, les échantillons ont été déposés manuellement dans la cellule capacitive. Ce mode de dépôt ne permet pas d'assurer l'homogénéité de la structure de l'échantillon. On observe ainsi un réseau de pores possédant des tailles variables. La question de la structure du sol est d'autant plus importante que la gamme de fréquence moyenne est le siège de polarisations apparaissant aux interfaces des phases solides, liquides et gazeuses. On peut alors se demander si une répartition homogène de la matrice solide a une influence sur les mécanismes de polarisation en jeux, et donc sur la mesure de la permittivité diélectrique.

Afin d'obtenir une répartition de densité homogène du sable pour l'ensemble de l'échantillon, le distributeur de sable (semeuse) du laboratoire Géoscience et Environnement de Cergy-Pontoise a été employé (Figure II-21). Des mesures sur quatre échantillons de sable NE14 ont été réalisées. L'accès aux installations n'étant pas aisé, un cycle entier de dessiccation n'a pu être réalisé et les comparaisons portent donc uniquement sur des teneurs en eau élevées (comprises entre 31 % et 17 %).

Les résultats (Figure II-26) sont comparés avec ceux obtenus pour les mêmes teneurs en eau par dépôt manuel (Figure II-23). On retrouve une relaxation dont la fréquence caractéristique (1.10^5 Hz) est inférieure à celle mesurée précédemment (comprises entre 1 et 3 MHz). De plus, cette fréquence ne varie pas pour les trois teneurs en eau étudiées (31 %, 22 % et 17 %). Ce résultat est différent de celui observé dans le cas d'un échantillon plus hétérogène où la fréquence de relaxation varie avec la teneur en eau volumique. De plus, les valeurs de permittivité diélectrique, à la fois réelle et imaginaire, sont très proches pour ces trois teneurs en eau, surtout pour des fréquences supérieures à la fréquence de relaxation.

Une homogénéité supérieure de l'échantillon présentant une gamme de taille de pores plus resserrée a donc une influence sur la mesure de la permittivité diélectrique complexe. Les polarisations observées aux moyennes fréquences étant des polarisations d'interface, une multiplication de ces processus apparaît lorsqu'on est en présence d'interfaces de nature et de taille différentes. Une structure plus homogène de l'échantillon implique la présence de peu de types de polarisation. C'est bien ce qu'on retrouve dans les expérimentations où on observe une unique fréquence de relaxation plus faible qui est identique pour les trois teneurs en eau étudiées. Ces observations ne peuvent être généralisées pour l'ensemble des teneurs en eau. En effet, les mesures n'ont pu être menées pour l'ensemble des teneurs en eau jusqu'à atteindre l'état sec à cause de problèmes d'accessibilité aux installations. Il serait intéressant de compléter ces mesures pour conclure sur la présence ou non de ces différences au cours de la dessiccation.

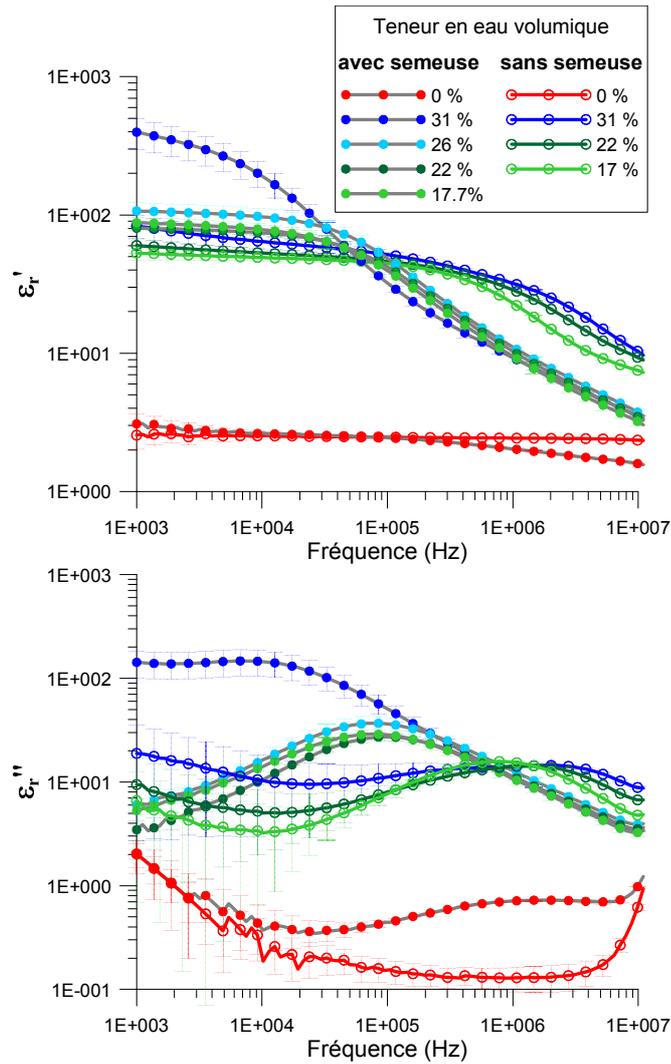


Figure II-26 : Parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique relative mesurées pour deux modes de dépôt différents de l'échantillon : dépôt manuel et dépôt à l'aide de la semeuse permettant une répartition de densité homogène sur l'ensemble de l'échantillon.

5.4. Conclusion

Dans le cas d'un sable, plusieurs conclusions peuvent être tirées des expériences menées. On observe un mécanisme de relaxation qui varie en fonction des caractéristiques de l'échantillon. La présence d'une polarisation d'interface modifie la valeur de la permittivité diélectrique réelle aux plus basses fréquences, celle-ci pouvant atteindre des valeurs de 100 pour les teneurs en eau les plus élevées. On montre que les lois couramment appliquées dans le domaine des hautes fréquences, et notamment la formule de Topp, sont valables jusqu'à 2 MHz pour une eau de conductivité moyenne égale à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. L'écart entre les mesures et la formule de Topp est inférieur à 20 % dans ce cas.

Pour des fréquences plus basses, un mécanisme de relaxation supplémentaire se met en place. Il est dépendant des différentes caractéristiques du système :

- **la teneur en eau** : la fréquence de relaxation augmente avec la teneur en eau volumique de l'échantillon,
- **la salinité du fluide** : la fréquence de relaxation augmente avec la conductivité électrique de l'eau, *i.e.* avec sa salinité,
- **la structure de l'échantillon** : dans le cas d'une densité plus homogène de l'échantillon, on observe une unique relaxation possédant une fréquence caractéristique égale à 10^5 Hz, plus faible que la fréquence de relaxation d'un échantillon possédant des densités plus hétérogènes. Ces observations mériteraient d'être poursuivies pour des teneurs en eau plus faibles. Ces variations sont marquées dans le cas d'un sable car ce matériau est plus sensible aux phénomènes d'effondrements granulaires. Il serait toutefois intéressant de renouveler l'expérience pour des échantillons contenant de l'argile.

Dans le cas d'un sol, les grains solides sont de natures variées. Les argiles possèdent des caractéristiques minéralogiques particulières (structure en feuillets) qui modifient de façon importante les paramètres électriques du milieu. Dans la suite du chapitre, nous étudierons l'influence de la teneur en argile sur les mécanismes de polarisation aux fréquences moyennes.

6. Influence de la présence d'argiles

6.1. Influence de la dessiccation des argiles sur la mesure des paramètres électriques

La structure en feuillets des argiles leur confère des propriétés particulières (Okay, 2011). Ainsi, du fait de leur surface spécifique très grande, les minéraux argileux interagissent fortement avec l'eau. En fonction de la force des liaisons entre les feuillets, le minéral peut s'hydrater ou non. La présence d'eau dans l'espace interfoliaire conduit à un gonflement des argiles.

Dans les mélanges effectués, une kaolinite (argile de type 1:1 faiblement gonflante) et une bentonite majoritairement constituée de smectite (argile de type 2:1 gonflante) sont utilisées. Lors de la dessiccation, un retrait à la fois vertical et horizontal des échantillons a été observé dans la cellule de mesure. Sur l'ensemble du cycle de dessiccation, il est égal en moyenne à :

- 1,5 mm pour une teneur en kaolinite de 20 %,
- 2,5 mm pour une teneur en kaolinite de 40 %,
- 2 mm pour une teneur en bentonite de 20 %,
- 4 mm pour une teneur en bentonite de 40 %.

Si la perte de matière se fait à la fois latéralement et verticalement, seule la variation d'épaisseur va jouer un rôle dans la mesure de la permittivité diélectrique complexe. Le même calcul (Simandoux, 1963) que dans le chapitre 2-2.1.3, où l'influence du vernis en polyuréthane sur la mesure est étudiée, peut être appliqué ici en considérant une couche d'air entre le vernis et l'échantillon.

Les valeurs de permittivité diélectrique sont donc corrigées en prenant en compte la capacité de l'air (mise en série avec le système RC de la cellule capacitive ; cf. Figure II-4). L'épaisseur de l'air prise en compte augmente lorsque la teneur en eau de l'échantillon diminue (retrait de l'argile).

6.2. Influence de la teneur en argile et du type d'argile présent

Deux types d'argile ont été employées dans les mélanges argilo-sableux artificiels : une kaolinite et une bentonite (composée principalement de smectite). A l'échelle macroscopique, ces mélanges se distinguent par leur caractère gonflant (pour la bentonite) ou non et par leur surface spécifique. La bentonite possède ainsi une surface spécifique et une capacité d'échange cationique (CEC) plus élevée, associée à des propriétés électriques marquées.

L'influence de la teneur en argile et de la minéralogie des argiles est étudiée pour des mélanges contenant 20 % et 40 % d'argile et comparée avec les mesures sur des échantillons de sable. L'étude de ces variations est réalisée à la fois en fonction de la fréquence de mesure et de la teneur en eau volumique de l'échantillon.

Mélange sable-kaolinite

Les mesures obtenues pour des échantillons de mélange argilo-sableux contenant 20 et 40 % de kaolinite sont présentées sur les figures II-27 et II-28.

Variations en fonction de la fréquence de mesure

Le comportement de la permittivité électrique complexe des mélanges argilo-sableux en fonction de la fréquence est semblable à celui précédemment observé pour les échantillons de sable. En effet, un phénomène de relaxation est présent pour chaque teneur en eau. La fréquence de relaxation mesurée augmente toujours avec la teneur en eau de l'échantillon, mais elle est très sensiblement décalée vers les plus basses fréquences lorsque la teneur en kaolinite augmente. Si on compare les résultats obtenus pour des échantillons possédant des teneurs en kaolinite différente mais une même teneur en eau, par exemple 16 %, la fréquence de relaxation est égale à :

- $1 \cdot 10^6$ Hz pour un échantillon de sable,
- $6 \cdot 10^4$ Hz pour un mélange composé de 20 % de kaolinite,
- $5 \cdot 10^3$ Hz pour un mélange composé de 40 % de kaolinite.

Une augmentation de la teneur en kaolinite implique donc une diminution de la fréquence de relaxation de l'échantillon.

De plus la partie imaginaire de la permittivité diélectrique relative montre une dispersion en fréquence plus importante autour de la fréquence centrale du mécanisme de polarisation.

Pour les teneurs en eau les plus basses, les valeurs de permittivité diélectrique réelle sont d'autant plus élevées que la teneur en kaolinite est importante. Dans les cas d'un échantillon sec, la permittivité diélectrique réelle est égale à 3,5 pour les échantillons de sable, 7 pour les échantillons contenant 20 % de kaolinite et 10 pour les échantillons contenant 40 % de kaolinite.

Aux plus basses fréquences, la permittivité imaginaire varie pour l'ensemble des échantillons contenant de la kaolinite. Un ou plusieurs nouveaux mécanismes de relaxation possédant une fréquence caractéristique inférieure à 10 kHz existent donc.

Variations en fonction de la teneur en eau volumique

Les valeurs de permittivité diélectrique réelle des mélanges sable-kaolinite, représentés en fonction de la teneur en eau volumique, sont comparées aux valeurs de permittivité diélectrique calculées à l'aide du polynôme de Topp. Contrairement aux mesures sur des échantillons de sable, les valeurs mesurées sont toujours supérieures aux valeurs calculées pour l'ensemble des fréquences.

Ces résultats indiquent la présence d'une polarisation d'interface dès 10 MHz, liée à la présence de minéraux argileux dans l'échantillon. De plus, on a observé que la dispersion de la partie imaginaire de la permittivité diélectrique est plus importante en présence d'argile. Ces résultats montrent que la présence d'argile dans les échantillons implique des mécanismes de relaxation multiples dont les fréquences de relaxation s'étalent sur l'ensemble de la gamme de fréquence étudié.

Conclusion

En présence de kaolinite, plusieurs observations différentes peuvent être tirées des mesures de permittivité diélectrique complexe :

- lorsque la teneur en kaolinite augmente, pour une même teneur en eau, la fréquence de relaxation centrale observée diminue
- la dispersion des fréquences autour d'une fréquence de relaxation centrale est plus importante en présence d'argile. Cette observation peut être reliée à l'apparition de plusieurs mécanismes de polarisation différents dont les fréquences de relaxation sont proches
- les valeurs de permittivité diélectrique sont supérieures à celles calculées à l'aide du polynôme de Topp pour l'ensemble des fréquences de mesure, on est donc en présence de mécanismes de polarisation d'interface dès 10 MHz.

Les mêmes expérimentations ont été menées pour une argile gonflante : la bentonite.

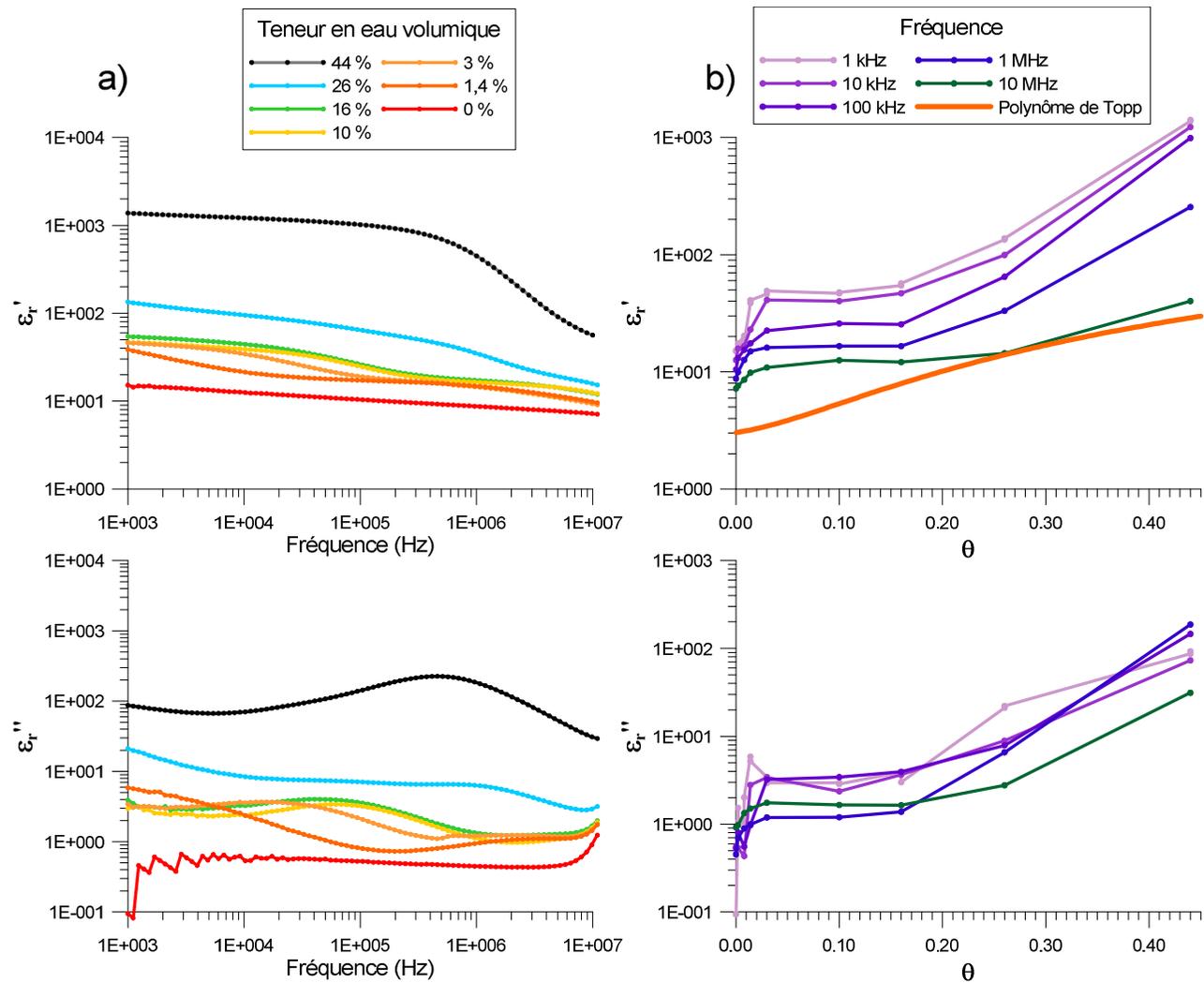


Figure II-27 : Variations des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective relative en fonction de : a) la fréquence de mesure et de b) la teneur en eau volumique θ pour un échantillon composé de **20 % de kaolinite**.

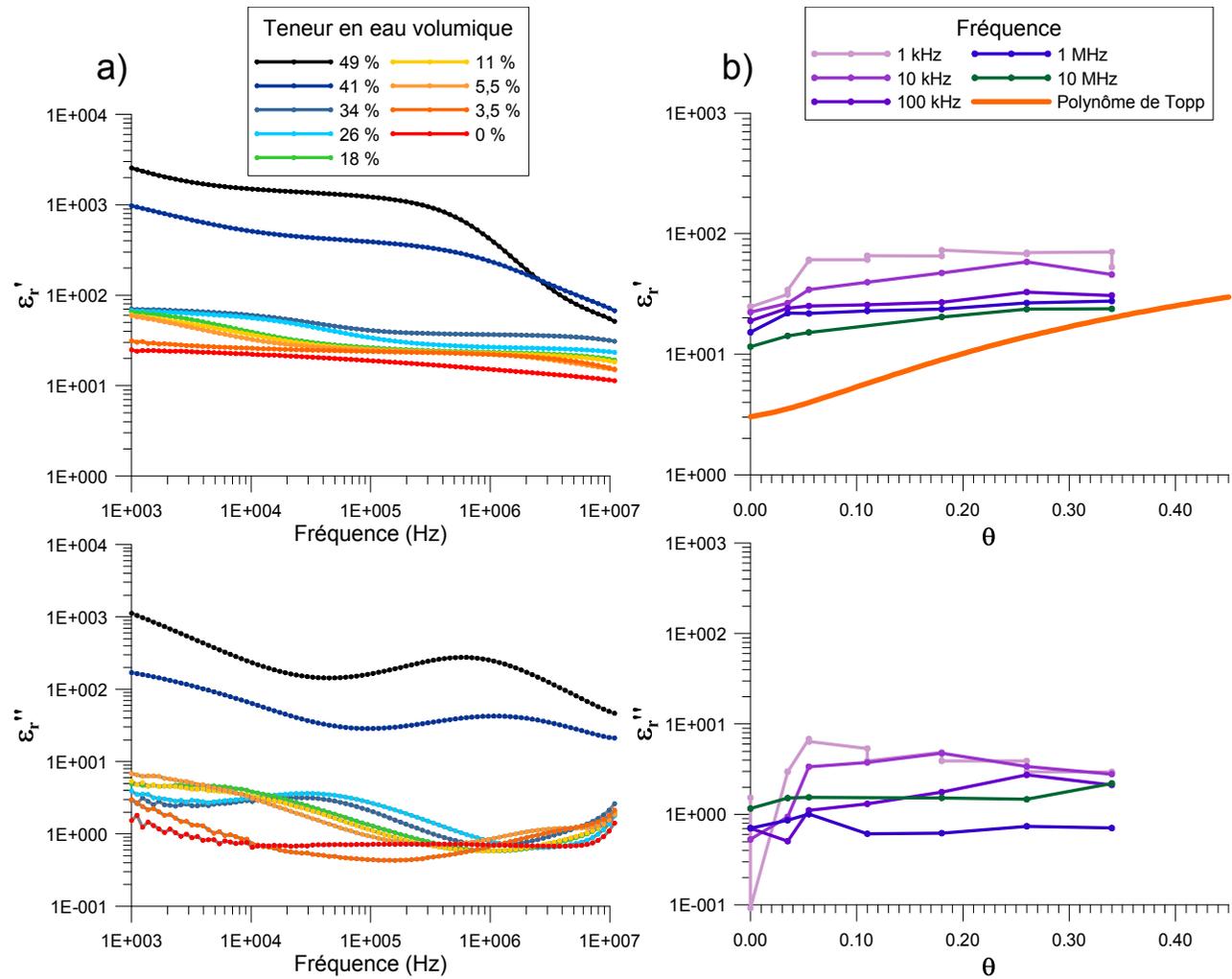


Figure II-28 : Variations des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective relative en fonction de : a) la fréquence de mesure et de b) la teneur en eau volumique θ pour un échantillon composé de **40 % de kaolinite**.

Mélange sable-bentonite

Les mesures obtenues pour des échantillons de mélange argilo-sableux contenant 20 et 40 % de bentonite sont présentées sur les figures II-29 et II-30.

Contrairement à la kaolinite, la bentonite est une argile gonflante. Cette caractéristique implique une capacité de rétention d'eau très importante qui explique les teneurs en eau volumique très élevées mesurées lors du cycle de dessiccation : elles atteignent 75 % pour les mélanges contenant 40 % de bentonite.

Variations en fonction de la fréquence de mesure

Pour l'ensemble des échantillons, on observe toujours une augmentation de la permittivité diélectrique réelle lorsque la fréquence diminue, ceci traduit la présence de mécanismes de polarisation d'interface. Cette augmentation est plus importante pour des fréquences inférieures à 10 kHz et corrélée avec une augmentation de la partie imaginaire où on ne distingue plus de maximum local. La fréquence de relaxation caractéristique de la polarisation observée n'apparaît pas dans la gamme de fréquences étudiée et est inférieure à 1 kHz.

Pour les teneurs en eau les plus faibles, une autre relaxation, d'amplitude faible, apparaît pour des fréquences comprises entre 100 kHz et 1 MHz :

- dans le cas d'un échantillon contenant 20 % de bentonite, cette polarisation apparaît pour des teneurs en eau volumiques inférieures à 21 % et est caractérisée par des fréquences de relaxation comprises entre $6 \cdot 10^5$ et $2 \cdot 10^6$ Hz
- dans le cas d'un échantillon contenant 40 % de bentonite, cette polarisation apparaît pour des teneurs en eau volumiques inférieures à 43 % et est caractérisée par des fréquences de relaxation comprises entre $2 \cdot 10^5$ et $7 \cdot 10^5$ Hz.

Ce deuxième mécanisme de polarisation d'interface est caractérisé par des fréquences de relaxation d'autant plus faibles que la teneur en bentonite augmente.

Compte-tenu de ces observations, on peut conclure que le caractère dispersif de la permittivité diélectrique est accentué dans le cas de mélange sablo-argileux utilisant une bentonite.

Variations en fonction de la teneur en eau volumique

Les valeurs de permittivité diélectrique réelle des mélanges sable-bentonite, représentés en fonction de la teneur en eau volumique, sont comparées aux valeurs de permittivité diélectrique calculées à l'aide du polynôme de Topp. Contrairement aux mesures sur des échantillons de sable, mais de la même manière que les échantillons contenant de la kaolinite, les valeurs mesurées sont supérieures aux valeurs calculées pour l'ensemble des fréquences.

Si les valeurs semblent s'approcher de la courbe de Topp dans le cas des échantillons contenant 40 % de bentonite, pour une fréquence de 10 MHz, il faut prendre en compte les teneurs en eau très élevées qui ont été mesurées, la courbe de Topp n'étant généralement pas employée pour des teneurs en eau aussi importante.

Comme dans le cas des mélanges contenant de la kaolinite, ces résultats semblent démontrer la présence de mécanismes de relaxation multiples, liés à des phénomènes de polarisation d'interface, dont les fréquences de relaxation s'étalent sur l'ensemble de la gamme de fréquence étudiée.

Conclusion

Dans le cas d'échantillons contenant de la bentonite, les mesures de permittivité diélectrique complexe permettent de tirer plusieurs conclusions sur les mécanismes de polarisation en présence :

- la valeur de la fréquence de relaxation centrale diminue :
 - lorsque la teneur en argile augmente
 - d'autant plus pour des échantillons contenant de la bentonite, comparativement à des mélanges sable/kaolinite
- la permittivité diélectrique augmente sur l'ensemble de la gamme de fréquence et son caractère dispersif est accentué en présence de bentonite
- les valeurs de permittivité diélectrique sont supérieures à celles calculées à l'aide du polynôme de Topp pour l'ensemble des fréquences de mesure, on est donc en présence de mécanismes de polarisation d'interface dès 10 MHz.

L'influence de l'argile dans la mesure de la permittivité diélectrique complexe est donc importante. Une augmentation de la teneur en argile induit une diminution de la fréquence de relaxation associée aux mécanismes de polarisation d'interface et une augmentation des valeurs de permittivité diélectrique.

La minéralogie des argiles employées influe également sur les mesures de permittivité diélectrique complexe en renforçant son caractère dispersif sur l'ensemble de la gamme de fréquences. Les valeurs de permittivité diélectriques sont supérieures à celles calculées à l'aide du polynôme de Topp pour l'ensemble des fréquences de mesures, on est bien en présence d'un terme additionnel dans la mesure de la permittivité diélectrique, lié à la présence de polarisation d'interface que l'on va tenter de caractériser à partir de la conductivité électrique.

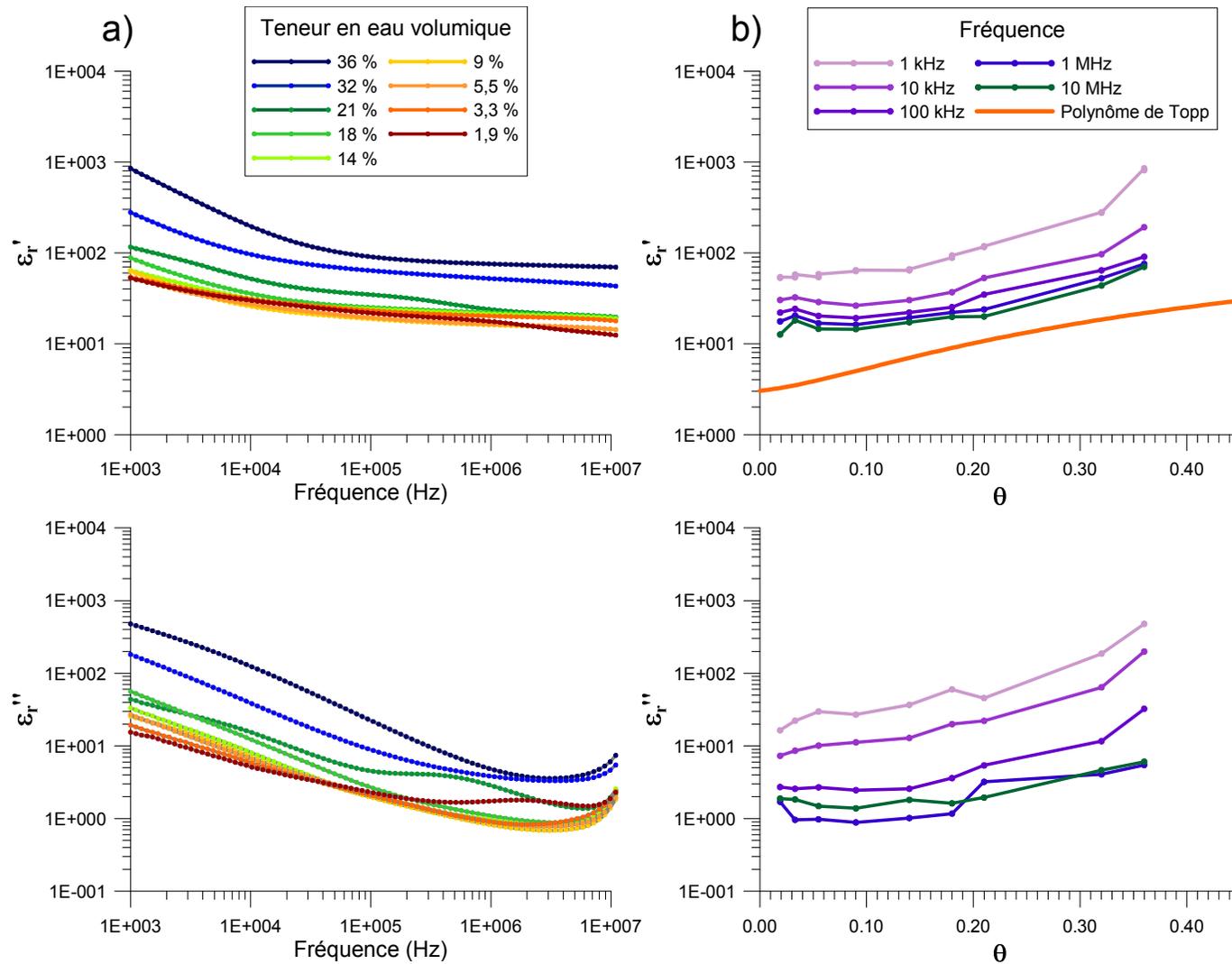


Figure II-29 : Variations des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective relative en fonction de : a) la fréquence de mesure et de b) la teneur en eau volumique θ pour un échantillon composé de **20 % de bentonite**.

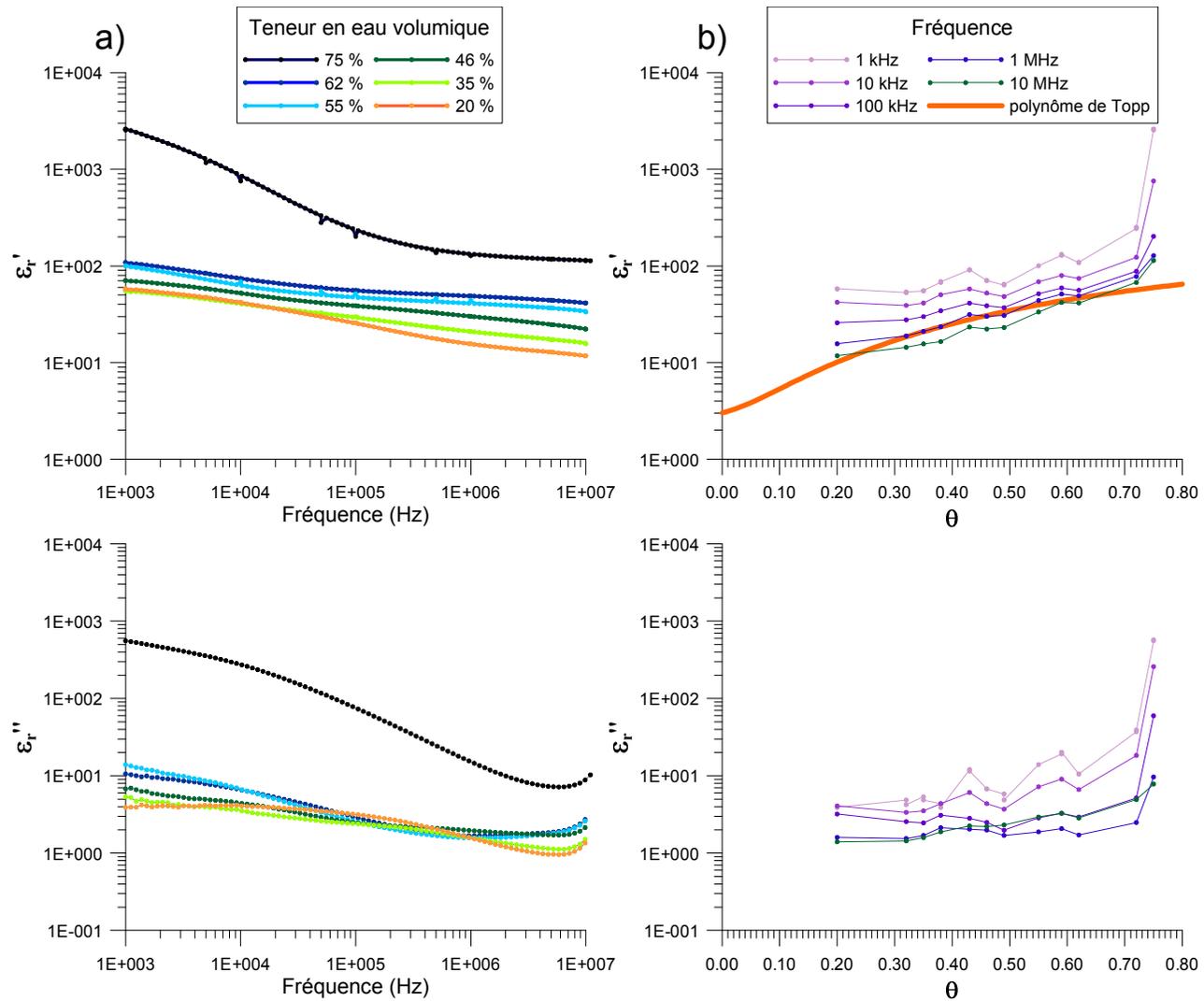


Figure II-30 : Variations des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective relative en fonction de : a) la fréquence de mesure et de b) la teneur en eau volumique θ pour un échantillon composé de 40 % de bentonite.

7. Mesures sur des sols naturels du site de l'INRA d'Estrée-Mons

Des mesures ont été réalisées sur des échantillons de sol naturels provenant des parcelles expérimentales P16 (Figure II-31) et P8 (Figure II-32) du site de l'INRA d'Estrée-Mons. Ces parcelles sont adjacentes de celles où ont été réalisés les essais sur le terrain (cf. chapitre 3-5.3).

Les sols étudiés sont des luvisols limoneux contenant 20% en moyenne d'argile granulométrique :

- 19,1 % pour les sols de la parcelle P16
- 21,9 % pour les sols de la parcelle P8

Peu de données existent sur la minéralogie de ces argiles. On peut toutefois citer le rapport de Martin (2010) qui rend compte de mesure de diffractométrie des rayons X. Ces analyses ont montré la présence des mêmes minéraux argileux dans l'ensemble des échantillons de sols collectés, avec, par teneur décroissante : chlorite et illite, kaolinite, smectite et interstratifiés illite-smectite. La fraction argileuse du sol de l'INRA d'Estrée-Mons est donc composée d'un mélange d'argiles gonflantes et non gonflantes. Nous ne disposons cependant pas de quantification des teneurs de ces différentes argiles et ne pourrions donc pas pousser l'interprétation plus loin. Le but de notre étude n'étant pas de comprendre les comportements microscopiques associés aux variations de propriétés électriques, mais de caractériser leur évolution macroscopique, on peut néanmoins faire quelques observations sur les mesures de permittivité diélectrique complexe.

Les mesures ont été réalisées sur un sol naturel préalablement séché à l'étuve à 105° pendant 24 heures, tamisé à 2 mm pour ne conserver que la fraction fine, puis humidifié suivant le protocole établi pour les échantillons artificiels.

Plusieurs observations peuvent être notées pour les mesures représentées sur les figures II-31 et II-32 :

- comme précédemment, la partie réelle de la permittivité diélectrique relative augmente lorsque la teneur en eau augmente, et d'autant plus que la fréquence appliquée est faible
- plusieurs mécanismes de polarisation, associés à des fréquences de relaxation différentes, sont observés. Le premier apparaît à des fréquences proches de 10 MHz et le second, d'amplitude moins élevée, possède une fréquence de relaxation inférieure à 1 kHz.
- ces mécanismes de polarisation dépendent de la teneur en eau de l'échantillon : la fréquence de relaxation diminue lorsque la teneur en eau baisse.
- la fréquence de relaxation la plus élevée ne peut pas être expliquée par les observations précédemment établies pour les mélanges artificiels. En effet, nous avons observé un décalage vers des fréquences plus faibles lorsque la teneur en argile augmentait.

- A l'existence de ce premier mécanisme de polarisation pour des fréquences élevées correspond une partie réelle de la permittivité diélectrique élevée pour les fréquences inférieures :

- comprises entre 60 et 150 pour la parcelle P16
- comprises entre 80 et 200 pour la parcelle P8

Les valeurs plus élevées observées pour la partie réelle de la permittivité diélectrique pour la parcelle P8 sont conformes à une teneur en argile légèrement plus importante (21,9 % pour P8 et 19,1 % pour P16).

- pour l'ensemble de la gamme de fréquence et pour l'ensemble des teneurs en eau volumique à l'exception de l'état sec, les permittivités diélectriques réelles sont supérieures à celles calculées avec la loi de Topp. Comme précédemment, nous interprétons ce résultat par la présence d'une polarisation d'interface pour toute la gamme des fréquences inférieures à 10 MHz.

Comme précédemment, il serait intéressant de séparer la part de la permittivité diélectrique associée à ces polarisations d'interface dites de Maxwell-Wagner de celle liée à la polarisation dipolaire. C'est l'objet de la section suivante où nous proposons une relation reliant ces deux quantités en utilisant les mesures de conductivité électrique.

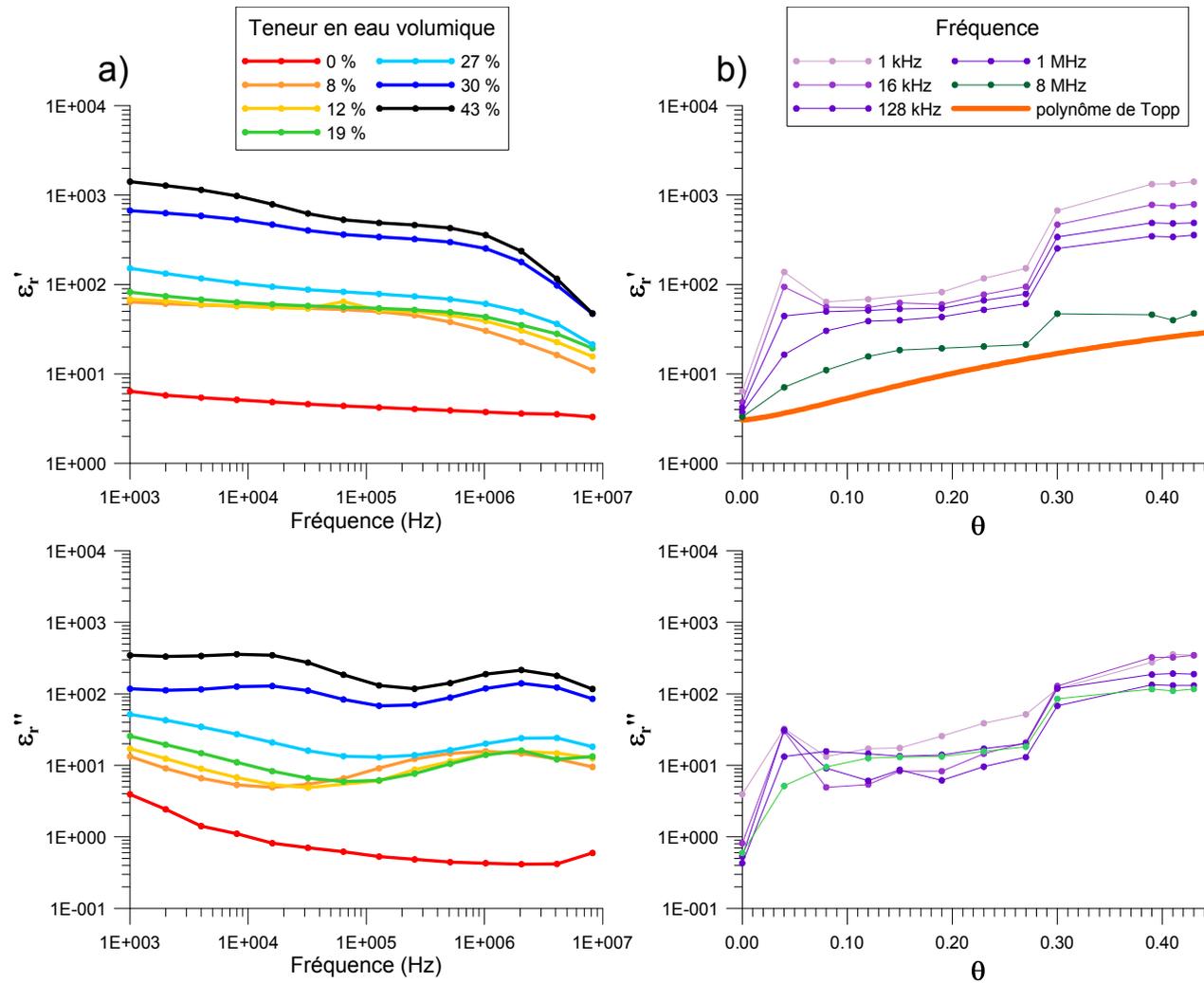


Figure II-31 : Variations des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective relative en fonction de : a) la fréquence de mesure et de b) la teneur en eau volumique θ pour un échantillon de sol naturel remanié provenant de la parcelle P16 de l'INRA d'Estrée-Mons.

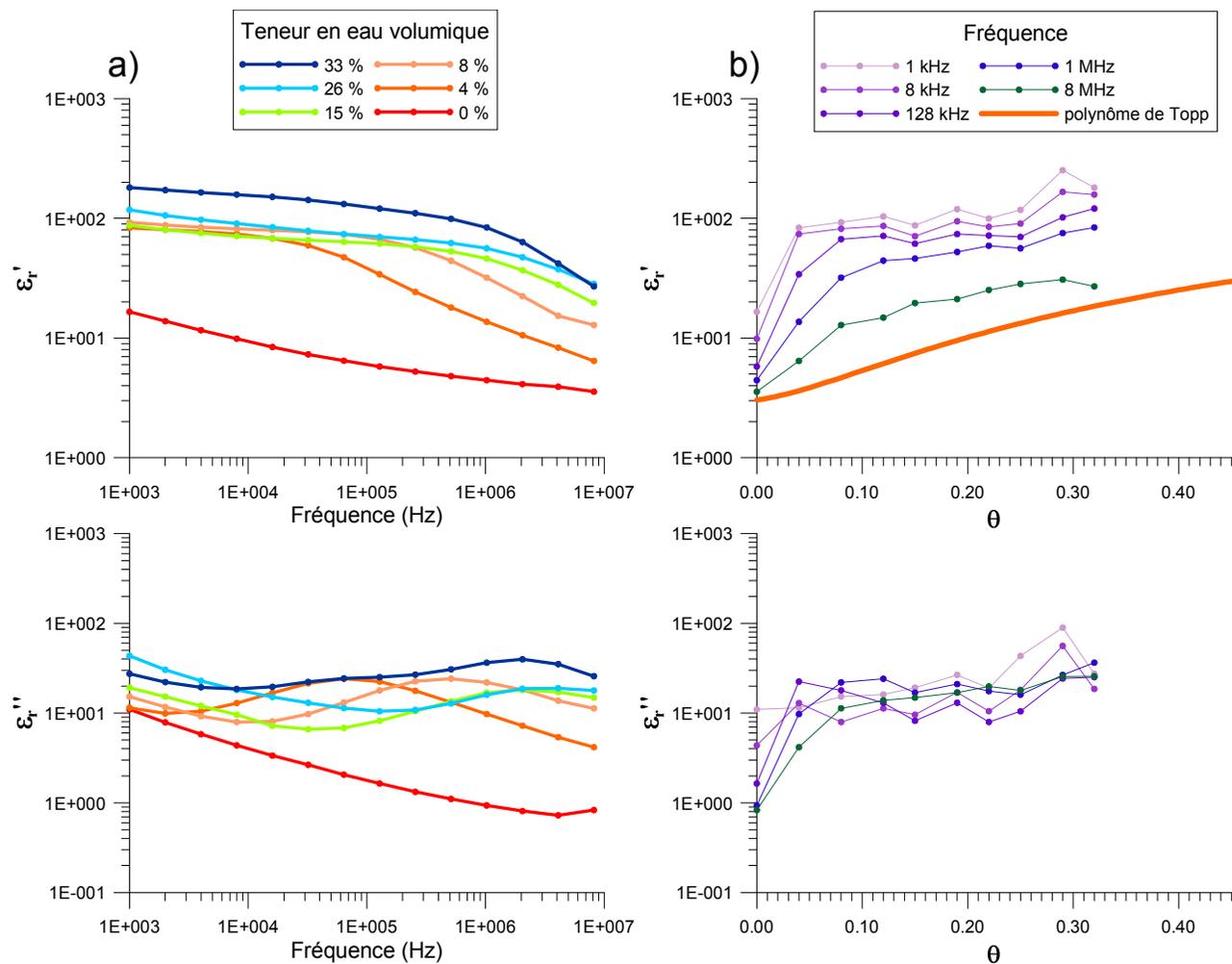


Figure II-32 : Variations des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective relative en fonction de : a) la fréquence de mesure et de b) la teneur en eau volumique θ pour un échantillon de sol naturel remanié provenant de la **parcelle P8 de l'INRA d'Estrée-Mons**.

Des mesures ayant été réalisées *in situ* sur des parcelles du même site expérimental, nous cherchons à déterminer une expression empirique reliant la partie réelle de la permittivité diélectrique à la teneur en eau volumique en fonction de la fréquence de mesure. Cette expression va nous permettre de tracer une carte de teneur en eau à partir des mesures effectuées à l'aide du prototype de mesure (cf. chapitre 3-5.3). Les données ayant été acquises à 1,56 MHz, nous nous proposons de déterminer cette relation pour des fréquences égales à 1,024 et 2,048 MHz (Figure II-33).

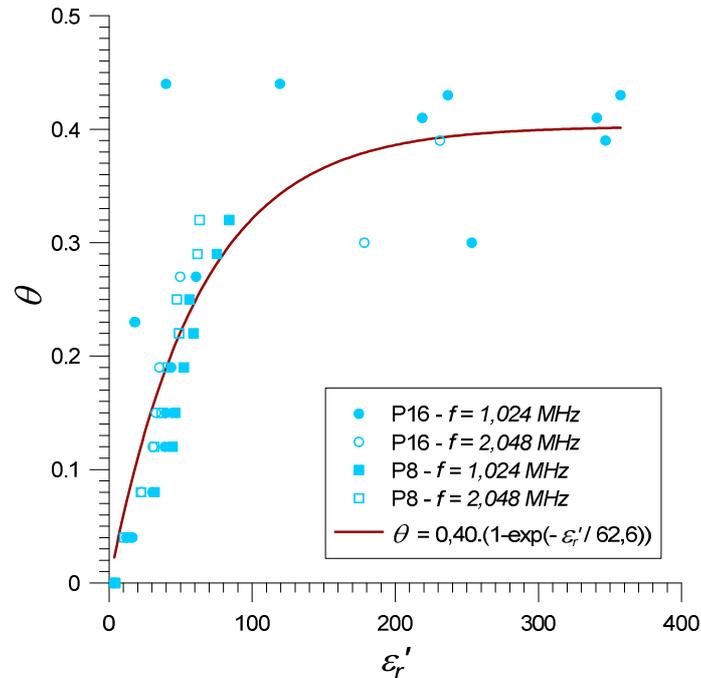


Figure II-33 : Représentation de la teneur en eau volumique en fonction de la partie réelle de la permittivité diélectrique relative, pour des fréquences de mesure égales à 1,024 MHz et 2,048 MHz, pour les échantillons de sol provenant des parcelles P8 et P16 de l'INRA d'Estrée-Mons.

La variation de la teneur en eau volumique θ en fonction de la permittivité diélectrique relative effective réelle ε_r' peut être approximée par l'expression :

$$\theta = 0,40(1 - e^{-\varepsilon_r'/62,6}) \quad (\text{II-22})$$

où la correspondance entre le modèle et les données (coefficient de détermination R^2) est égal à 0,779 pour 47 observations.

Cette expression sera par la suite appliquée aux données acquises à l'aide du prototype de mesure au chapitre 3-5.3.

Cette relation est valable dans le cas particulier des sols de Mons. Etant donné qu'il existe des relations qui relient la permittivité diélectrique à haute fréquence et la teneur en eau volumique (polynôme de Topp, loi de CRIM,...), il est intéressant de se poser la question de la généralisation d'une relation entre la permittivité diélectrique effective et la teneur en eau volumique aux fréquences moyennes, et notamment à la fréquence de mesure choisie pour le prototype de mesure

in situ ($f = 1,56$ MHz). Dans la section suivante, on se propose d'identifier les parts respectives de la permittivité diélectrique associée aux polarisations d'interface dites de Maxwell-Wagner et à la polarisation dipolaire en faisant intervenir la valeur de la conductivité électrique DC.

8. Modèle empirique permettant de restituer la permittivité diélectrique dipolaire

Pour toute la gamme de fréquence en présence d'argile, et pour les fréquences inférieures à 2 MHz pour les sols sans argile, une permittivité liée à la polarisation d'interface amplifie la permittivité dipolaire (liée à la rotation de la molécule d'eau). Dans l'objectif de déterminer la teneur en eau, il apparaît donc pertinent de chercher à dissocier la part de la permittivité dipolaire de celle de la permittivité correspondant à une polarisation d'interface, la permittivité dipolaire ainsi retrouvée pouvant alors permettre de déterminer la teneur en eau à l'aide des lois de comportement (de type Topp) bien éprouvées dans le domaine des hautes fréquences.

Si une telle démarche peut s'appliquer à l'ensemble de la gamme des fréquences moyennes, nous limiterons aux fréquences comprises entre 1,024 et 2,048 MHz afin d'appliquer les relations obtenues aux mesures *in situ* effectuées à l'aide du dispositif EM développé au cours de ce travail qui fonctionne à 1,56 MHz.

Les données acquises en laboratoire permettent de connaître :

- la permittivité diélectrique relative réelle effective totale de l'échantillon $\epsilon_{r,totale}$
- la conductivité de l'échantillon σ_{DC}
- la teneur en eau volumique de l'échantillon θ

On cherche dans un premier temps à déterminer les relations existant entre la permittivité diélectrique relative totale, $\epsilon_{r,totale}$, et la permittivité diélectrique relative HF, $\epsilon_{r,dipolaire}$. La valeur de cette dernière est calculée à partir des teneurs en eau volumiques mesurées, suivant la relation de Topp de l'équation (I-45) :

$$\epsilon_{r,dipolaire} = 3,03 + 9,30.\theta + 146,00.\theta^2 - 76,70.\theta^3$$

Les données, représentées sur la figure II-34, peuvent être approchées avec un coefficient de détermination supérieur à 0,7 pour l'ensemble des échantillons par une fonction affine. Les meilleures correspondances sont obtenues pour l'échantillon de sable qui possède un coefficient de détermination égal à 0,91, pour 59 données étudiées. Les échantillons de sols de Mons (P8 et P16) ainsi que les mélanges argilo-sableux possédant 20% d'argile ont une correspondance données/modèle supérieure à 0,85, pour une moyenne de 30 observations par type d'échantillons. Ce sont les échantillons contenant 40% d'argile qui possèdent les coefficients de détermination les plus faibles, ceux-ci étant égaux à 0,72 pour les mélanges sable / kaolinite (pour 62 observations) et 0,75 pour les mélanges sable / bentonite (pour 89 observations).

L'ensemble de ces coefficients de détermination restent acceptables et permettent de conclure que la permittivité diélectrique relative HF, $\epsilon_{r,dipolaire}$, pourra être déterminée à partir de la permittivité diélectrique relative totale $\epsilon_{r,totale}$ mesurée à plusieurs MHz en lui adjoignant un coefficient :

$$\epsilon_{r,totale} = \epsilon_{r,dipolaire} \cdot C \text{ où } C \text{ est une constante}$$

Comme on peut l'observer sur la figure II-34, C est une constante qui est fonction du type d'échantillons étudié. Il est intéressant de voir si cette constante C peut être déterminée à partir des paramètres du milieu.

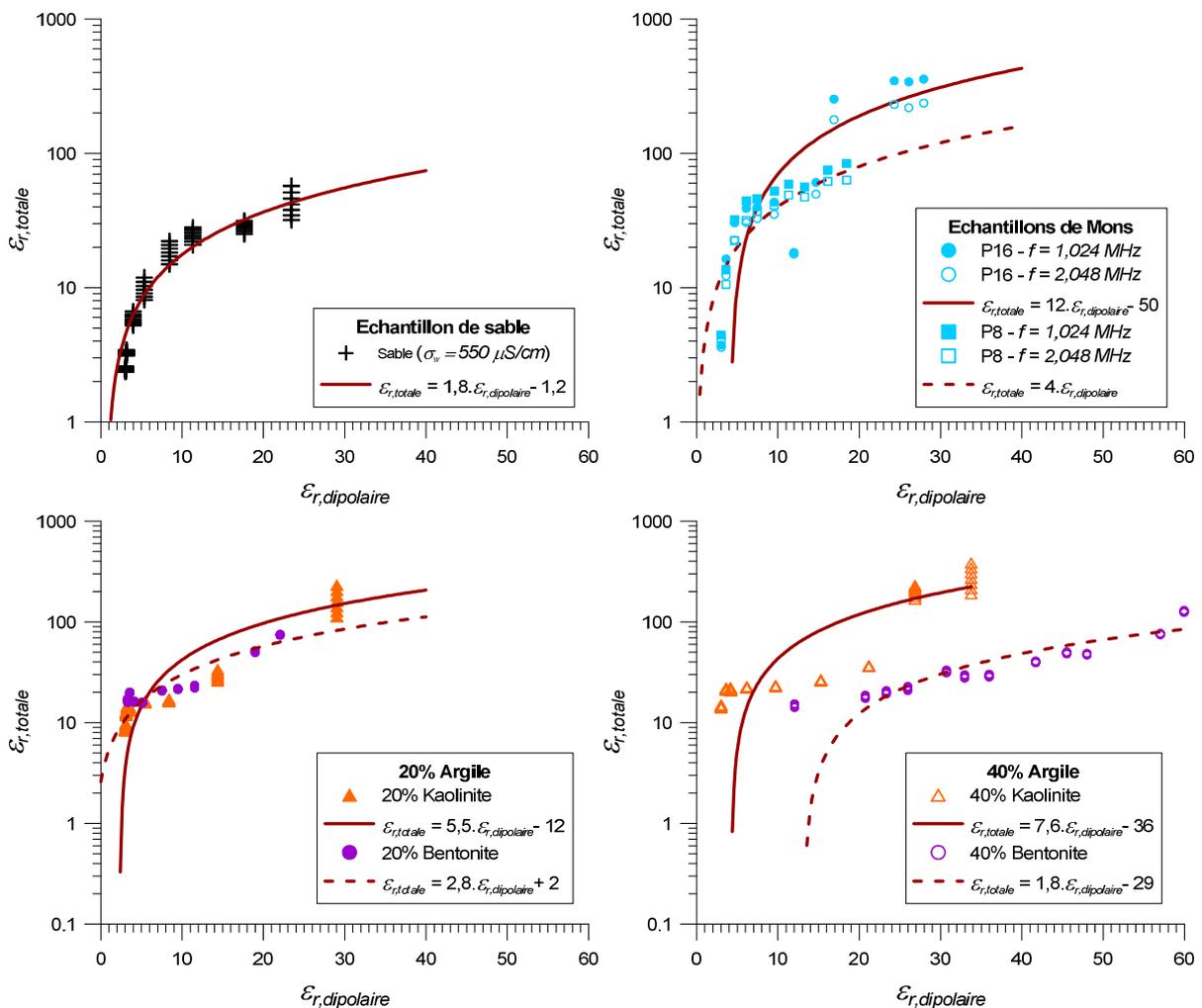


Figure II-34 : Représentation de la permittivité diélectrique relative totale $\epsilon_{r,totale}$ mesurée pour des fréquences comprises entre 1 et 2 MHz, en fonction de la permittivité diélectrique relative HF, $\epsilon_{r,dipolaire}$ (déterminée à partir de la relation de Topp), pour différents types d'échantillons.

Cette conclusion se rapproche des observations qui ont pu être réalisées dans les modèles théoriques développés pour rendre compte de la polarisation de Maxwell-Wagner (Tabbagh *et al.*, 2009). La permittivité liée à la polarisation de Maxwell-Wagner dépend ainsi des ions présents et de leur aptitude à se déplacer comme de la géométrie des interfaces (forme des pores et des plaquettes). Dans ces modèles, la permittivité HF (dipolaire) intervient comme un facteur multiplicatif.

Ce sont précisément ces paramètres d'état qui permettent de distinguer les différents types d'échantillons étudiés (variation de la concentration et du type d'argile). Etant donné que la conductivité électrique est gouvernée par ces mêmes paramètres, il est logique de rechercher une expression de la constante C qui soit fonction de la conductivité électrique :

$$\epsilon_{r,totale} = \epsilon_{r,dipolaire} \cdot f(\sigma_{DC}) \quad (II-23)$$

Les conductivités électriques des échantillons ont été mesurées à l'aide du quadripôle électrique carré pour chaque teneur en eau (Figures II-35, II-36 et II-37). Etant donnée la variété des échantillons étudiés, les valeurs de conductivité électrique s'étirent sur un peu plus de deux décades : $\sigma_{DC} \in [10^{-1}; 5 \cdot 10^2] \text{ mS/m}$.

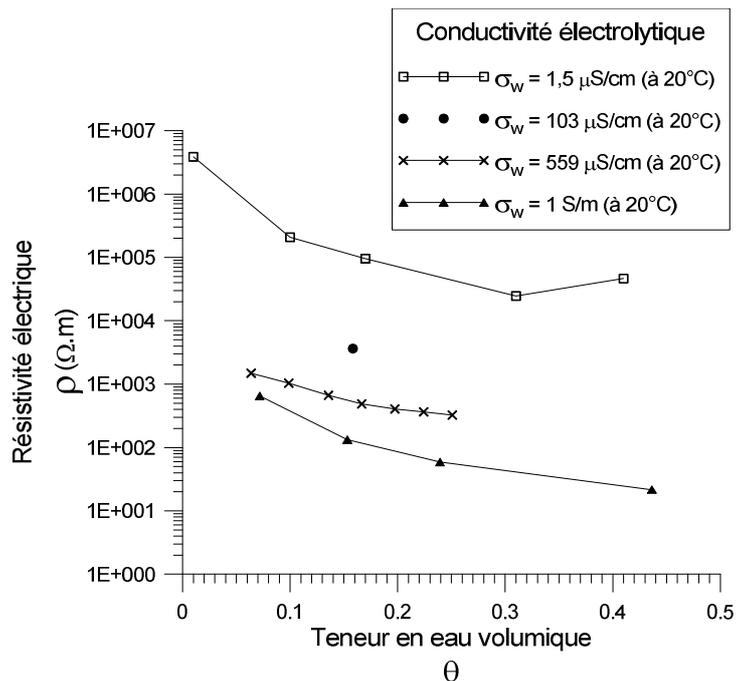


Figure II-35 : Variations de la résistivité électrique DC en fonction de la teneur en eau volumique pour quatre échantillons possédant des électrolytes de conductivité électrique différente. Les résistivités ont été toutes mesurées avec le résistivimètre RMCA-4 à l'exception de celle pour laquelle $\sigma_w = 1,5 \mu S/cm$ où le PSM 1735 a été employé.

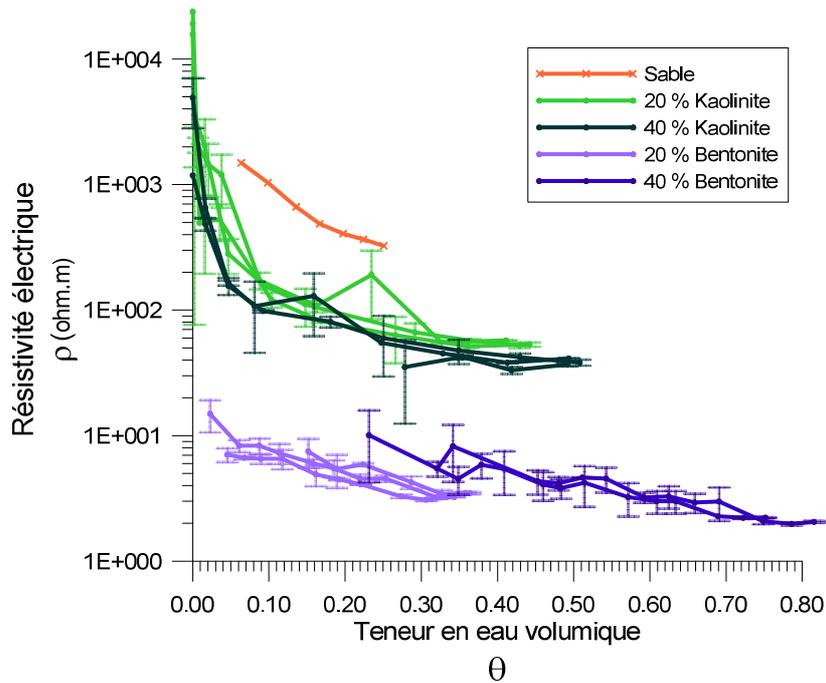


Figure II-36 : Variations de la résistivité électrique basse fréquence ($f = 1 \text{ kHz}$) en fonction de la teneur en eau volumique pour des mélanges argilo-sableux étudiés, mesurées à l'aide du PSM1735. Les barres d'erreur, correspondant à 4 positions différentes du quadripôle électrique, donnent une indication sur l'hétérogénéité de l'échantillon.

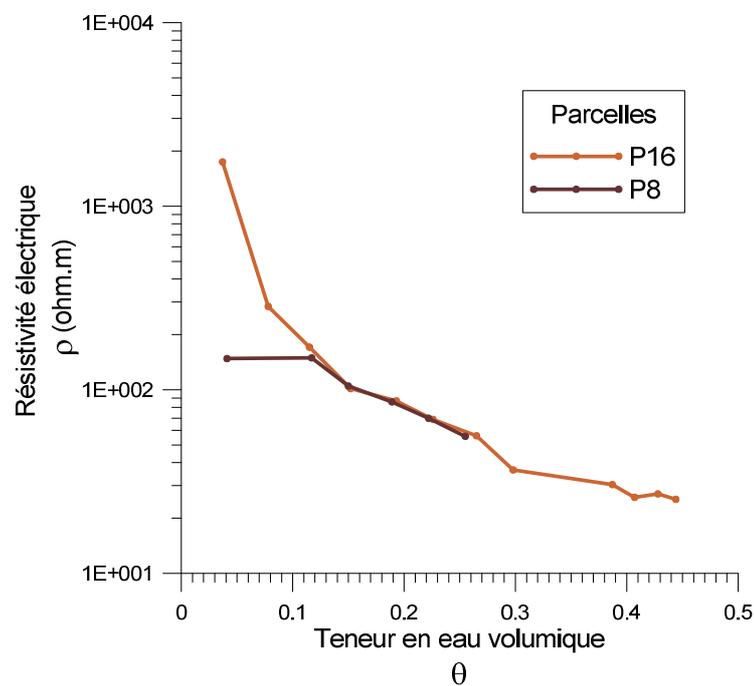


Figure II-37 : Variations de la résistivité électrique DC en fonction de la teneur en eau volumique pour des échantillons de sols provenant des parcelles P16 et P8 du site de l'INRA d'Estrée-Mons, mesurée à l'aide du RMCA-4.

Sur la figure II-38, on a représenté le rapport des permittivités diélectriques relatives totales $\epsilon_{r,totale}$ et HF $\epsilon_{r,dipolaire}$ en fonction de la conductivité électrique σ_{DC} pour les différents échantillons étudiés. Les données sont relativement dispersées et nous n'avons pu faire apparaître une loi commune à l'ensemble des échantillons afin de déterminer la constante de multiplication C en fonction de la conductivité électrique.

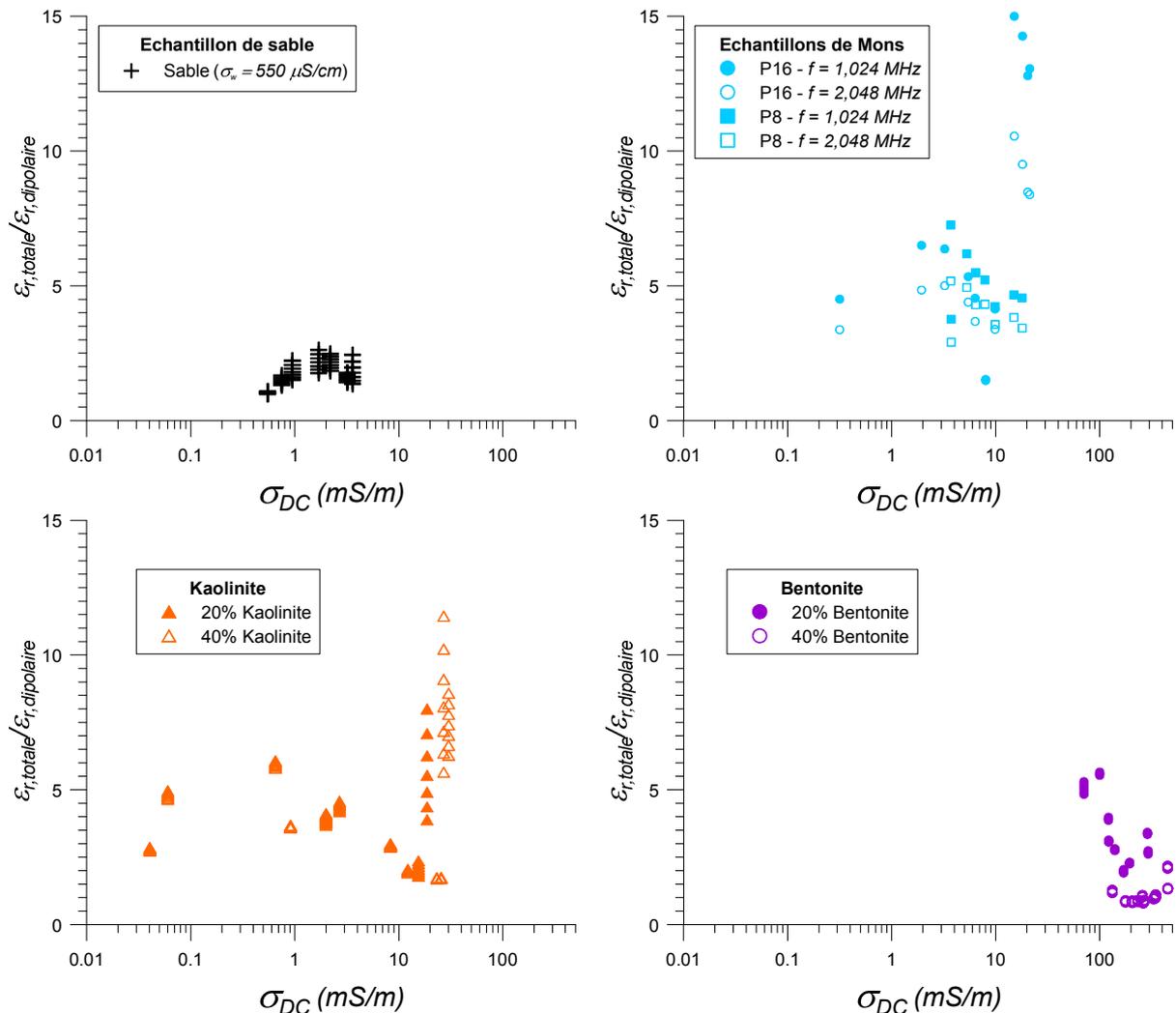


Figure II-38 : Représentation du rapport des permittivités diélectriques relatives totales $\epsilon_{r,totale}$ et HF $\epsilon_{r,dipolaire}$, pour des fréquences de mesure comprises entre 1 et 2 MHz, en fonction de la conductivité électrique DC σ_{DC} mesurée à l'aide du quadripôle électrique pour différents types d'échantillons.

En l'état actuel des recherches, nous n'avons donc pu déterminer une loi générale permettant de retrouver la teneur en eau d'un échantillon de sol à partir des mesures de la permittivité diélectrique réelle totale et de la conductivité électrique. La démarche devra être réitérée pour chaque nature de sol différente. Dans ce manuscrit, nous nous contenterons d'utiliser le modèle empirique établi à l'équation (II-22) afin de retrouver la teneur en eau *in situ* dans le cas des limons argileux de l'INRA d'Estrée-Mons au chapitre 3.

9. Conclusions

L'étude de la permittivité diélectrique et de la conductivité en laboratoire a permis de tirer des enseignements intéressants. Pour l'ensemble des échantillons, on observe l'apparition d'un mécanisme de relaxation dans le domaine des fréquences moyennes étudiées (1 kHz – 10 MHz), dont l'amplitude, la fréquence de relaxation centrale et la dispersion sont fonction des paramètres d'état de l'échantillon.

Ainsi, dans le cas d'un sable, la permittivité diélectrique relative réelle peut atteindre une valeur de 100 aux plus basses fréquences. Aux plus hautes fréquences (supérieures à 2 MHz), les lois de comportement établies en HF s'appliquent et la polarisation est uniquement liée à la rotation des molécules d'eau. La fréquence de relaxation liée à la mise en place d'un mécanisme de polarisation d'interface augmente lorsque la teneur en eau et/ou la salinité de l'électrolyte augmente. La structure de l'échantillon influence également les mesures puisque dans le cas d'un échantillon de densité homogène, la dispersion du mécanisme de polarisation est moins importante et on n'observe plus la mise en place d'un deuxième mécanisme de relaxation pour des fréquences proches de 1 kHz.

Pour les mélanges argileux, distinguer la part de la permittivité liée à la polarisation d'interface est encore plus complexe. En effet, la minéralogie des argiles présente des caractéristiques géométriques spécifiques. Ainsi, les valeurs de permittivité diélectrique relative ne correspondent plus aux lois de comportement HF sur l'ensemble de la gamme de fréquence et une polarisation d'interface γ est observée. De plus, la fréquence de relaxation obtenue dans la gamme de fréquence étudiée est dépendante de la teneur en argile et de sa minéralogie. Le cas d'un sol possédant une composition plus complexe induit un comportement plus complexe de la permittivité diélectrique. On observe ainsi deux phénomènes de relaxation distincts et les permittivités mesurées sont supérieures à celles calculées par les lois de comportement HF sur l'ensemble de la gamme de fréquence.

Si une relation empirique reliant la permittivité diélectrique mesurée à la teneur en eau de l'échantillon peut être déterminée pour chaque type de sol étudié, aucune relation générale applicable quelque soit le sol en présence ne peut être proposée entre ces deux grandeurs. En effet, dans le domaine des hautes fréquences, la seule présence de la polarisation dipolaire, liée à la rotation de la molécule d'eau, permet de retrouver des relations directes entre la permittivité diélectrique réelle et la teneur en eau volumique du sol. Aux fréquences moyennes, les mécanismes de polarisation d'interfaces induisent un terme supplémentaire dans la mesure de la permittivité diélectrique. Déterminer cet apport de la polarisation d'interfaces permettrait donc de retrouver la teneur en eau. Nous proposons de quantifier ce raisonnement à l'aide d'une fonction reliant le rapport de la permittivité diélectrique effective mesurée sur la permittivité diélectrique liée à la polarisation dipolaire à la conductivité électrique mesurée. Au regard des échantillons étudiés, aucune loi générale n'a pu être déterminée et la démarche devra donc être réitérée pour chaque type de sol. L'expression empirique obtenue dans le cas des sols de Mons est donc appliquée au cours du chapitre suivant sur les données expérimentales obtenues *in situ* à l'aide du prototype de mesure CE120 développé.

Chapitre 3 :
Développement d'un nouvel appareil de
mesures *in situ* aux fréquences moyennes

1. Introduction

Au chapitre 2, les relations entre les paramètres électriques d'un échantillon de sol et plusieurs paramètres d'état ont été étudiées. Nous souhaitons maintenant évaluer ces relations à l'échelle d'une parcelle. Un prototype permettant une cartographie des deux propriétés a été développé dans ce but.

Après avoir déterminé les caractéristiques optimales du prototype par modélisation directe pour un terrain tabulaire, des premiers tests ont été réalisés pour contrôler la réponse de l'appareil à un objet de caractéristiques connues : une boule conductrice en aluminium. Sa réponse à une variation de hauteur par rapport au sol a également été mesurée. Ces tests permettent de calibrer le prototype.

Enfin, des mesures sur trois sites différents sont présentées : des alluvions sableuses, un luvisol argileux et un sol sur calcaires fracturés.

2. Modélisation – Choix du dispositif le plus adapté

La première étape de développement de l'appareil consiste à définir les caractéristiques du prototype les mieux adaptées aux objectifs de mesure. On cherche à mesurer simultanément la permittivité diélectrique et la conductivité électrique sur un volume de sol d'épaisseur métrique. La configuration, les dimensions du prototype ainsi que sa fréquence de mesure doivent donc être fixées.

Un critère important à évaluer est alors la profondeur d'investigation pour une configuration donnée. Elle représente la profondeur limite jusqu'à laquelle les propriétés électriques du milieu sont mesurables, c'est-à-dire lorsque leurs valeurs sont supérieures aux seuils de bruit définis.

Cette profondeur d'investigation est liée aux caractéristiques géométriques de l'appareil. : elle augmente lorsque l'écartement inter-bobine augmente, lorsque l'appareil est plus près du sol ou lorsque la fréquence de mesure diminue. De plus, les différentes géométries possibles ne possèdent pas la même sensibilité aux variations latérales et transversales du sous-sol.

Avant toute modélisation, il est nécessaire d'estimer le bruit de la mesure pour déterminer quelles sont les variations mesurables par l'appareil. Trois types de modèles sont ensuite employés :

- un terrain homogène de conductivité électrique et de permittivité diélectrique variable qui va permettre de préciser à partir de quelles fréquences des variations de permittivité diélectrique sont détectables pour chaque géométrie de mesure.
- un terrain à deux couches qui donnera une première idée de la profondeur d'investigation attendue pour la ou les configurations les plus favorables (en termes de géométrie et de fréquence). La profondeur d'investigation étant fortement liée à l'écartement inter-bobine, les réponses du prototype pour plusieurs écartements différents sont modélisées afin de fixer l'écartement inter-bobine optimum.

- un terrain à trois couches dont la seconde couche est fine et mobile. La profondeur d'investigation du prototype correspond à la profondeur limite au-delà de laquelle la couche fine conductrice n'est plus détectable. Les résultats de cette modélisation permettent de corroborer les choix précédemment effectués.

Nous avons choisi de travailler en termes de parties réelles et imaginaires des rapports de champs mesurés. Cependant, la représentation en terme de modules et phases peut se révéler être un choix également pertinent, la détermination des seuils de bruit ainsi que des profondeurs de pénétration devenant alors plus optimiste.

2.1. Configurations envisagées

Dans la gamme de fréquence adoptée pour la présente étude, il nous a paru préférable d'utiliser en émission comme en réception des capteurs magnétiques (des bobines), donc d'adopter un dispositif de mesure du type Slingram analogue à ceux utilisés en basse fréquence. Deux raisons nous ont conduit à ce choix :

- un appareil utilisant des capteurs de champ électrique est beaucoup trop sensible à toute modification de l'altitude de mesure, à moins d'utiliser des électrodes plantées dans le sol lui-même, ce qui limiterait considérablement les conditions de mesure,
- le laboratoire a acquis une expérience importante dans la réalisation des appareils basse fréquence, aussi bien en termes de structure mécanique qu'en termes d'électronique lors de développement de prototypes EMI pour lesquels les conditions à respecter sont bien plus drastiques, vu la faible amplitude des champs secondaires.

L'objectif principal du prototype de mesure est de réaliser des cartographies rapides des paramètres électriques d'un sol sur le premier mètre de profondeur. Plusieurs caractéristiques sont donc requises :

- l'écartement entre l'émetteur T_x et le récepteur R_x qui fixe la profondeur d'investigation doit être définie,
- le choix de mesurer le champ secondaire en même temps que le champ émis impose une bonne rigidité mécanique de la structure supportant les capteurs,
- le prototype doit rester maniable, ce qui limite sa taille et son poids.

Différentes géométries de type Slingram ont ainsi été testées dans les modélisations (Figure III-1).

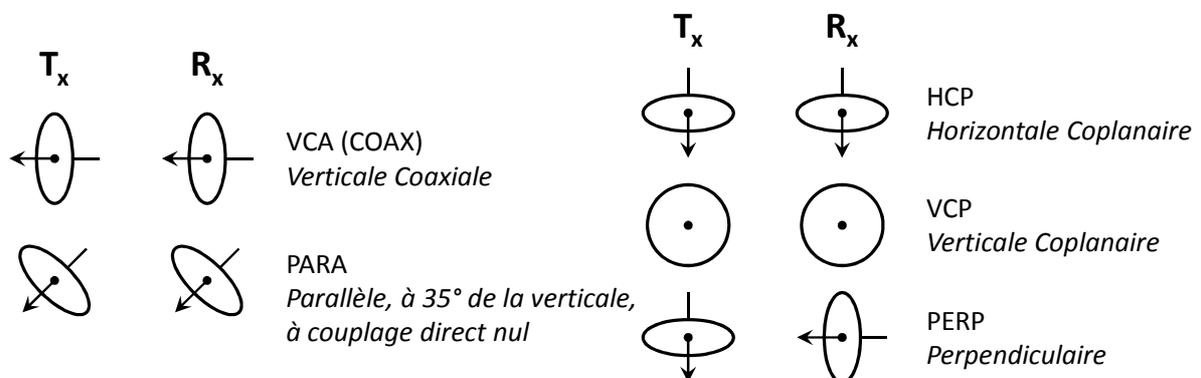


Figure III-1 : Représentation des 5 configurations de type Slingram testées dans les modélisations qui suivent.

Les modélisations effectuées ont donc pour but de déterminer les paramètres géométriques de l'appareil : écartement inter-bobine T_x-R_x , orientation des bobines et fréquences de mesure les plus adéquates.

2.2. Estimation des seuils de bruit

Plusieurs sources de bruits présentes au cours de la mesure induisent une limite de détection au-dessous de laquelle aucune cible ne peut être détectée. Il est donc important d'identifier ces sources afin d'estimer les seuils de détection du champ secondaire.

Bruit électromagnétique ambiant

La première source de bruit est la présence d'émissions d'ondes EM extérieures à des fréquences comprises dans la bande passante de la bobine réceptrice de notre prototype, notamment des émetteurs radio locaux (émetteurs grandes ondes et ondes moyennes).

En désignant par H_s (en A/m) le champ secondaire de l'objet pour une source de moment unitaire et par B_{an} (en A/m) le bruit ambiant normalisé par le moment de la source à chaque fréquence, Bourgeois et Lenain (2002) proposent un seuil de détection pour H_s égal à :

$$H_s \geq 3B_{an}$$

$$H_s \geq 3Db_a \frac{\sqrt{F_e/N}}{M} \quad (\text{III-1})$$

avec : Db_a : densité spectrale de bruit imposée par l'environnement

N/F_e : durée d'échantillonnage (rapport du nombre d'échantillons divisé par la fréquence d'échantillonnage)

M : moment d'émission

Ce seuil peut être réduit en augmentant la durée d'échantillonnage ou le moment d'émission du prototype. En optimisant ces paramètres, un seuil de détection de 10^{-7} A/m (ou 10^{-8} A/m dans l'hypothèse optimiste) peut être atteint.

Bruit électromagnétique du dispositif

Au bruit électromagnétique ambiant s'ajoute un bruit lié au dispositif lui-même. En effet, les différents composants électroniques et les câbles coaxiaux rayonnent et émettent un champ magnétique supplémentaire qui s'ajoute au champ magnétique secondaire mesuré par la bobine réceptrice. Ce bruit ne peut cependant pas aisément être estimé séparément. En effet, il faudrait être isolé de toute source de bruit électromagnétique extérieure ; ceci n'est possible que dans une chambre amagnétique. On peut cependant supposer que le bruit est stable pendant la mesure puisque tous les composants, et notamment les câbles coaxiaux, sont fixés.

Bruit associé aux déformations géométriques de l'appareil

La mesure du champ secondaire étant réalisée dans le domaine fréquentiel, elle se fait en présence du champ primaire. Toute déformation géométrique (alignement des bobines, distance T_x - R_x , variation angulaire de l'axe des bobines) du prototype modifie donc le champ primaire reçu par la bobine réceptrice.

En première approximation, le champ magnétique primaire varie en $1/r^3$, avec r la distance inter-bobines. A une variation relative de l'écartement de 1‰ (variation de 1 mm pour un écartement de 1 m) correspond donc une variation relative de 3‰ du champ magnétique primaire mesuré.

De même, une erreur dans l'orientation des bobines peut induire une variation non négligeable dans la mesure. Les variations les plus importantes sont observées dans le cas d'une géométrie PERP. En effet, dans un espace infini homogène, le champ primaire mesuré par la bobine réceptrice est normalement nul (Figures III-2 et III-18). Toute variation angulaire produit un effet en $\sin\theta$. Une variation angulaire de $0,17^\circ$, soit $0,003\text{ rd}$, ajoute un champ de valeur égale à 3‰ du champ primaire à la mesure. En revanche, dans le cas d'une géométrie HCP ou VCP, dans un espace infini homogène, la variation est en $\cos\theta$. Une variation angulaire de $0,17^\circ$ induit une variation de seulement 5 ppm du champ primaire dans la mesure.

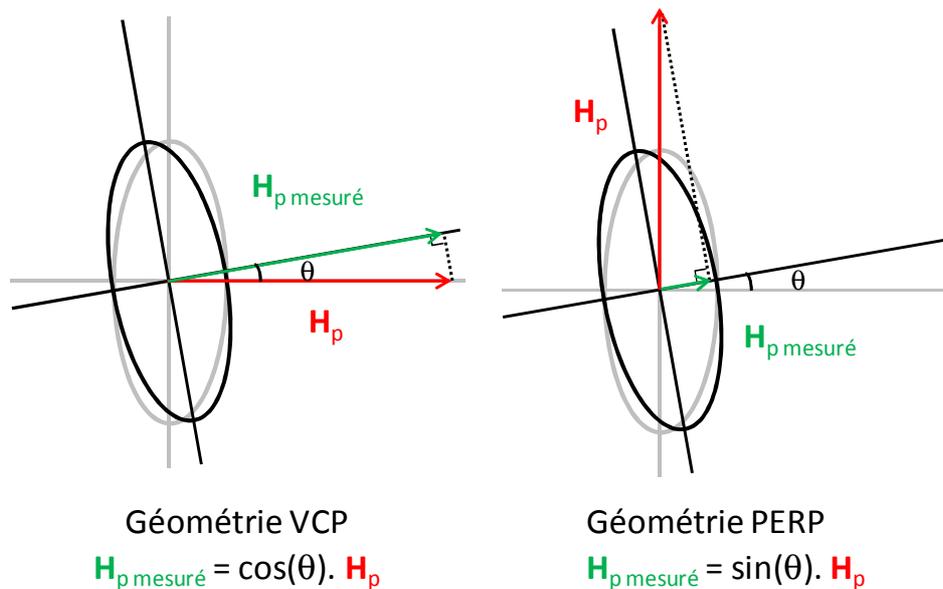


Figure III-2 : Variations induites dans la mesure du champ primaire $H_{p \text{ mesuré}}$ par la bobine réceptrice lorsqu'on introduit une erreur angulaire θ dans le positionnement de R_x pour une bobine émettrice T_x d'axe vertical.

En admettant comme raisonnable un rapport de 3 entre signal et bruit géométrique B_g , le seuil de détection du rapport H_s/H_p sera donc égal à :

$$H_s/H_p \geq 3B_g \quad (\text{III-2})$$

Pour $B_g = 3^0/00$, c'est-à-dire en considérant une erreur de distance de $1^0/00$ et, dans le cas le plus défavorable (configuration PERP), une variation angulaire de $0,17^\circ$, on obtient un seuil de détection de 1%. Si T_x et R_x sont solidaires dans une mécanique rigide, ce seuil est très pessimiste car il prend en compte des erreurs absolues. Or, si ces erreurs sont constantes sur l'ensemble des mesures effectuées, les variations du champ liées à la présence de cibles seront tout de même détectables en corrigeant empiriquement l'ensemble des mesures.

Il est difficile d'apprécier *a priori* ce bruit de déformation géométrique mais plusieurs observations peuvent guider son appréciation et sa correction éventuelle :

- il a été possible de limiter à environ 1 ppm ce bruit dans les appareils en basse fréquence où T_x et R_x sont solidaires,
- les champs secondaires aux fréquences moyennes sont considérablement plus forts que ceux mesurés en BF,
- ce bruit se manifeste surtout par une dérive thermique, relativement facile à corriger puisque de fréquence spatiale très différente des variations recherchées.

Un seuil de 0,1 %, voir de 100 ppm peut donc être facilement admis en maîtrisant et minimisant les sources de bruit géométrique.

Bruit global

Si on considère à la fois le bruit électromagnétique et le bruit lié aux déformations géométriques, le seuil de détectabilité est alors égal au maximum de ces valeurs :

$$H_s/H_p \geq 3 \times \max(4\pi r^3 B_{an}; B_g) \quad (\text{III-3})$$

En fonction de l'écartement inter-bobines, l'une ou l'autre des sources de bruit prédominera. Ainsi, lorsque la distance T_x-R_x augmentera, l'effet relatif du bruit électromagnétique ambiant augmentera car l'amplitude des réponses en A/m diminuera alors que le bruit géométrique diminuera puisqu'il est proportionnel à $1/r^3$. Ces résultats sont résumés sur la figure III-3 pour des fréquences proches de 1 MHz. Le bruit géométrique est dominant jusqu'à un écartement T_x-R_x de 20 m. Comme on cherche à développer un prototype de faible écartement inter-bobine, le bruit géométrique serait donc dominant dans l'étude, mais c'est celui que l'on a pu maîtriser pour des prototypes de mesure basse fréquence. On peut espérer faire de même avec ce nouveau prototype de mesure.

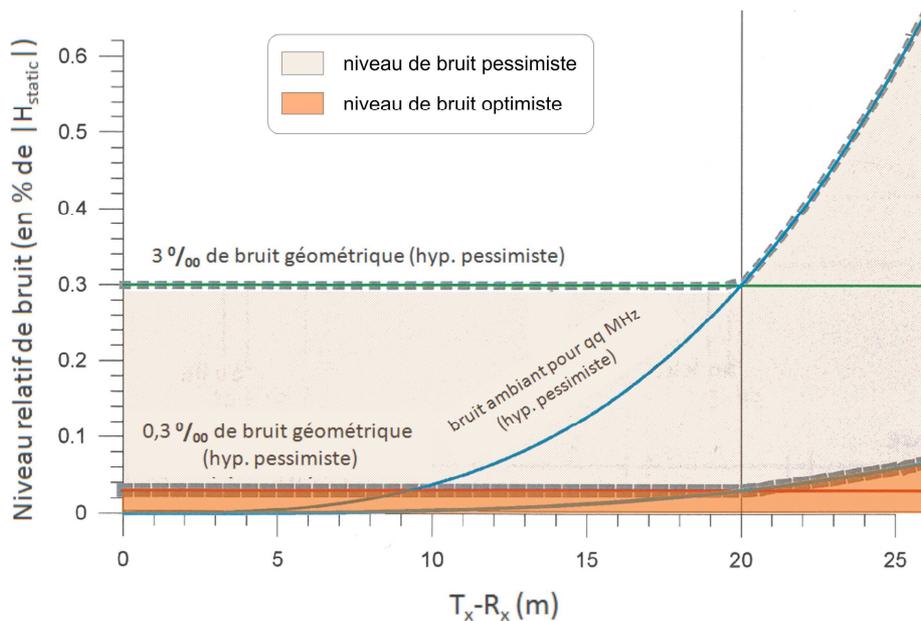


Figure III-3 : Seuils de bruit mesurés en fonction de l'écartement T_x-R_x pour des hypothèses optimiste et pessimiste. Prise en compte du bruit EM ambiant et géométrique (d'après Bourgeois et Lenain, 2002).

2.3. Méthodes de calcul

On cherche à évaluer la valeur du champ secondaire engendré par le sol, rapporté au champ primaire émis par T_x , dans le cas d'un terrain homogène. Tabbagh (1994) a montré que la perméabilité magnétique influence très peu les valeurs des champs magnétiques mesurés dans cette gamme de fréquences. Dans le calcul ci-dessous, la perméabilité magnétique μ est donc égale à celle du vide ($\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$).

Calcul du champ primaire

On peut considérer que l'approximation quasi-statique est toujours valable. En effet, à 10 MHz et pour un écartement T_x-R_x de 1 m, le champ primaire total est à plus de 98% identique au champ primaire quasi-statique, soit, pour un moment unitaire de la bobine émettrice :

$$H_p = 1/4\pi r^3 \quad (\text{III-4})$$

avec r [m] l'écartement inter-bobine T_x-R_x

Calcul du champ secondaire

Dans cette gamme de fréquences, les courants de déplacement, présents à la fois dans le sol et dans l'air, doivent être pris en compte (Bourgeois et Lenain, 2002). L'air est alors considéré comme un demi-espace infini diélectrique de caractéristiques constantes :

- $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
- $\sigma = 0 \text{ S/m}$

Afin de calculer la réponse du sol et puisque la bobine émettrice peut être assimilée à un dipôle magnétique, le vecteur potentiel électrique de Schelkunoff \vec{F} est introduit tel que $\vec{E} = -\overrightarrow{rot}(\vec{F})$. Le potentiel vérifie l'équation de Helmholtz tel que :

- dans l'air, le potentiel électrique secondaire vérifie : $\Delta\vec{F}_s + \varepsilon_0\mu_0\omega\vec{F}_s = 0$
- dans le sol, le potentiel électrique total vérifie : $\Delta\vec{F} - i\sigma\mu\omega.\vec{F} + \varepsilon\mu\omega^2.\vec{F} = 0$

On retrouve alors l'expression du champ magnétique \vec{H} en fonction du potentiel \vec{F} :

$$\vec{H} = \frac{1}{i\omega\mu} \overrightarrow{rot} \overrightarrow{rot} (\vec{F}) \quad (\text{III-5})$$

Pour les différentes configurations Slingram envisagées, le module du rapport du champ secondaire sur le champ primaire vaut alors (Tabbagh, 1994) :

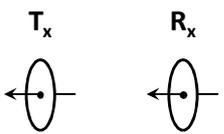
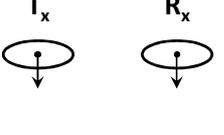
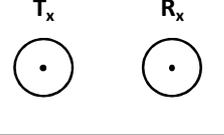
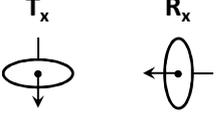
Configuration Slingram	Orientations des bobines	Expression du rapport H_s/H_p
Configuration VCA		$\frac{H_s}{H_p} = r^3.T_3 - \frac{1}{2}r^2.T_2$
Configuration PARA		$\frac{H_s}{H_p} = \frac{\sqrt{2}}{3}r^3.T_0 + \frac{\sqrt{2}}{6}r^3.T_3 - \frac{\sqrt{2}}{6}r^2.T_2$
Configuration HCP		$\frac{H_s}{H_p} = r^3.T_0$
Configuration VCP		$\frac{H_s}{H_p} = r^2.T_2$
Configuration PERP		$\frac{H_s}{H_p} = -r^3.T_1$

Tableau III-1 : Expressions du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction des différentes configurations Slingram envisagées.

avec les transformés de Hankel :

$$\begin{aligned}
 T_0 &= \int_0^{+\infty} e^{-2u_0 h} \lambda u_0 \cdot R(\lambda) \cdot J_0(\lambda r) d\lambda \\
 T_1 &= \int_0^{+\infty} e^{-2u_0 h} \lambda^2 \cdot R(\lambda) \cdot J_1(\lambda r) d\lambda \\
 T_2 &= \int_0^{+\infty} e^{-2u_0 h} \frac{\lambda^2}{u_0} R(\lambda) \cdot J_0(\lambda r) d\lambda \\
 T_3 &= \int_0^{+\infty} e^{-2u_0 h} \frac{\lambda^3}{u_0} R(\lambda) \cdot J_0(\lambda r) d\lambda
 \end{aligned}
 \tag{III-6}$$

où :

J_0 et J_1 sont les fonctions de Bessel de première espèce d'ordre 0 et 1

h [m] est la hauteur du centre des bobines par rapport au sol

r [m] est l'écartement inter-bobine T_x-R_x

λ [m⁻¹] est la fréquence spatiale d'intégration

u_0 et u sont deux variables dépendant de λ et du nombre d'onde complexe k

$u = \sqrt{\lambda^2 - k^2}$ avec $k^2 = -i\sigma\mu\omega + \varepsilon\mu\omega^2$ (pour une dépendance temporelle en $e^{+i\omega t}$ et un milieu non dispersif)

$$u_0 = \sqrt{\lambda^2 - k_0^2} \text{ avec } k_0^2 = \varepsilon_0\mu_0\omega^2$$

Pour un sol homogène, on peut exprimer la variable $R(\lambda)$ à partir des expressions précédentes :

$$R(\lambda) = \frac{u_0 - u}{u_0 + u} \tag{III-7}$$

2.4. Réponse pour un terrain homogène

Avant de s'intéresser à des cas plus complexes, il convient d'étudier la réponse des deux composantes, en phase et en quadrature avec le champ primaire, du champ magnétique secondaire en présence d'un demi-espace homogène de propriétés variables. Les modélisations ont été réalisées pour :

- les 5 configurations de mesure de type Slingram
- différentes fréquences comprises entre 200 kHz et 10 MHz
- une résistivité électrique ρ_a variant entre 1 et 10 000 $\Omega.m$
- une permittivité diélectrique relative $\varepsilon_{r,a}$ comprise entre 10 et 1 000

$$\begin{array}{l} \rho \rightarrow \infty \\ \varepsilon_r = 1 \\ \hline \rho_a = 50 \Omega.m \\ \varepsilon_{r,a} = 40 \end{array}$$

Les valeurs obtenues en phase et en quadrature seront comparées à un terrain homogène de base de caractéristiques moyennes : sa résistivité est égale à 50 $\Omega.m$ et sa permittivité diélectrique relative vaut 40. La variation de susceptibilité magnétique χ_m est négligeable dans le domaine de fréquences considéré.

Pour cette première étude, l'écartement inter-bobines est fixé à 1 m et la hauteur des bobines à 0,1 m du sol, ce qui correspond approximativement à la profondeur d'investigation recherchée.

L'étude des variations du champ magnétique dans le cas d'un terrain homogène (Figures III-4 à III-10) va permettre de déterminer la configuration la plus appropriée afin de mesurer simultanément la résistivité et la permittivité du sol sur la gamme de fréquences adoptées, à la fois en terme de géométrie Slingram et de fréquences d'émission.

Afin de déterminer les gammes de permittivité diélectrique et de résistivité électrique où un signal est détecté, il est nécessaire de définir un seuil au-dessous duquel la mesure des champs se confond avec le bruit de mesure. Dans cette première étape de modélisation, on définit un seuil de détection pessimiste de 0,1 % de H_p .

Configuration VCA

Les valeurs des rapports H_s/H_p dépassent le seuil de détection uniquement pour des terrains très conducteurs ($\rho \leq 25 \Omega.m$) lorsque la fréquence est inférieure à 1 MHz. Au-delà, les valeurs des champs dépassent le seuil de détection pour toutes les résistivités. On observe cependant un passage par 0 entre 42 et 75 $\Omega.m$ pour $Im(H_s/H_p)$ et autour de 3 $\Omega.m$ à 2,5 MHz, de 6 $\Omega.m$ à 5 MHz et de 12 $\Omega.m$ à 10 MHz pour $Re(H_s/H_p)$. Si l'on observe les variations des valeurs de H_s/H_p les unes par rapport aux autres, elles ne peuvent être mesurées pour une gamme de résistivités importante que pour les fréquences les plus hautes : $\rho \in [1; 100] \Omega.m$ pour $f > 2,5 \text{ MHz}$; $\rho \in [1; 1000] \Omega.m$ pour $f > 5 \text{ MHz}$.

Si l'on s'intéresse aux valeurs des rapports H_s/H_p en fonction de la permittivité diélectrique relative ε_r , celles-ci dépassent le seuil de détection pour $\varepsilon_r \leq 100$ lorsque la fréquence de mesure est supérieure à 1 MHz. Cependant, la partie imaginaire H_s/H_p change de signe et passe ainsi sous le seuil de détection pour $\varepsilon_r \in [30; 75]$.

Configuration PARA

Pour les fréquences inférieures à 2,5 MHz, les valeurs des champs dépassent le seuil de détection uniquement pour des terrains conducteurs ($\rho \leq 100 \Omega.m$). Lorsque la fréquence augmente, les rapports H_s/H_p sont supérieurs à 0,1% pour l'ensemble de la gamme de résistivités, à l'exception des valeurs pour lesquelles les rapports changent de signe. Ainsi, pour une fréquence de 10 MHz, $Re(H_s/H_p)$ ne dépasse pas le seuil de détection entre 3 et 4 $\Omega.m$ et $Im(H_s/H_p)$ passe par 0 lorsque la résistivité est proche de 20 $\Omega.m$. Quant aux variations de H_s/H_p , elles peuvent être observées sur une gamme importante de résistivités ($\rho \in [1; 100] \Omega.m$) pour des fréquences de mesure supérieures à 2,5 MHz.

Les valeurs des rapports H_s/H_p sont supérieures au seuil de détection pour l'ensemble des permittivités lorsque la fréquence de mesure est supérieure à 500 kHz. Cependant, la gamme de permittivité pour laquelle les valeurs des champs sont inférieures au seuil (changement de signe de $Re(H_s/H_p)$ et (H_s/H_p)) augmente lorsque la fréquence diminue. Ainsi, pour $f = 750$ kHz, $Re(H_s/H_p) \leq 0,1\%$ pour $\epsilon_r \in [60; 500]$ et pour $f = 1$ MHz, $Re(H_s/H_p) \leq 0,1\%$ pour $\epsilon_r \in [150; 400]$. Ces larges gammes de permittivité montrent que les valeurs des champs ne varient que très peu en fonction de ϵ_r . En effet, la fréquence doit être supérieure à 5 MHz pour observer des variations supérieures au seuil de détection pour des permittivités inférieures à 100.

Configuration HCP

Les rapports H_s/H_p sont supérieurs à 0,1% pour l'ensemble des résistivités étudiées à partir de 750 kHz, à l'exception des changements de signe. En effet, $Re(H_s/H_p)$ passe sous le niveau de bruit pour des résistivités comprises entre 75 et 200 $\Omega.m$ à 750 kHz, entre 100 et 130 $\Omega.m$ à 1 MHz et entre 85 et 95 $\Omega.m$ pour les fréquences entre 2 et 5 MHz. Les variations des rapports de champs les uns par rapport aux autres dépassent la valeur de 0,1 % pour une gamme de résistivité de plus de deux décades à partir d'une fréquence de 1 MHz : $\rho \in [1; 5000] \Omega.m$ pour $f = 5$ MHz.

Les valeurs de H_s/H_p en fonction de ϵ_r sont, quant à elles, supérieures à 0,1% pour l'ensemble des permittivités étudiées à partir de 750 kHz. Cependant, $Re(H_s/H_p)$ et $Im(H_s/H_p)$ ont des valeurs inférieures au seuil de détection lors des changements de signe. Ainsi, $Re(H_s/H_p)$ tend vers 0 pour des permittivités relatives comprises entre 100 et 150 aux fréquences comprises entre 750 et 2,5 MHz. De plus, les rapports de champs varient d'une quantité supérieure à 0,1% pour l'ensemble des permittivités pour des fréquences supérieures à 2,5 MHz.

Configuration VCP

Les observations sont proches de celles effectuées pour la configuration HCP. En effet, les rapports des champs sont supérieurs à 0,1% pour l'ensemble des résistivités étudiées à partir de 1 MHz. Cependant, leurs parties réelles et imaginaires coupent l'axe des abscisses entre 55 et 100 $\Omega.m$ à 1 MHz, entre 45 et 60 $\Omega.m$ à 2,5 MHz et entre 45 et 50 $\Omega.m$ pour 5 et 10 MHz. Comme pour la configuration HCP, les variations des rapports sont supérieures à 0,1% sur plus de deux décades à partir de 1 MHz.

De plus, les rapports H_s/H_p sont mesurables à partir de 750 MHz pour toute la gamme de permittivités diélectriques étudiées, à l'exception des permittivités pour lesquelles on observe un changement de signe de la partie réelle ou de la partie imaginaire des champs. Ainsi, $Re(H_s/H_p)$ est inférieur à 0,1% pour des permittivités comprises entre 45 et 90 à 1 MHz ou entre 45 et 50 à 2,5 MHz. De plus, comme pour la configuration HCP, pour des fréquences supérieures à 2,5 MHz, les rapports de champs varient suffisamment en fonction de ϵ_r pour pouvoir la mesurer.

Configuration PERP

A partir de 1 MHz, les valeurs des champs sont supérieures à 0,1% pour l'ensemble des résistivités étudiées, à l'exception des résistivités comprises entre 35 et 45 $\Omega.m$ où $Re(H_s/H_p)$ change de signe.

Il en est de même pour les variations de valeurs de champ en fonction de la résistivité électrique : elles sont supérieures à 0,1% pour $\rho \in [1; 200] \Omega \cdot m$ à 1 MHz et pour $\rho \in [1; 1000] \Omega \cdot m$ à 5 MHz. De plus, le seuil de détection est dépassé sur l'ensemble des permittivités étudiées pour des fréquences supérieures à 1 MHz, à l'exception des permittivités comprises entre 20 et 30 où l'on observe un changement de signe de $Re(H_s/H_p)$. Pour les fréquences supérieures à 1 MHz, les variations des valeurs de H_s/H_p en fonction de la permittivité sont également supérieures à 0,1% sur l'ensemble de la gamme de permittivités étudiées.

A partir de ces observations, plusieurs conclusions se dégagent :

- En dessous de 1 MHz, à l'exception des terrains très conducteurs et de permittivité élevée, les rapports $Re(H_s/H_p)$ et $Im(H_s/H_p)$ ont des valeurs inférieures à 0,1 % et leur variation en fonction des paramètres électriques est trop faible pour être mesurée.
- Les configurations VCA et PARA sont les moins sensibles aux variations des paramètres électriques. Elles ne sont donc pas envisagées pour la construction du prototype.
- Les configurations VCP et HCP ont des comportements assez semblables et les valeurs des champs sont supérieures à 0,1 % à partir 1 MHz pour une large gamme de résistivités et de permittivités. Cependant, on observe un changement de signe (rotation de phase) dans les rapports $Re(H_s/H_p)$ et $Im(H_s/H_p)$ en fonction des paramètres électriques. Ces changements de signe complexifient l'interprétation des résultats.
- La configuration PERP permet également d'obtenir des valeurs et des variations de champs supérieures à 0,1% à partir de 1 MHz pour l'ensemble des résistivités et des permittivités étudiées. On observe également un changement de signe (rotation de phase) de $Re(H_s/H_p)$ autour de 35 $\Omega \cdot m$ de résistivité électrique et de 20 de permittivité diélectrique relative. La partie imaginaire de H_s/H_p reste elle toujours positive.

Le prototype est donc choisi avec une fréquence d'émission supérieure à 1 MHz et une orientation des bobines de type VCP, HCP ou PERP, avec une préférence pour la configuration PERP qui semble moins complexe à interpréter (changement de signe uniquement pour $Re(H_s/H_p)$).

Il est cependant à noter qu'il n'existe pas de variations linéaires entre les rapports des champs et les paramètres électriques. Il faudra donc passer par la construction d'un abaque ou d'un programme d'inversion pour retrouver les paramètres électriques à partir des champs mesurés.

Pour cette première modélisation, la hauteur de l'appareil et l'écartement inter-bobine sont fixés à 0,1 m pour la hauteur et 1 m pour l'écartement étant donné les cibles visées. Afin de tester la validité de ces premières hypothèses, une deuxième modélisation pour un terrain à deux couches est effectuée.

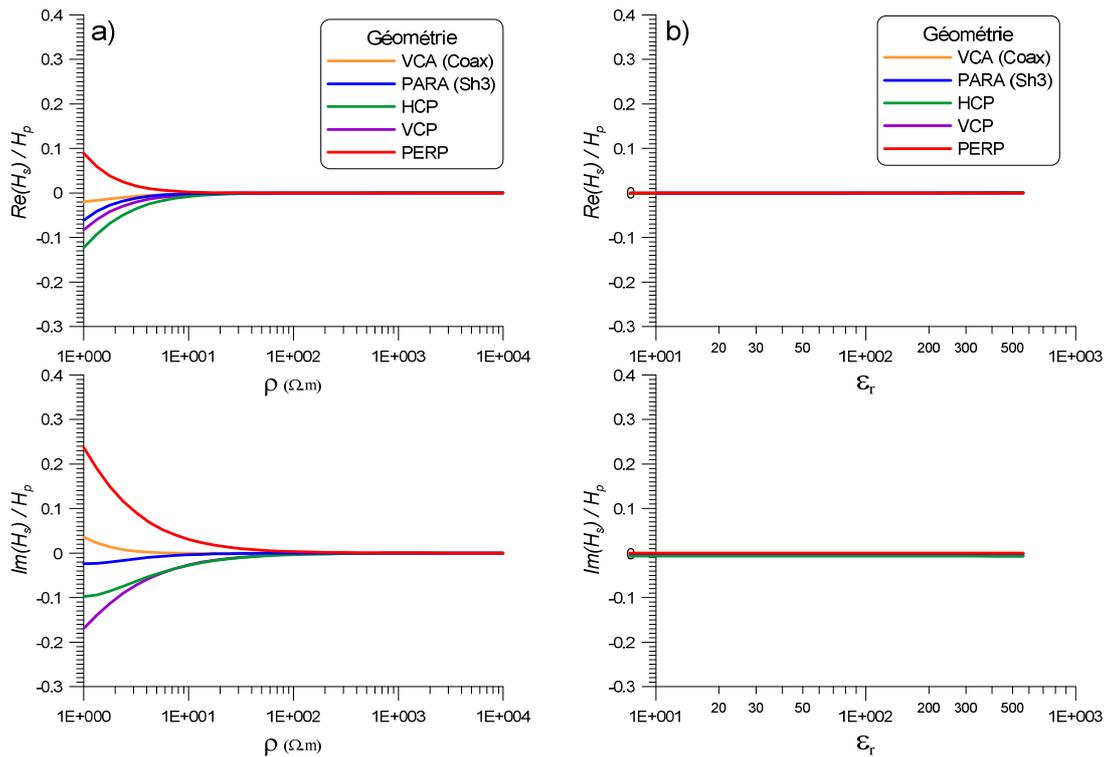


Figure III-4 : Réponse en phase et en quadrature du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction de a) la résistivité électrique et de b) la permittivité diélectrique relative d'un terrain homogène pour 5 configurations Slingram et une fréquence de mesure égale à **200 kHz**.

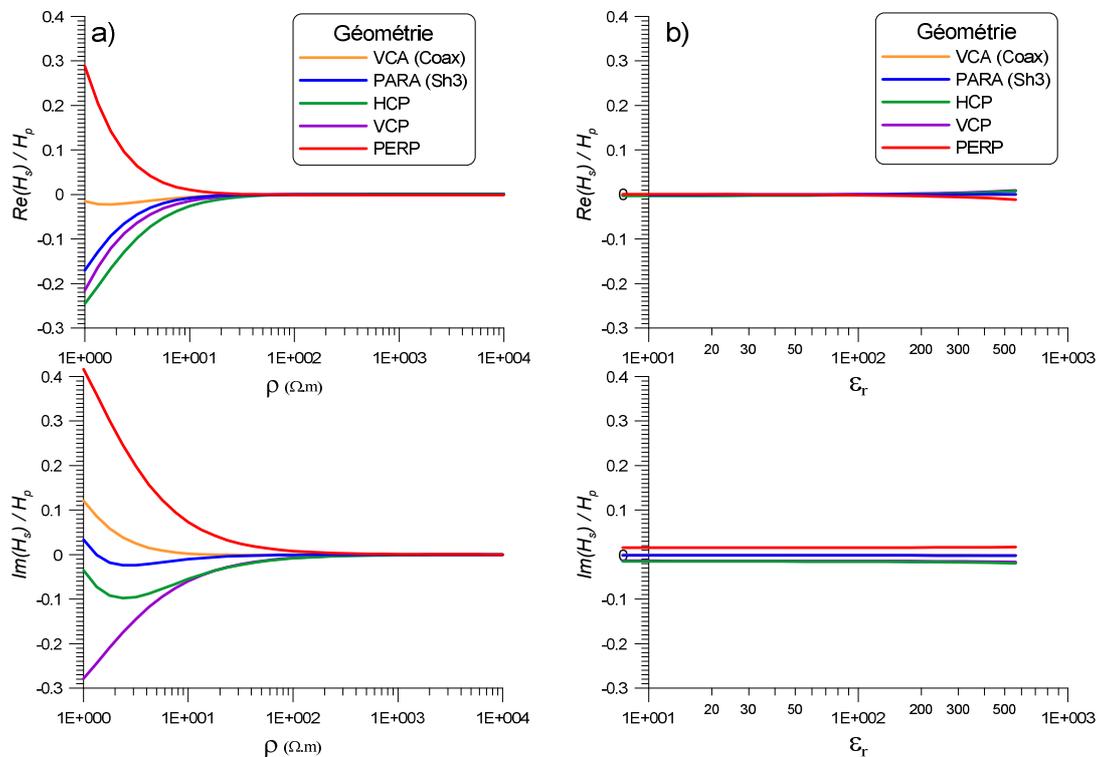


Figure III-5 : Réponse en phase et en quadrature du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction de a) la résistivité électrique et de b) la permittivité diélectrique relative d'un terrain homogène pour 5 configurations Slingram et une fréquence de mesure égale à **500 kHz**.

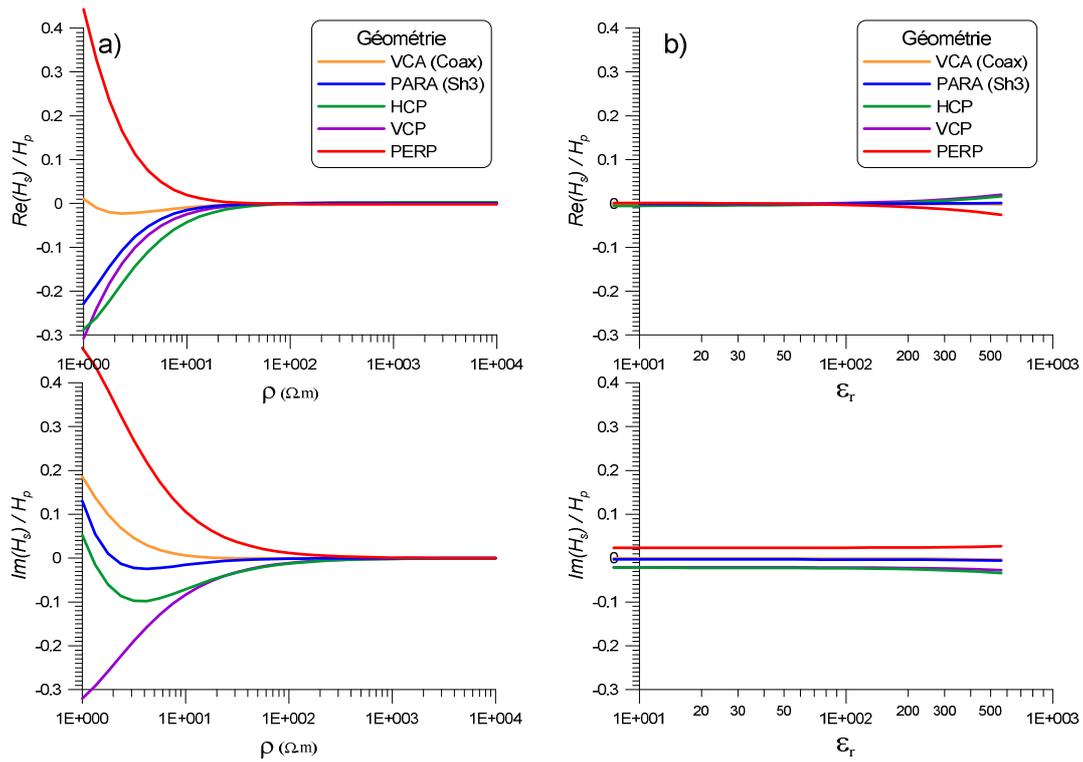


Figure III-6 : Réponse en phase et en quadrature du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction de a) la résistivité électrique et de b) la permittivité diélectrique relative d'un terrain homogène pour 5 configurations Slingram et une fréquence de mesure égale à **750 kHz**.

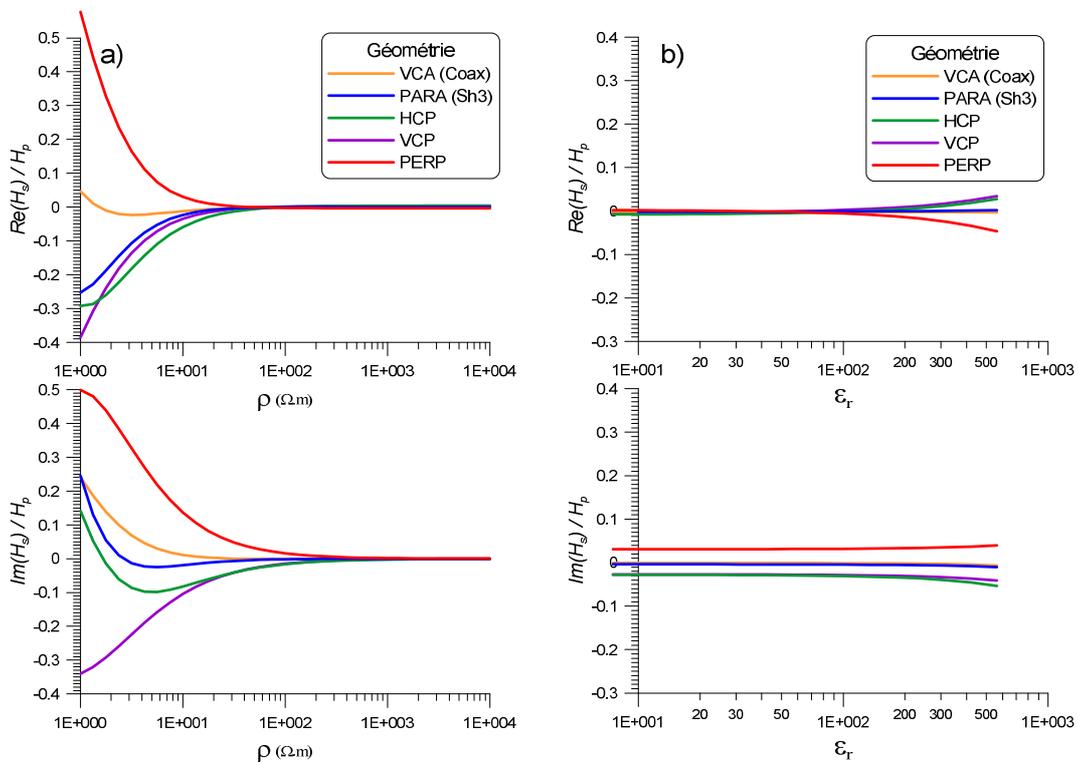


Figure III-7 : Réponse en phase et en quadrature du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction de a) la résistivité électrique et de b) la permittivité diélectrique relative d'un terrain homogène pour 5 configurations Slingram et une fréquence de mesure égale à **1 MHz**.

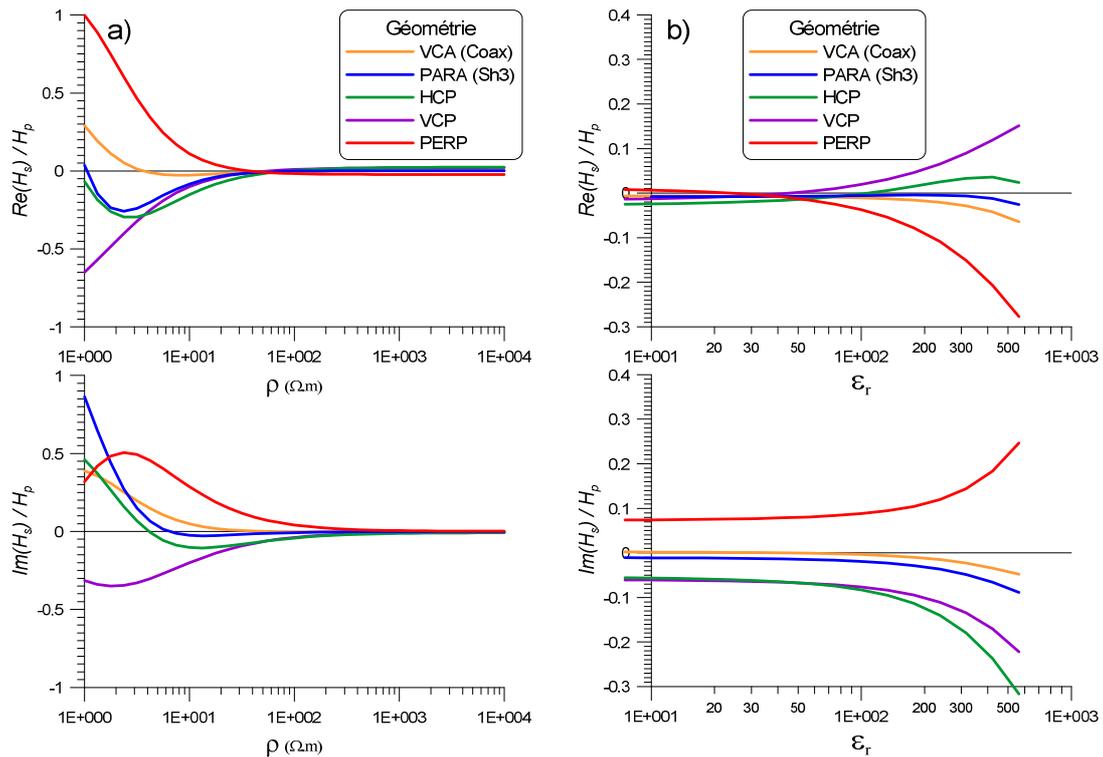


Figure III-8 : Réponse en phase et en quadrature du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction de a) la résistivité électrique et de b) la permittivité diélectrique relative d'un terrain homogène pour 5 configurations Slingram et une fréquence de mesure égale à **2,5 MHz**.

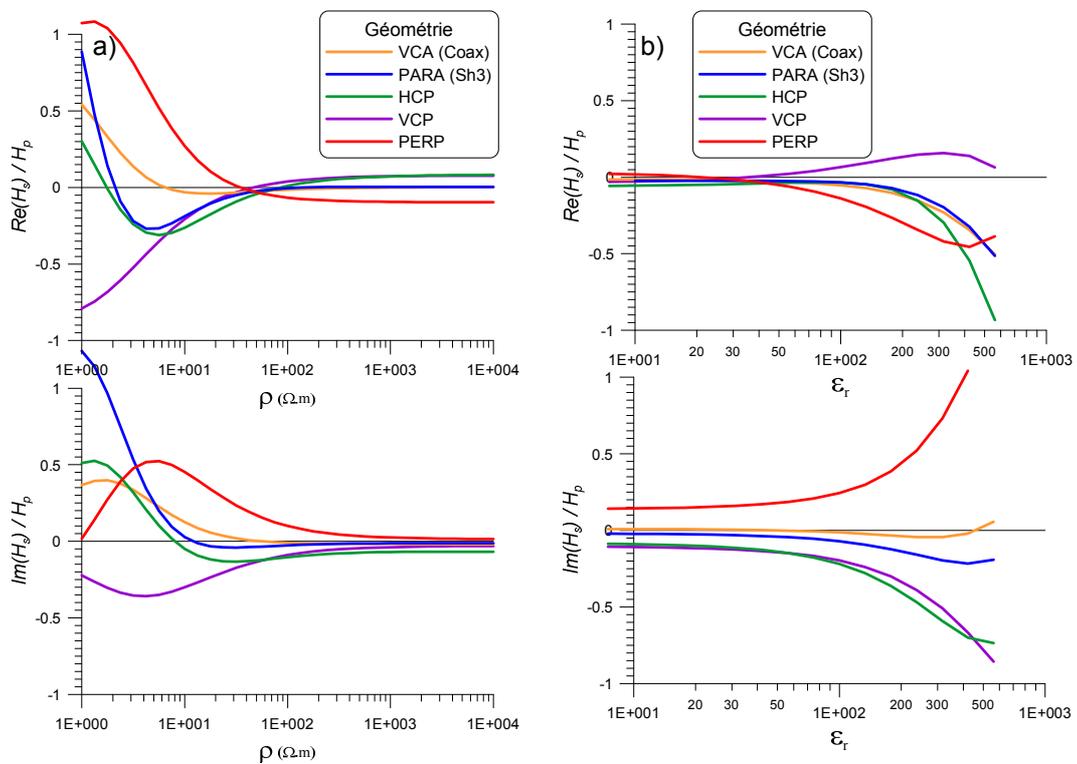


Figure III-9 : Réponse en phase et en quadrature du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction de a) la résistivité électrique et de b) la permittivité diélectrique relative d'un terrain homogène pour 5 configurations Slingram et une fréquence de mesure égale à **5 MHz**.

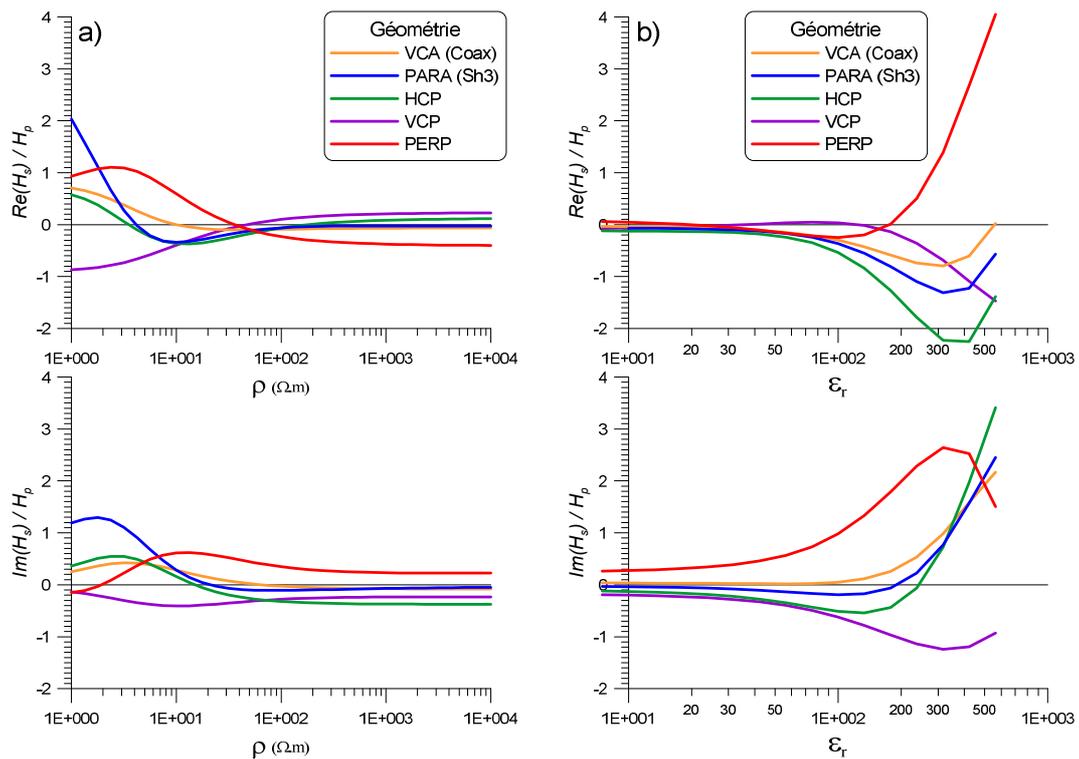


Figure III-10 : Réponse en phase et en quadrature du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction de a) la résistivité électrique et de b) la permittivité diélectrique relative d'un terrain homogène pour 5 configurations Slingram et une fréquence de mesure égale à **10 MHz**.

2.5. Réponse à un terrain tabulaire à 2 couches

Afin d'évaluer la sensibilité du dispositif aux variations verticales des propriétés électriques du sol, des modèles à deux couches sont testés. En faisant varier l'épaisseur de la première couche, on détermine la profondeur au-delà de laquelle le deuxième terrain n'est plus visible dans les mesures de champs. On effectue ainsi une première estimation de la profondeur d'investigation du prototype.

On peut donc estimer une profondeur d'investigation liée à un appareil de configuration connue, mais également préciser la configuration d'un prototype en fonction d'une profondeur visée. Ainsi, en fixant la fréquence de mesure et l'orientation des bobines du prototype, sa profondeur d'investigation dépendra uniquement de l'écartement inter-bobines. La réponse du prototype à un terrain à deux couches va donc permettre de déterminer l'écartement entre les bobines émettrice et réceptrice présentant le meilleur compromis entre profondeur d'investigation et maniabilité sur le terrain.

Deux modèles de terrain à deux couches sont choisis :

- C/R : un terrain conducteur et de permittivité moyenne ($\rho_1 = 70 \Omega.m$; $\varepsilon_{r,1} = 50$) sur un terrain plus résistant et de permittivité plus faible ($\rho_2 = 200 \Omega.m$; $\varepsilon_{r,2} = 20$)
- R/C : un terrain conducteur et de permittivité moyenne ($\rho_1 = 30 \Omega.m$; $\varepsilon_{r,1} = 30$), sur un terrain plus conducteur et de permittivité plus élevée ($\rho_2 = 10 \Omega.m$; $\varepsilon_{r,2} = 40$)

C/R	$\rho \rightarrow \infty$ $\varepsilon_r = 1$	R/C	$\rho \rightarrow \infty$ $\varepsilon_r = 1$
$\rho_1 = 70 \Omega.m$ $\varepsilon_{r,1} = 50$		$\rho_1 = 30 \Omega.m$ $\varepsilon_{r,1} = 30$	
$\rho_2 = 200 \Omega.m$ $\varepsilon_{r,2} = 20$		$\rho_2 = 10 \Omega.m$ $\varepsilon_{r,2} = 40$	

On fait varier l'épaisseur de la première couche de 0,2 m à 2 m avec un pas de 0,2 m.

Les caractéristiques de l'appareil étudié sont les suivantes :

- La fréquence d'émission est fixée à 5 MHz,
- Deux orientations de bobines sont testées : PERP et VCP. Les modélisations ont également été réalisées pour la configuration HCP, mais ne sont pas représentées ci-dessous car elles sont très semblables aux réponses pour la configuration VCP.
- La hauteur des bobines est fixée à 0,1 m,
- On fait varier l'écartement inter-bobines de 0,5 m à 2 m.

On définit le seuil de détection comme la valeur du rapport de champs au-dessus de laquelle on mesure l'influence de la deuxième couche. On utilise à nouveau l'hypothèse de seuil de bruit de 0,1 %. Lorsque la valeur des rapports de champs magnétiques se détache de plus de 0,1 % par rapport à la valeur d'un terrain homogène possédant des paramètres électriques identiques à la

première couche, on détecte l'influence de la deuxième couche. Ce seuil est représenté sur les figures suivantes par les courbes noires.

Plusieurs observations globales peuvent être déduites des figures III-11 à III-15. Pour l'ensemble des écartements et des configurations, les variations du modèle R/C sont plus importantes que les variations du modèles C/R. La résistivité de la deuxième couche est plus élevée (200 Ω .m) pour le modèle C/R, limitant la réponse du milieu profond, et ainsi la détection de la deuxième couche.

De plus, à fréquence fixe, les valeurs des champs et leurs variations augmentent lorsque l'écartement inter-bobines augmente. On passe ainsi d'un écart maximal entre les valeurs, en fonction de l'épaisseur de la première couche, de 2% pour un écartement T_x-R_x de 0,5 m à un écart maximal supérieur à 40 % pour un écartement de 2 m, en passant par un écart maximal compris entre 0,2 et 0,3 pour les écartements inter-bobines de 1 à 1,5 m. Ces valeurs de champs sont très largement supérieures aux seuils de bruit les plus pessimistes définis précédemment. L'ensemble des configurations de mesure étudiées permettra donc une bonne détection des variations de propriétés du sous-sol.

Cependant, les configurations de mesure ne sont pas équivalentes en termes de profondeur de pénétration. Le tableau III-2 ci-dessous présente les épaisseurs maximales de la première couche pour lesquelles la deuxième couche du modèle est détectée. Pour chaque configuration, on prendra la profondeur d'investigation la plus faible entre la partie réelle et la partie imaginaire comme référence. Cette hypothèse induit une détermination pessimiste de la profondeur d'investigation. En utilisant le module et la phase des données, la profondeur d'investigation déduite serait plus importante.

Ecartement T_x-R_x (m)	PERP		VCP	
	Modèle C/R	Modèle R/C	Modèle C/R	Modèle R/C
0,5	0,3 m	0,6 m	Non	0,5 m
1	0,3 m	0,6 m	Non	0,5 m
1,2	1,2 m	1,2 m	0,9 m	1,1 m
1,5	1,2 m	1,3 m	0,9 m	1,2 m
2	≥ 2 m	1,2 m	1,8 m	1 m

Tableau III-2 : Epaisseur maximale de la première couche au-dessus de laquelle on détecte la 2^e couche du modèle, i.e. profondeur d'investigation obtenue, pour les configurations PERP et VCP en fonction de l'écartement inter-bobines, étudiée pour les modèles C/R et R/C précédemment définis.

En fonction de l'écartement inter-bobines, l'épaisseur maximale de la première couche correspondant au seuil de détection varie. Elle passe ainsi de 0,6 m pour un écartement T_x-R_x de 0,5 m à plus de 2 m pour un écartement inter-bobines de 2 m. Etant donné que l'on cherche à atteindre une profondeur d'investigation métrique, l'écartement inter-bobines optimal est donc supérieur 1 m, mais inférieur à 1,5 m pour les deux configurations de mesure PERP et VCP (Figures III-11 à III-15). On préférera cependant la configuration PERP à la configuration VCP car elle possède des profondeurs d'investigation légèrement plus élevées et une meilleure détection en situation C/R.

On choisira finalement un écartement inter-bobines intermédiaire de 1,2 m qui représente un bon compromis entre profondeur d'investigation et maniabilité du dispositif.

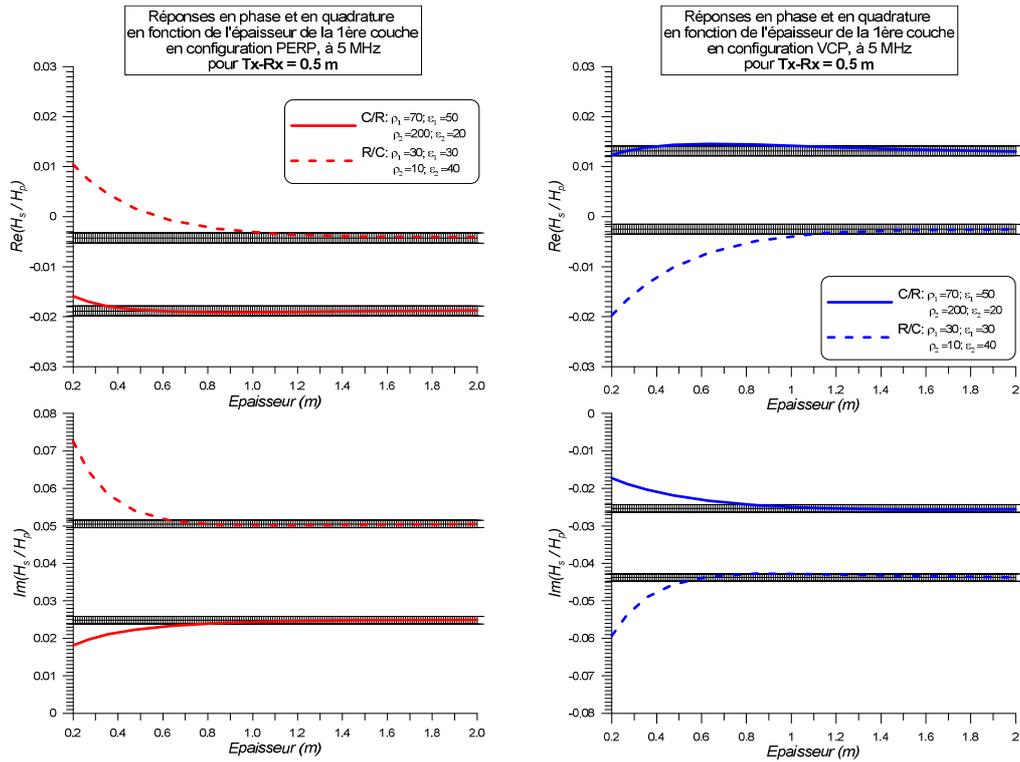


Figure III-11 : Réponses en phase et en quadrature des rapports H_s/H_p pour un terrain tabulaire à 2 couches en fonction de l'épaisseur de la 1^{ère} couche, en configuration de mesure PERP et VCP, pour une fréquence de 5 MHz et un écartement T_x-R_x de **0,5 m** (courbes noires =: seuil de détection).

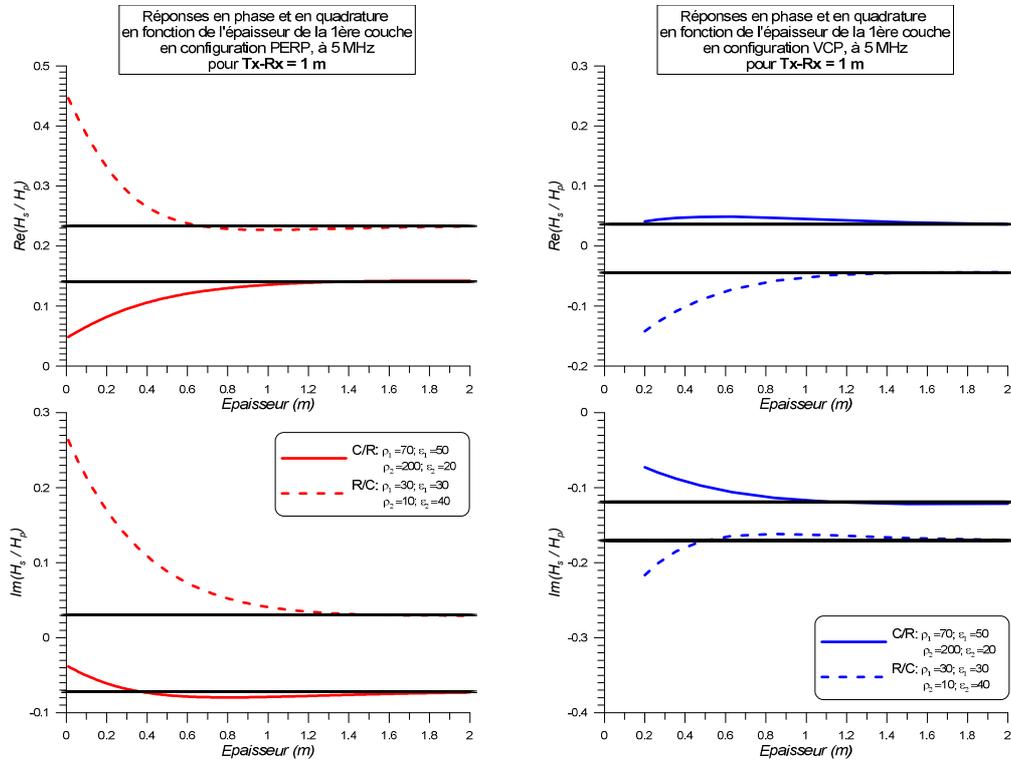


Figure III-12 : Réponses en phase et en quadrature des rapports H_s/H_p pour un terrain tabulaire à 2 couches en fonction de l'épaisseur de la 1^{ère} couche, en configuration de mesure PERP et VCP, pour une fréquence de 5 MHz et un écartement T_x-R_x de **1 m** (courbes noires =: seuil de détection).

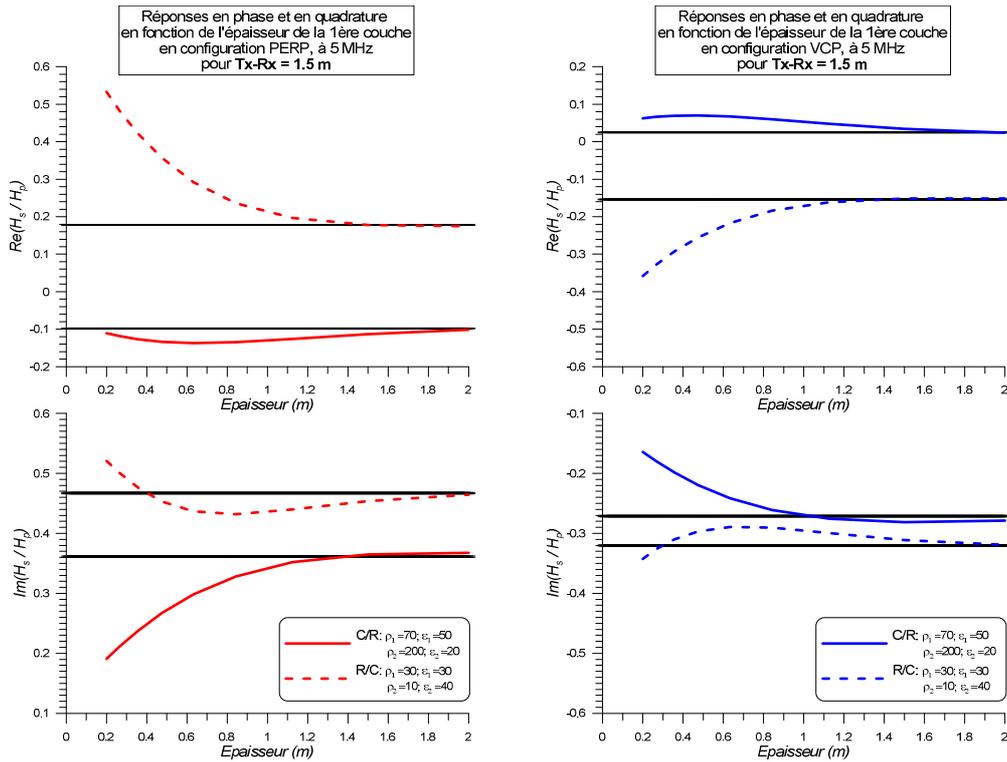


Figure III-13 : Réponses en phase et en quadrature des rapports H_s/H_p pour un terrain tabulaire à 2 couches en fonction de l'épaisseur de la 1^{ère} couche, en configuration de mesure PERP et VCP, pour une fréquence de 5 MHz et un écartement T_x-R_x de 1,5 m (courbes noires =: seuil de détection).

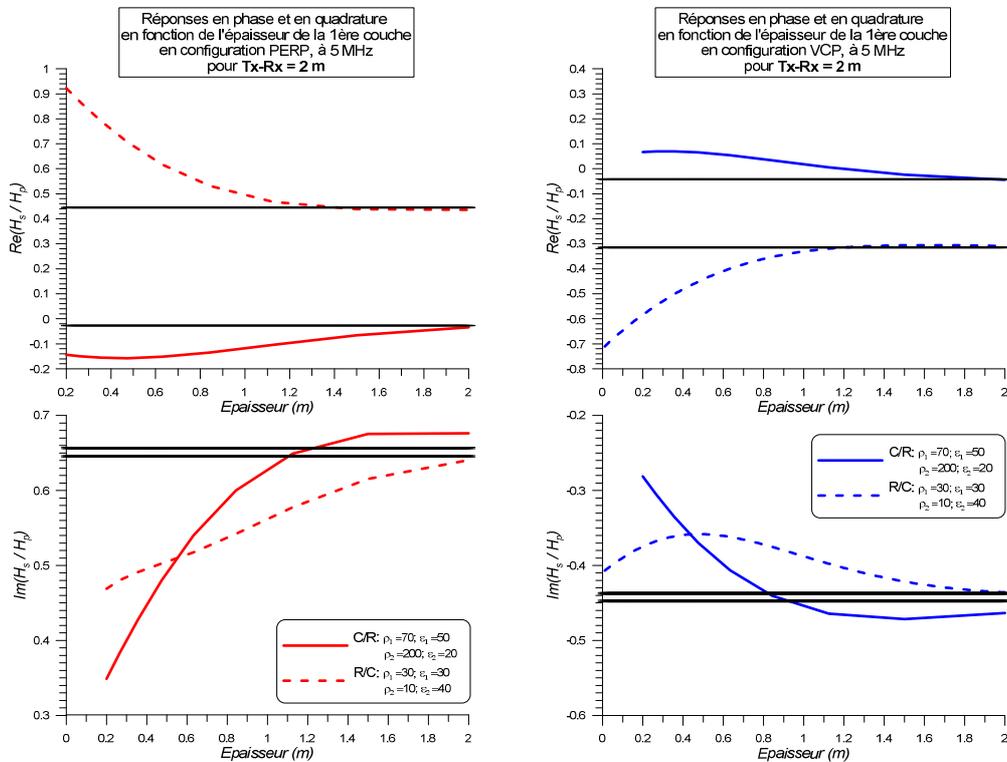


Figure III-14 : Réponses en phase et en quadrature des rapports H_s/H_p pour un terrain tabulaire à 2 couches en fonction de l'épaisseur de la 1^{ère} couche, en configuration de mesure PERP et VCP, pour une fréquence de 5 MHz et un écartement T_x-R_x de 2 m (courbes noires =: seuil de détection).

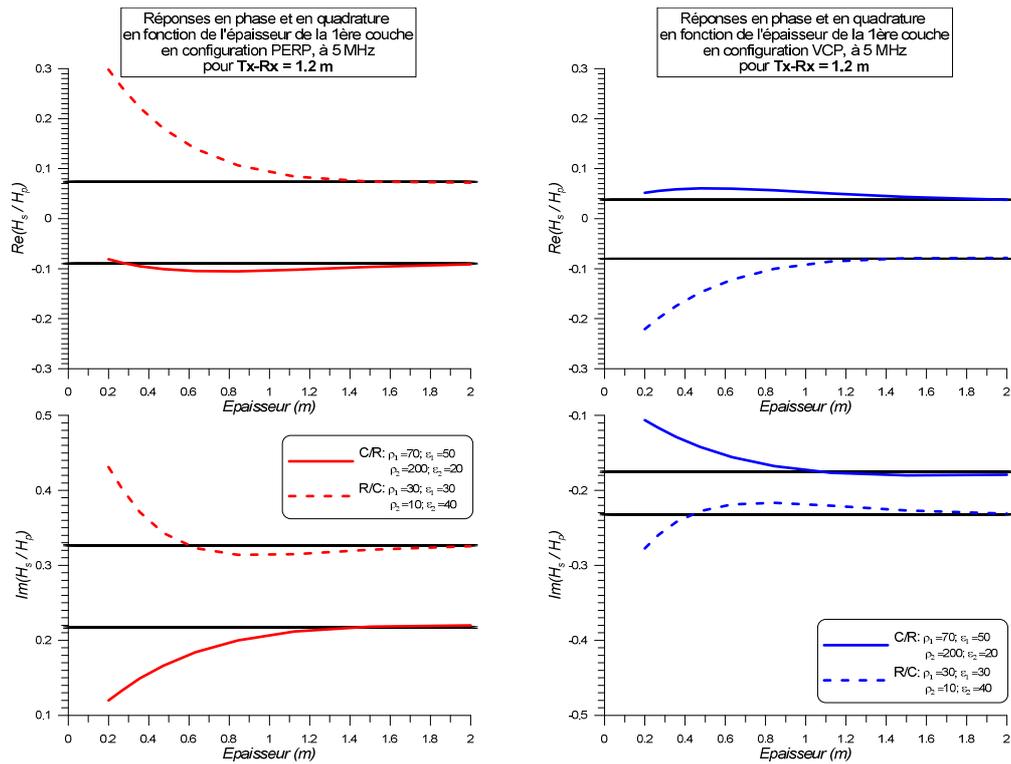
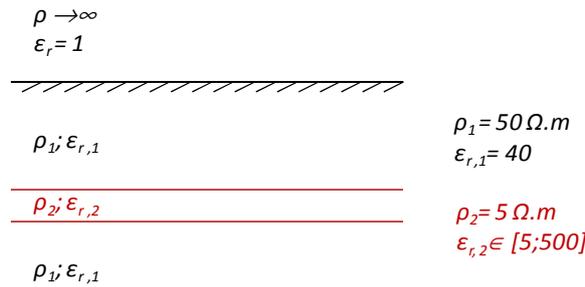


Figure III-15 : Réponses en phase et en quadrature des rapports H_s/H_p pour un terrain tabulaire à 2 couches en fonction de l'épaisseur de la 1^{ère} couche, en configuration de mesure PERP et VCP, pour une fréquence de 5 MHz et un écartement T_x-R_x de **1,2 m** (courbes noires =: seuil de détection).

2.6. Estimation de la profondeur d'investigation

Pour préciser la profondeur d'investigation de la configuration choisie, on modélise la réponse du prototype à un terrain tabulaire possédant une fine couche conductrice mobile. On cherche la profondeur à partir de laquelle on ne détecte plus la couche. On choisit un encaissant possédant des propriétés moyennes : résistivité électrique égale à $50 \Omega.m$ et permittivité diélectrique relative égale à 40 et une couche conductrice (couche mobile) de résistivité électrique égale à $5 \Omega.m$ et de permittivité diélectrique variable comprise entre 5 et 500. La susceptibilité magnétique est prise égale à 50.10^{-5} uSI. On fait varier le toit de la couche conductrice, épaisse de 10 cm, entre 5 cm et 2 m de profondeur.



Les mesures sont réalisées pour un dispositif possédant les caractéristiques suivantes :

- géométries Slingram PERP et VCP,
- écartement inter-bobines égale à 1,2 m,
- altitude du prototype égale à 0,1 m,
- fréquences de mesure comprises entre 1 et 10 MHz.

Les variations des rapports H_s/H_p en phase et en quadrature sont représentées en fonction de la profondeur du toit de la fine couche conductrice (i.e. de l'épaisseur de la première couche) (Figure III-16) et comparées aux valeurs des champs calculées pour un terrain homogène possédant les propriétés de l'encaissant. Les caractéristiques optimales ayant été choisies, on définit la profondeur d'investigation comme la profondeur au-dessus de laquelle les valeurs des champs se distinguent des valeurs du terrain homogène de plus de 100 ppm. Ce seuil est représenté sur les figures par les courbes rouges. La profondeur d'investigation étant différente pour les parties en phase et en quadrature, on prendra le minimum des profondeurs comme profondeur d'investigation pour chaque cas. Cette hypothèse est une hypothèse pessimiste. On aurait pu choisir de travailler en termes de module et phase, la profondeur d'investigation obtenue devenant plus élevée.

La couche fine est détectée pour toutes les fréquences supérieures à 1 MHz. Les variations sont similaires pour les configurations PERP et VCP. On note cependant que, comme observé pour les modèles à deux couches, les profondeurs d'investigation atteintes par la configuration PERP sont plus élevées de 20 cm environ pour chaque fréquence par rapport à celles de la configuration VCP.

De plus, les valeurs des rapports des champs magnétiques varient en fonction de la permittivité de la couche mobile. On observe une inversion de signe de la différence des valeurs calculées par rapport à celles du terrain homogène lorsque la permittivité diélectrique de la couche augmente. A 10 MHz, les variations deviennent encore plus complexes et le changement de signe se produit à deux reprises. L'interprétation des mesures n'en sera que plus compliquée et il faudra tenir compte de ces observations dans l'interprétation des résultats.

En considérant un dispositif d'écartement inter-bobines de 1,2 m, positionné à une altitude de 0,1 m d'altitude, la profondeur d'investigation métrique visée est donc atteinte pour les deux configurations de mesure PERP et VCP, pour des fréquences supérieures à 1 MHz. Comme observé précédemment, la profondeur d'investigation atteinte est toutefois supérieure d'environ 20 cm pour les mesures en configuration PERP. De plus, les variations des rapports de champs magnétiques ne sont pas linéaires, et se complexifient à 10 MHz. Il faudra donc tenir compte de cette observation lors de l'interprétation des résultats.

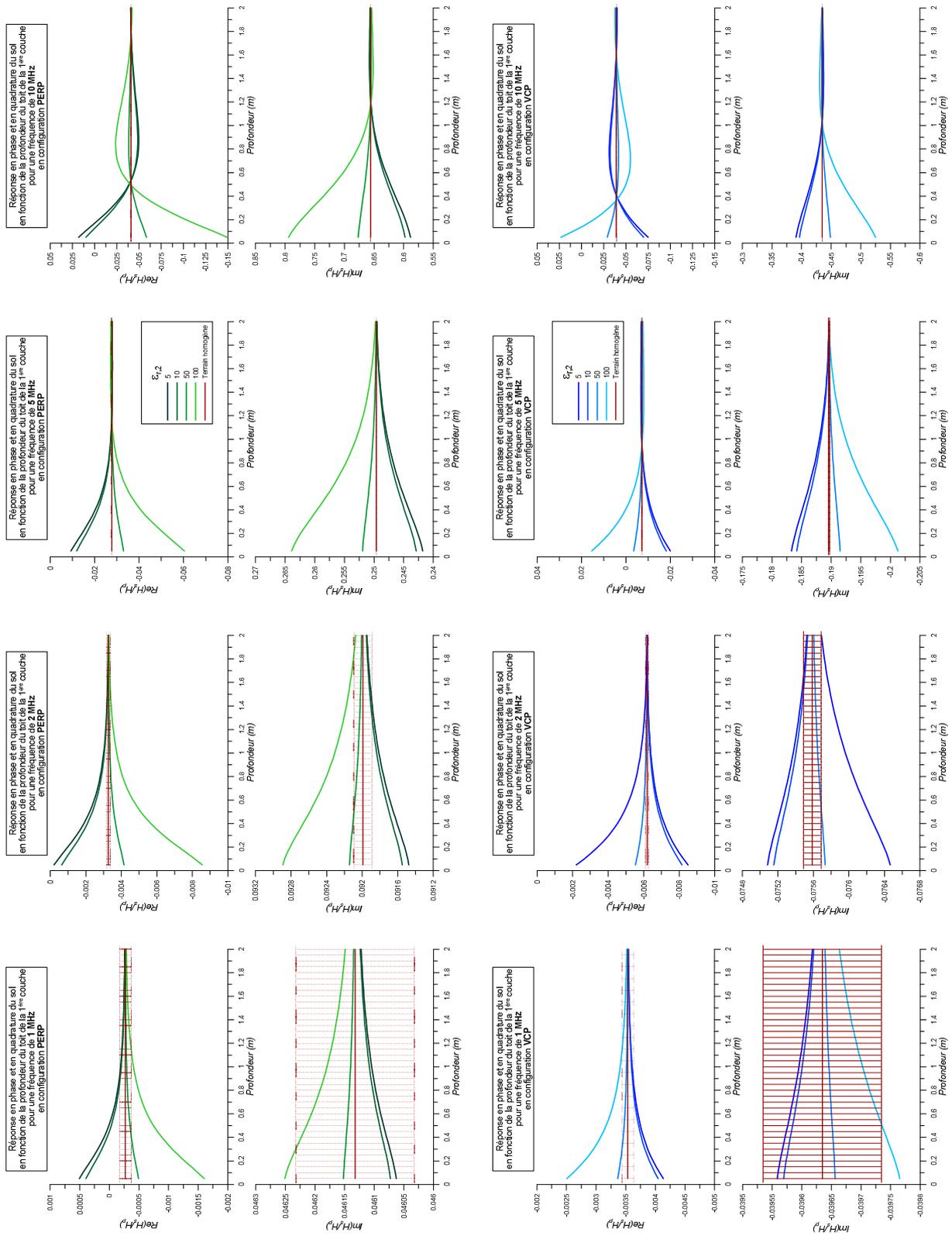


Figure III-16 : Réponse en phase et en quadrature du terrain tabulaire à 3 couches décrit ci-dessus, en

fonction de la profondeur du toit de la couche mobile conductrice et de sa permittivité diélectrique relative $\varepsilon_{r,2}$, pour les configurations de mesure PERP et VCP, pour des fréquences de mesure comprises entre 1 et 10 MHz et pour un écartement Tx-Rx de 1,2 m (courbes rouges =: seuil de détection de la couche conductrice).

2.7. Conclusion

Au vue des différentes modélisations effectuées, nous avons donc choisi de construire un dispositif possédant les caractéristiques suivantes :

- Configuration de mesure : PERP ou VCP
- Ecartement entre les bobines : $1 \text{ m} \leq T_x - R_x \leq 1,5 \text{ m}$
- Fréquence de travail : $f > 1 \text{ MHz}$

On se limite à un appareil possédant un écartement inter-bobines déterminé. Les bobines d'émission et de réception peuvent ainsi être fixées sur un même support afin de contrôler au maximum les erreurs liées aux angles de tangage et de roulis.

On souhaite effectuer des mesures avec une fréquence de travail supérieure à 1 MHz. Une autre limitation permet de fixer le choix des fréquences d'émission : afin de limiter d'éventuels couplages capacitifs entre l'émetteur et le récepteur, les fréquences ne doivent pas être trop élevées. On les choisira entre 1 et 10 MHz. Finalement, un changement de fréquences d'émission est possible, la même bobine émettrice pouvant être utilisée pour l'ensemble de la gamme de fréquences choisies.

Le prototype de mesure possède donc les caractéristiques suivantes :

- Configuration de mesure : PERP
- Fréquence de travail utilisée : $f = 1,56 \text{ MHz}$
- Ecartement entre les bobines : 1,2 m

Une fois les caractéristiques du prototype définies, il faut choisir les composants, tant d'un point de vue mécanique qu'électronique, les plus adaptés à la construction de l'appareil et présentés dans la partie III-3.

De plus, nous avons observé que les rapports de champs calculés ne varient pas de manière linéaire en fonction des différents paramètres étudiés, et notamment de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique. Il faudra donc étudier les variations des champs mesurés en fonction des paramètres électriques et utiliser une méthode d'inversion pour retrouver les paramètres électriques à partir des valeurs de H_s/H_p .

3. Inversion du couple (σ ; ϵ)

Une fois la configuration adoptée et comme il est d'usage dans l'ensemble des méthodes électriques et électromagnétiques, les résultats obtenus sont exprimés en terme de propriétés apparentes, i.e. propriétés qui seraient celles d'un sol homogène possédant la même réponse au champ magnétique appliqué : conductivité (ou résistivité) électrique apparente et permittivité diélectrique relative apparente. La détermination de ces propriétés est univoque si la fréquence, l'orientation des bobines, leur altitude et l'écartement inter-bobine sont fixes et si la profondeur d'investigation est définie. Une variation de la fréquence, de l'altitude de mesure et/ou de l'écartement inter-bobines permettrait de modifier cette profondeur d'investigation et ainsi de réaliser un sondage des paramètres électriques. Ces variations donneraient ainsi des indications sur l'évolution des paramètres électriques avec la profondeur, nécessitant une interprétation complexe en termes de terrains tabulaires à chaque point de mesure. Cette interprétation n'est pas abordée dans la partie expérimentale de ce travail car nous présentons les résultats obtenus à 1,56 MHz, les autres paramètres étant fixes.

Les deux propriétés apparentes sont donc déterminées en utilisant un modèle de terrain homogène. Les modélisations effectuées pour un terrain homogène (cf. chapitre 3-2.4) montrent qu'il n'existe pas, comme c'est le cas pour des faibles nombres d'induction, de relations de proportionnalité directes entre la conductivité électrique ou la permittivité diélectrique et les rapports de champs mesurés. L'utilisation d'abaques va permettre dans un premier temps de visualiser les relations existantes et d'évaluer la possibilité de restituer les valeurs des deux propriétés. Les abaques présentés dans la figure III-17 ont été obtenus en faisant varier la conductivité électrique entre 0,2 mS/m et 200 mS/m ($\rho \in [5; 5000] \Omega.m$) et la permittivité diélectrique relative entre 1 et 1000, pour une susceptibilité magnétique de 50.10^{-5} uSI, une configuration PERP, un écartement inter-bobines de 1,2 m et une hauteur de l'appareil par rapport au sol de 0,2 m. Les résultats sont présentés pour trois fréquences différentes : 1,56 MHz ; 3,03 MHz ; 4,49 MHz.

On observe que les deux jeux de courbes sont quasi-orthogonaux. Ils forment toujours un angle suffisant pour que la détermination de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique soit aisée. A un couple $Re(H_s/H_p)$ et $Im(H_s/H_p)$ correspondra donc une valeur de conductivité électrique et une valeur de permittivité diélectrique.

En fonction de la fréquence, on observe différents degrés de dépendance entre les paramètres électriques et les parties réelles et imaginaires des champs :

- $f = 1,56 \text{ MHz}$: La conductivité électrique et la permittivité diélectrique influencent de manière symétrique les parties réelles et imaginaires des champs.
- $f = 3,03 \text{ MHz}$: Pour les permittivités diélectriques les plus élevées ($\varepsilon \geq 500$), la conductivité électrique sera déterminée majoritairement à partir de $Re(H_s/H_p)$ et la permittivité diélectrique à partir de $Im(H_s/H_p)$. Lorsque la permittivité diélectrique diminue, les valeurs de $Re(H_s/H_p)$ et $Im(H_s/H_p)$ seront nécessaires pour déterminer les deux paramètres électriques.
- $f = 4,49 \text{ MHz}$: Pour les permittivités diélectriques les plus faibles ($\varepsilon \leq 500$), la conductivité électrique sera déterminée principalement à partir de $Re(H_s/H_p)$ et la permittivité diélectrique à partir de $Im(H_s/H_p)$. Lorsque la permittivité augmente, les valeurs de $Re(H_s/H_p)$ et $Im(H_s/H_p)$ devront être prises en compte afin de déterminer la permittivité diélectrique et la conductivité électrique.

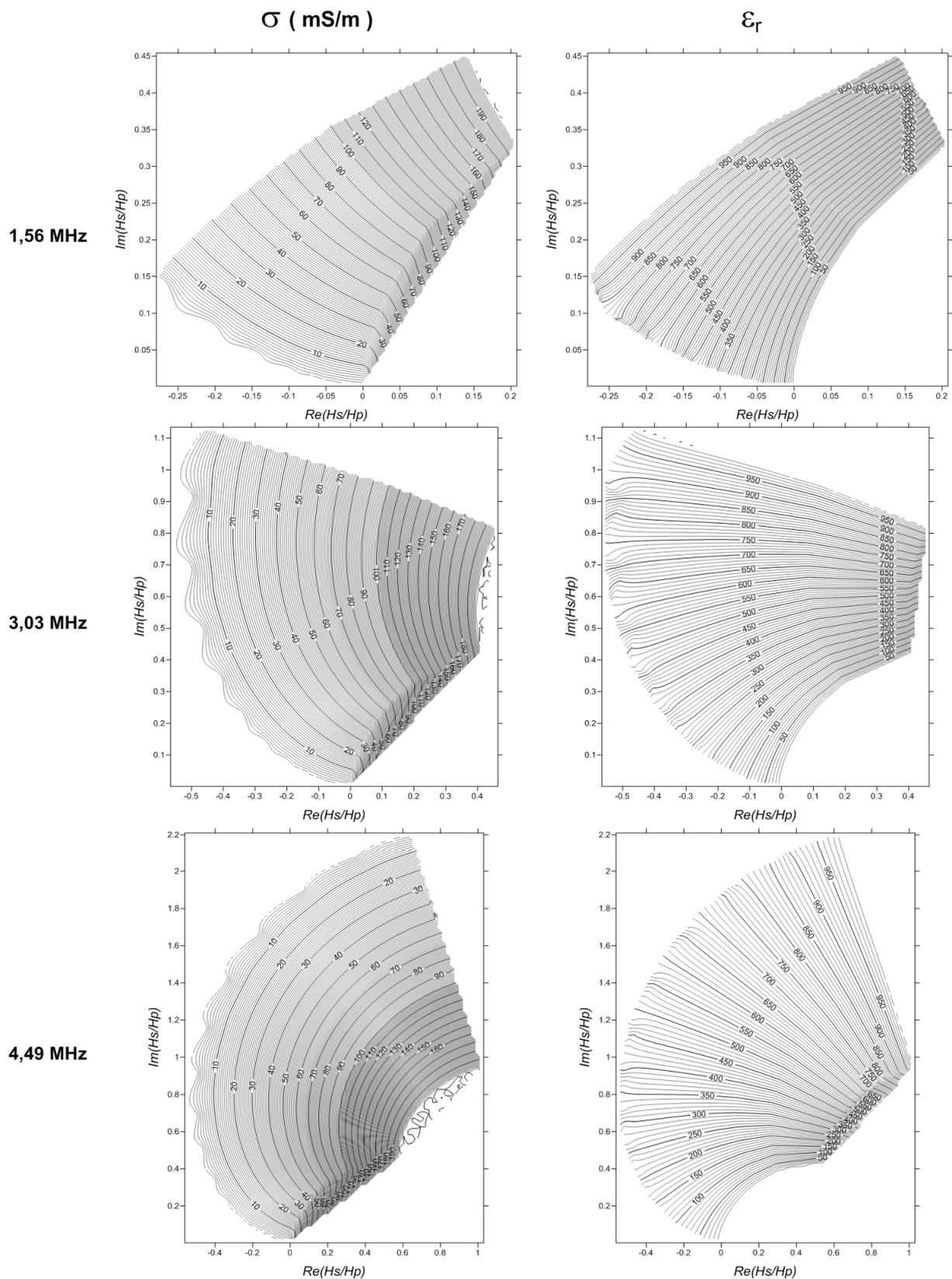


Figure III-17 : Variation de la conductivité électrique σ (mS/m) et de la permittivité diélectrique relative ϵ_r , en fonction des valeurs de la partie réelle $Re(H_s/H_p)$ et de la partie imaginaire $Im(H_s/H_p)$, pour des bobines émettrice T_x et réceptrice R_x perpendiculaires espacées de 1,2 m, à 0,2 m au-dessus du sol et pour 3 fréquences de mesure : 1,56 MHz ; 3,03 MHz ; 4,49 MHz.

La détermination de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique apparentes à partir des mesures de champs magnétiques en phase et en quadrature est donc possible pour l'ensemble de la gamme de fréquences étudiées. Cependant, il faut tenir compte à la fois de la phase et de la quadrature des champs pour retrouver ces paramètres. Les abaques se prêtant mal à un traitement rapide des mesures, un algorithme d'inversion basé sur la méthode de Newton-Raphson pour un système non linéaire d'équations (Press *et al.*, 1992) est utilisé en complément du modèle du sol homogène. Les étapes du calcul sont détaillées ci-dessous.

On cherche, par approximations successives, à retrouver la conductivité électrique σ et la permittivité diélectrique ε pour lesquelles les valeurs de $Re(H_s/H_p)$ et $Im(H_s/H_p)$ calculées coïncident avec les valeurs mesurées. En d'autres termes, on cherche à résoudre le système d'équations suivant :

$$\begin{aligned} Re_{mes} - Re_{cal}(\sigma, \varepsilon) &= 0 \\ Im_{mes} - Im_{cal}(\sigma, \varepsilon) &= 0 \end{aligned} \quad (III-8)$$

avec Re_{mes} partie réelle du rapport H_s/H_p mesurée par le prototype
 Im_{mes} partie imaginaire du rapport H_s/H_p mesurée par le prototype
 $Re_{cal}(\sigma, \varepsilon)$ partie réelle du rapport H_s/H_p calculée à partir d'un couple (σ, ε) donné
 $Im_{cal}(\sigma, \varepsilon)$ partie imaginaire du rapport H_s/H_p calculée à partir d'un couple (σ, ε) donné

A partir des paramètres *a priori* du modèle σ_0 et ε_0 , on cherche les valeurs de σ et ε qui permettent de résoudre le système précédent par ajout successif de petites quantités $\delta\sigma$ et $\delta\varepsilon$. A chaque itération i , on recalcule $Re(\sigma_i, \varepsilon_i)$ et $Im(\sigma_i, \varepsilon_i)$ avec $\sigma_i = \sigma_{i-1} + \delta\sigma$ et $\varepsilon_i = \varepsilon_{i-1} + \delta\varepsilon$. Au voisinage des valeurs de σ_{i-1} et ε_{i-1} , on peut écrire $Re(\sigma_i, \varepsilon_i)$ et $Im(\sigma_i, \varepsilon_i)$ sous forme de série de Taylor. En négligeant les termes du second ordre et en posant $Re(\sigma_i, \varepsilon_i) = 0$, on obtient un système de deux équations à deux inconnues ($\delta\sigma$ et $\delta\varepsilon$) à résoudre après avoir calculé les quatre dérivées partielles :

$$\begin{aligned} Re_{mes} &= Re_{cal}(\sigma_{i-1}, \varepsilon_{i-1}) + \left. \frac{\delta Re_{cal}}{\delta\sigma} \right|_{\sigma=\sigma_{i-1}} \cdot \delta\sigma + \left. \frac{\delta Re_{cal}}{\delta\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_{i-1}} \cdot \delta\varepsilon \\ Im_{mes} &= Im_{cal}(\sigma_{i-1}, \varepsilon_{i-1}) + \left. \frac{\delta Im_{cal}}{\delta\sigma} \right|_{\sigma=\sigma_{i-1}} \cdot \delta\sigma + \left. \frac{\delta Im_{cal}}{\delta\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_{i-1}} \cdot \delta\varepsilon \end{aligned} \quad (III-9)$$

Le processus itératif se termine si la somme de l'ensemble des différences $Re_{mes} - Re_{cal}(\sigma, \varepsilon)$ et $Im_{mes} - Im_{cal}(\sigma, \varepsilon)$ et la somme de l'ensemble des couples $\delta\sigma$ et $\delta\varepsilon$ sont inférieures à une valeur que l'on fixe à 10^{-6} dans cette étude.

4. Réalisation technique et étalonnage du prototype

A partir des résultats de modélisation, un prototype possédant une géométrie Slingram perpendiculaire a été développé. Nous l'avons nommé CE120, acronyme qui peut s'expliquer par :

C = conductivité électrique

E = epsilon (permittivité diélectrique)

120 = 120 cm d'écartement inter-bobine

La bobine émettrice T_x est d'axe horizontal (assimilé à un dipôle magnétique horizontal ou DMH) et la bobine réceptrice R_x d'axe vertical (Figure III-18). Cette configuration est en théorie strictement équivalente à celle où l'émettrice serait d'axe vertical et la réceptrice d'axe horizontal, mais l'influence des champs EM créés par les émetteurs LF-MF est ainsi limitée et le rapport signal sur bruit amélioré.

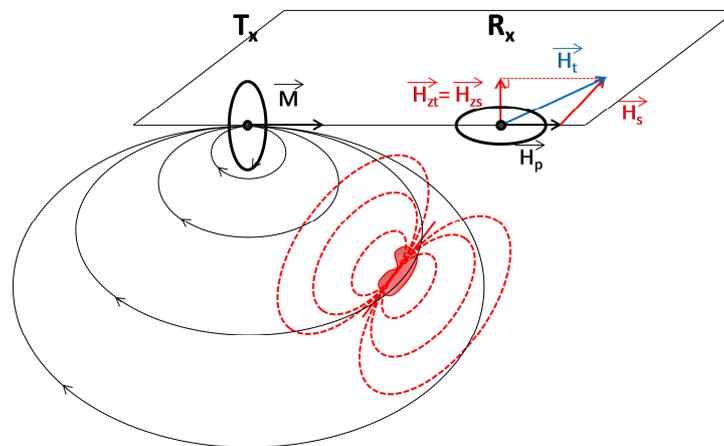


Figure III-18 : Représentation du dispositif de mesure de type Slingram en configuration PERP avec un DMH de moment \vec{M} et une bobine réceptrice mesurant la composante verticale \vec{H}_{zs} du champ créé par une cible en sous-sol.

Après une étude des différents composants du prototype, des premiers tests doivent être menés afin d'évaluer la réponse de l'appareil à des variations contrôlées des paramètres électriques : réponse à un objet de caractéristiques connues (boule en aluminium) et réponse à une variation de hauteur du prototype par rapport au sol.

4.1. Caractéristiques techniques du prototype

La construction du prototype de mesure comporte des choix quant aux solutions mécaniques, mais aussi électroniques.

Afin d'assurer la rigidité mécanique du prototype, un matériau composite à base de fibres de verre et d'araldite compacté et pultrudé est choisi pour l'ensemble du prototype, à l'exception des bobines et du support des circuits électroniques qui sont en polyoxyméthylène (Delrin®), matériau plus aisé à usiner. Pour faciliter le maniement de l'appareil sur le terrain, il est disposé sur un chariot (Figure III-19) également composé de matériau composite et de delrin. Afin de limiter un maximum les efforts mécaniques sur le prototype de mesure, le chariot maintient l'ensemble du dispositif par

sa poignée. De plus, des bandes élastiques sont disposées sur le chariot pour amortir les efforts mécaniques associés aux déplacements du prototype. Tous les matériaux utilisés sont non conducteurs et de faible permittivité.

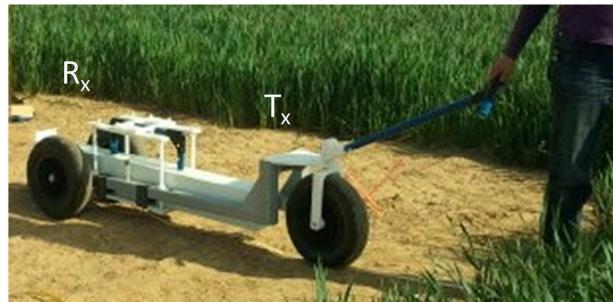


Figure III-19 : Dispositif de mesure composé du CE120 posé sur son chariot en fonctionnement sur le site expérimental de l'ORE ACBB (INRA).

D'un point de vue électronique, le prototype est composé de quatre éléments indépendants positionnés sur le même axe (Figure III-20) : la bobine émettrice T_x , la bobine de référence de phase, la bobine réceptrice R_x ainsi que les circuits électroniques d'émission et de réception et la batterie qui sont placés au centre du dispositif afin de limiter le bruit EM lié au rayonnement des différents composants.



Figure III-20 : Positionnement des éléments composant le prototype.

Avant de détailler le rôle de chaque bobine, leurs principales caractéristiques sont présentées sur le tableau III-3 ci-dessous :

Bobine	Nombre de spires N	Inductance L (μH)	Résistance (Ω)	Capacité répartie C (pF)	Fréquence de résonance
Emettrice	9	15	≤ 1	5,2	18 MHz
Référence	$2 \times 7 = 14$	$2 \times 7,65$	≤ 1	22,9 pour une bobine de 7 spires	12 MHz
Réceptrice	$2 \times 7 = 14$	$2 \times 7,65$	≤ 1	22,9 pour une bobine de 7 spires	12 MHz

Tableau III-3 : Caractéristiques électroniques des bobines employées.

Bobine émettrice

La bobine est une boucle d'axe horizontal qui peut être considérée comme un dipôle magnétique horizontal (DMH) (Figure III-21). Cette approximation est valable à mieux que 10% si la distance r entre la source et la cible est supérieure ou égale à 5 fois le rayon de la boucle d'émission (soit $r \geq 25 \text{ cm}$). Si tel n'était pas le cas, on aurait représenté la boucle d'émission comme une succession de dipôles électriques, la longueur de chaque dipôle n'excédant pas le dixième de la distance source/cible.

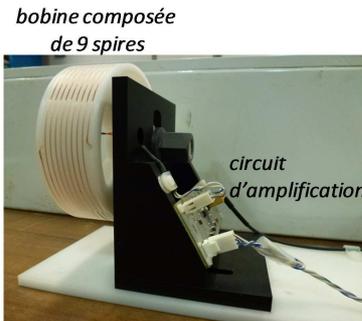


Figure III-21 : Bobine émettrice R_x .

L'oscillateur choisi possède une fréquence de 50 MHz que l'on divise par 2 par précaution vis-à-vis du processeur et des convertisseurs analogiques/numériques. Les fréquences de mesure possibles seront donc des diviseurs de 25 MHz : $f = 25 \text{ MHz} / 2^{N_i}$, avec N_i nombre entier. Un deuxième diviseur numérique permet de multiplier encore le nombre de fréquences de mesure possible. Les résultats présentés ont été effectués pour une fréquence d'émission égale à 1,56 MHz.

Bobine réceptrice et bobine de référence de phase

Travailler aux fréquences moyennes implique de construire des bobines ayant une fréquence de résonance suffisamment élevée pour mesurer le champ secondaire, tout en conservant un signal mesuré suffisamment élevé par rapport aux bruits EM. Les bobines réceptrices et de référence de phase possèdent des caractéristiques identiques afin de garantir la synchronisation des enregistrements et la bonne correction du déphasage (Figures III-21 et III-22) :

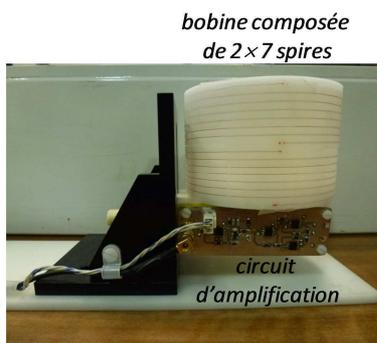


Figure III-22 : Bobine réceptrice T_x .

- *même géométrie :*

Les bobines sont en réalité composées de deux bobines de sept spires. Ce dédoublement permet de diviser l'inductance totale par $\sqrt{2}$, et donc d'augmenter la fréquence de résonance du système. De plus, le nombre de spires étant faible, celui-ci permet également d'augmenter la fréquence de résonance des bobines. Les valeurs de champ mesuré aux fréquences moyennes étant suffisamment importantes, le faible nombre de spires ne limite pas la mesure du signal.

- *3 étages d'amplification :*

Le circuit d'amplification des deux bobines est placé au même endroit sur la bobine et non pas sur les circuits électroniques centraux afin de limiter l'influence de champs produits par le rayonnement des câbles. Trois étages d'amplification sont présents :

- un étage différentiel (AOP = Amplificateur opérationnel)
- un étage de filtrage (filtre passe-bande)
- un étage d'amplification avec un gain dix fois plus important pour la bobine réceptrice que pour la bobine de référence de phase.

Circuits électroniques

Les tensions mesurées sont ensuite échantillonnées à $25 \cdot 10^6$ échantillons par seconde dans les deux CAN (Convertisseurs Analogiques/ Numériques) (Figure III-23). Pour les fréquences de mesure utilisées, on obtient donc un échantillonnage de 5-6 échantillons par période pour 4,49 MHz et 16-17 échantillons par période pour 1,56 MHz. Le théorème de Nyquist-Shannon est donc bien respecté. Après traitement numérique au sein du circuit logique programmable (FPGA = Field-programmable gate array), les valeurs des champs mesurés en phase et en quadrature sont envoyées au PC de commande par liaison Bluetooth. Ces valeurs sont exprimées en digit. Il reste à les transformer en rapport de champ secondaire sur le champ primaire mesuré (en ppm) en les multipliant par un coefficient d'étalonnage pour la phase et la quadrature. Ce coefficient est déterminé à l'aide de mesures sur des objets de caractéristiques connues présentés dans la partie suivante.

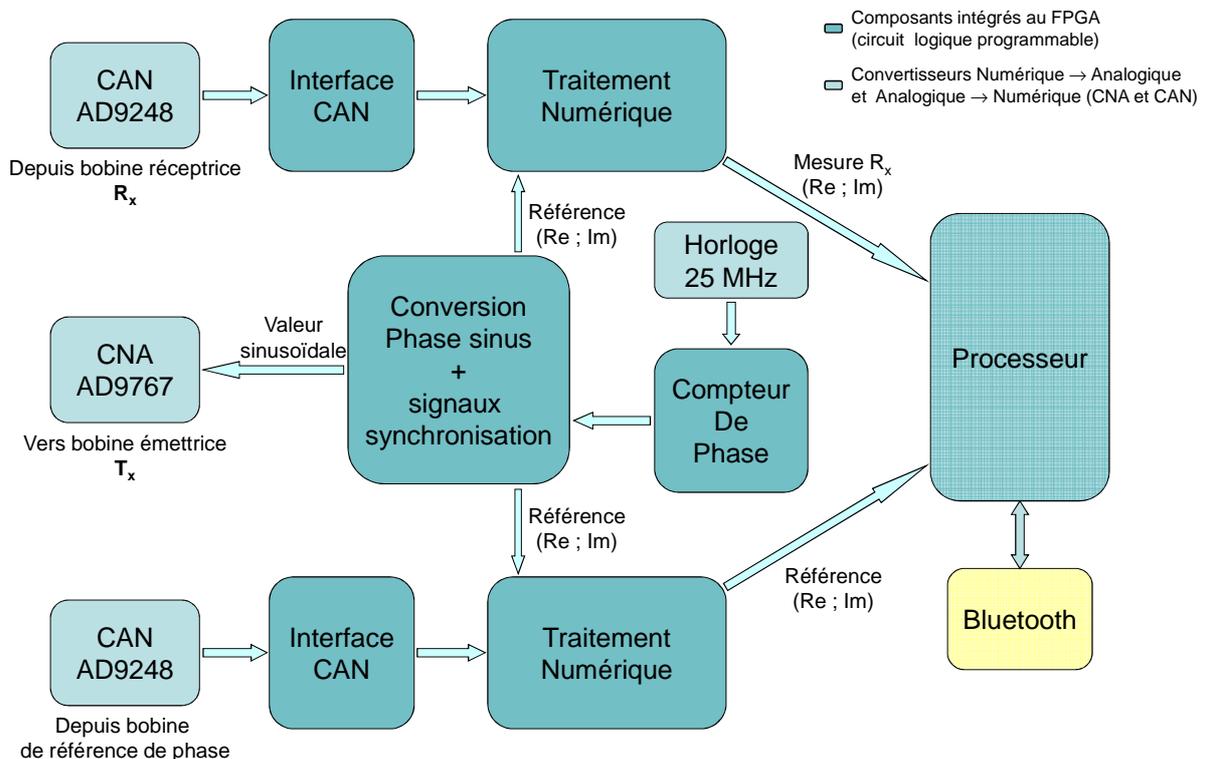


Figure III-23 : Principaux composants des circuits électriques placés au centre du dispositif.

4.2. Etalonnage à la boule

Les tensions mesurées sont numérisées et exprimées en digits. Afin de retrouver les valeurs des champs magnétiques mesurés en nT, la réponse de l'appareil à un objet de géométrie simple et de caractéristiques connues est comparée avec le résultat obtenu par modélisation du même objet. Tous les champs étant normalisés par le champ primaire $H_p = |H_{static}| = 1/4\pi r^3$, on cherche donc un coefficient d'étalonnage permettant de retrouver les valeurs de H_s/H_p (en ppm ou en %) à partir des mesures de tensions.

Les premiers tests menés sur un objet ayant une réponse connue permettent ainsi à la fois de :

- vérifier le bon fonctionnement de l'appareil en contrôlant la forme des courbes obtenues en fonction de la position relative de l'objet par rapport au prototype,
- effectuer un étalonnage de l'appareil en calculant le coefficient d'étalonnage associé, en prenant globalement en compte les différents gains des étages de la chaîne électronique.

Une boule conductrice de 10 cm de diamètre en aluminium ($\sigma = 1,96 \cdot 10^7$ S/m, $\epsilon = 9,5$, $K_{ph} = 2,2 \cdot 10^5$ uSI, d'après Thiesson, 2007) est déplacée le long de deux profils orthogonaux (Figure III-24) :

- un profil latéral, parallèle au dispositif
- un profil transversal perpendiculaire au prototype et passant par son centre.

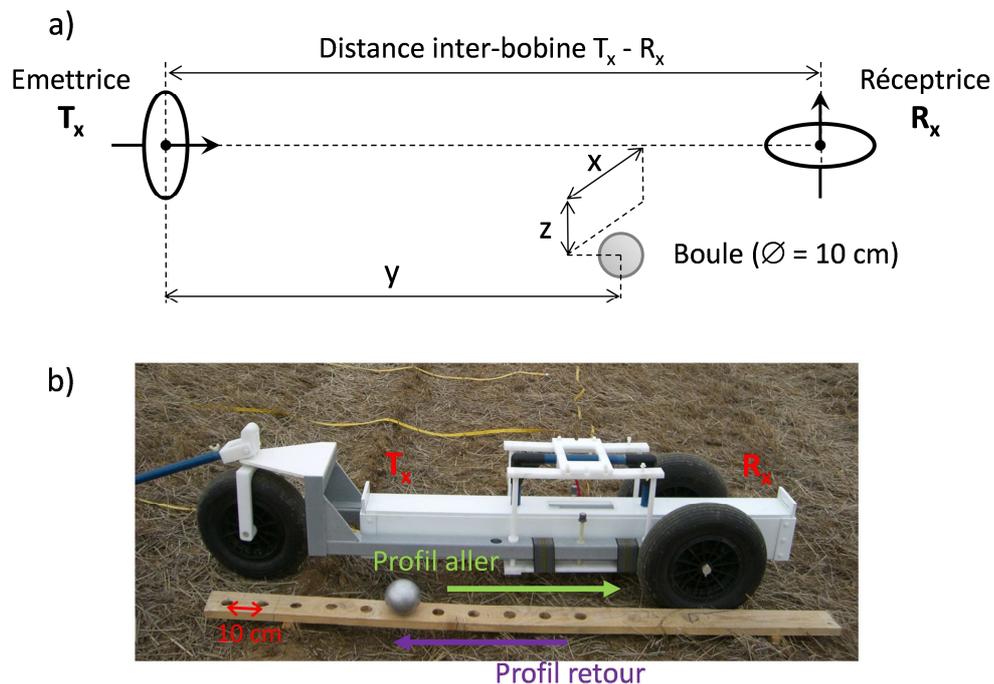


Figure III-24: a) Géométrie du problème modélisé (d'après Thiesson, 2007). b) Exemple d'étalonnage à la boule - profil latéral.

Modélisation

D'après le calcul du champ magnétique réémis par une sphère, mesuré par un dispositif Slingram, détaillé en annexe (Annexe A3), le champ magnétique mesuré dans l'air sera exclusivement réel, et égal à :

$$\begin{aligned} [H_r]_{air} &= \left(-\frac{a^3}{r^3} + 1 \right) H_0 \cos\theta \\ [H_\theta]_{air} &= \left(-\frac{a^3}{2r^3} - 1 \right) H_0 \sin\theta \\ [H_\varphi]_{air} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III-10})$$

Les mesures de la réponse de l'appareil à la présence d'une sphère conductrice devront donc être réelles (déphasage nul) et permettrons de déterminer le coefficient d'étalonnage de la partie réelle du champ.

Comparaison avec les mesures

Les résultats des profils latéral et transversal pour la fréquence de mesure employée dans l'étude (1,56 MHz) sont présentés sur la figure III-25. Les variations des champs mesurés en fonction de la position de la boule correspondent bien avec les valeurs calculées à partir des modélisations. On observe une réponse non nulle de la partie imaginaire qui sera corrigée dans les mesures par une rotation de phase de 2° dans les mesures *in situ*.

Une dissymétrie est observée dans les résultats de mesure, la configuration Slingram PERP choisie étant elle-même dissymétrique. En $x=0$, une mesure à vide (sans la boule) a été effectuée. On retrouve alors des valeurs identiques aux mesures lorsque la boule est loin de l'appareil, donc lorsque son influence devient négligeable.

Le coefficient d'étalonnage moyen est donc égal à 3,1 ppm par digit de tension mesurée pour une fréquence de 1,56 MHz.

Il est à noter que ces variations ne sont pas des variations absolues car le zéro de l'appareil n'est pas connu. De plus, cet étalonnage ne permet pas de contrôler la présence d'un éventuel offset lié à une mauvaise prise en compte des différents étages d'amplifications. En effet, dans la méthodologie de l'étalonnage à la boule, l'appareil est fixe et la boule est déplacée. On s'intéresse alors uniquement à la variation du champ mesuré par rapport à une valeur de référence qui est la réponse du sol au point fixe de mesure.

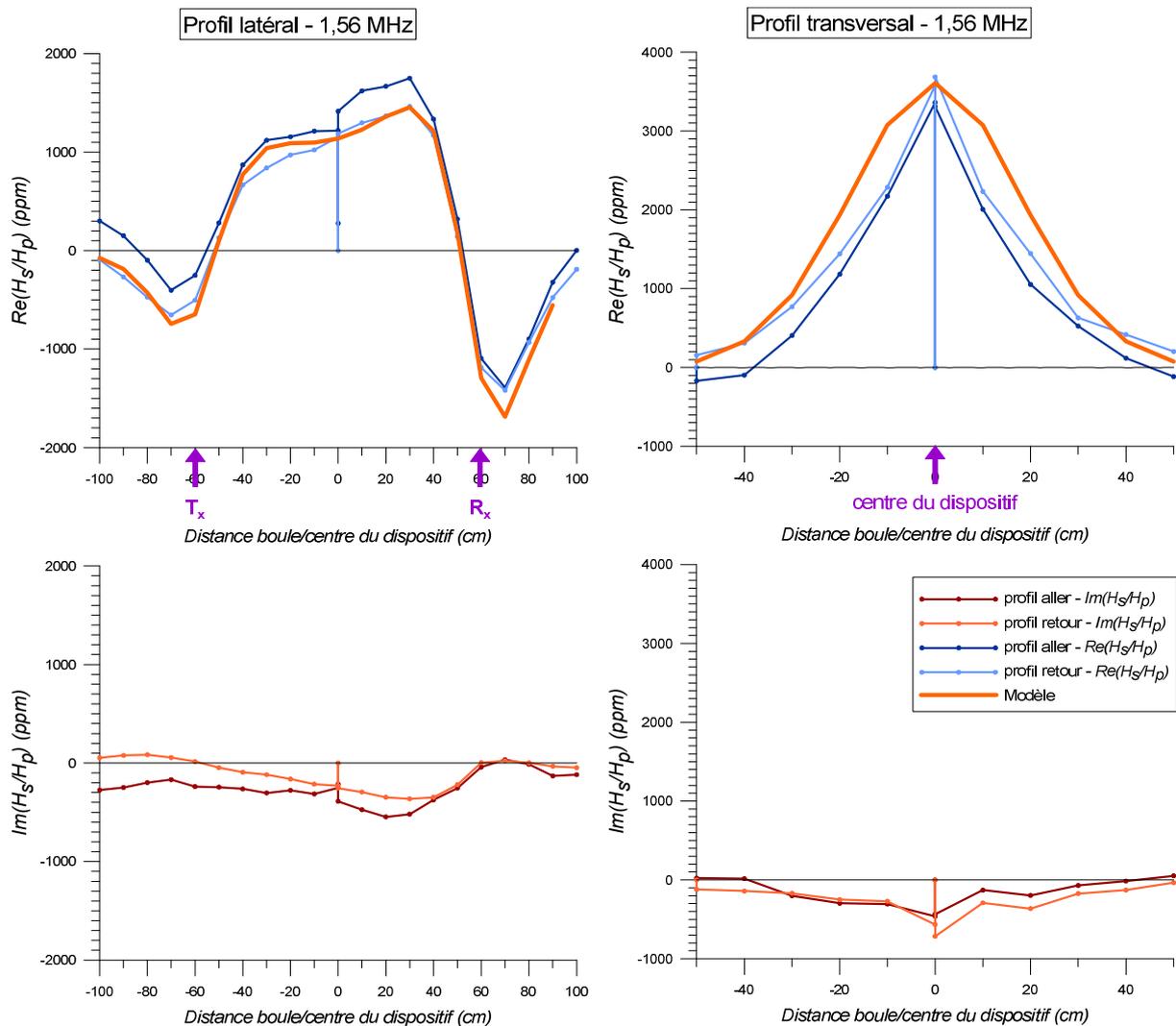


Figure III-25 : Comparaison des modèles et des mesures effectuées en déplaçant la sphère suivant des profils latéral et transversal à 1,56 MHz. Au centre du dispositif, une mesure à vide a été répétée afin de contrôler la variation de la valeur de référence de l'appareil.

Une deuxième expérience comparant les réponses d'un terrain homogène en fonction de la hauteur de l'appareil par rapport au sol va permettre de contrôler le coefficient d'étalonnage en phase et en quadrature, la présence éventuel d'un offset à corriger et d'estimer le zéro de l'appareil.

Au cours du temps, les composants de l'appareil peuvent être amenés à se modifier légèrement (usure, léger déplacement,...), faisant ainsi varier le zéro de l'appareil. Sa valeur devra donc être estimée au cours de chaque nouvelle prospection à partir d'une mesure à une altitude fixe suffisamment élevée. Compte-tenu du matériel disponible, nous effectuons cette mesure de référence à 1,13 m du sol, altitude correspondant à la hauteur du prototype placé sur une succession de cales en bois.

4.3. Etude de l'influence de la hauteur du dispositif

Des mesures de variations d'altitude du prototype ont été réalisées sur le site de prospection de Grand (cf. chapitre 3-5.4). Le matériel à disposition a permis d'effectuer des mesures avec le centre des bobines placé entre 0,06 et 1,13 m de hauteur. Les mesures obtenues sur le terrain ont été comparées aux modèles théoriques afin de contrôler le coefficient d'étalonnage obtenu pour les mesures à la boule et la présence d'un éventuel offset.

A partir des mesures électriques au RM15-D et des mesures au CS60, on a pu fixer la résistivité apparente du terrain au point d'étalonnage pour une profondeur d'investigation d'environ 1 m à $200 \Omega.m$. Le modèle de terrain homogène a ensuite été ajusté aux mesures en faisant varier la permittivité diélectrique relative apparente. La meilleure correspondance entre le modèle et les mesures se fait pour une permittivité diélectrique relative égale à 15 (Figure III-26).

On détermine ensuite le coefficient d'étalonnage permettant de convertir les valeurs de tension en rapport de champs. Le coefficient d'étalonnage moyen est égal à 2,7 ppm par digit de tension mesuré pour une fréquence de 1,56 MHz. Ces valeurs sont proches de celles calculées lors de l'étalonnage à la boule. Au vue de ces deux expérimentations, on choisira finalement un coefficient d'étalonnage moyen de 2,9 ppm/digit pour 1,56 MHz.

De plus, le signal mesuré prenant cette fois en compte la réponse du sol, il permet de vérifier la présence d'un offset à corriger dans les mesures. Pour une fréquence de mesure de 1,56 MHz, on observe la présence d'un offset de 12 000 digits pour la partie réelle de la tension mesurée et de -20 000 digits pour la partie imaginaire de la tension mesurée.

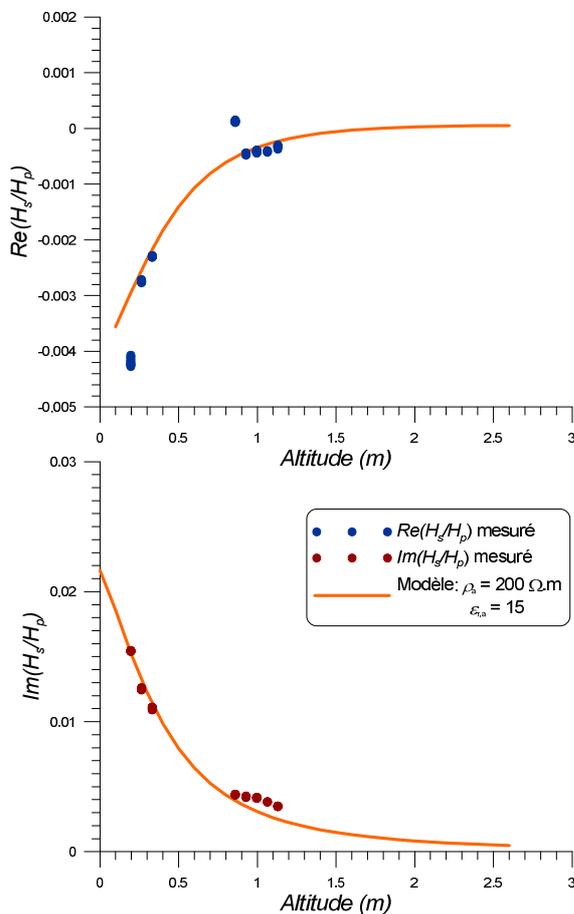


Figure III-26 : Comparaison entre les mesures des champs magnétiques avec altitude par rapport au sol et un modèle de sol homogène ($\rho = 200 \Omega.m$ et $\epsilon_r = 15$).

5. Mesures *in situ*

Afin de tester le prototype de mesure, plusieurs expérimentations ont été menées sur des sols de nature différente. Les mesures effectuées avec le prototype sont comparées avec plusieurs mesures géophysiques différentes dont le principe est rappelé dans le premier paragraphe. Elles sont complétées par des mesures directes de teneurs en eau massique sur des prélèvements de sols.

5.1. Présentation des appareils géophysiques employés

Trois appareils de mesure différents ont été employés afin de comparer leur réponse sur les différents sites d'étude *in situ* à celle du prototype de mesure.

Le résistivimètre RM15-D (Geoscan Research) permet de cartographier la résistivité électrique très basse fréquence sur trois profondeurs d'investigation différentes : 0,5, 1 et 2 m proche de la profondeur d'investigation du CE120. L'utilisation du RM15-D permet donc de comparer les conductivités électriques mesurées avec le CE120 sur des profondeurs d'investigation similaires. Le résistivimètre RMCA-4 est employé dans le but d'effectuer des sondages de résistivité électrique afin de prendre en compte les variations verticales de la résistivité électrique dans l'interprétation des mesures au CE120. Enfin, le CS60 (prototype de l'UMR Sisyphe) est un dispositif de mesure EMI permettant d'évaluer la conductivité électrique sur 1 m de profondeur en moyenne et la susceptibilité magnétique sur 40 cm.

Ces dispositifs, possédant des profondeurs d'investigation proches de celle de prototype de mesure, permettent donc un contrôle des valeurs de conductivité électrique retrouvées au CE120. Il aurait également été intéressant de comparer les valeurs de permittivité obtenues avec celles mesurées à l'aide d'un radar-sol, mais la disponibilité du matériel n'a pas permis d'employer cette technologie.

Résistivimètre RM15-D de Geoscan Research

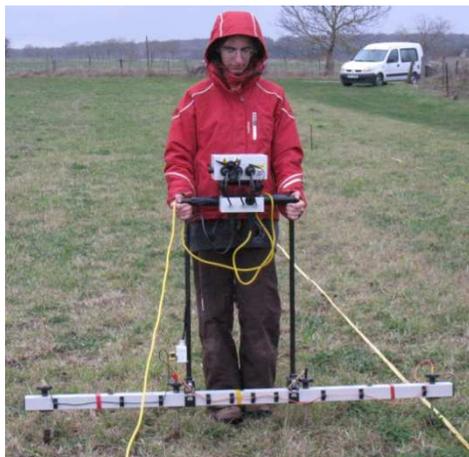


Figure III-27 : Résistivimètre RM15-D couplé au multiplexeur MPX-15, associé au porte-électrodes.

Le résistivimètre RM15-D (Figure III-27) est un dispositif manuel qui est utilisé en configuration pôle-pôle dans notre étude. Les électrodes de références B et N se situent donc à l'infini (les distances OB, ON et BN devant être 30 fois supérieures à la distance AM, avec O centre du dispositif AM) et les électrodes A et M sont placées sur le porte-électrodes. On a positionné 5 électrodes distantes de 50 cm les unes des autres sur le porte-électrodes, permettant ainsi d'obtenir 7 mesures de résistivité électrique apparente pour chaque planté grâce à la permutation des électrodes par multiplexage (MPX-15). Trois cartes de résistivités électriques, correspondant à des profondeurs d'investigations de l'ordre de 0,5, 1 et 2 m peuvent alors être tracées.

Résistivimètre RMCA-4



Figure III-28 : Résistivimètre RMCA-4 relié à un jeu de 4 électrodes.

Le résistivimètre RMCA-4 (Figure III-28), déjà employé dans les mesures en laboratoire, est ici utilisé pour réaliser trainés et sondages électriques.

Les trainés électriques ont été effectués, sauf mention contraire, avec un écartement inter-électrodes de 1 m en configuration Wenner α ou pôle-pôle.

Les sondages électriques ont été réalisés en configuration Wenner α avec un écartement inter-électrode maximal de 7 m.

Slingram BF CS60



Figure III-29 : CS60 relié à sa console de commande.

Le conductivimètre-susceptibilimètre CS60 (Figure III-29) est un appareil électromagnétique fréquentiel de géométrie Slingram. Les bobines émettrices et réceptrices sont coplanaires et l'appareil peut être utilisé à la fois en configuration VCP et HCP. Sauf mention contraire, la position VCP a été choisie dans les cartes présentées. Avec un écartement inter-bobines de 60 cm et une fréquence d'émission égale à 27,96 kHz, le CS60 permet de mesurer simultanément la conductivité électrique et la susceptibilité magnétique du sous-sol. La profondeur d'investigation atteinte est de l'ordre de 1 m pour la conductivité électrique et de 40 cm pour la susceptibilité magnétique. Il a habituellement été mis en œuvre avec un maillage de 1 m dans notre étude.

5.2. Mesures sur les alluvions sableuses, site de l'INRA à Orléans (Ardon)

Nous avons effectué une série de mesures sur une parcelle du site de l'INRA d'Orléans (Figure III-30). Celui-ci est implanté sur une formation alluviale de sables du Quaternaire. L'intérêt de ce site est la teneur en argile très faible du sol. Il permet donc d'étudier l'influence directe de la teneur en eau sur la mesure de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique aux fréquences moyennes. La texture du sol étant homogène sur l'ensemble de la parcelle, on cherche à créer des variations artificielles de teneurs en eau. Nous avons donc installé une bâche de 6×8 m au centre de la zone de prospection de dimension 20×8 m à partir d'octobre 2010. La parcelle est enherbée sur toute sa surface.

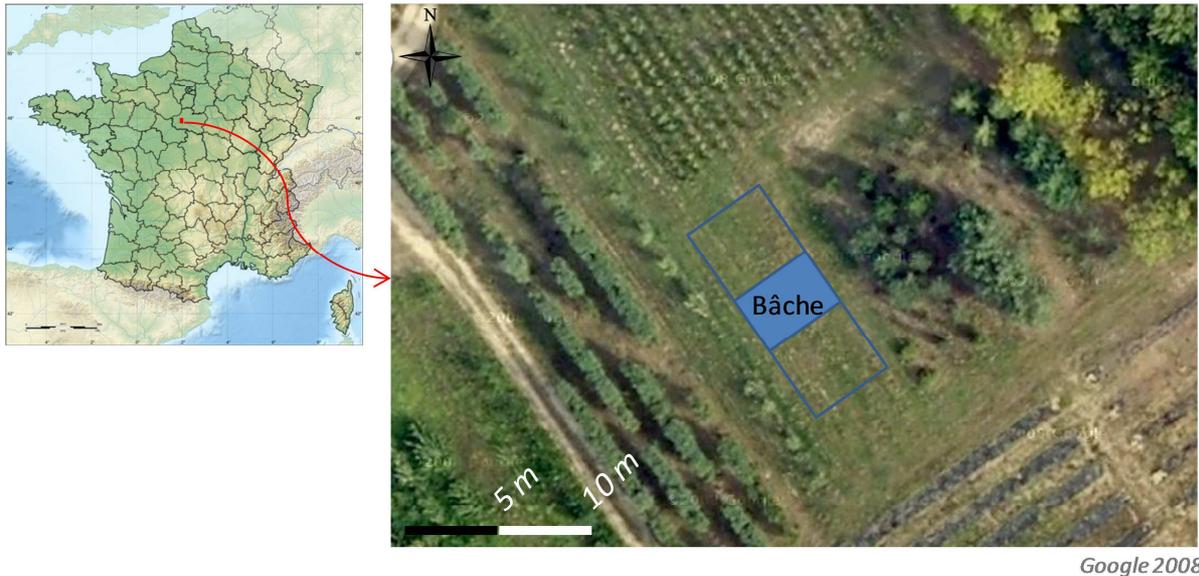


Figure III-30 : Localisation de la zone de prospection sur le site de l'INRA d'Orléans (Ardon).

Des mesures ont été réalisées sur le site au mois de mai 2011. Elles ont été complétées par des mesures de teneur en eau massique, des sondages électriques, ainsi que des cartographies électriques et électromagnétiques basses fréquences. Les mesures de teneurs en eau massiques, rapportées à la masse sèche de l'échantillon, ont été effectuées sur des échantillons prélevés tous les 10 ou 30 cm jusqu'à une profondeur maximale de 90 cm. Nous n'avons en effet pas pu aller au-delà avec une tarière manuelle.

Les sondages ainsi que les cartographies électriques ont été réalisés à l'aide du résistivimètre RMCA-4. Des tests ont été entrepris dans un premier temps avec le RM15-D, mais sa source ne possédait pas une intensité d'injection suffisante pour pouvoir effectuer des mesures étant donné la forte résistance de prise dans ce terrain sableux. Les sondages électriques ont été réalisés en configuration Wenner α et les cartographies en configuration pôle-pôle avec un écartement AM égal à 1 m. Les cartographies électriques et électromagnétique (EM) ont été réalisées suivant un maillage carré de 1 m avec des profils orientés NO-SE (dans la direction de la longueur du terrain).

Des mesures ont également été entreprises avec le dispositif EM basses fréquences CS60, mais les valeurs de champ mesurées sont trop faibles pour être interprétées en termes de conductivité électrique et de susceptibilité magnétique. Il est en effet bien connu que les dispositifs EM basses fréquences sont plus adaptés aux terrains conducteurs.

Observations préliminaires

Un état initial de la parcelle a été établi en septembre 2010 afin d'estimer les variations de différents paramètres du site tant en profondeur que latéralement. Du fait de l'inaptitude de ce sol à retenir l'eau, la teneur en eau massique, mesurée au point P1L1 (Profil 1 m Ligne 1 m), est constante jusqu'à la profondeur maximale atteinte (90 cm) et égale à 7,5 % (Figure III-31).

Afin de comprendre l'organisation verticale du sol, deux sondages électriques ont été réalisés aux points P3L10 et P8L10 (Figures III-31 et III-32). Un modèle à trois couches presque identique pour les deux points permet d'expliquer les variations observées avec moins de 10 % d'erreur. Les couches sont de plus en plus conductrices avec la profondeur :

- la première couche, épaisse de 1 m environ, possède une résistivité importante égale à 3700 $\Omega.m$ en moyenne ;
- à partir de 1 m de profondeur et jusqu'à 3,30 m en moyenne, une deuxième couche de résistivité électrique proche de 750 $\Omega.m$ est présente ;
- une troisième couche de résistivité égale à 100 $\Omega.m$ apparaît à partir de 3,30 m.

Les teneurs en eau massiques étant mesurées jusqu'à 90 cm maximum, il est impossible de déterminer si les variations de résistivités électriques observées sont influencées par ce paramètre. Cependant, on peut conclure à une modification de la nature du sol à partir de 1 m où des matériaux fins pourraient apparaître.

Ces observations sur les variations verticales des propriétés du sol sont complétées par une cartographie électrique de type pôle-pôle (Figure III-33). Le terrain est globalement homogène et très résistant (résistivité électrique moyenne égale à 1700 $\Omega.m$), à l'exception de l'extrémité nord de la carte, de résistivité plus faible (800 $\Omega.m$).

Les effets consécutifs à l'installation de la bâche ont été contrôlés en mars 2011. La bâche a permis de limiter l'évapotranspiration du sol, ainsi que l'infiltration d'eau. Ce deuxième mécanisme est mineur compte tenu de la nature très poreuse du sol et de la saison. La bâche a également favorisé l'implantation de terriers de petits mammifères sur l'ensemble de la zone couverte, perturbant ainsi la structure superficielle du sol.

Les teneurs en eau massiques ont été mesurées en quatre points (Figure III-31) également répartis entre la zone bâchée (points P5.5L12 et P1L11) et la zone non bâchée (P7L3 et P1L18). Elles sont comprises entre 5 et 10 %, croissantes jusqu'à 40 cm de profondeur puis décroissantes. Une différence de 1 % est observée entre le point P1L18 et les autres points de mesure à toutes les profondeurs. Cette différence est liée à la limitation de l'évapotranspiration sous la bâche. Deux sondages électriques sont centrés aux points P5.5L12 et P1L18 où les mesures de teneurs en eau ont également été effectuées. Au point P5.5L12, le modèle inversé est semblable aux modèles obtenus en septembre 2010, auxquels on a adjoint une couche moins résistante en surface ($\rho = 1438 \Omega.m$). Cette variation peut s'expliquer par une teneur en eau un peu plus importante pour la zone bâchée,

liée à la limitation du mécanisme d'évapotranspiration. Au point P1L18, les résistivités électriques obtenues pour le modèle sont très élevées. Pour une profondeur comprise entre 10 et 30 cm, on observe une couche de résistivité supérieure à 20 000 $\Omega.m$, épaisse d'environ 20 cm. A partir de 30 cm de profondeur, on retrouve une couche de résistivité plus faible égale à environ 300 $\Omega.m$.

Les résultats obtenus en sondage électrique sont cohérents avec la cartographie électrique réalisée avec un écartement inter-électrode de 1 m. En effet, on distingue clairement trois zones (Figure III-33) :

- *sous la bâche* : des résistivités électriques plus faibles comprises entre 1 000 et 1 500 $\Omega.m$, proches de la résistivité moyenne mesurée en septembre 2010.
- *en dehors de la bâche* : des résistivités comprises entre 2 500 et 3 500 $\Omega.m$, liées à une teneur en eau plus faible due à l'évapotranspiration.
- *au nord de la zone* : une résistivité plus faible, proche des résistivités observées pour la zone bâchée. Ce contraste, déjà observé en septembre 2010, peut être lié à une variation de la texture du sol.

Des contrastes de résistivités électriques, correspondant à des variations de teneurs en eau, sont donc mesurables entre la zone bâchée et la zone bâchée.

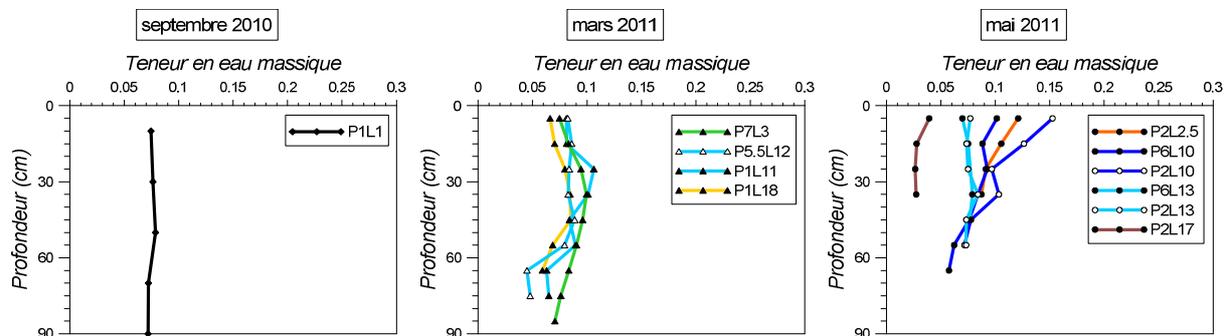


Figure III-31 : Teneurs en eau massiques mesurées tous les 30 cm en septembre 2010 et tous les 10 cm en mars et en mai 2011, jusqu'à une profondeur de 90 cm.

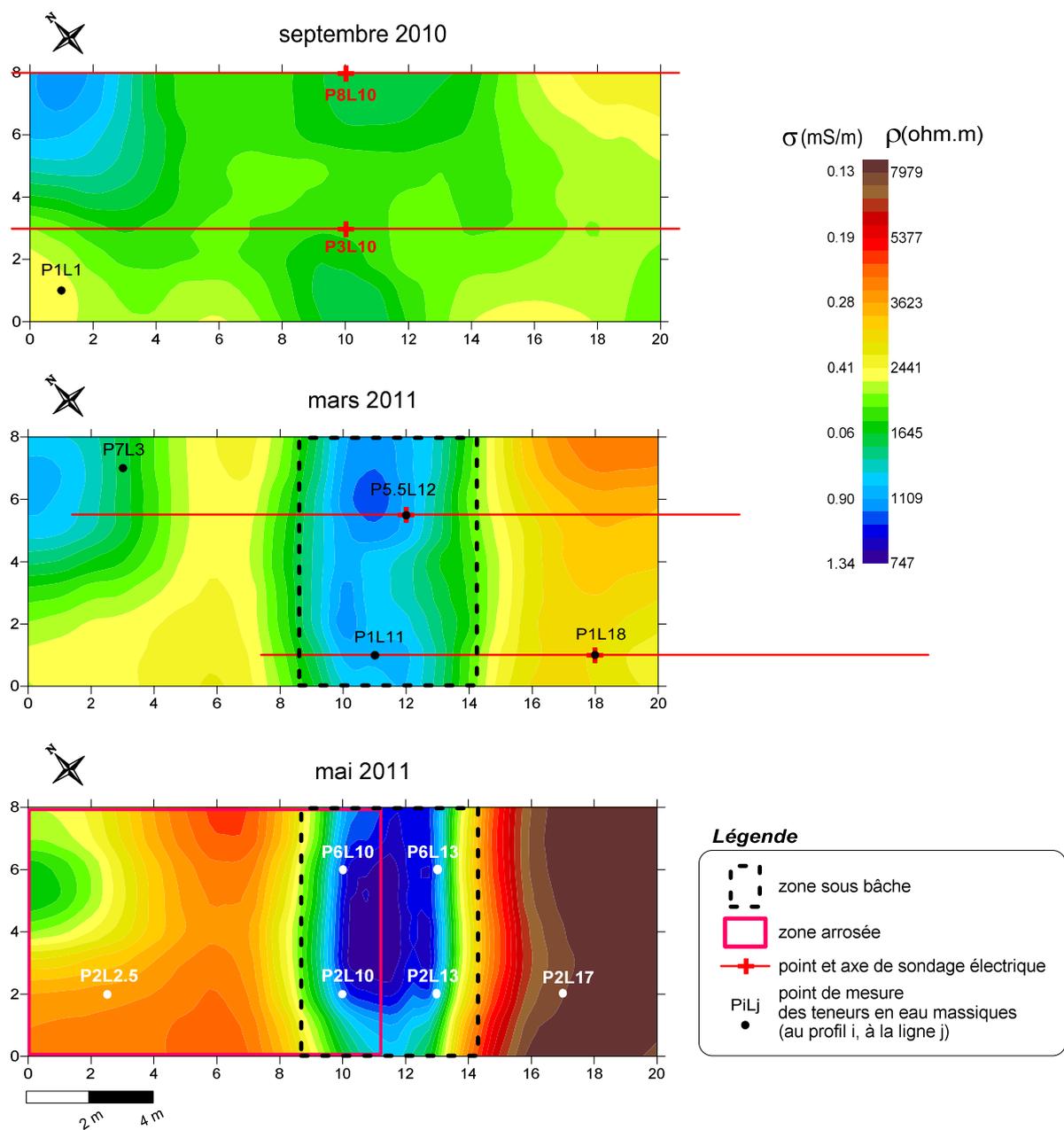


Figure III-32 : Cartes de la résistivité électrique apparente de la parcelle étudiée à l'INRA d'Orléans, établie avec le résistivimètre RMCA-4 pour une configuration pôle-pôle et un écartement inter-électrode de 1 m. Localisation des sondages électriques et des points de mesure de teneurs en eau massiques.

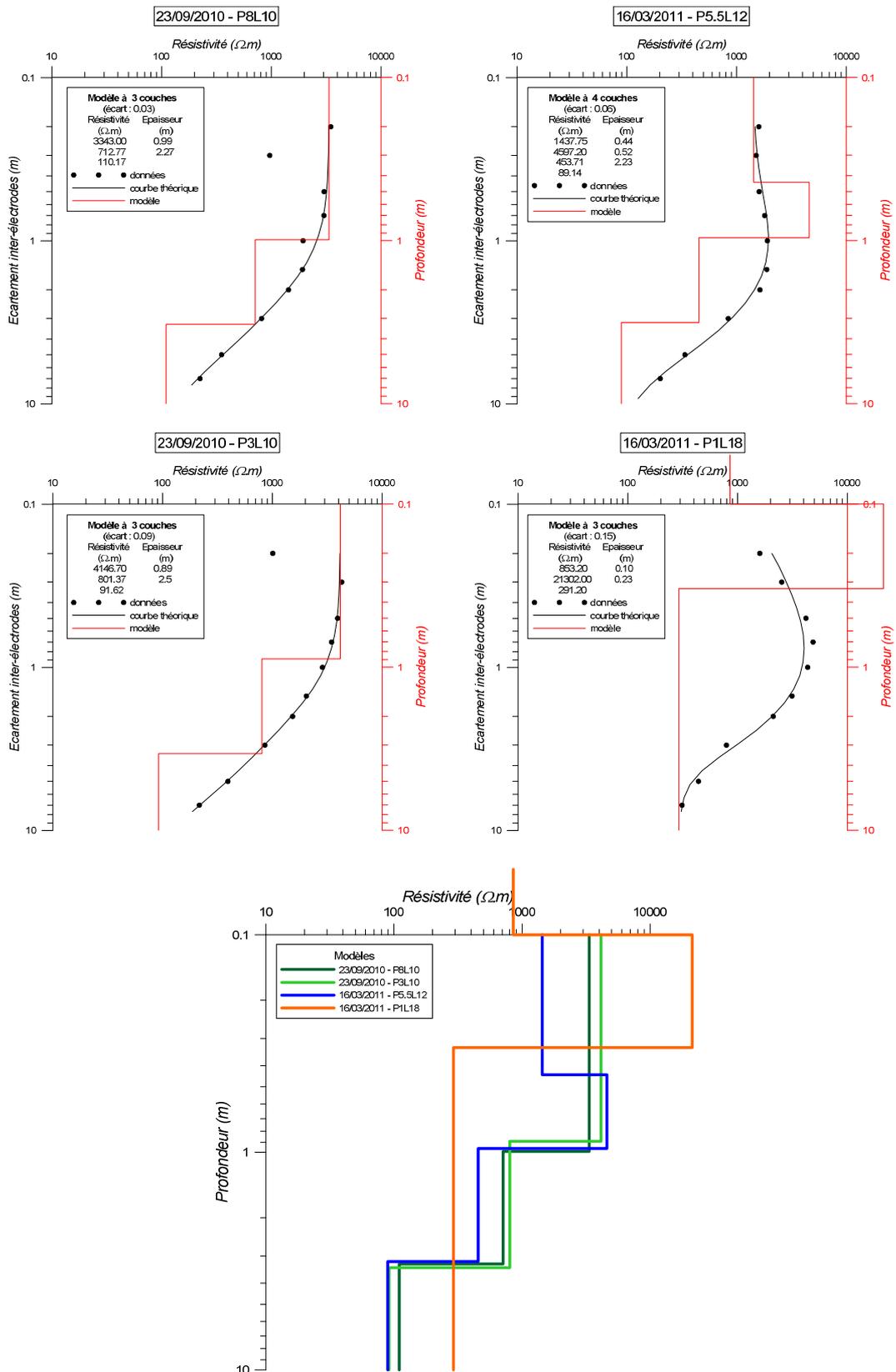


Figure III-33 : Modèles à 3 couches de résistivité électrique obtenus à partir des données de sondage électrique(en configuration Wenner α) de septembre 2010 et mars 2011 aux points P*ilj* définis sur la figure III-32.

Cartographie électromagnétique MF

Une série de mesures à l'aide du prototype de mesure CE120 a été réalisée en mai 2011. Différents éléments ont été mis en place afin d'obtenir plusieurs contrastes de teneurs en eau :

- La bâche, toujours en place depuis le mois de septembre 2010.
- Mise en place d'un arrosage de la moitié nord-ouest du terrain (entre $x=0$ et $x=10$ m), partie bâchée comprise (bâche soulevée) pendant 3 h au cours de l'après-midi précédent les mesures.

Les mesures effectuées à l'aide du prototype permettent d'obtenir des conductivités très faibles (Figure III-34), s'approchant de celles mesurées précédemment à l'aide du résistivimètre : elles varient entre 0,1 et 3 mS/m (soit entre 333 et 1000 ohm.m en résistivité électrique apparente). On ne peut distinguer les différentes zones les unes des autres. On atteint en effet les limites des possibilités de mesure de l'appareil. En effet, les appareils EM de type slingram possèdent de faibles performances en matière de détection de contrastes de résistivités électriques sur des terrains très résistants. Seules les interfaces à la limite entre la zone bâchée et la zone non bâchée du terrain sont marquées. Une modélisation de la reconnaissance de variations 3D des propriétés électriques du sous-sol est prévue pour mieux comprendre ces observations, vraisemblablement liées à l'orientation des bobines.

Il n'en est pas de même pour la permittivité diélectrique. En effet, sur la carte (Figure III-34), on distingue différentes zones :

- *sur la zone non-arrosée :*
La zone non bâchée possède une permittivité diélectrique moyenne de 6 alors que la permittivité diélectrique moyenne de la zone bâchée est égale à 11. Ces contrastes peuvent également être observés en terme de résistivité électrique mesurée à l'aide du résistivimètre RMCA-4 en trainé électrique (Figure III-32). En effet, la résistivité électrique de la zone non bâchée est supérieure à 7 000 Ω .m alors que celle de la zone bâchée est presque dix fois inférieure et vaut en moyenne 800 Ω .m.
- *sur la zone arrosée :*
La permittivité diélectrique moyenne de la zone non bâchée est égale à 10 alors que celle de la zone bâchée est proche de 14. Ces contrastes de teneurs en eaux sont également visibles sur la cartographie de la résistivité électrique DC (Figure III-32) où la résistivité de la zone non bâchée est égale à 4 000 Ω .m en moyenne, à l'exception de la partie nord de la zone où elle est égale à 2 000 Ω .m en moyenne. Le terrain est donc plus conducteur dans cette zone. La jonction entre la zone bâchée et la zone non bâchée est moins nette que dans la partie non arrosée. La résistivité de la zone bâchée arrosée est également sensiblement inférieure à celle de la zone bâchée et non arrosée et vaut en moyenne 760 Ω .m.

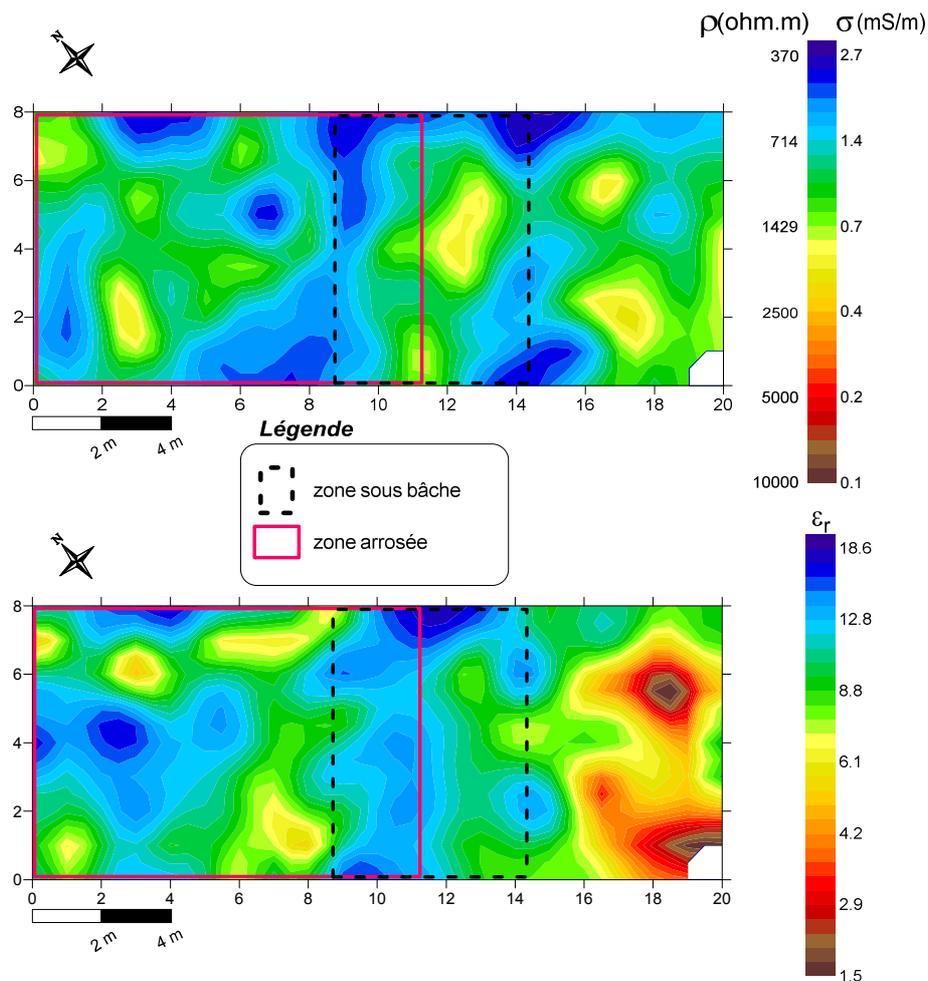


Figure III-34 : Cartes de conductivité électrique apparente et de permittivité diélectrique apparente obtenues à l'aide du prototype EM moyennes fréquences pour une fréquence d'émission de 1,56 MHz.

Les valeurs de permittivité diélectrique relative obtenues, relativement faibles, peuvent s'expliquer par la faible teneur en eau des terrains et leur nature fortement sableuse. Aucun mécanisme de relaxation lié à une polarisation d'interface ne semble apparaître dans ce cas. Ces résultats sont en accord avec les observations du chapitre 2-5 où nous avons conclu que la relation de Topp (Topp *et al.*, 1980) peut être appliquée pour des fréquences supérieures ou égales à 2 MHz dans le cas de formations sableuses. Cette relation s'écrit, en fonction de la permittivité diélectrique :

$$\theta_v = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_r - 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_r^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon_r^3 \quad (\text{III-11})$$

En appliquant la relation de Topp à l'ensemble des points de mesure de permittivité diélectrique relative, on obtient une carte reconstituée de teneurs en eau volumiques (Figure III-35).

Ces teneurs en eau volumiques apparentes sont à mettre en relation avec les teneurs en eau massiques mesurées sur les échantillons prélevés en mai 2011 (Figure III-31).

Les prélèvements effectués permettent en effet de retrouver en partie les contrastes observés en cartographie. En effet, le point P2L17, situé sur la zone non bâchée et non arrosée, possède les teneurs en eau les plus faibles (entre 3 et 4 %). Les teneurs en eau de la zone bâchée, non arrosée

sont constantes et égale à 7,5 % en moyenne sur l'ensemble des profondeurs et pour les deux points de mesure P6L13 et P2L13. Cette valeur est proche des teneurs en eau mesurées en mars aux points P1L11 et P5.5L12 et est liée à la limitation de l'évapotranspiration sous la bâche.

Aux points P6L10 et P2L10 qui sont bâchés puis arrosés, les teneurs en eau diminuent avec la profondeur : elles passent de 10 % pour P6L10 et 15 % pour P2L10 en surface à 6-7 % à 60 cm de profondeur. L'effet de l'arrosage reste donc superficiel et ne dépasse pas 60 cm de profondeur. L'effet de l'arrosage est également visible sur la zone non bâchée et arrosée, au point P2L2.5, où la teneur en eau passe de 12 % en surface à 9 % à 40 cm de profondeur.

Les teneurs en eau n'ont pu être mesurées à des profondeurs supérieures à 40 cm pour les points non bâchés car le terrain devenait trop résistant mécaniquement pour pouvoir extraire des carottes de sol manuellement. On peut donc conclure à une couche plus compacte et de teneur en eau plus faible pour les profondeurs supérieures à 40 cm.

Si l'on compare les teneurs en eau volumiques calculées et les teneurs en eau massiques mesurées aux points de sondages, on retrouve une masse volumique apparente sèche moyenne de $1,3 \text{ g/cm}^3$ pour le terrain, ce qui est tout à fait raisonnable pour un sol sableux. En effet, la relation entre les deux types de teneurs en eau s'écrit :

$$w = \theta_v \cdot \frac{\rho_w}{\rho_{as}} \quad (\text{III-12})$$

avec	w	teneur en eau massique rapportée à la masse sèche
	θ_v	teneur en eau volumique
	ρ_w	masse volumique de l'eau
	ρ_{as}	masse volumique apparente sèche égale au rapport de la masse sèche de l'échantillon sur son volume total

Dans un terrain possédant des teneurs en argile très faible, on retrouve donc la mesure de la teneur en eau volumique à partir de la permittivité diélectrique relative mesurée à 1,56 MHz en utilisant une relation classiquement employée dans le domaine des hautes fréquences (Topp ou CRIM).

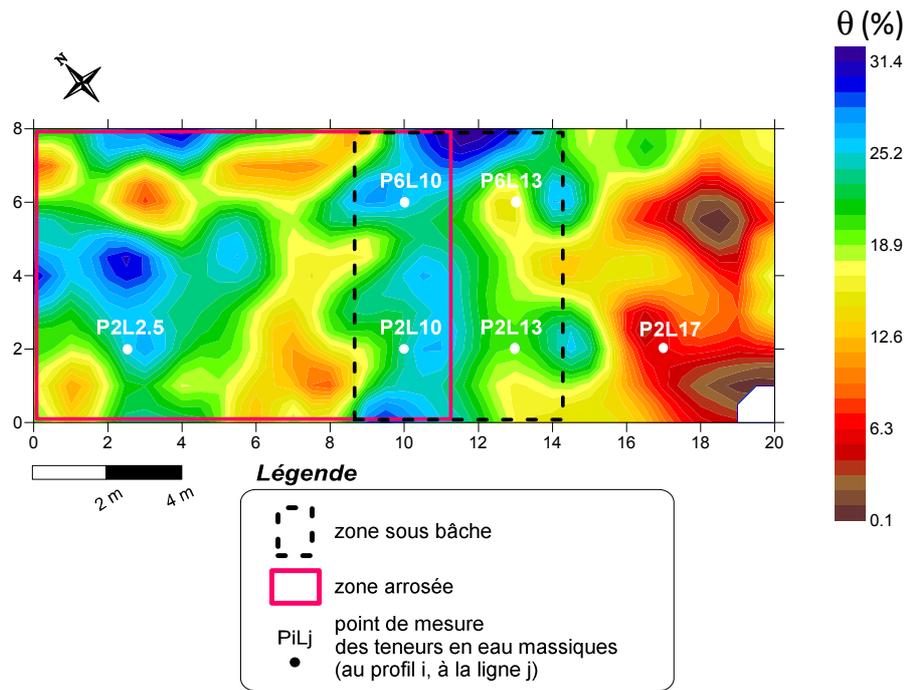


Figure III-35 : Carte des teneurs en eau volumiques apparentes obtenue à partir de la mesure de la permittivité diélectrique relative apparente, à l'aide du prototype CE120, à 1,56 MHz, en utilisant la relation de Topp (Topp *et al.*, 1980).

5.3. Mesures sur les luvisols limoneux de l'INRA d'Estrée-Mons

Nous avons effectué des mesures sur le site de l'Observatoire de Recherche en Environnement dédié aux Agroécosystèmes, aux Cycles Biogéochimiques et à la Biodiversité (ORE-ACBB) de l'INRA d'Estrée-Mons (Figure III-36). Le site est divisé en plusieurs parcelles où des types de traitement différents sont mis en œuvre (Figure III-37 et Tableau III-4). Contrairement au site de l'INRA d'Ardon, les sols d'Estrées-Mons possèdent une teneur en argile significative : limon moyen ($\theta_{argile} = 11,5$ à $21,5$ %) et limon argileux ($\theta_{argile} = 21,5$ à $27,5$ %). L'influence de la teneur en eau sur la mesure de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique aux fréquences moyennes ne pourra donc être étudiée directement : il faudra prendre en compte l'influence de l'argile.



Figure III-36 : Localisation des zones de prospection sur le site de l'ORE ACBB.

Afin d'y cartographier des variations de teneurs en eau, trois zones de prospection différentes ont été sélectionnées (Figures III-36 et III-37) :

- **P1** : cette zone est positionnée à cheval entre une parcelle de sol nu et la parcelle traitée suivant un itinéraire cultural de type T2 (Tableau III-4) du bloc 0. Au fur et à mesure de la croissance des plants, des variations de teneurs en eau entre les deux parcelles vont apparaître.
- **P2** : cette zone est également située dans la parcelle de type T2 du bloc 0. Une tente a été installée sur la moitié ouest de la zone, limitant ainsi l'infiltration d'eau.
- **P3** : cette zone est placée sur la parcelle de type T6 du bloc 1 où se développe du switchgrass. Contrairement au blé d'hiver et au colza, ses racines peuvent atteindre une profondeur de 2 m.

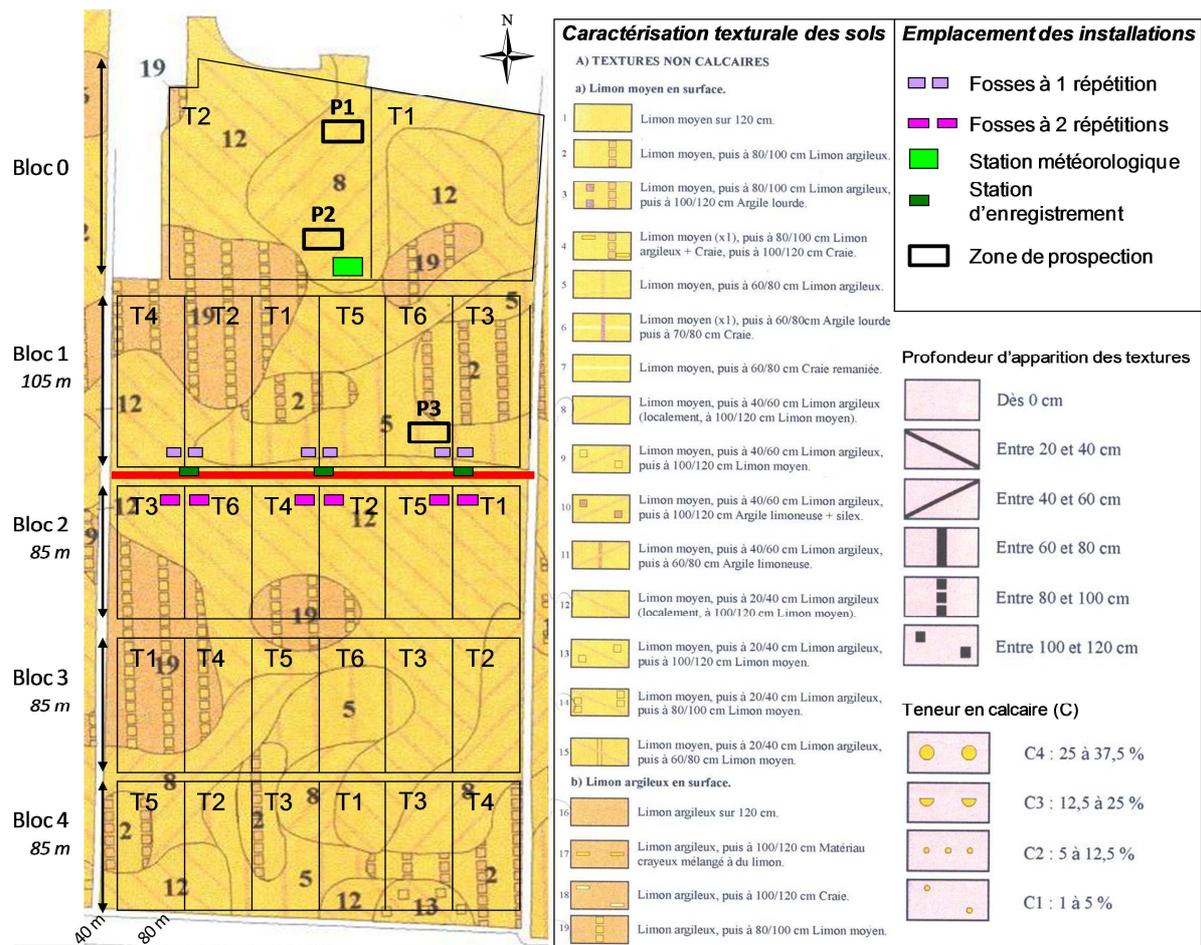


Figure III-37 : Emplacements des différentes zones prospectées positionnés sur la carte des sols de l'ORE - ACBB (d'après Lindor et Sarrazin, et Brunet, communication personnelle).

Traitement	Successions	Travail du sol	Modalité de gestion
T1	Pois/ Blé d'hiver/ Colza/ Blé d'hiver	Labour annuel	Restitution des résidus
T2	Pois/ Blé d'hiver/ Colza/ Blé d'hiver	Travail réduit du sol	Restitution des résidus
T3	Pois/ Blé d'hiver/ Colza/ Blé d'hiver	Travail réduit du sol	Exportation des résidus
T4	Pois/ Blé d'hiver/ Colza/ Blé d'hiver	Labour annuel	Restitution des résidus et faible apport N
T5	Pois/ Blé d'hiver/ Colza/ Blé d'hiver suivi de 4 années de Switchgrass	Labour occasionnel	Exportation des résidus
T6	Switchgrass en continu	Non travail	Exportation des résidus

Tableau III-4 : Traitements sélectionnés pour les différentes parcelles d'étude : succession des cultures, type de travail du sol et modalité de gestion (d'après Brunet, communication personnelle).

En sus d'un traitement différent du sol, les trois zones sélectionnées possèdent des textures qui diffèrent sensiblement (Figure III-38) :

- la texture des zones de prospection P1 et P2 est identique (Texture 8 de la Figure III-37) : on trouve du limon moyen ($\theta_{argile} = 17,5$ à $19,5$ %, d'après Figure III-38) en surface puis, à partir de 40-60 cm, du limon argileux. On retrouve parfois localement du limon moyen à partir de 100-120 cm (Figure III-37).
- la texture de la zone P3 (texture 5 de la Figure III-37) est composée de limon moyen ($\theta_{argile} = 15,5$ à $17,5$ %, d'après Figure III-38) en surface puis, à partir de 60-80 cm, de limon argileux.

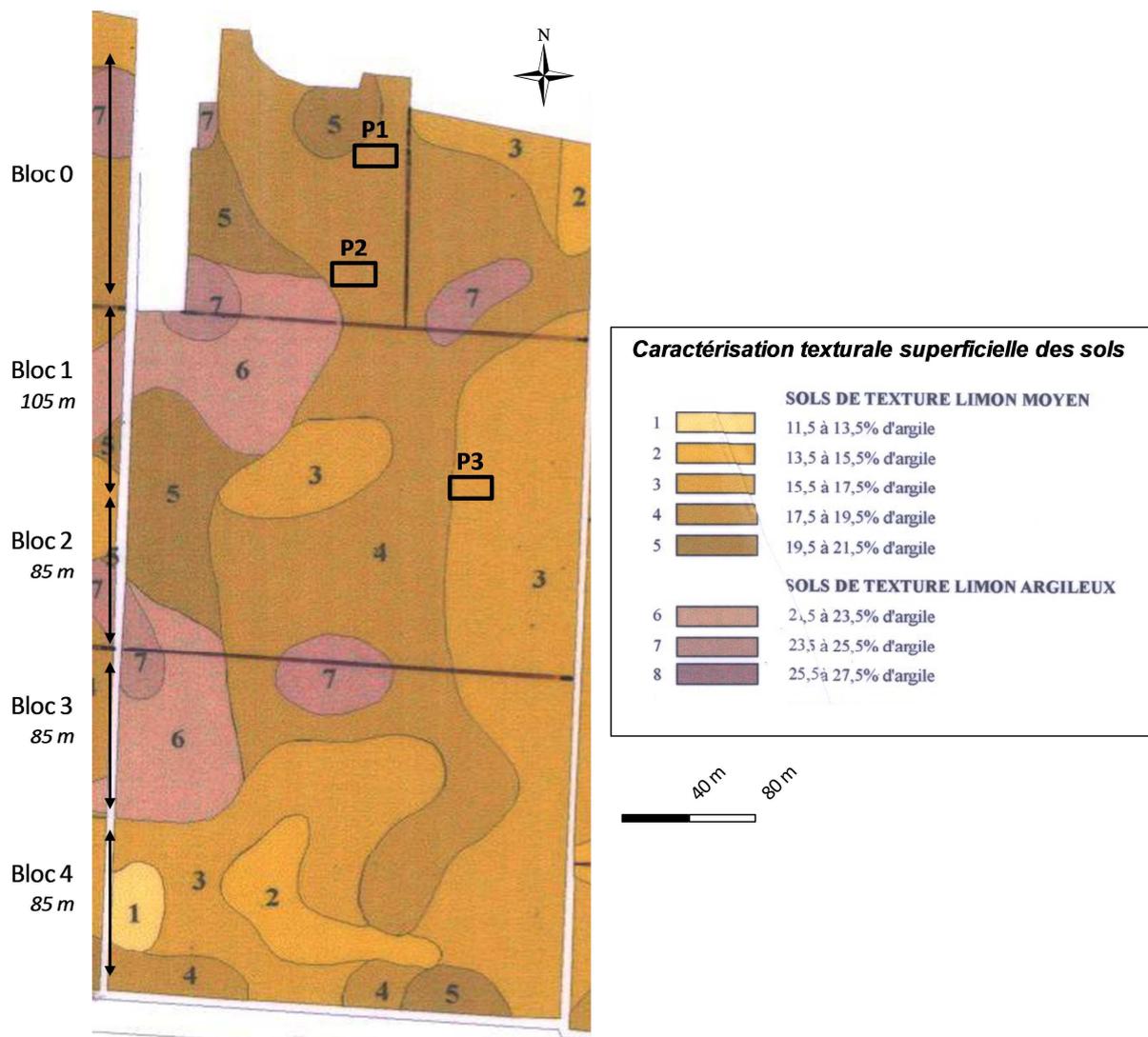


Figure III-38 : Localisation des zones prospectées P1, P2 et P3 sur la carte des textures superficielles (entre 0 et 20 cm de profondeur) des sols (d'après Lindor et Sarrazin, et Brunet, communication personnelle).

Si on doit impérativement tenir compte de la teneur en argile, le facteur important de notre étude est la teneur en eau des sols. Des mesures de teneurs en eau massiques en fonction de la profondeur ont été réalisées sur les différentes zones de prospection. La composition du sol ne varie pas avec les saisons, mais la teneur en eau est fortement dépendante de la météorologie et du développement des cultures. Les mesures sur les trois zones ont donc été répétées à plusieurs saisons différentes afin d'observer les variations de ce paramètre au cours du temps : mars 2011, mai 2011 et décembre 2011. La figure III-41 présente l'ensemble des teneurs en eau massiques mesurées en fonction de la profondeur (1 mesure tous les 30 cm) sur les zones P1, P2 et P3 aux trois dates de prospection.

Le 18 mars 2011, on observe des teneurs en eau massiques comprises entre 21 et 21,5 % sur les 3 zones de prospection et sur l'ensemble des profondeurs de mesures. Les seules variations notables s'observent entre 0 et 30 cm entre le couvert de blé et le sol nu (P1) d'une part et le couvert de blé et le couvert de blé sous tente (P2) d'autre part. Les teneurs en eau massiques du sol nu et du couvert de blé sous tente sont alors égales à 19 %. Le très faible développement des cultures (aussi bien switchgrass que blé) explique ces faibles contrastes (Figure III-39).

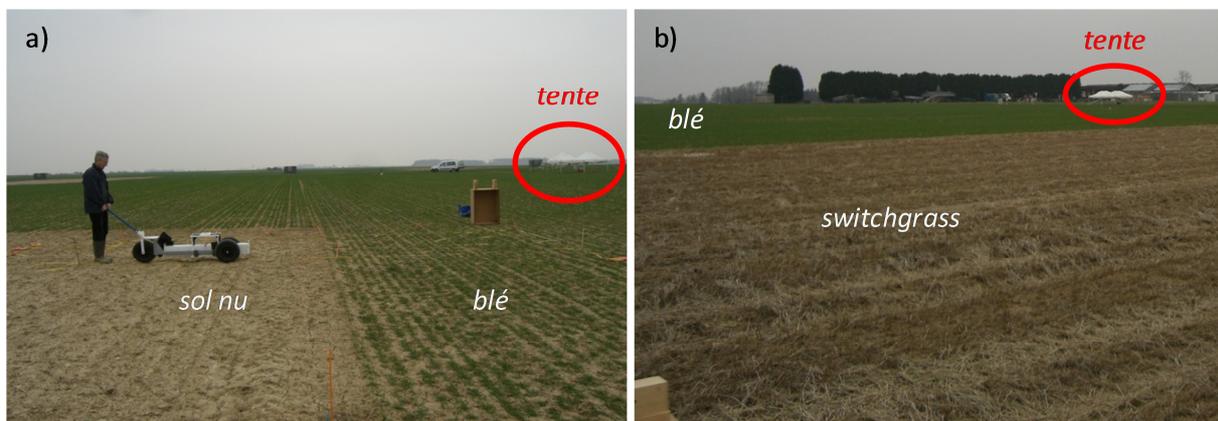


Figure III-39 : Etat des trois zones de prospection le 18/03/2011.
a) vue de la zone P1 sur la zone P2 ; b) vue depuis la zone P3 sur la zone P2.

Le 11 mai 2011 (Figure III-40), les contrastes de teneurs en eau sont beaucoup plus importants :

- Sur la zone de prospection P2, les teneurs en eau du couvert de blé varient entre 8 % et 21 % lorsque la profondeur de la mesure augmente. Sous la tente, les teneurs en eau sont, à chaque profondeur, supérieures de 2 % environ à leurs valeurs hors de la tente. Elles augmentent avec la profondeur (10 % → 19 %) puis se stabilisent à 19 % à partir de 90 cm.
- Sur la zone de prospection P1, on observe une évolution similaire entre les teneurs en eau massiques du sol nu et celles de la parcelle cultivée : augmentation importante de la teneur en eau avec la profondeur (8 % → 16 % pour le couvert en blé ; 15 % → 20 % pour le sol nu) jusqu'à 90 cm puis augmentation plus faible (16-18 %) pour le couvert de blé et faible diminution (20-19 %) pour le sol nu.

- Sur la zone de prospection P3, les teneurs en eau massiques varient entre 15 % et 20 % jusqu'à 90 cm de profondeur, puis se stabilisent à 20 %. Ces variations restent proches de celles du sol nu.

La période de forte sécheresse du mois de mai 2011 explique bien les variations de teneurs en eau massiques observées : les valeurs plus importantes de teneurs en eau du couvert de blé sous tente s'expliquent par une évapotranspiration limitée ; l'évaporation à la surface du sol est la cause de l'augmentation de la teneur en eau massique du sol nu avec la profondeur. Le réseau racinaire de blé atteignant son développement maximum durant cette période, la profondeur des racines peut alors atteindre jusqu'à 1,50 m. Les teneurs en eau de la zone de sol nu sont ainsi plus importantes que celles de la zone sous couvert de blé sur l'ensemble des profondeurs ; l'écart entre ces grandeurs tendant à diminuer lorsque la profondeur augmente, jusqu'à être inférieur à 1% à 1,50 m de profondeur.

Les teneurs en eau mesurées pour le switchgrass sont comparables à celles mesurées sur la partie sol nu de la zone de prospection P1. Cette observation peut s'expliquer par le fait que le système racinaire du switchgrass n'a pas encore atteint son développement maximum. La quantité d'eau prélevée est donc plus faible que pour les parcelles en couvert de blé.



Figure III-40 : Etat des trois zones de prospection le 11/05/2011.
a) vue de la zone P1 ; b) vue de la zone P3.

Le 14 décembre 2011, les variations de teneur en eau en fonction de la profondeur varient en sens opposé à celles du mois de mai. En effet, les précipitations ayant été importantes, la teneur en eau diminue avec la profondeur sur les trois zones. Elle passe ainsi de 26 % à 15 % pour le couvert de colza et de 24 % à 15 % pour le couvert de colza sous tente. La teneur en eau du couvert de colza sous tente est alors inférieure de 2 % à celle du couvert de colza hors tente pour l'ensemble des profondeurs inférieures à 90 cm. Dans ce cas, la tente a permis de limiter l'infiltration d'eau. La teneur en eau du sol nu reste quant à elle constante et égale à 22 % sur l'ensemble des profondeurs jusqu'à 90 cm, puis diminue jusqu'à atteindre 19 % à 1,5 m de profondeur.

Ces données sur les paramètres d'état des sols sont complétées par des mesures de conductivités électriques sur l'ensemble des zones afin d'appréhender les variations latérales et en profondeur du paramètre à l'aide de mesures électriques et EM basse fréquence.

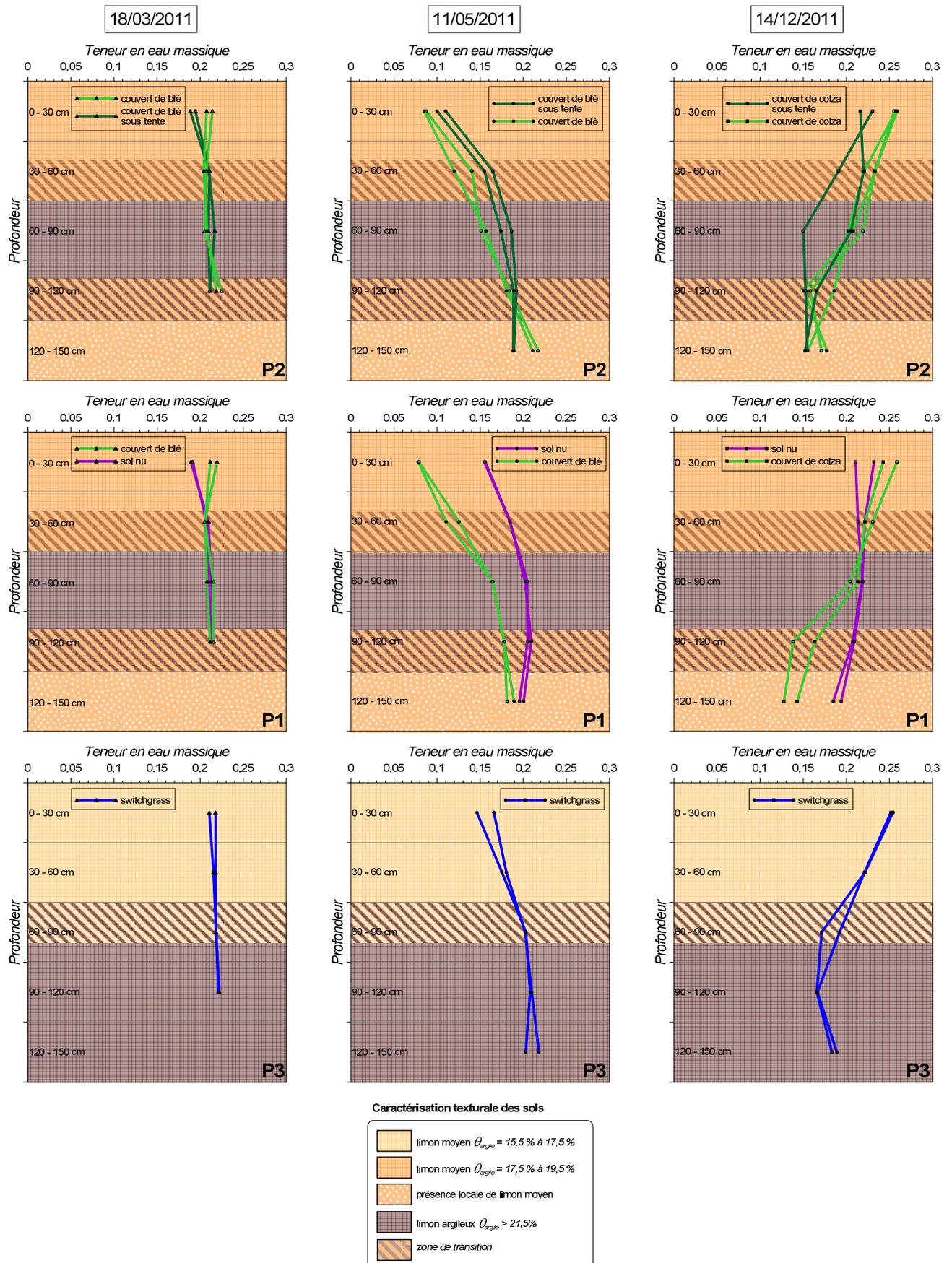


Figure III-41 : Mesures de teneurs en eau massique effectuée à plusieurs profondeurs (tous les 30 cm) sur les trois zones de prospection de l'INRA d'Estrée-Mons ainsi que leur caractérisation texturale.

Sondages électriques

Des sondages électriques à l'aide du résistivimètre RMCA-4 et d'un dispositif en configuration Wenner α ont été effectués le 11 mai 2011 en période de sécheresse (Figure III-42). Les modèles à 3 couches proposés correspondent bien aux données pour les zones P2 et P3. Un écart de 20% est observé entre les données et le modèle le plus adapté pour la zone P1. Ce faible niveau d'accords s'explique par des variations latérales importantes des caractéristiques du sol le long du profil est-ouest adopté. Il est plus pertinent de limiter les comparaisons aux modèles obtenus pour les zones P2 et P3. Ils se composent d'une couche plus résistante entre 0 et 30 cm de profondeur (43 $\Omega.m$ pour P2 et 82 $\Omega.m$ pour P3), puis d'une couche plus conductrice (autour de 25 $\Omega.m$) jusqu'à environ 7 m. La troisième couche possède une résistivité semblable à la couche superficielle pour la zone P2 (50 $\Omega.m$) et est beaucoup plus élevée pour la zone P3 (342 $\Omega.m$). Pour le premier mètre du sol, les variations observées pourraient correspondre à :

- une couche de limon moyen en surface, avec une résistivité plus élevée pour P3 qui possède une texture moins riche en argile ($\theta_{argile} = 15,5$ à $17,5$ %, d'après Figure III-38) que pour P1 ou P2 ($\theta_{argile} = 15,5$ à $17,5$ %),
- une couche de limon argileux de résistivité plus faible (environ 25 $\Omega.m$) à partir de 30 cm de profondeur.

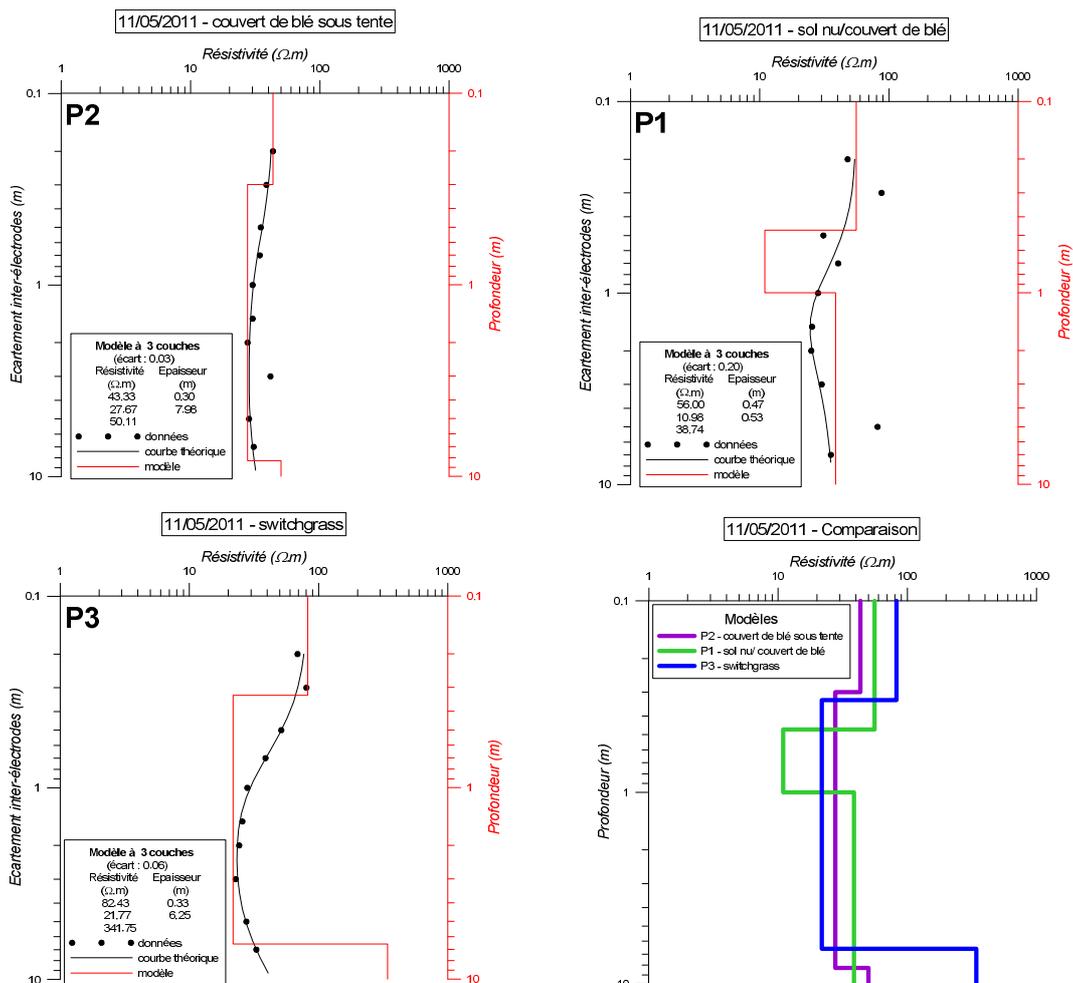


Figure III-42 : Sondages électriques (Wenner α) effectués sur les trois zones de prospection P1, P2 et P3, au centre de la zone, d'orientation est-ouest, le 11 mai 2011.

Des sondages de même type ont été effectués le 12 décembre 2011 (Figure III-43). Le terrain étant très conducteur, et les valeurs de résistances devenant trop faibles, l'écartement inter-électrode a dû être limité à 2 m. On modélise les données mesurées par un terrain à 3 couches avec une précision meilleure que 7 % pour trois des quatre sondages. Les modèles des quatre sondages présentent une séquence similaire : une première couche de résistivité moyenne (entre 50 et 80 Ω .m), puis une couche plus résistante (autour de 100 Ω .m) et enfin une couche conductrice de résistivité égale à 15 Ω .m en moyenne à partir de 30 cm de profondeur. Ces résultats sont en accord avec les observations précédentes où à une couche de limon moyen succède une couche de limon argileux à partir de 30 cm de profondeur.

Les résultats peuvent être interprétés plus précisément par zones :

- *zone de prospection P1* : sur le sol nu, on observe des résistivités identiques à celles des autres zones jusqu'à 30 cm, puis une résistivité plus faible pour la partie limon argileux (8 Ω .m). Le sol nu possède une teneur en eau, plus élevée que celle des autres terrains, constante sur l'ensemble du profil (égale à 20 %) qui peut expliquer les faibles résistivités observées.
- *zone de prospection P2* : la résistivité électrique du couvert de colza sous tente est plus élevée de 10 Ω .m sur l'ensemble des profondeurs. Cette différence est liée à la baisse de teneur en eau massique sous la tente, l'infiltration y ayant été plus limitée.

Si les sondages électriques, couplés aux mesures de teneurs en eau massique, permettent de comprendre la structuration électrique verticale du sol, il est également nécessaire d'étudier les variations latérales des paramètres électriques. Des mesures de résistivité électrique ont été réalisées sur l'ensemble des zones à l'aide des résistivimètres RMCA-4 et RM15-D et de l'appareil de mesure EM basses fréquences CS60.

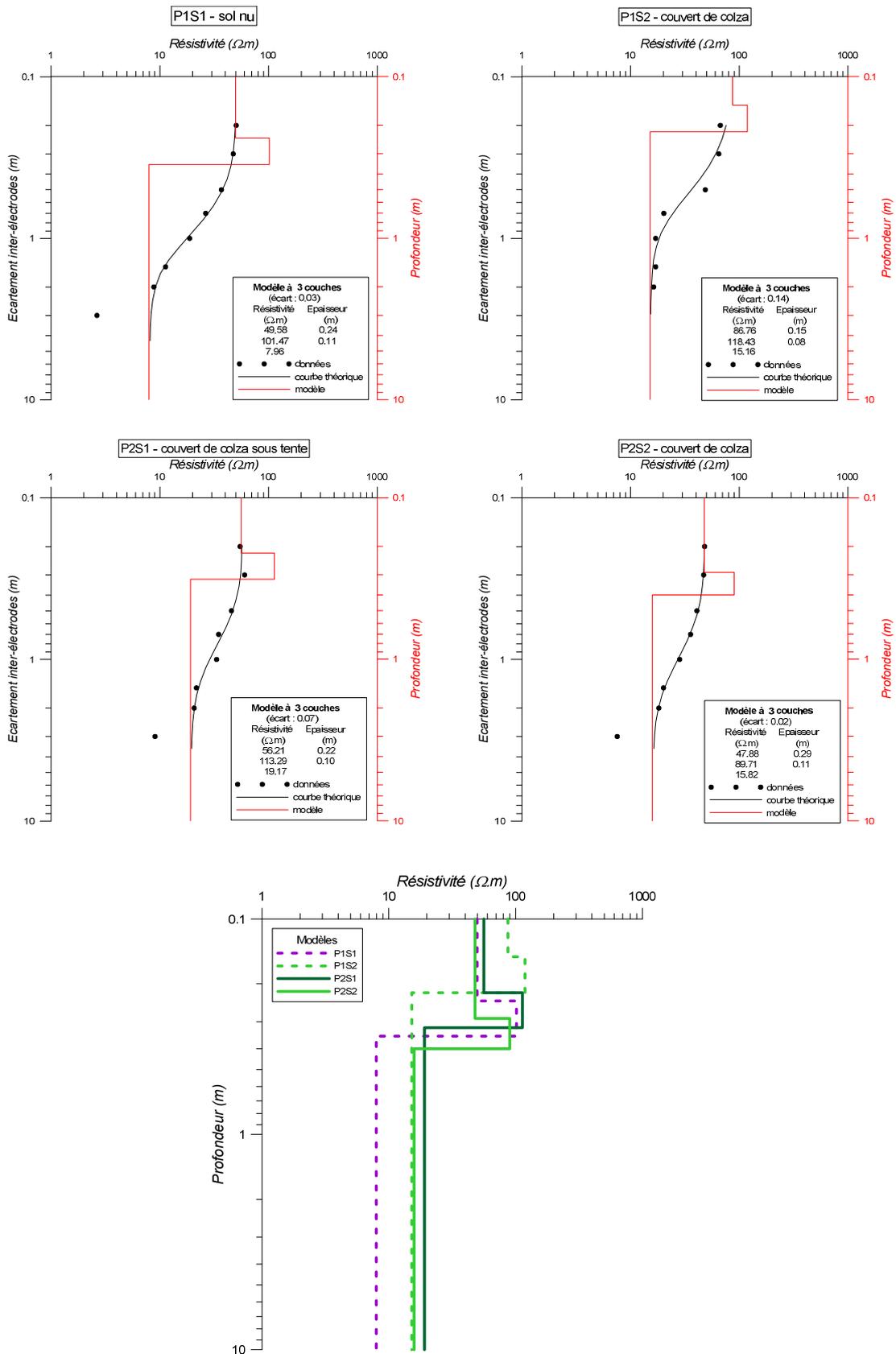


Figure III-43 : Sondages électriques (Wenner α) effectués sur les zones de prospection P1 et P2, d'orientation Est-Ouest, le 12 décembre 2011. P1S1 : sondage centré sur la zone de sol nu ; P1S2 : sondage centré sur la zone de couvert de colza ; P2S1 : sondage centré sur la zone en culture placée sous la tente ; P2S2 : sondage centré sur la zone en culture hors de la tente.

Cartographie électrique

Une cartographie de résistivité électrique a été réalisée à l'aide du RM15-D avec trois profondeurs d'investigation en mars et en décembre 2011 avec un pas de 1 m en mars et de 50 cm en décembre. Les résultats sont présentés en termes de résistivité électrique apparente. La même échelle de résistivité/conductivité électrique a été utilisée pour l'ensemble des méthodes et des cartes présentées. Les résistivités électriques DC mesurées à l'aide des résistivimètres sont comprises entre 20 et 45 $\Omega.m$ pour l'ensemble des mesures, ce qui correspond bien à des textures de sol électriquement conducteur de type limon moyen ou limon argileux.

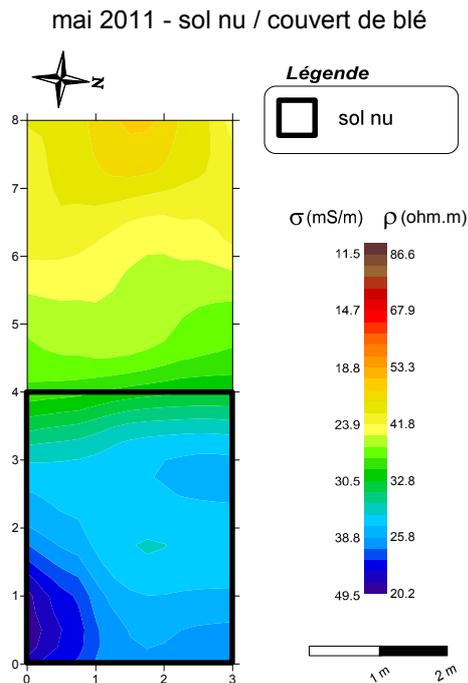


Figure III-44 : Cartographie de la résistivité électrique de la zone P1, le 11 mai 2011, à l'aide du résistivimètre RMCA-4, pour un écartement inter-électrode de 1 m..

Pour l'ensemble des prospections effectuées, on retrouve des sols plus conducteurs en profondeur ($\rho_a = 25-30 \Omega.m$) (pour un écartement inter-électrode $a=1$ et $1,5$ m) correspondant au limon argileux et des sols en moyenne plus résistants en surface ($\rho_a \approx 40 \Omega.m$) correspondant au limon moyen (Figures III-37 et III-38) et à une plus forte porosité.

Sur les cartes du 18 mars 2011 (Figure III-45), on ne distingue de contrastes de résistivité électrique ni entre les trois zones de prospection, ni entre les zones de couverts différents sur une même zone de prospection (couvert de blé sous tente et hors tente pour P2 ; couvert de blé et sol nu pour P1).

Ces observations ne sont plus valables en mai et en décembre 2011. En effet, figure III-44, une augmentation de la résistivité sur la zone P1 entre la partie sol nu et la partie sous couvert de blé est observée le 11 mai 2011. On passe d'une résistivité de 25 $\Omega.m$ pour le sol nu à une résistivité de 40 $\Omega.m$ en moyenne pour le couvert de blé. La texture du sol étant la même sur l'ensemble de la zone prospectée, les variations de teneurs en eau produites par le couvert sont les principales causes de cette augmentation.

Sur les mesures du 14 décembre 2011 (Figure III-46), on observe également des contrastes de résistivité électrique liés au traitement des sols. Ainsi, sur la zone de prospection P1, on détecte clairement les limites de la partie sol nu de résistivité électrique égale à 30 $\Omega.m$ en surface en moyenne, comparée à la zone en culture de résistivité électrique moyenne de 40 $\Omega.m$. Ces résultats concordent avec les observations précédemment établies. La cause principale de variation de la résistivité électrique est ici la teneur en eau massique plus élevée du sol nu (égale à 20% environ). De même, une anomalie résistante est observée à l'emplacement de la tente sur la zone de prospection P2. Cette anomalie est légèrement décalée vers l'est par rapport à l'emplacement de la tente, ce qui peut s'expliquer par la présence de vent provenant de l'ouest qui modifie la trajectoire de la pluie. Ceci explique également qu'aucun contraste net n'a pu être observé sur la zone de prospection choisie pour le prototype où les résistivités varient entre 39 et 45 $\Omega.m$.

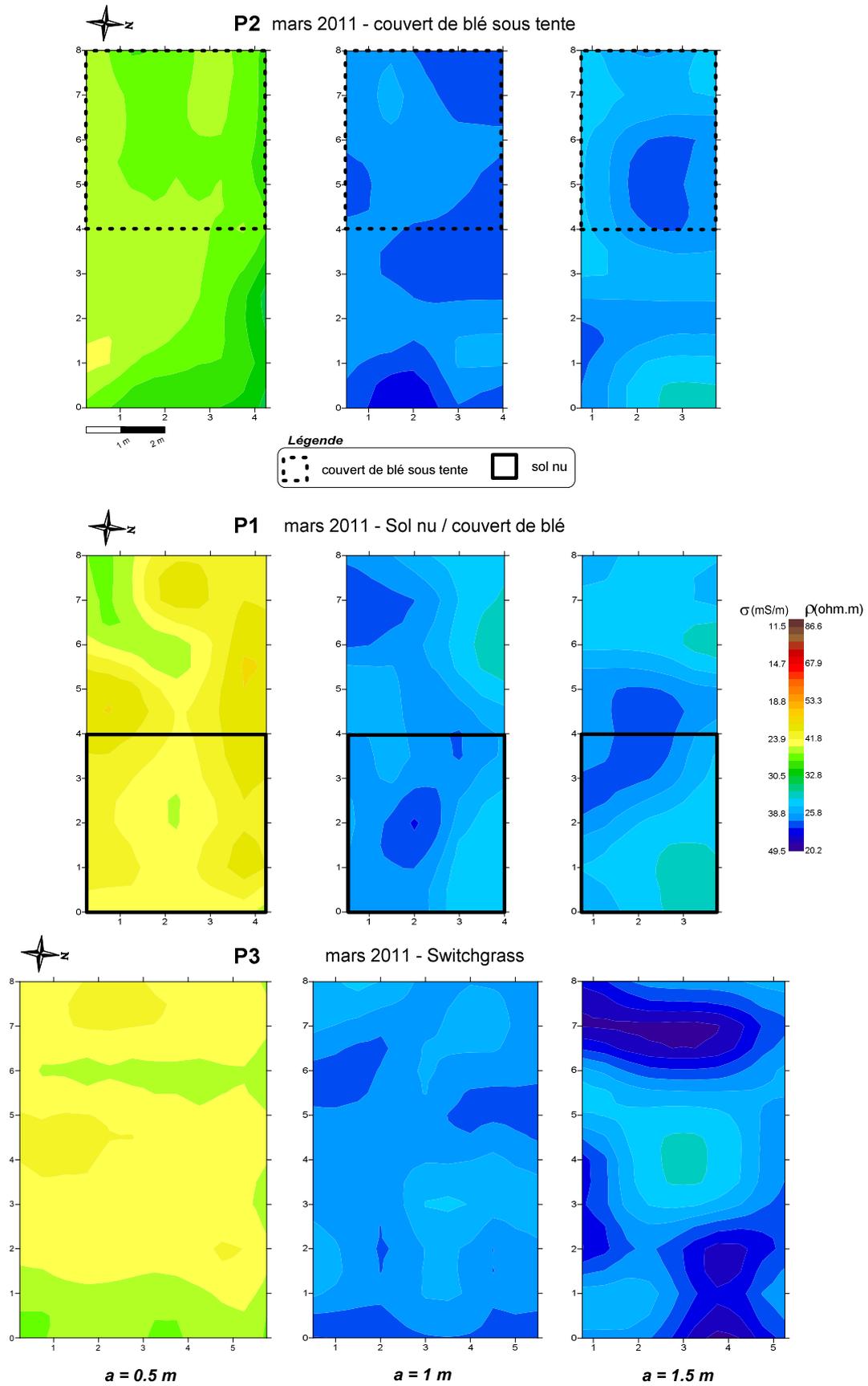


Figure III-45 : Cartographie électrique des zones de prospection P1, P2 et P3 réalisée le 18 mars 2011 avec le résistivimètre RM15-D, pour 3 écartements inter-électrodes différents ($a=0,5-1-1,5\text{ m}$).

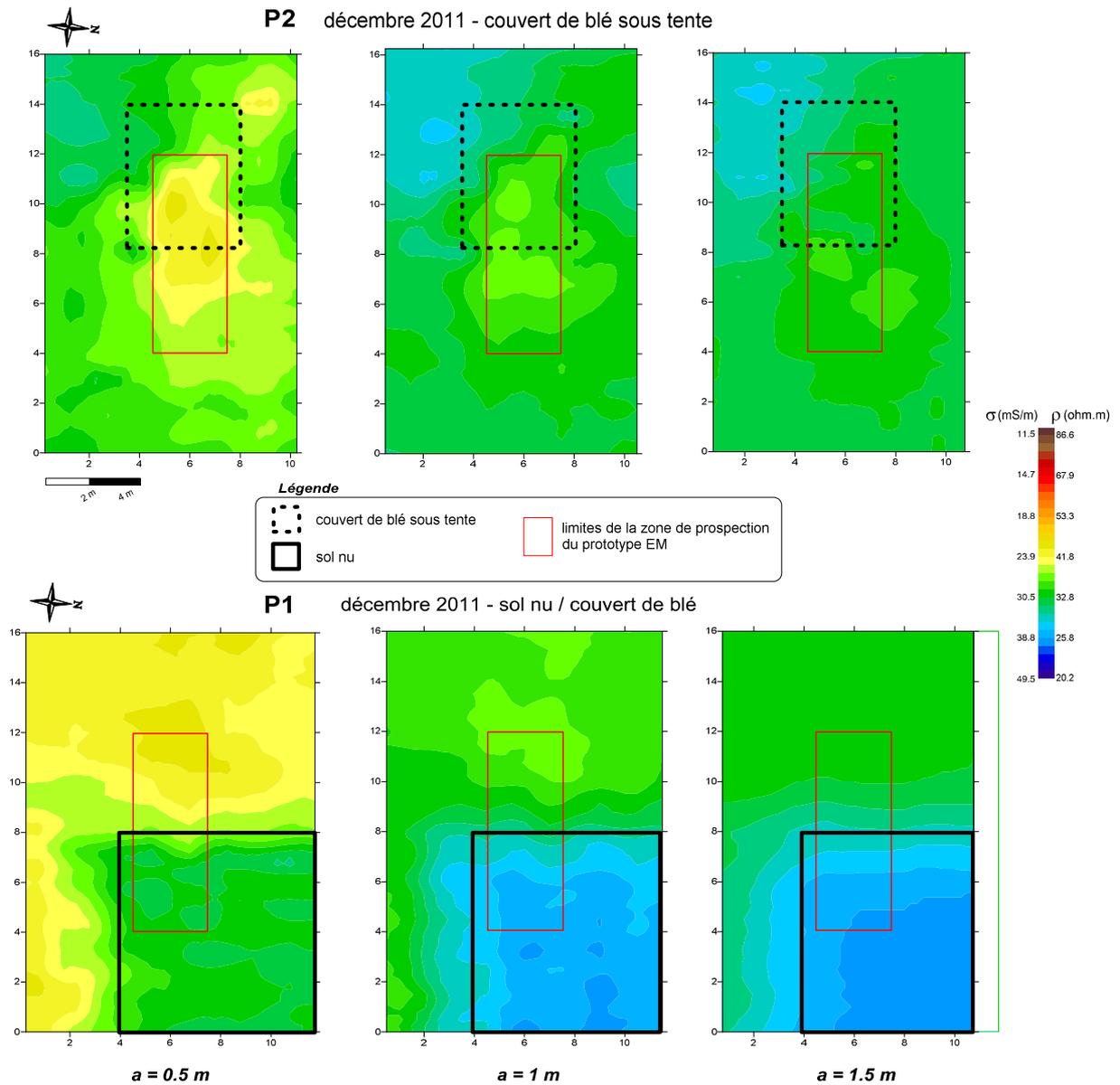


Figure III-46 : Cartographie de la résistivité électrique apparente sur les zones P1 et P2 élargies (9×16 m), le 14 décembre 2011, à l'aide du résistivimètre RM15-D, pour 3 écartements inter-électrodes différents ($a=0,5-1-1,5$ m).

Cartographie électromagnétique BF

Les résistivités électriques mesurées à l'aide du CS60 (Figure III-47) appartiennent à une gamme plus étendue de valeurs : alors que les résistivités mesurées au RM15-D varient entre 20 et 45 Ω .m, elles varient ici entre 22 et 90 Ω .m. Cette différence peut s'expliquer par une profondeur d'investigation différente.

Les différences de résistivités électriques les plus significatives observées entre les zones de prospections sont présentes entre la zone possédant un couvert de switchgrass et les deux autres zones, quelle que soit la saison de mesure. Ces variations ne sont pas liées au changement de texture entre les trois zones. En effet, sur les cartes des sols (Figures III-37 et III-38), la zone de prospection P3 possède une texture de limon moyen de teneur en argile plus faible (15,5 à 17,5 % au lieu de 17,5 à 19,5 % pour P1 et P2) avec un toit de la couche de limon argileux situé en moyenne 20 cm plus en profondeur. Concernant la texture du sol, on pourrait même s'attendre à des résistivités plus importantes sur la zone P3 par rapport à celles des zones P1 et P2. Si les teneurs en eau de la zone P3 (Figure III-41), proches de celles de la partie sol nu de la zone P1, sont plus élevées que celles mesurées pour les zones sous couvert de blé, ces variations sont tout de même faibles et ne permettent pas vraiment d'expliquer un passage de 50 Ω .m en moyenne pour les zones P1 et P2 à 30 Ω .m pour la zone P3.

Sur la zone en couvert de switchgrass, on observe des variations non négligeables de résistivité électrique, non liées à des contrastes de teneurs en eau créés artificiellement. Il est donc difficile de déterminer la cause de ces variations.

Les contrastes de résistivité les plus nets sur une même zone sont observés entre les parties sol nu et couvert de blé de la zone P1, surtout pour les prospections effectuées en mai et en décembre 2011. Ces contrastes sont en accord avec les variations précédemment observées à l'aide du RM15-D : résistivité plus faible d'environ 10 Ω .m pour la partie sol nu par rapport à la partie en culture.

Enfin, concernant la zone P2, on ne distingue pas de limite nette entre la zone protégée par une tente et la zone non couverte. La résistivité est toutefois un peu plus faible hors de la tente, surtout en mai 2011.

Les valeurs de résistivités mesurées varient également en fonction de la période de l'année à laquelle les prospections ont été réalisées. Entre les mois de mars et mai, et le mois de décembre, les résistivités d'une même zone de prospection diminuent. Elles passent de 45 Ω .m à 30 Ω .m en moyenne. Ces variations sont liées à l'augmentation des teneurs en eau observée entre des périodes plus sèches et plus humides (Figure III-41).

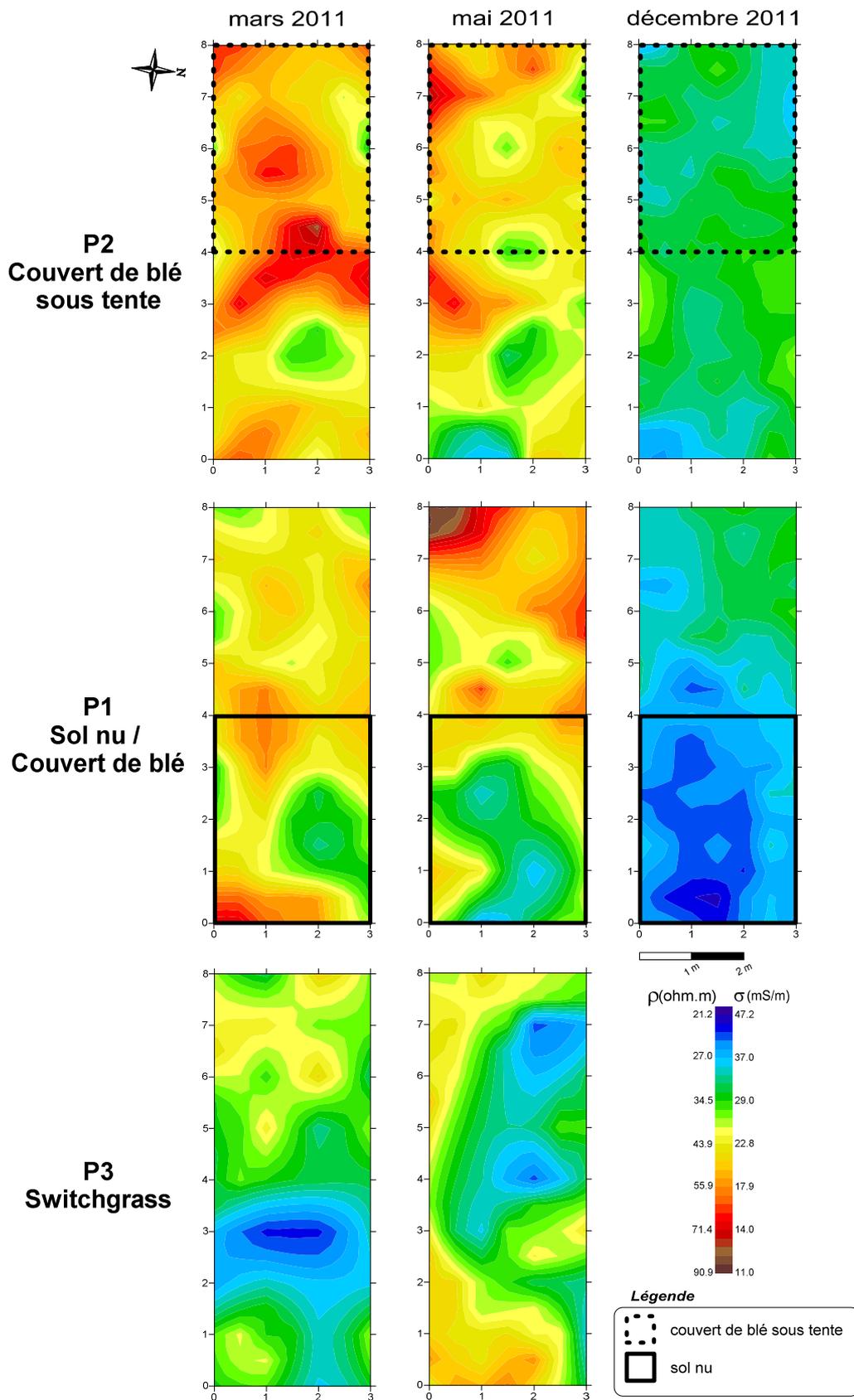


Figure III-47 : Cartes de conductivité électrique apparente σ obtenues à l'aide du dispositif EM BF CS60, sur les trois zones de prospection définies, à trois périodes différentes (mars, mai et décembre 2011).

Les cartes de susceptibilité magnétique (Figure III-48) n'apportent pas d'informations supplémentaires. Les seules variations notables sont observées entre les zones de sol nu et de couvert de blé sur la parcelle P1 où la susceptibilité est plus élevée pour le couvert de blé. Ces variations sont surtout observées en mai, et dans une moindre mesure en décembre 2011, où l'ensemble des zones prospectées possèdent des valeurs de susceptibilité magnétique plus faibles qu'en mars, qui sont elles-mêmes plus faibles qu'en mai. Plusieurs causes pédologiques peuvent être à l'origine de ces variations (Thiesson, 2007) comme les phénomènes de transport et d'accumulation de sol contenant des grains magnétiques de petites tailles ou de l'argile (contribution paramagnétique) ou encore des variations climatiques et des changements de teneur en eau (Deng *et al.*, 2006 ; Fialova *et al.*, 2006), sans compter l'influence des pratiques agricoles comme l'apport d'engrais ou les labours (Tite et Mullins, 1971 ; Marmet *et al.*, 1999). La compréhension de ces processus n'étant pas l'objectif de notre étude, on se limitera à ces observations dans ce manuscrit.

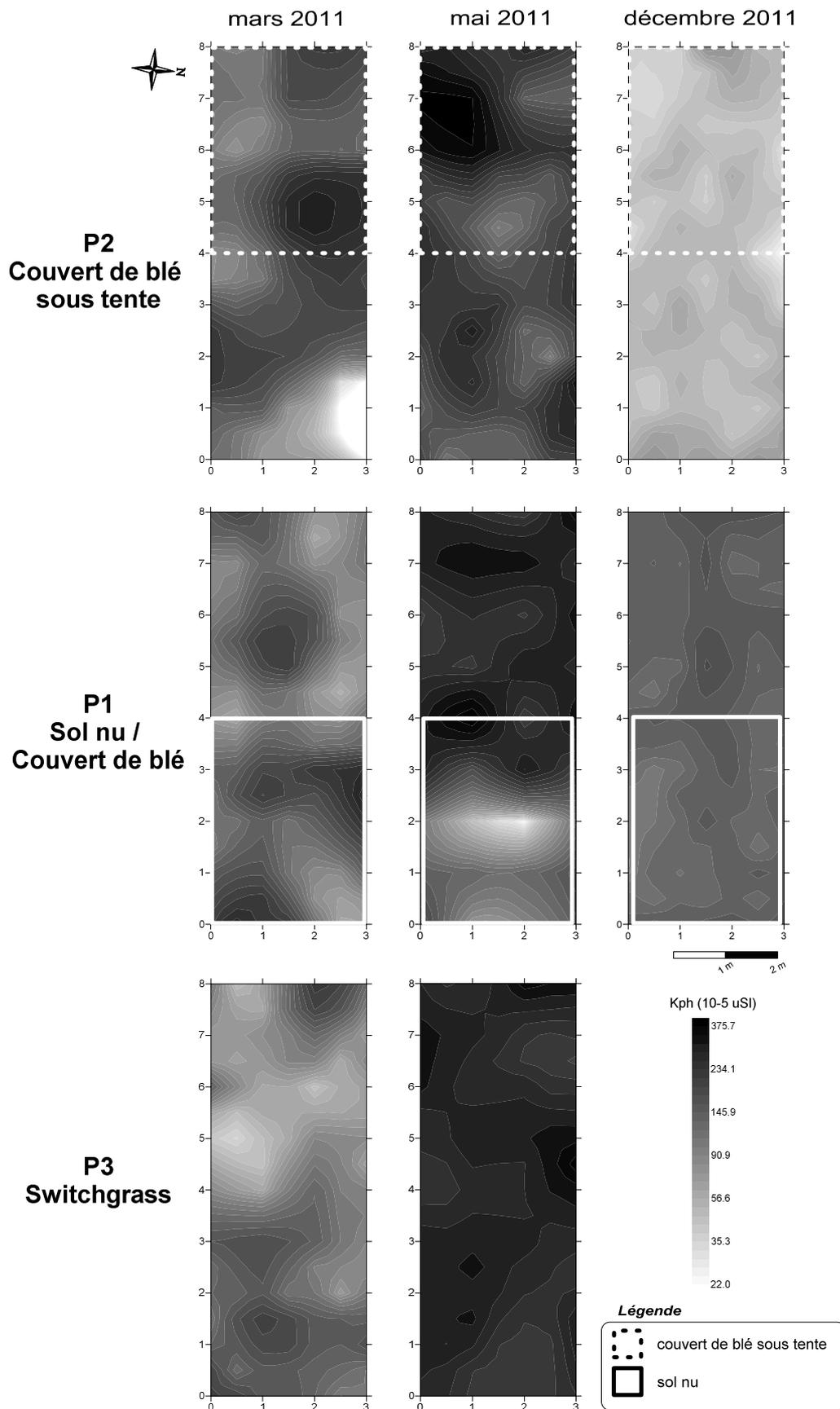


Figure III-48 : Cartes de susceptibilité magnétique K_{ph} obtenues à l'aide du dispositif EM BF CS60, sur les trois zones de prospection définies, à trois périodes différentes (mars, mai et décembre 2011).

Cartographie électromagnétique MF

Bien que proche, la gamme de résistivité électrique calculée à partir des mesures avec le CE120 est plus faible que celle mesurée avec le CS60 : les résistivités apparentes ne varient plus entre 22 et 90 Ω .m, mais entre 36 et 69 Ω .m (Figure III-49). Ce nouveau dispositif de mesure, plus grand, fournit vraisemblablement une réponse plus intégrante. De plus, en comparaison avec les résistivités calculées pour les deux autres terrains de prospection (chapitre 3-5.2 et 3-5.4), ces valeurs sont nettement plus faibles. La teneur en argile plus élevée sur le site de l'INRA d'Estrée-Mons explique bien ces variations.

La résistivité électrique apparente moyenne est globalement proche d'une zone de prospection à l'autre. Les petites différences de texture décrites ci-dessus (la zone de prospection P3 possède une teneur en argile de 2% plus faible que celle des zones P1 et P2) ne sont vraisemblablement pas détectées par le prototype CE120.

La résistivité apparente varie en fonction de la période de prospection. Très peu de contrastes sont observés sur chaque zone au mois de mars. Ces mesures sont conformes aux observations effectuées au RM15-D (Figure III-45). Elles sont liées aux teneurs en eau massiques constantes mesurées en mars (Figure III-41). Les trois terrains possèdent une résistivité moyenne proche de 50 Ω .m.

Des contrastes apparaissent au sein de chaque zone d'étude au mois de mai 2011. Concernant la zone P2, on observe une zone plus résistante sous la tente (en moyenne 64 Ω .m), correspondant à une teneur en eau plus faible, et une zone plus conductrice (en moyenne 45 Ω .m) hors des limites de la tente. Un contraste est également observé pour la zone P1 à la transition entre le sol nu et le couvert de blé : le sol nu possède une résistivité plus faible égale à 40 Ω .m en moyenne contre 46 Ω .m pour le couvert de blé.

En décembre, l'ensemble des zones n'a pu être prospectée du fait d'une panne de matériel et de contraintes de temps. Sur la zone P2 prospectée, on observe une résistivité apparente plus faible, égale en moyenne à 38 Ω .m pour la zone sous la tente et à 35 Ω .m pour la zone hors-tente. Ces valeurs, plus faibles que les résistivités mesurées sur la même zone en mars et mai 2011, et cohérentes avec les valeurs mesurées au CS60, s'expliquent par des teneurs en eau massiques plus élevées à cette période de l'année (Figure III-41).

La permittivité diélectrique relative varie également entre les différentes zones prospectées (Figure III-50). Pour l'ensemble des zones de prospection et des périodes de mesure, ses valeurs sont comprises entre 34 et 166, avec une moyenne proche de 75. Ces valeurs sont beaucoup plus importantes que celles mesurées sur le site de l'INRA d'Orléans (cf. chapitre 3-5.2) ou sur le site de Grand (cf. chapitre 3-5.4). Elles s'expliquent par la présence d'argile en quantité plus importante, et la fréquence de mesure étudiée (1,56 MHz), où des effets de polarisation d'interface se manifestent.

La permittivité diélectrique relative varie en fonction de la période de prospection. En mars 2011, la permittivité des zones P1 et P2 est globalement constante et vaut en moyenne 98. La permittivité de la zone P3 est plus élevée (125 en moyenne). Cependant, ni la teneur en eau (qui est constante et égale à 21-21,5 % sur les trois zones de prospection), ni la texture du sol (teneur en argile plus faible de 2 % pour la zone P3) ne permettent d'expliquer simplement cette augmentation.

C'est au mois de mai 2011 que les contrastes sur une même zone de prospection sont les plus marqués :

- Concernant la zone P2, la permittivité diélectrique relative mesurée est plus élevée à l'est et au nord-est (égale à 135 en moyenne). Ces contrastes semblent corrélés avec les valeurs de résistivités plus faibles observées à l'est de la zone, à la fois pour les mesures au CS60 et pour celles effectuées à l'aide du prototype CE120.
- Sur la zone P1, la permittivité diélectrique du sol nu est plus élevée (93 en moyenne) que la partie sous couvert de blé (50 en moyenne). La texture du sol étant identique, ces variations sont liées aux contrastes de teneurs en eau créés par les prélèvements du système racinaire du blé. Ces observations sont corrélées avec les variations de teneurs en eau massique mesurées sur la parcelle (Figure III-41).
- La zone P3 sous couvert de switchgrass possède une permittivité diélectrique relative moyenne de 109 avec une zone de permittivité plus faible (75 en moyenne) au centre de la zone. Ces variations ne semblent pas corrélées avec une différence de texture ou de teneur en eau.

En décembre 2011, la permittivité diélectrique mesurée sur la zone de prospection P2 est la plus élevée : elle atteint 150 en moyenne. Ces valeurs sont liées à des teneurs en eau plus élevées à cette période de l'année (Figure III-41).

Les paramètres électriques mesurés à l'aide du prototype de mesure sont globalement cohérents avec les autres prospections réalisées sur le site. Il se pose alors la question de la restitution de la teneur en eau. Nous nous proposons d'utiliser la fonction déterminée au chapitre 2 pour les échantillons de Mons, évaluée pour des fréquences comprises entre 1 et 2 MHz (équation (II-22)).

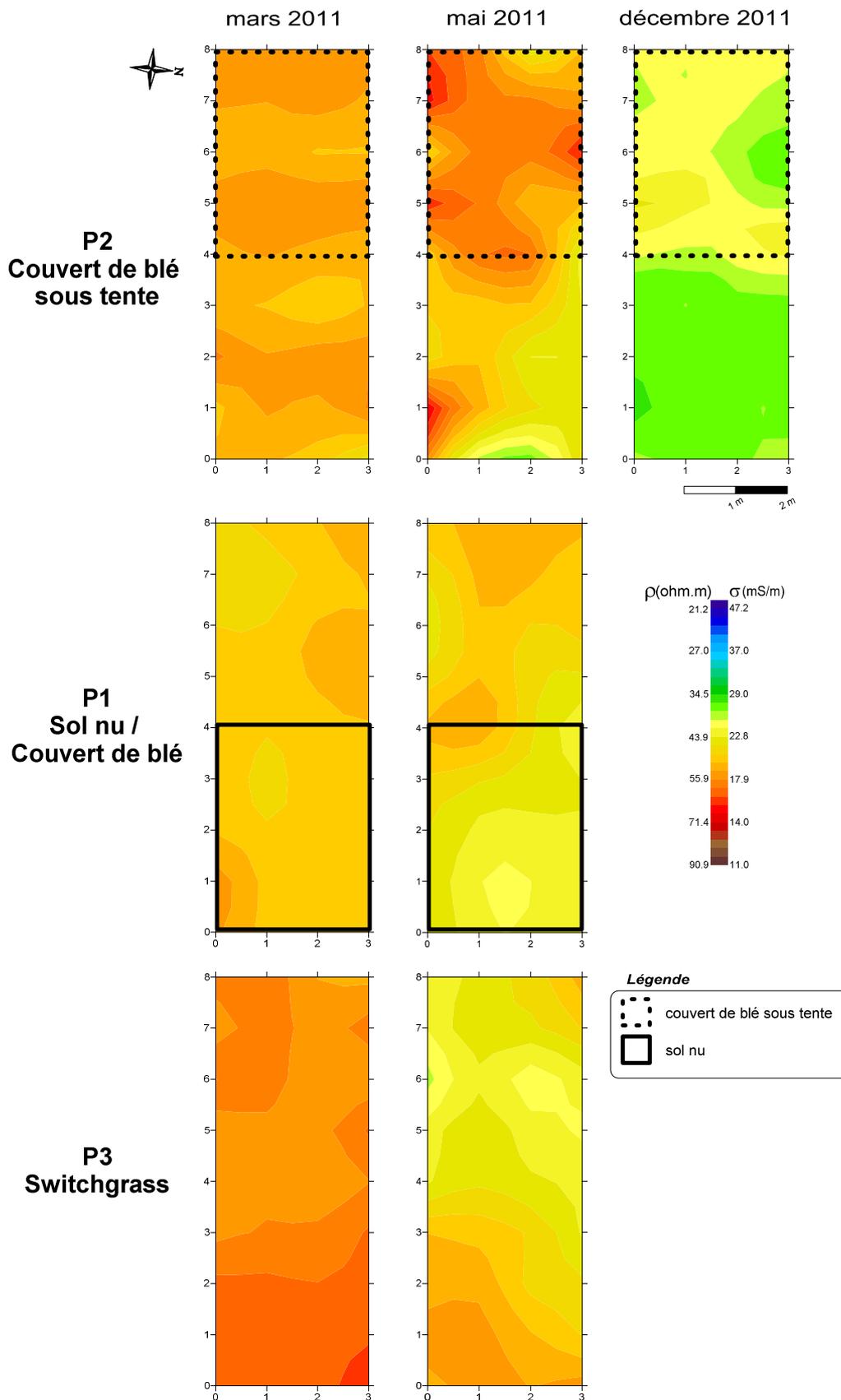


Figure III-49 : Cartes de conductivité électrique apparente σ mesurée à l'aide du prototype CE120 à 1,56 MHz, sur les trois parcelles sélectionnées P1, P2 et P3 du site de l'INRA d'Estrée-Mons, à trois dates différentes.

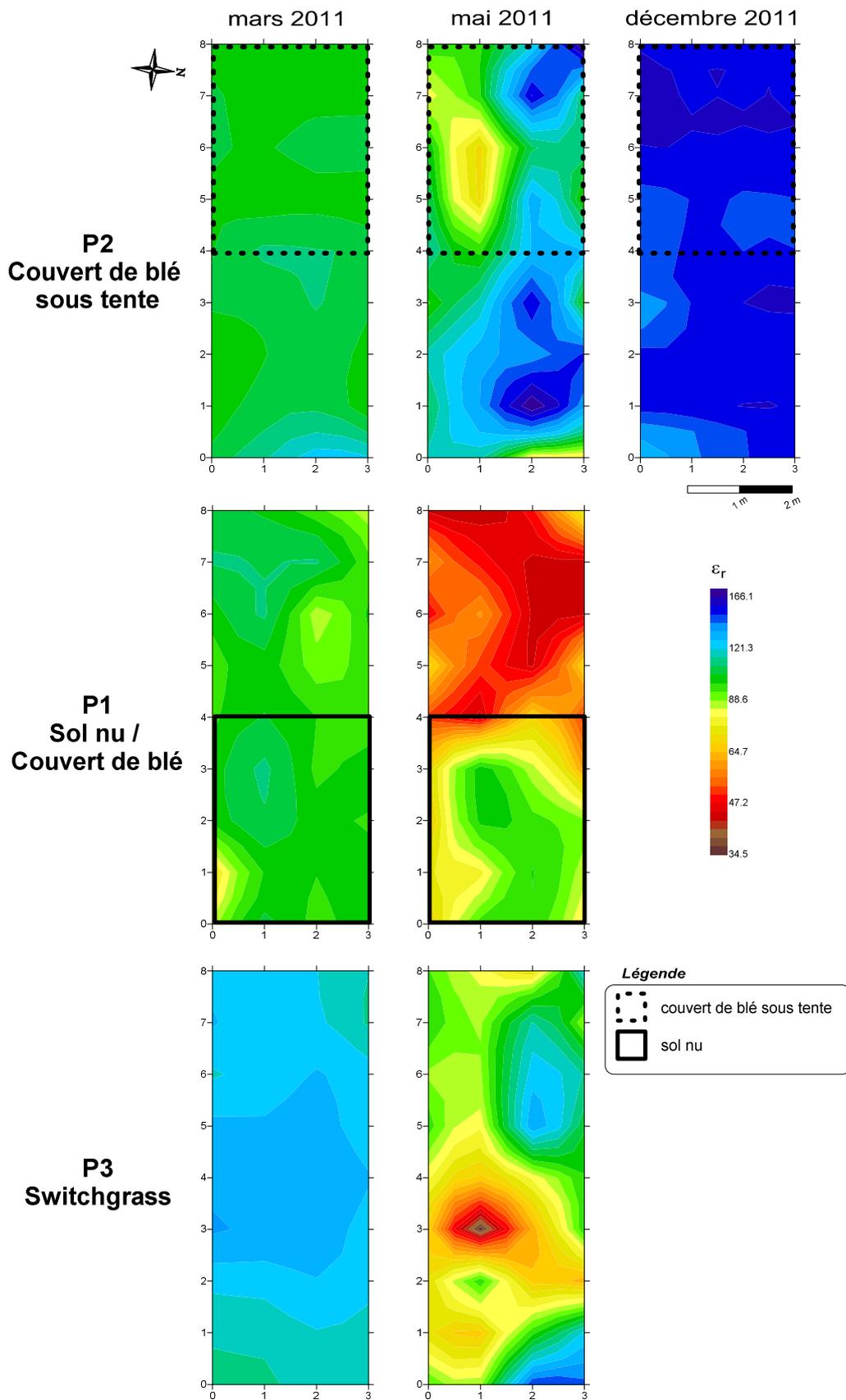


Figure III-50 : Cartes de permittivité diélectrique relative apparente ϵ_r mesurée à l'aide du prototype CE120 à 1,56 MHz, sur les trois parcelles sélectionnées P1, P2 et P3 du site de l'INRA d'Estrée-Mons, à trois dates différentes.

A partir des mesures de permittivités diélectriques relatives apparentes acquises à l'aide du CE120 et de la relation empirique établie en laboratoire pour les échantillons provenant du site de Mons, nous pouvons restituer une teneur en eau volumique apparente pour l'ensemble des zones et des périodes prospectées (Figure III-51).

Au mois de mars 2011, les teneurs en eau volumiques apparentes calculées pour les zones P1 et P2 varient peu et valent en moyenne 31 %. Les teneurs en eau massiques mesurées sur ces mêmes parcelles (Figure III-41) sont égales à 21 %. A partir de ces données, on retrouve une densité sèche apparente moyenne pour le premier mètre de profondeur égale à 1,5. Pour la parcelle P3, si la teneur en eau massique mesurée vaut également 21 %, on détermine une teneur en eau volumique apparente moyenne plus élevée (égale à 35 %). Les causes de cette variations sont complexes à expliciter et nécessiterai d'autres analyses.

Au mois de mai 2012, les contrastes de permittivité diélectrique relative plus importants observés induisent des variations de teneurs en eau volumiques plus marquées sur chaque zone. Concernant la zone P2, on peut la subdiviser en deux zones différentes : à l'est et au nord-ouest, la teneur en eau volumique moyenne est plus élevée et égale à 35,4 % alors qu'au sud-ouest, la teneur en eau volumique moyenne est égale à 30,5 %. Ces valeurs sont proches des teneurs en eau massiques mesurées sur le premier mètre de profondeur (Figure III-41). En effet, si on considère une masse volumique apparente sèche égale à 1,6 sous la semelle de labour (qui se situe à 20 cm sur les parcelles de l'ORE), on obtient des teneurs en eau massiques comprises entre 17 % et 24 %. Sur la zone P1, les teneurs en eau volumiques moyennes sont égales à 31,0 % pour la zone de sol nu et 22,0 % pour la zone sous couvert de blé. En utilisant la même répartition de densités apparente sèche, on retrouve des teneurs en eau massique égales à 14 % pour la zone sous couvert de blé et à 19,4 % pour la zone de sol nu. On retrouve donc bien les contrastes observés sur les mesures de teneur en eau massique. Si on compare ces résultats avec ceux de la parcelle P2, on observe que la teneur en eau du couvert de blé est plus élevée dans le cas de la parcelle P2. Cette observation est également conforme aux mesures de teneur en eau massiques. La zone P3 sous couvert de switchgrass possède une teneur en eau volumique apparente moyenne de 33 %, à l'exception de la zone centrale, où la teneur en eau volumique diminue pour atteindre une moyenne de 27,9 %. La teneur en eau massique apparente estimée est alors égale à 20,6 %. Ces résultats sont cohérents avec les mesures de teneurs en eau massiques qui varient entre 15 et 21 % sur les 90 premiers centimètres de profondeur.

Au mois de décembre 2011, seules les teneurs en eau volumique de la parcelle P2 ont pues être calculées. On observe peu de variations sur la zone dont la teneur en eau volumique moyenne apparente est égale à 36,4 %, équivalent à une teneur en eau massique apparente restituée de 22,8 %. Comparée aux mesures effectuées aux mois de mars et de mai, cette valeur est plus et conforme aux teneurs en eau massiques importantes mesurées sur la zone en décembre 2011.

Globalement, l'utilisation de l'expression empirique obtenue à l'aide des mesures en laboratoire sur les sols de Mons (équation (II-22)) permet de restituer des contrastes de teneur en eau cohérents avec les variations mesurées par la méthode directe. La méthode empirique proposée permet donc une première estimation des teneurs en eau apparente du sol. Cependant son utilisation est limitée au seul cas d'étude présenté ici et des mesures des paramètres électriques du sol sur échantillons doivent être répétées pour chaque nouveau type de sol étudié.

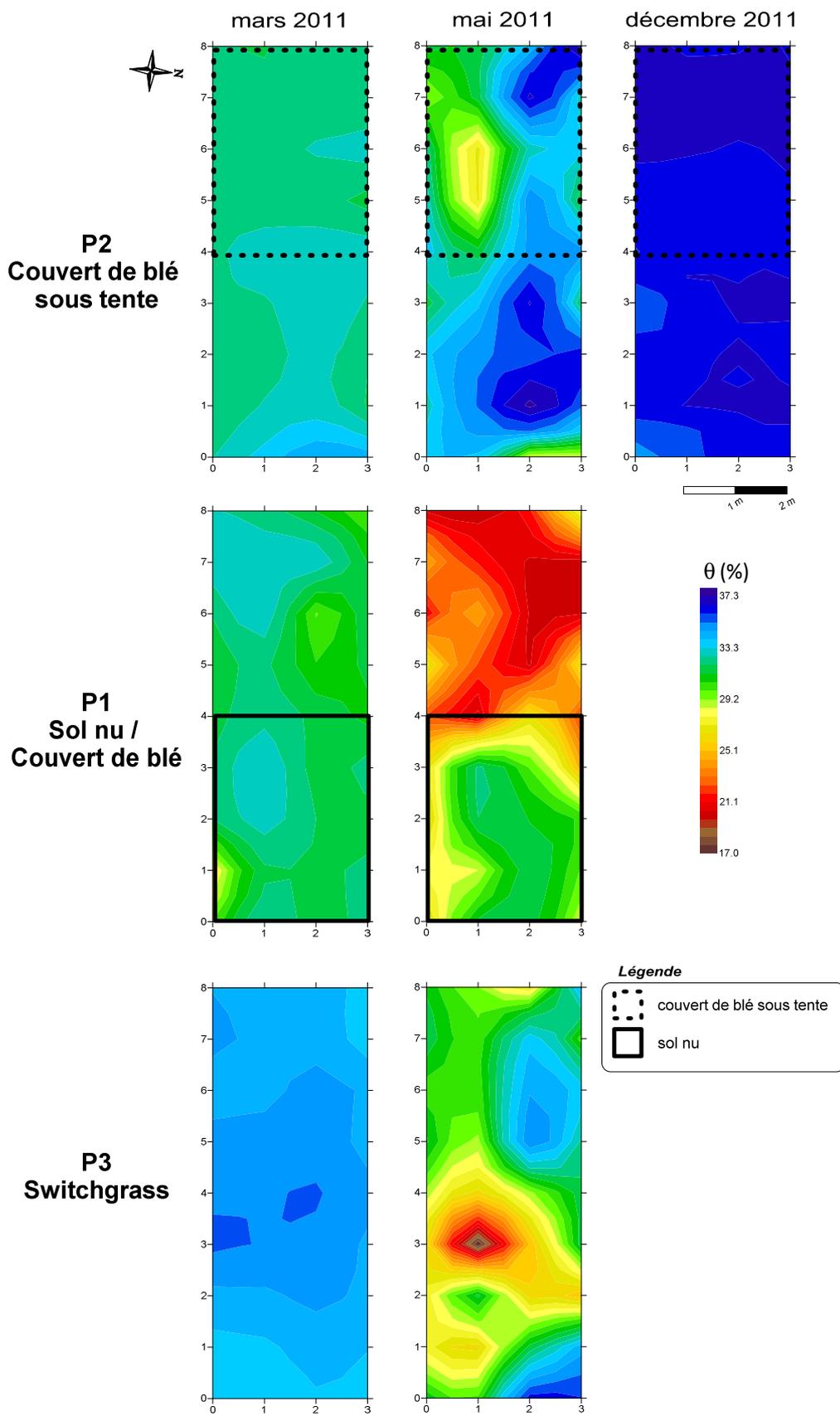


Figure III-51 : Cartes de teneurs en eau volumiques restituées à partir des mesures de permittivités diélectriques obtenues à l'aide du prototype CE120, sur les trois zones de prospection définies, à trois périodes différentes (mars, mai et décembre 2011).

5.4. Mesures sur les calcaires fracturés de Grand (Vosges)

Des mesures ont également été réalisées sur un champ enherbé (lieu-dit La Violette), proche du village de Grand. Le village de Grand se situe sur un plateau de calcaires du Jurassique à l'est du bassin de Paris, à la limite de deux couches calcaires : l'Oxfordien moyen et l'Oxfordien supérieur. La base de l'Oxfordien supérieur est constituée d'une alternance de bancs marno-calcaires. A la limite entre ces deux formations géologiques, on retrouve une alternance de bancs marno-calcaires. Sur le site de La Violette, un interbanc de calcaires fracturés a été détecté à l'aide de prospections électriques antérieures et des photos aériennes (végétation plus foncée) (Figure III-52) : deux jeux de fractures conjugués, orientés NO-SE et NE-SO, se croisent. Différentes méthodes de prospections géophysiques ont été appliquées sur ce site dans le cadre de la thèse de Brinon (2012) afin d'étudier les ressources en eau de la ville antique et d'établir son extension spatiale.



Figure III-52 : Localisation du lieu-dit La Violette (Grand, Vosges) et photo aérienne du site avec interprétation des contrastes observés dans la végétation en terme de fracturation.

Des mesures à l'aide du prototype CE120 ont été effectuées en mai 2011 sur une parcelle de 15×30 m orientée NE-SO (Figure III-52). Ces mesures ont été complétées par une cartographie électrique au RM15-D à trois profondeurs (Figure III-53), deux sondages électriques (Figure III-54) et une cartographie EM basses fréquences (CS60) (Figures III-56 et III-57). Préalablement à cette prospection, des mesures à l'EM31 ont également été effectuées, permettant de retrouver la conductivité électrique sur une profondeur d'investigation de 5-6 m. Ce dispositif permet de retrouver des variations de conductivité d'origine géologique (Figure III-55a).

Sur les deux sondages électriques (Figure III-54), on observe une couche de $330 \Omega.m$ de résistivité moyenne en surface, puis une couche plus conductrice de résistivité égale à $60 \Omega.m$ en moyenne. Le toit de la deuxième couche n'apparaît pas à la même profondeur en fonction du point de sondage : 35 cm au point (9 ; 14) et 1 m au point (10 ; 23). Cette variation s'explique par l'orientation des pendages des couches géologiques. La carte de conductivité électrique établie pour les cinq premiers mètres de profondeur, à l'aide d'un appareil Slingram BF (EM31) (Figure III-55a) montre la présence d'une couche conductrice en surface à l'est de la zone, correspondant à un banc de marne. Ce même banc se retrouve un peu plus en profondeur à l'ouest de la zone : c'est lui que l'on observe dans la deuxième couche des modèles inversés de sondage électrique. Le point (10 ; 23) étant le plus à

l'ouest, on retrouve la couche de marne plus en profondeur. La conductivité électrique sera donc plus élevée dans la partie nord-est de la zone de prospection si on englobe un volume de sol de l'ordre de 1 m d'épaisseur.

Brinon *et al.* (2012) retrouvent des conclusions identiques en effectuant une inversion en deux étapes (1D/3D) d'une cartographie de résistivité électrique réalisée précédemment à notre étude. Ils adjoignent une première couche de terre végétale en surface de 24 cm d'épaisseur. On retrouve ensuite une couche de calcaire non saturée dont l'épaisseur est très variable (comprise entre 20 cm et plusieurs mètres), suivie d'une couche très conductrice interprétée comme une couche de marne.

Ces résultats sont également confirmés par les cartes de résistivité électrique obtenues où la résistivité apparente diminue avec la profondeur (Figure III-53). Pour les écartements inter-électrodes 1 m et 1,5 m, on observe des résistivités plus importantes dans la partie ouest que dans la partie est, ce qui confirme les résultats de la carte EM31 (Figure III-55a). Concernant les variations latérales de la résistivité électrique, on observe un réseau de fractures orthogonales de résistivités plus faibles (100 - 150 $\Omega.m$ pour $a=0,5$ m ; 60 - 90 $\Omega.m$ pour $a=1$ m et 48 - 90 $\Omega.m$ pour $a=1,5$ m). Ces fractures ont été comblées par un matériau plus conducteur, vraisemblablement plus argileux. La zone prospectée est donc composée de calcaires fracturés suivant deux orientations perpendiculaires en surface et d'une couche de marne à faible pendage ouest en profondeur.

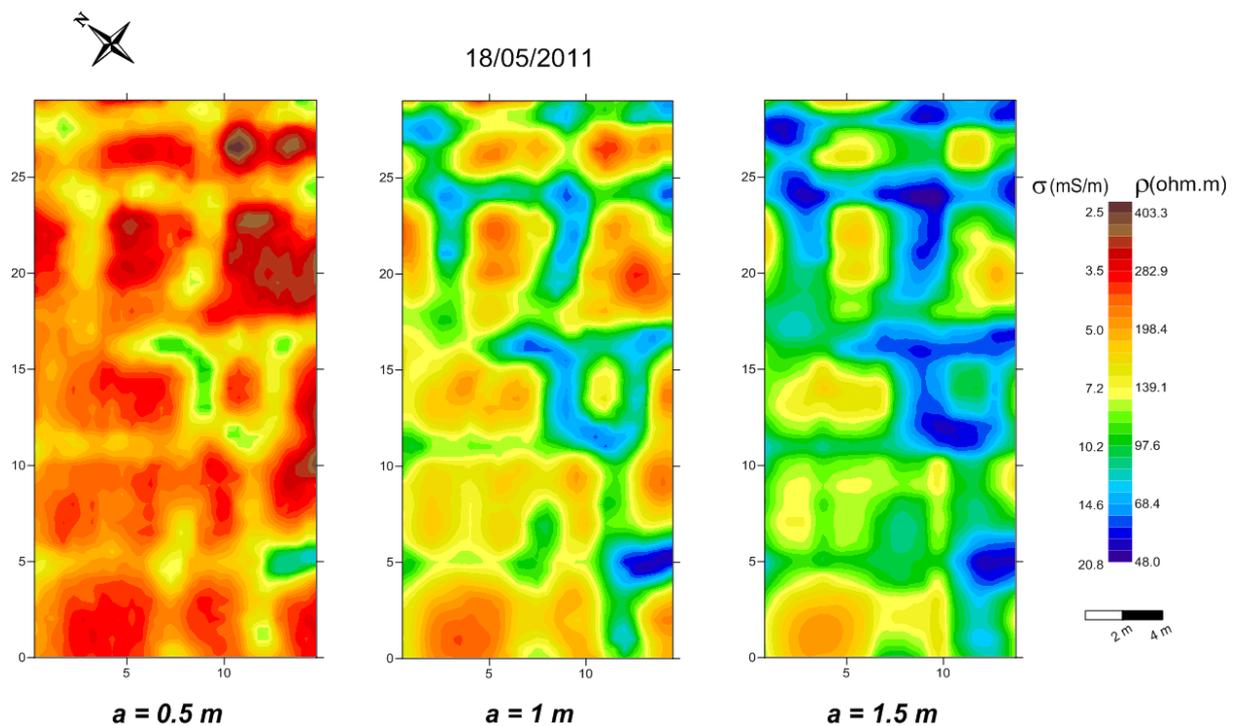


Figure III-53 : Cartes de résistivité électrique apparente mesurée à l'aide du RM15-D pour trois écartements inter-électrodes : 0,5 m, 1 m et 1,5 m.

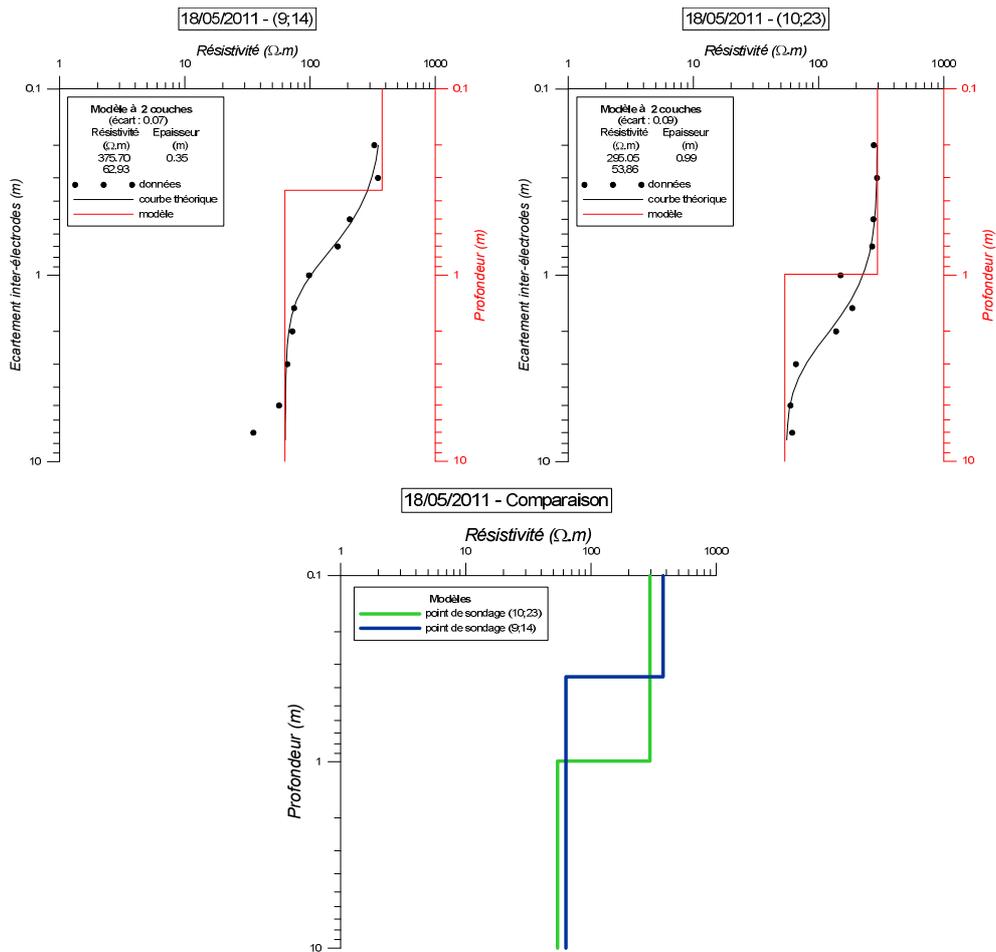


Figure III-54 : Sondages électriques (Wenner α) et modèles associés après inversion aux points (9 ; 14) et (10 ; 23) de la zone de prospection (Figure III-55b).

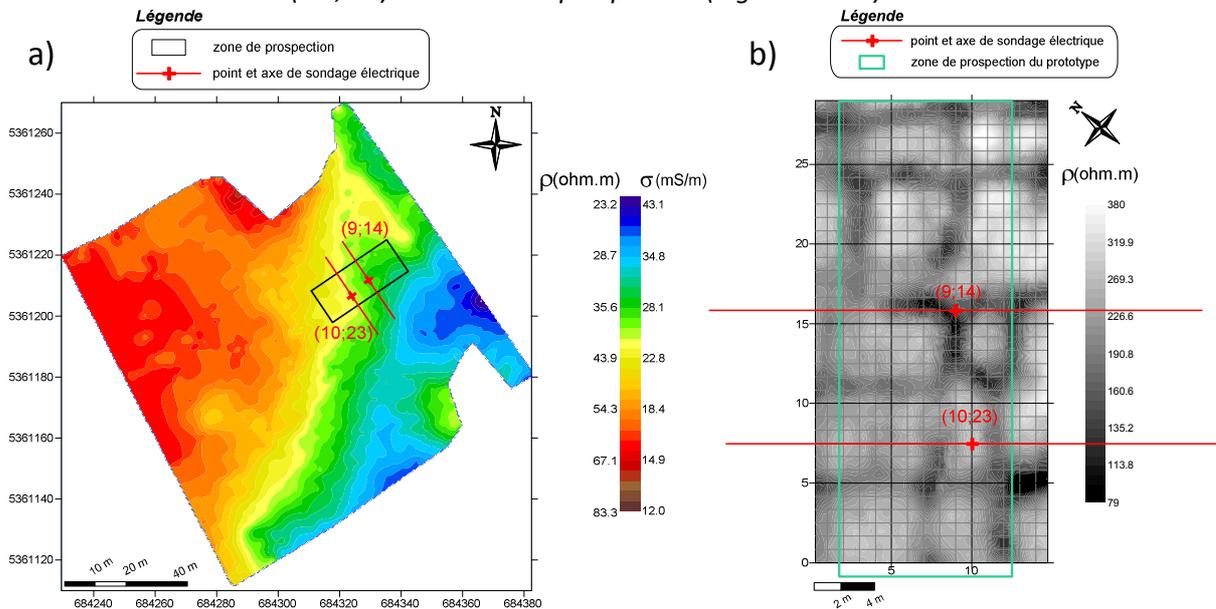


Figure II-55 : a) Carte de conductivité électrique apparente réalisée à l'EM31, en amont de notre étude (Brinon, 2012) avec localisation de la zone de prospection et des points de sondage électrique. b) Positionnement des points de sondages et de la zone de prospection du prototype sur la carte de résistivité électrique apparente obtenue avec le résistivimètre RM15-D pour un écartement inter-électrodes $a=1$ m.

Mesures EM basses fréquences (CS60)

Des mesures ont également été entreprises avec le CS60. Les résistivités apparentes mesurées (Figure III-56), comprises entre 20 et 150 $\Omega.m$ sont cohérentes avec les valeurs de résistivité électrique apparente obtenues au RM15-D pour une profondeur d'investigation comprise entre 1 m et 1,5 m. Bien que moins nettes, on observe des zones de plus faible résistivité (comprise entre 20 et 40 $\Omega.m$) d'axe NE-SO et NO-SE qui correspondent au réseau de fractures. Cependant, la localisation de ces anomalies conductrices ne correspond pas exactement avec celle des anomalies repérées sur les cartes obtenues au RM15-D (Figure III-57). Ces décalages sont certainement liés à la configuration du dispositif de mesure utilisé. Pour s'assurer de la validité de cette hypothèse, il faudrait effectuer des modélisations 3D de la réponse du sol à un dispositif Slingram en configuration VCP, pour la fréquence propre de l'appareil (27,96 kHz) et les comparer avec les résultats mesurés.

Les variations de susceptibilité magnétique plus superficielles ne semblent pas correspondre au réseau de fractures. On observe uniquement une augmentation de la susceptibilité d'est en ouest, qui traduit une évolution de la couche superficielle.

Mesures EM fréquence moyenne (CE120)

La conductivité électrique apparente mesurée à l'aide du prototype à 1,56 MHz présente également des variations d'axe NE-SO et NO-SE (Figures III-58 et III-59). Si on compare ces variations à celles présentes sur les mesures effectuées au RM15-D, on observe un décalage d'environ 2 m vers le sud-est des anomalies linéaires conductrices orientées NE-SO, décalage également observé, mais dans une moindre mesure, pour les mesures au CS60. Comme précédemment, afin de mieux comprendre ces variations, une modélisation 3D permettant de retrouver les variations de conductivité électrique pour une configuration d'appareil donnée et un modèle fixé à partir des données initiales (cartes de résistivité électrique au RM15-D) est prévu.

On retrouve le même type de variations avec les permittivités diélectriques (Figure III-58) ; les plus élevées correspondant aux conductivités électriques les plus élevées qui marquent probablement la présence d'un matériau de remplissage plus fin au sein des fractures. Les valeurs de permittivité diélectrique relative sont comprises entre 5 et 72. Si les valeurs de permittivité les plus faibles ($\epsilon_r \leq 20$) peuvent être expliquées uniquement à l'aide des mécanismes de polarisation dipolaire (ou moléculaire) (cf. chapitre 1-4.3), les valeurs plus élevées, correspondant au matériau de remplissage, voient apparaître d'autres mécanismes de polarisation d'interface. Le matériau de remplissage étant plus fin, il est probable qu'il contienne un pourcentage d'argile plus important que la roche calcaire, une plus forte teneur en eau et une plus forte teneur en matière organique.

En complément de l'étude de la conductivité électrique, la permittivité diélectrique nous donne ainsi des renseignements sur la nature du sous-sol, et notamment sur la présence de matériau plus ou moins argileux. A ce stade, une quantification de la teneur en argile ne peut être réalisée, mais doit être envisagé en employant un modèle plus élaboré que le modèle empirique utilisé pour les données de Mons.

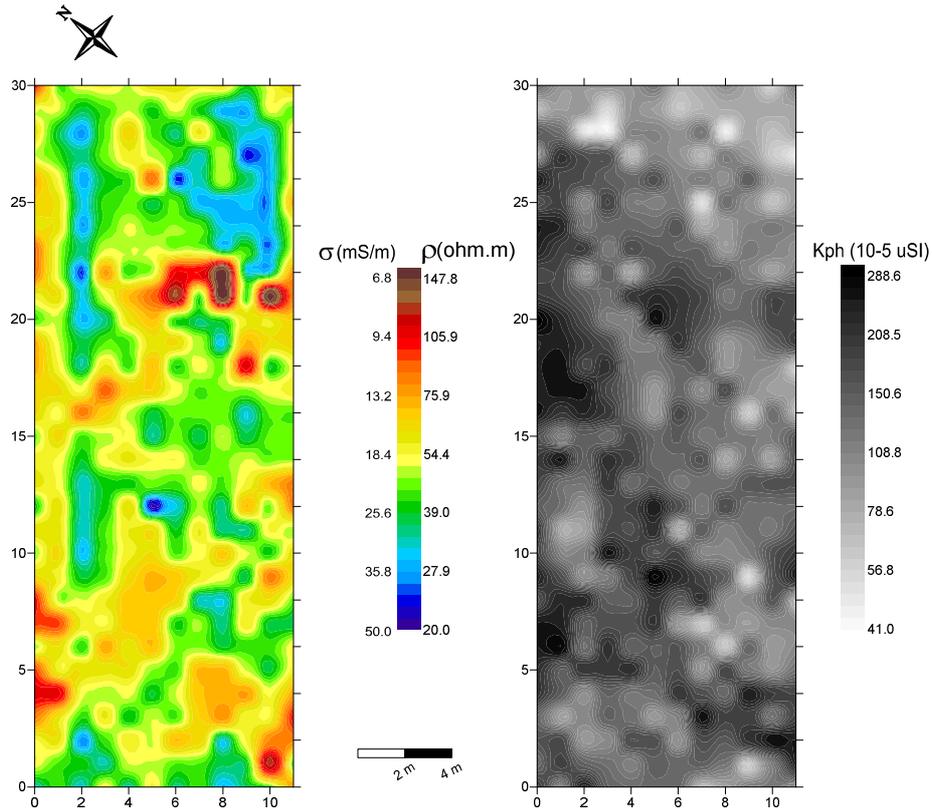


Figure III-56 : Cartes de résistivité électrique apparente et de susceptibilité magnétique apparente mesurées à l'aide du CS60 avec un maillage carré de 1 m de côté.

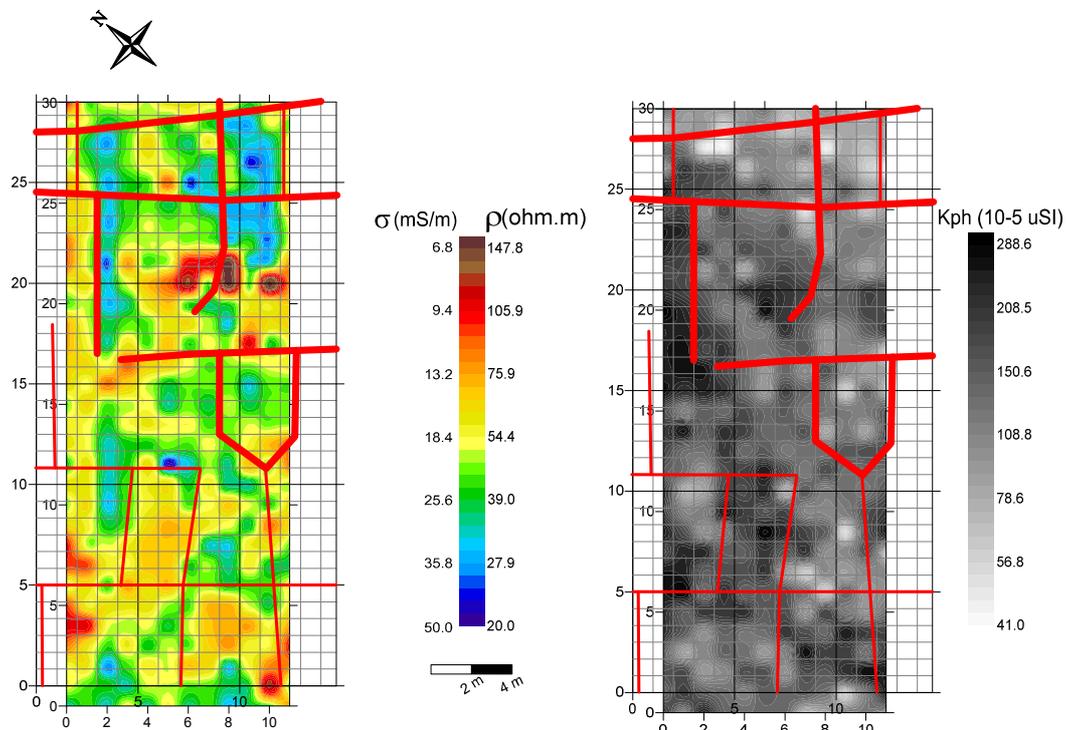


Figure III-57 : Cartes de résistivité électrique apparente et de susceptibilité magnétique apparente mesurées à l'aide du CS60 avec un maillage carré de 1 m de côté comparées avec le réseau de fractures (lignes rouges) observé à l'aide de la cartographie électrique au RM15-D.

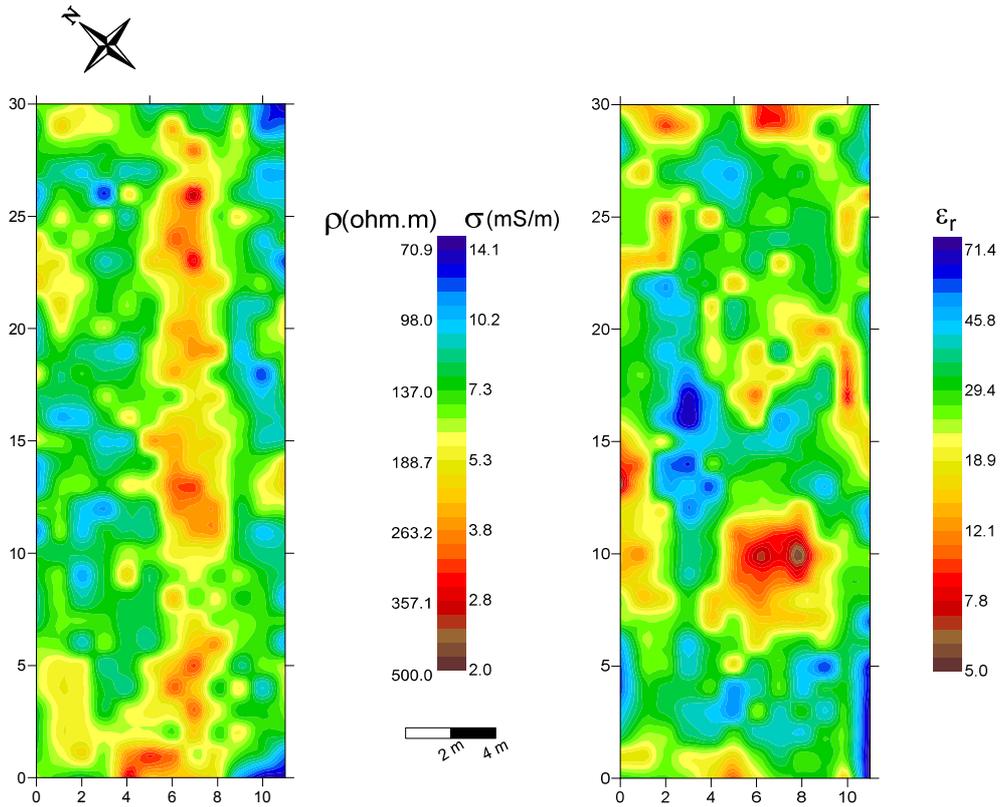


Figure III-58 : Cartes de conductivité électrique apparente et de permittivité diélectrique apparente mesurées à l'aide du prototype à 1,56 MHz avec un maillage carré de 1 m de côté.

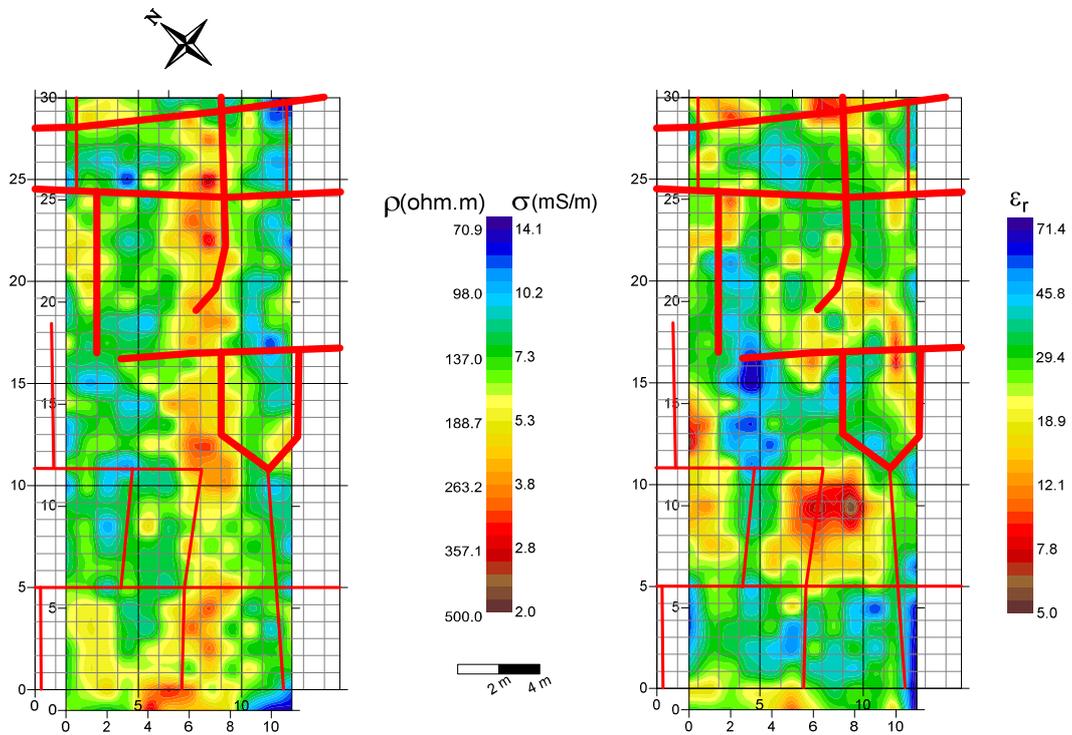


Figure III-59 : Cartes de conductivité électrique apparente et de permittivité diélectrique apparente mesurées à l'aide du prototype à 1,56 MHz avec un maillage carré de 1 m de côté comparées avec le réseau de fractures (lignes rouges) observé à l'aide de la cartographie électrique au RM15-D.

6. Conclusions

Plusieurs étapes sont nécessaires afin de développer un prototype permettant de mesurer simultanément la permittivité diélectrique et la conductivité électrique aux fréquences moyennes. Une première phase de modélisation permet de déterminer les caractéristiques optimales de l'appareil répondant aux objectifs fixés en termes de profondeur d'investigation et de sensibilité aux variations des paramètres électriques du sol. Afin d'obtenir un prototype sensible à la fois aux variations de conductivité électrique et de permittivité diélectrique, et intégrant la mesure de ces paramètres sur une profondeur d'investigation égale à 1 m, nous avons choisi de construire un appareil de type « Slingram » en configuration PERP, d'écartement inter-bobine égal à 1,2 m et l'avons mis en œuvre à la fréquence de 1,56 MHz.

Il faut également s'assurer que les variations de permittivité diélectrique et de conductivité électrique se distinguent suffisamment dans la mesure des champs pour être déterminées. D'après les abaques construits pour les caractéristiques de notre appareil, à un jeu de données représentant les parties réelles et imaginaires des rapports de champs correspond un unique couple de paramètres électriques. Cependant, les variations n'étant pas linéaires, les données doivent être inversées.

Afin de tester le bon fonctionnement de l'appareil, mais également de le calibrer, des mesures à l'aide d'une boule en aluminium ont été entreprises et comparées aux résultats de modélisation. On retrouve des variations semblables entre les mesures et le modèle qui nous permettent de déterminer un coefficient de calibration. Cette calibration est complétée par des tests sur la réponse de l'appareil à un changement d'altitude qui corrobore les résultats précédents.

Des mesures *in situ* peuvent alors être envisagées. Nous avons effectué une série de mesures sur trois sols différents, possédant des contrastes d'humidités naturels ou artificiels.

Le site de l'INRA d'Orléans est composé d'alluvions sableuses de résistivités électriques très importantes (1500 Ω .m en moyenne) et possédant une argilosité faible. Une bâche a été installée au centre du terrain afin de créer des contrastes de teneur en eau. En limitant l'évaporation, la zone bâchée présente ainsi une humidité plus importante. La carte de conductivité électrique obtenue à l'aide du CE120 ne permet pas de détecter des contrastes clairs à l'intérieur de la zone bâchée, mais est sensible aux transitions entre les zones bâchée et non bâchée. Les limites de la méthode sont atteintes en terme de mesures de conductivité électrique à l'aide d'un appareil de géométrie Slingram. Concernant la permittivité diélectrique mesurée, on distingue bien la zone bâchée qui possède une permittivité diélectrique en moyenne plus élevée que dans la zone non bâchée. Les valeurs de permittivité obtenues sont relativement faibles (comprises entre 2 et 19) et traduisent le fait qu'il n'y a pas de mécanismes de polarisation d'interfaces présents à cause de la faible teneur en eau des terrains et de leur nature sableuse. La cartographie peut donc être traduite en teneur en eau à l'aide des lois de comportement utilisées dans le domaine des hautes fréquences. En appliquant la loi de Topp, on retrouve des teneurs en eau volumiques proches de celles mesurées sur échantillons.

C'est sur le site de l'INRA d'Estrée-Mons que sont localisées les parcelles de l'ORE-ACBB. Nous avons effectué des mesures sur plusieurs zones, à plusieurs périodes de l'année. Les sols, classés dans la famille des luvisols limoneux, possèdent une teneur en argile proche de 20 %. La conductivité

électrique calculée à l'aide du prototype de mesure est élevée et présente des valeurs similaires à celles mesurées par méthodes électriques et EMI. La permittivité diélectrique est, quant-à-elle, beaucoup plus élevée que dans les alluvions précédemment étudiés (en moyenne proche de 80). Ces valeurs traduisent la présence de mécanismes de polarisation d'interfaces liés à la teneur en argile des sols. La teneur en eau ne pouvant plus être déterminée directement à l'aide des lois de comportement HF, nous avons appliqué la relation empirique déterminée à l'aide des échantillons en laboratoire, reliant la permittivité diélectrique mesurée à la teneur en eau volumique du sol (cf. chapitre 2-7, eq. (II-22)). Globalement, on retrouve des teneurs en eau volumiques et des contrastes proches des teneurs en eau massiques mesurées à l'aide des échantillons de sols prélevés. La relation empirique déterminée au chapitre 2 a donc été employée avec succès pour déterminer la teneur en eau des sols. Si la relation empirique déterminée en laboratoire a pu être appliquée avec succès aux mesures effectuées à l'aide du CE120 *in situ*, aucune généralisation de ces relations n'a pu être déterminée, et une combinaison de mesures en laboratoire et *in situ* devra être employée pour chaque nouveau cas d'étude.

Une dernière zone d'étude a été sélectionnée dans la commune de Grand (Vosges), où un calcaire fracturé orthogonalement est sub-affleurant. Ce site permet d'évaluer la sensibilité de l'appareil aux variations latérales de propriétés électriques. En effet, le matériau remplissant les fractures est plus argileux, possède une teneur en eau et en matière organique plus élevée. On observe des contrastes importants à la fois en termes de permittivité diélectrique et de conductivité électrique, mais les anomalies semblent décalées vers le sud-est par rapport aux anomalies mesurées en mesure électrique DC et ne peuvent être interprétées directement. Une modélisation 3D de la réponse du CE120 permettant de retrouver les variations de conductivité électrique pour une configuration d'appareil donné et un modèle fixé à partir de données initiales (cartes de résistivité électrique au RM15-D) est prévue pour comprendre ces variations.

Les premiers essais *in situ* de l'appareil permettent donc de confirmer l'utilité des mesures aux fréquences moyennes afin de déterminer des contrastes de teneurs en eau à l'aide de l'interprétation simultanée de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique. Ces premiers résultats méritent d'être confirmés en effectuant des prospections sur une série de sites possédant des sols de nature différente. De plus, la sensibilité du prototype aux variations latérales de nature du sol doit être mieux connue et une modélisation 3D de la réponse du CE120 est nécessaire pour pouvoir interpréter complètement les mesures.

Conclusions et perspectives

Le travail de recherche présenté dans cette thèse porte sur l'étude de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique du sol dans le domaine des fréquences moyennes, l'objectif final étant de développer une nouvelle méthode de cartographie simultanée de ces paramètres électriques dans le but de retrouver la teneur en eau des sols sur une épaisseur métrique. Il est en effet connu en hautes fréquences que la permittivité diélectrique permet de remonter à l'humidité, mais cette gamme de fréquences ne permet pas toujours une profondeur d'investigation suffisante.

Dans le domaine des fréquences moyennes, la permittivité diélectrique effective d'un sol cumule les permittivités liées aux polarisations électroniques, atomiques, dipolaires et d'interfaces. Les fréquences de relaxation associées aux trois premières polarisations étant nettement supérieures à 10 MHz, leurs contributions sont constantes. Si la polarisation dipolaire seule permet de remonter à la teneur en eau, les relaxations liées aux mécanismes de polarisation d'interfaces qui apparaissent pour des fréquences inférieures à 10 MHz complexifie la relation entre permittivité diélectrique et teneur en eau. Cette relation est d'autant plus complexe que la permittivité diélectrique devient dispersive et varie avec la fréquence.

Tous ces mécanismes de polarisation sont liés aux paramètres d'état du sol. Si la polarisation dipolaire permet d'obtenir une relation directe entre la permittivité diélectrique haute fréquence et la teneur en eau du sol, les polarisations d'interfaces seront également liées à la présence de type de minéraux spécifiques comme les argiles. Des lois de comportement sont donc nécessaires afin d'étudier l'influence des différents paramètres sur les paramètres électriques. Les mesures effectuées ont été modélisées à l'aide d'un modèle phénoménologique (modèle Cole-Cole) pour représenter les variations en fonction de la fréquence et d'un modèle empirique (loi de Topp) qui rend compte de la relation directe existant entre la permittivité diélectrique et la teneur en eau volumique aux hautes fréquences. D'autres types de modèles plus physiques existent afin d'interpréter les variations observées d'un point de vue microscopique. Si ce type de modèle n'est pas étudié dans le cadre de notre étude, il sera intéressant à appliquer dans le futur.

Des mesures en laboratoire ont été réalisées afin de connaître l'évolution de ces deux paramètres en fonction de la fréquence dans le domaine des fréquences moyennes. La permittivité diélectrique et la conductivité électrique d'échantillons de sable, de mélanges artificiels de sable et d'argiles (kaolinite et bentonite) en proportions variées ainsi que d'échantillons de sol limoneux ont été mesurées pour différentes teneurs en eau. Nous avons étudié l'effet de la teneur en eau, de la teneur en argile, de la minéralogie des argiles impliquées ainsi que de la salinité de l'électrolyte sur la détermination des paramètres électriques de l'échantillon.

Dans le cas d'échantillons propres (sans argile), les modèles théoriques existant prédisent bien la réponse à haute fréquence des matériaux étudiés en fonction de la teneur en eau. Des effets de polarisation autres que la rotation des molécules d'eau apparaissent pour des fréquences inférieures à 2 MHz. Ces effets sont d'autant plus importants que la teneur en argile augmente. Ils sont liés aux propriétés surfaciques de l'argile présente (capacité d'échange cationique, surface spécifique).

L'estimation de la relation entre la teneur en eau et les paramètres électriques d'un échantillon a tout d'abord été effectuée de manière empirique dans le cas des sols de Mons. La relation

déterminée a ensuite pu être employée afin de retrouver la teneur en eau volumique apparente à l'aide de la permittivité diélectrique mesurée *in situ*. La question de la généralisation de cette relation pour différents types de sols (donc différents teneurs en argile) s'est alors posée. Etant donné les relations HF connues entre la permittivité diélectrique liée à la polarisation dipolaire (permittivité HF due à la rotation des molécules d'eau) et la teneur en eau volumique, nous avons cherché une relation permettant de retrouver la valeur de cette permittivité diélectrique HF à partir de la permittivité diélectrique mesurée, i.e. de déterminer l'apport de la polarisation d'interfaces dans la mesure globale de la permittivité diélectrique MF. Nous proposons de quantifier cette approche à l'aide d'une fonction reliant le rapport de la permittivité diélectrique effective mesurée sur la permittivité diélectrique liée à la polarisation dipolaire et la conductivité électrique mesurée. Un polynôme du second degré est employé dans ce but, cependant, aucune relation n'a pu être déterminée pour l'ensemble de types d'échantillons étudiés. La démarche devra donc être réitérée pour chaque type de sol. L'expression empirique obtenue dans le cas des sols de Mons est appliquée sur les données expérimentales obtenues *in situ* à l'aide du prototype de mesure.

En parallèle a été développé un prototype d'appareil électromagnétique de mesure *in situ*, de type Slingram, composé de deux bobines perpendiculaires (PERP), utilisé à 1,56 MHz. Des modélisations 1D ont été réalisées afin de définir les caractéristiques idéales du prototype de mesure. Après avoir étalonné l'appareil et testé sa réponse sur des objets de propriétés connues, plusieurs sites d'expérimentation ont été choisis : des alluvions sableuses à l'INRA d'Orléans (Centre), des luvisols limoneux de l'INRA d'Estrée-Mons (Picardie) et des sols sur calcaires fracturés du site de Grand (Vosges). Ils présentent tous des natures de sols différentes, et des variations de teneurs en eau, naturelles ou artificielles, ont été cartographiées.

Si, dans le cas des alluvions sableuses, les permittivités diélectriques sont du même ordre de grandeur que les permittivités HF et permettent de retrouver la teneur en eau du sol à partir des modèles théoriques existant (loi de Topp), il n'en est pas de même pour des sols plus riches en argile. Les relations empiriques établies à l'aide des expérimentations en laboratoire permettent une première estimation de la teneur en eau volumique, cohérente avec les teneurs en eau massiques des échantillons prélevés. Une cartographie de la teneur en eau volumique apparente peut alors être proposée.

Plusieurs perspectives de recherche concernant les mesures en laboratoire peuvent être envisagées :

L'exploitation des résultats en laboratoire s'est pour le moment limitée à la détermination d'expressions empiriques permettant de relier permittivité diélectrique et teneur en eau. Il sera nécessaire de mieux comprendre les phénomènes qui régissent les processus de polarisation et de conduction aux fréquences moyennes à l'aide de modèles physiques complexes prenant en compte les polarisations de type Maxwell-Wagner.

De plus, nous nous sommes cantonnés à l'étude des variations de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique aux fréquences moyennes. Il serait très intéressant de coupler ces mesures avec des mesures de polarisation provoquée aux plus basses fréquences et à l'aide de sondes TDR (ou d'antennes RADAR) aux plus hautes fréquences pour un même échantillon afin d'élargir le spectre de mesure et d'appréhender les phénomènes de manière plus globale.

Etant donné qu'il n'a pas été possible de déterminer une relation empirique commune à l'ensemble des échantillons étudiés, il serait intéressant de réitérer les expérimentations sur une plus large gamme de sols possédant des teneurs en argile variées et de tester la pertinence des relations obtenues à l'aide des mesures *in situ*. De plus, nous nous sommes intéressés aux relations empiriques existant aux fréquences proches de la fréquence de mesure choisie pour notre prototype CE120. Cette démarche pourrait être étendue à l'ensemble de la gamme de fréquence étudié et les relations obtenues comparées.

Concernant le prototype de mesure développé, plusieurs perspectives de recherche peuvent être étudiées :

Si les mesures de conductivité électrique obtenues à l'aide du prototype CE120 ont pu être comparées aux conductivités électriques mesurées par d'autres dispositifs fonctionnant dans le domaine des basses fréquences, il n'en est pas de même concernant la permittivité diélectrique. Des mesures à l'aide de sondes TDR ou d'antennes RADAR pourraient compléter les observations effectuées.

De plus, le prototype de mesure développé ne fonctionne actuellement qu'à fréquence de mesure et écartement inter-bobine fixe. Il pourrait être intéressant d'étendre à la fois sa gamme de fréquences de fonctionnement et d'écartements inter-bobines. S'il est possible de travailler à des fréquences comprises entre 1 et 10 MHz pour une même bobine émettrice, un dispositif multi-spacing engendrerait des modifications de la configuration mécanique du prototype.

Enfin, des mesures *in situ* sur des sites présentant des caractéristiques différentes, couplées à des modélisations 3D de la réponse du prototype CE120, permettront de mieux appréhender les limites de sensibilité du prototype.

Références bibliographiques

A

Adler, P.M., Jacquin, C.G., et Thovert, J-F., 1992 : "The formation factor of reconstructed porous media", *Water Resour. Res.*, vol. 28(6), pp. 1571-1576.

Alharthi, A., et Lange, J., 1987 : "Soil Water Saturation: Dielectric Determination", *Water Resour. Res.*, vol. 23(4), pp. 591-595.

Archie, G.E., 1942: "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics", *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, vol. 146, pp. 54-62.

B

Bartier, D., et Blanc-Valleron, M., 2009 : "Rapport de la caractérisation par diffraction des rayons X", Ref commande : I30 / 11017750, 26 Mars 2009.

Benahmed, N., Canou, J., et Dupla, J.-C., 2004: "Structure initiale et propriétés de liquéfaction statique d'un sable". *C.R. Mécanique* 332 (2004), pp. 887-894.

Bourgeois, B., et Lenain, F., 2002 : "Etude de la faisabilité d'un appareil électromagnétique fréquentiel dans la gamme 30 kHz-10 MHz", rapport BRGM RC-51643-FR.

Breede, K., Esser, O., Zimmermann, E., Huisman, J.A., et Kemna, A., 2010 : Characterizing structural and textural subsurface patterns using spectral induced polarization: Effects of saturation, 12, EGU2010-5473, EGU General Assembly, 2010.

Brinon, C., 2012 : "Etude de la ressource en eau du site gallo-romain de Grand (Vosges) et de sa gestion antique", Thèse de doctorat, Université Paris VI, 324 p.

Brinon, C., Simon, F.-X., et Tabbagh, A., 2012 : "Rapid 1D/3D inversion of shallow depth resistivity multipole data : examples in archaeological prospection", in *Geophysics*, accepté.

Bruggeman, D.A.G., 1935 : "Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen", *Ann. Phys. Lpz.*, vol. 24, pp. 636-679.

Burgess, J., 1978 : "Metal ions in solution", Ellis Horwood Limited, Halsted Press, 481 p.

C

Chapman, D. L., 1913 : "A Contribution to the Theory of Electrocapillarity", *Phil. Mag.* 25, 475 p.

Chelidze, T.L., et Guéguen, Y., 1999 : "Electrical properties of porous rocks: a review – I. Theoretical models", *Geophys. J. Int.*, vol. 137, pp. 1-15.

Chelidze, T.L., Guéguen, Y., et Ruffet, C., 1999 : "Electrical properties of porous rocks: a review – II. Experimental results and interpretation", *Geophys. J. Int.*, vol. 137, pp. 16-34.

Chelidze, T.L., Derevjanko, A.I. et Kurilenko, O.D., 1977 : "Electrical spectroscopy of Heterogeneous Systems", *Naukova Dumka, Kiev* (en russe).

Chen, Y., et Or, D., 2006a : "Geometrical factors and interfacial processes affecting complex dielectric permittivity of partially saturated porous media", *Water Resour. Res.*, 42, W06423, doi: 10.1029/2005WR004744, 9 p.

Chen, Y., et Or, D., 2006b : "Effects of Maxwell-Wagner polarization on soil complex dielectric permittivity under variable temperature and electrical conductivity", *Water Resour. Res.*, 42, W06424, doi: 10.1029/2005WR004590, 14 p.

Cole, K. S., et Cole, R. H., 1941 : "Dispersion and adsorption in dielectrics", *J. Chem. Phys.*, vol. 9, pp. 341-351.

Comparon, L., 2005, "Etude expérimentale des propriétés électriques et diélectriques des matériaux argileux consolidés". Thèse de doctorat, IPGP, 388 p.

Cosenza, P., Ghorbani, A., Camerlynck, C., Rejiba, F., Guérin, R., et Tabbagh, A., 2009 : "Effective medium theories for modeling the relationships between electromagnetic properties and hydrological variables in geomaterials: a review", *Near Surface Geophysics*, 7, pp. 563-578.

Cosenza, P., et Tabbagh, A., 2004 : "Electromagnetic determination of clay water content : role of microporosity", *Applied Clay Science*, 26, pp 21-36.

Cosenza, P., Camerlynck, C., et Tabbagh, A., 2003 : "Differential effective medium schemes for investigating the relationship between high-frequency relative dielectric permittivity and water content of soils", *Water Resour. Res.*, 39(9), 1230, 13 p.

Coussy, O., 1991: "Mécanique des milieux poreux". Editions Technip, 487 p.

Cubas, N., 2009 : "Séquences de chevauchement, prédictions mécaniques, validation analogique et application à la chaîne de l'Agrio", Thèse de doctorat, Université Paris XI, 233 p.

D

Davidson, D. W., et Cole, R. H., 1951 : "Dielectric relaxation in glycerol, propylene glycol, and n-propanol", *J. Chem. Phys.*, vol. 19, pp. 1484-1490.

Debye, P., 1929 : "Polar molecules", *Chemical Catalogue Company*, New York, pp. 109-124.

Deng, C., Shaw, J., Liu, .Q., Pan, Y., et Zhu, R., 2006 : "Mineral magnetic variation of the Jingbian loess/paleosoil sequence in the northern Loess Plateau of China: Implications for Quaternary development of Asian aridification and cooling.", *Earth and Planetary Science Letters* 241, pp. 248-259.

Dirksen, C. et Dasberg, S., 1993 : "Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 57, pp. 660-667.

F

Féchant, C., 1996 : "Réalisation d'un quadripôle de mesure *in situ* de la permittivité diélectrique des végétaux. Première application à la détermination du contenu en eau des épis de blé", Thèse de doctorat, Université Paris VI, 190 p.

Féchant, C., et Tabbagh, A., 1999 : "Mesure en laboratoire de la permittivité diélectrique moyenne fréquence de végétaux à 430 kHz à l'aide d'un capacimètre. Relation entre permittivité apparente d'un ensemble d'épis de blé et leur contenu en eau", *C.R. Acad. Sci. Paris*, t.327, Série II b, pp. 285-298.

Fialova, H., Maier, G., Petrovsky, E., Kapicka, A., Boyko, T., et Scholger, R., 2006 : "Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings.", *Journal of Applied Geophysics* 59, pp 273-283.

Fixman, M., 1983 : "Thin double layer approximation for electrophoresis and dielectric response", *J. Chem. Phys.*, vol. 78(3), p. 1483-1491.

Fixman, M., 1980 : "Charged molecules in external fields –I- The sphere", *J. Phys. Chem.*, vol. 72, pp. 5177-5186.

Fuller, B.D., and Ward, S.H., 1970 : "Linear-system description of the electrical parameters of rocks", *JEEE Trans. Geosci. Electronics*, GE-8, pp. 7-18.

G-J

Gouy, G., 1910 : "Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte". *J. Phys.*, vol. 9, pp. 457-468.

Guéguen, Y., et Palciauskas, V., 1992 : "Introduction à la physique des roches", Ed. Hermann, 299 p.

Hanai, T., 1968 : "Electrical properties of emulsions", *Emulsion Science*, Sherman Ed., Academic Pres, New-York, pp. 354-478.

Havriliak, S., et Negami, S., 1966 : "A complete plane analysis of α -dispersion in some polymer systems", *J. Polym. Sci., Polym. Symp.*, vol. 6, pp. 99-117.

Hoekstra, P, et Doyle, W.T., 1971 : "Dielectric relaxation of surface adsorbed water", *J. Colloid Inter. Sci.*, vol. 36(4), pp. 513-521

Howell, B.F., et Licastro, P.H., 1961 : "Dielectric behavior of rocks and minerals", *The American mineralogist*, vol. 46(3-4), pp. 269-288.

Jackson, M., L., 1964 : "Soil chemical analysis", Prentice Hall Inc., New Jersey, USA (3rd edition), 521 p.

K

Keskin, H., Atarb, M., Korkutç, S., et Tekina, A., 2010 : "Scratch resistance of cellulosic, synthetic, polyurethane, waterborne, and acid-hardening varnishes used on woods", *Industrial Crops and Products*, vol. 31, pp.1 219–224.

Knight, R., et Nur, A., 1987 : "The dielectric constant of sandstones, 60 kHz to 4 MHz", *Geophysics*, vol. 52, n°5, pp. 644-654.

Knoll, M.D., et Knight, R.J., 1994 : "Dielectric and hydrogeologic properties of sand-clay mixtures", *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Kitchener, Canada, (1994).

Knoll, M. D., 1996 : "A petrophysical basis for Ground-penetrating radar and very early time electromagnetics, electrical properties of sand-clay mixtures", Ph.D. Thesis, University of British Columbia, 316 p.

Kutrubes, D.L., 1986 : "Dielectric permittivity measurements of soils saturated with hazardous fluids". PhD thesis. Colo. Sch. Mines, Golden

L

Leroy, Ph., Revil, A., Kemna, A., Cosenza, P., et Ghorbani, A., 2008 : "Complex conductivity of water-saturated packs of glass beads", *J. Colloid Interface Sci.*, 321, pp. 103-117.

Lichtenecker, K., 1926 : "Die dielektrizitätskonstante natürlicher kunstlicher mischkörper", *Physikalische Zeitschrift*, vol. 27, pp. 115.

M-N

Marmet, E., Bina, M., Fedroff, N., et Tabbagh, A., 1999: "Relationship between human activity and the magnetic properties of soils : a case study in the medieval site of Roissy en France." *Archaeological Prospection*, vol. 6, pp 161-170.

Martin, S., 2010, "Impacts de systèmes de culture sur la dynamique des complexes organominéraux contenant du fer dans un luvisol". Rapport de stage de Master 2 Hyrdologie, Hydrogéologie et sols (Paris –Sud XI), 32 p.

Maxwell, J.C., 1873 : "A treatise on electricity and magnetism", Oxford Clarendon Press, vol.1-2, 507 p.

Maxwell, J.C., 1865 : "A dynamical theory of the electromagnetic field", *Philosophical Transaction of the Royal Society of London (The Royal Society, Editor)*, pp. 459-512.

Maxwell-Garnett, J.C., 1904 : "Colours in metal glasses and in metallic films", *Trans. Royal Soc. London*, vol. 203, pp. 385-420.

Norris, A.N., Callegari, A.J., et Sheng, P., 1985 : "Effective-medium theories for two-phase dielectric media", *Journal of Applied Physics*, vol. 57, pp. 1990-1996.

O

Olhoeft, G.R., 1987 : "Electrical properties from 10^{-3} to 10^9 Hz - physics and chemistry". *Physics Chem. Porous Media II*, 2nd ed. JR Banavar, J Koplik, KW Winkler, AIP Conf. Proc. 154, pp. 775-786.

Olhoeft, G.R., 1985 : "Low-frequency electrical properties", *Geophysics*, vol.50 (12), pp. 2492-2503.

Olhoeft, G.R., 1979a : "Nonlinear electrical properties", *Nonlinear behavior of molecules, atoms and ions in electric, magnetic, or electromagnetic fields*, Neel, L., Ed., Elsevier Science Publishing Co., pp. 395-410.

Olhoeft, G.R., 1979b : "Electrical Properties", in *Initial Report of the Petrophysics Laboratory*, U.S. Geological Survey Circular 789, Reston, VA, pp. 1-24.

Olhoeft, G.R., 1976 : "Electrical properties of rocks", *The Physics and Chemistry of Minerals and Rocks (Strens, R.G.J., Editor)*, Wilsons and Sons, England, pp. 261-278.

Okay, G., 2011 : "Caractérisation des hétérogénéités texturales et hydriques des géomatériaux argileux par la méthode de Polarisation Provoquée : Application à l'EDZ de la station expérimentale de Tournemire", Thèse de doctorat, Université Paris VI, 427 p.

P-R

Pelton, W.R., et Sill, W.R., and Smith, B.D., 1983 : "Interpretation of complex resistivity and dielectric data Part I", *Geophys. Trans.*, vol. 29(4), pp. 297-330.

Pissis, P., Georgoussis, G., Bersthtein, V.A., Neagu, E., et Fainleib, A.M., 2002 : "Dielectric studies on homogeneous polyurethane/polycyanurate interpenetrating polymer networks", *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 305, pp. 150–158.

Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. et Flannery, B.P., 1992 : "Numerical Recipes in FORTRAN", Cambridge Univ. Press, New York, 1486 p.

Roberts, J.N., et Schwartz, L.M., 1985 : "Grain consolidation and electrical conductivity in porous media", *Phys. Rev. B*, vol.31, pp. 5990-5997.

S

Schurr, J.M., 1964 : "On the theory of the dielectric dispersion of spherical colloidal particles in electrolyte solution", *J. Phys. Chem.*, vol. 68(9), pp. 2407-2413.

Schwarz, G., 1962 : "A theory of the low-frequency dielectric dispersion of colloidal particles in electrolyte solution", *J. Phys. Chem.*, vol. 66, pp. 2636-2642.

Scott, J.J., Carroll, R.D., et Cunningham, D.R., 1967 : "Dielectric constant and electrical conductivity measurements of moist rock : a new laboratory method", *J. Geophys. Res.*, vol. 72, pp. 5105–5115.

Sen, P.N., 1987 : "Electrolytic conduction past arrays of charged insulating spheres", *J. Chem. Phys.*, vol. 87(7), pp. 4100-4107.

Sen, P.N., Scala, C., et Cohen, M.H., 1981 : "A self-similar model for sedimentary rocks with application to the dielectric constant of fused glass beads", *Geophys.*, vol. 46(5), pp. 781-795.

Shaw, D.J., 1992 : "Introduction to colloid and surface chemistry", Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd., 236 p.

Simandoux, P., 1963 : "Mesures diélectriques en milieu poreux - Application à la mesure des saturation en eau – Etude du comportement des massifs argileux", *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, n° Hors-Série, pp. 193-215.

Smith-Rose, R.L., 1935 : "The electrical properties of soils for at frequencies up to 100 Megacycles per second; with a note on the resistivity of ground in the United Kingdom", *Proc. Phys. Soc.*, vol. 47, pp. 923-931.

Smith-Rose, R.L., 1933 : "The electrical properties of soils for alternating currents at radio frequencies", *Proc. R. Soc. London A*, vol. 140 , pp. 359–377.

Souloumiac , P., 2009 : "Evolution de structures compressives en 2D et 3D par le calcul à la rupture", thèse de doctorat, Ecole centrale de Paris, 245 p.

Stern, O., 1924 : "Zur Theorie der electrolytischen Doppelschicht", *Z. Elektrochemie*, vol. 30, pp. 508-516.

Stewart, D.C., Anderson, W.L., Grover, T.P., et Labson, V.F., 1994: "Shallow subsurface mapping by electromagnetic sounding in the 300kHz to 30 MHz range: Model studies and prototype system assessment", *Geophysics*, vol. 59 (8), pp. 1201-1210.

T

Tabbagh, A., 1994 : "Simultaneous Measurement of electrical conductivity and dielectric permittivity of soils using a Slingram electromagnetic device in medium frequency range", *Archeometry*, vol. 36(1), pp. 159-170.

Tabbagh, A., Camerlynck, C., et Cosenza, P., 2000 : "Numerical modeling for investigating the physical meaning of the relationship between relative permittivity and water content of soils", *Water Resour. Res.*, vol. 36(9), pp. 2771-2776.

Tabbagh, A., Cosenza, P., Ghorbani, A., Guérin, R. et Florsch, N., 2009: "Modelling of Maxwell-Wagner induced polarization amplitude for clayey materials", *J. Appl. Geophys.*, vol. 67, pp. 109-113.

Tabbagh, A. et Panissod, C., 2000 : "1D complete calculation for electrostatic soundings interpretation", *Geophysical Prospecting*, vol. 48, pp. 511-520.

Tabbagh, A., Panissod, C., Guérin, R., et Cosenza, P., 2002 : "Numerical modeling of the role of water and clay content in soils' and rocks' bulk electrical conductivity", *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, n° B11, 2318, ECV 20, pp. 1-9.

Terhzaz, J., Ammor, H., Assir, A. et Mamouni, A., 2007 : "Application of the FDTD method to determine complex permittivity of dielectric materials at microwave frequencies using a rectangular waveguide", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 49(8), pp. 1964-1968.

Thiesson, J., 2007 : "Mesure et cartographie de la viscosité magnétique des sols", Thèse de doctorat, Université Paris VI, 91 p.

Tite, M. S., et Mullins, C., 1971 : "Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites." *Archeometry*, vol 13(2), pp. 209-219.

Topp, G.C., Davis, J.L., et Annan, A.P., 1980 : "Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines", *Water Resour. Res.*, vol. 16, pp. 574-582.

Tran Ngoc Lan, Chaigne, P., et Philippe, A., 1972 : "Expérimentation d'une méthode capacitive pour l'évaluation de l'humidité des sols", *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, vol. 60 (Juillet-Août 1972), pp. 155-165.

W-Z

Wagner, K.W., 1924 : "Erklärung des dielektrischen Nachwirkungen auf Grund Maxwellischer Vortellungen", *Arch. Electr.*, vol. 2, pp. 371-387.

Waxman, M.H., et Smits, L.J.M., 1968 : "Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands", *SPE J.*, pp. 107-122.

Wobschall, D., 1977 : "A theory of the complex dielectric permittivity of soil containing water: the semi-disperse model", *IEEE Transactions on geoscience electronics*, vol. GE-15 (1), pp. 49-58.

Zakri, T., 1997 : “Contribution à l’étude des propriétés diélectriques de matériaux poreux en vue de l’estimation de leur teneur en eau : modèles de mélange et résultats expérimentaux”, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 251 p.

Listes des Figures et des tableaux

Tableaux

Chapitre 1

Tableau I-1 : Expressions des paramètres caractérisant les différents régimes.	15
Tableau I-2 : Caractéristiques des différents mécanismes de polarisation présents dans les milieux poreux.	23
Tableau I-3 : Comparaison des différentes approximations effectuées dans le cadre de la théorie des milieux effectifs, dans le cas d'un mélange à deux phases où ε^* correspond à la permittivité effective du milieu, ε_1 est égale à la permittivité diélectrique de la matrice solide, ε_2 à la permittivité des inclusions (phase fluide), ϕ correspond à la porosité et d est un paramètre prenant en compte la forme des inclusions ($d = 1/3$ dans le cas d'inclusions sphériques).	37

Chapitre 2

Tableau II-1: Caractéristiques du multimètre vectoriel PSM1735 de NumtriQ utilisé en mode FRA.	47
Tableau II-2 : Paramètres du modèle à 4 couches utilisé pour représenter le dispositif de mesure composé de l'échantillon contenu dans la partie inférieure de la cellule capacitive	64
Tableau II-3 : Analyse DRX (échantillon brute et fraction fine), BET (surface spécifique) et CEC des poudres de kaolinite et de bentonite utilisées dans les mélanges argilo-sableux (Bartier et Blanc-Valleron, 2009).	69
Tableau II-4 : Composition chimique des échantillons provenant des deux parcelles P8 et P16 de l'INRA d'Estrée-Mons, exprimée en %	70
Tableau II-5 : Composition physique des échantillons provenant des deux parcelles P8 et P16 de l'INRA d'Estrée-Mons, exprimée en g/kg	70
Tableau II-6 : Composition minéralogique de l'eau du robinet utilisée dans les mesures de permittivité diélectrique et de conductivité électrique (rapport de l'agence régionale de santé d'Ile de France).	71
Tableau II-7 : Etude des différents paramètres Cole-Cole en jeu pour un échantillon de sable de teneur en eau variable ($\sigma_w = 450 \mu S/cm$)	75

Chapitre 3

Tableau III-1 : Expressions du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction des différentes configurations Slingram envisagées.	111
Tableau III-2 : Epaisseur maximale de la première couche au-dessus de laquelle on détecte la 2 ^e couche du modèle, i.e. profondeur d'investigation obtenue, pour les configurations PERP et VCP en fonction de l'écartement inter-électrode, étudiée pour les modèles C/R et R/C précédemment définis.	121
Tableau III-3 : Caractéristiques électroniques des bobines employées	134

Figures

Chapitre 1

- Figure I-1 : Modèle de Stern de la double couche électronique (d'après Shaw, 1992). Les Ψ_j représentent les potentiels (en V) : i) sur la surface du minéral (Ψ_0), ii) sur le plan de Helmholtz (couche de Stern), potentiel entre la couche de Stern externe et la solution électrolytique libre (Ψ_s), iii) entre la surface de cisaillement et l'électrolyte libre (Ψ_l), qui est supposé identique à Ψ_s . 18
- Figure I-2 : Représentation des effets Maxwell-Wagner dans un sol : (A) Alignement des cations de la double couche électrique (DDL) à l'interface solide/liquide ; (B) Accumulation des ions à l'interface liquide/air provoqué par le contraste de propriétés électriques entre les différentes phases. La permittivité apparente ε_a du milieu ne peut plus être calculée à partir d'une combinaison linéaire des permittivités de la phase solide ε_s et de la phase liquide ε_w (Chen et Or, 2006a). 22
- Figure I-3 : Représentation schématique des variations de permittivité diélectrique réelle ε' et imaginaire ε''_d (pertes diélectrique) et ε''_c (influence de la conductivité) en fonction de la fréquence. Lors de l'apparition de chaque nouveau mécanisme de polarisation, une nouvelle permittivité est additionnée à la permittivité apparente avec : ε_{a-e} permittivité liée aux polarisations atomique et électronique, ε_{dip} permittivité liée à la polarisation dipolaire, ε_{MW} permittivité liée à la polarisation Maxwell-Wagner, ε_i permittivité liée aux polarisations d'interface (polarisation d'électrode, de membrane...) (d'après Tran Ngoc Lan et al., 1972). 24
- Figure I-4 : Comparaison des modèles de Debye et Cole-Cole pour une fréquence de relaxation centrale égale à 10 Hz ($\tau_0 \approx 0,016$ s), un coefficient α égal à 0,5 et des permittivités diélectriques effectives relatives statique et infinie égales à : $\varepsilon_s = 1000$ et $\varepsilon_\infty = 30$. Ces modèles sont représentés sous forme de diagramme d'Argand **a)** et en terme de partie réelle (bleue) et partie imaginaire (rouge) de la permittivité diélectrique effective en fonction de la fréquence **b)**. 27
- Figure I-5 : Comparaison des modèles Cole-Cole, Davidson-Cole et généralisé pour une fréquence de relaxation centrale égale à 10 Hz ($\tau_0 \approx 0,016$ s), pour des coefficients α et β égaux à 0,6 et des permittivités diélectriques effectives relatives statique et infinie égales à : $\varepsilon_s = 1000$ et $\varepsilon_\infty = 30$. Ces modèles sont représentés sous forme de diagramme d'Argand **a)** et en terme de partie réelle (bleue) et partie imaginaire (rouge) de la permittivité diélectrique effective en fonction de la fréquence **b)**. 28
- Figure I-6 : Représentation du modèle de dispersion de la conductivité électrique pour ($\tau_0 = 1$ s ; $m = 0,9$; $\sigma_{DC} = 10^{-3}$ S/m (d'après Comparon, 2005). 30

Figure I-7 : Parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective relative représentées à l'aide du modèle général (eq. (I-43)) dans le cas de trois processus de polarisation différents, associés à trois fréquences de relaxation, pour trois coefficients α égaux à 0, trois coefficients β égaux à 1, trois coefficients C égaux à 0,33, une permittivité diélectrique relative statique ϵ_s égale à 1000 et une permittivité diélectrique relative infinie ϵ_∞ égale à 30, pour trois valeurs différentes de conductivité électrique ($\sigma_{DC} = 0 S/m, 10^{-6} S/m$ et $10^{-4} S/m$), comparées avec un modèle prenant en compte uniquement σ_{DC} ($\epsilon''_{eff,r} = \sigma_{DC}/\omega\epsilon_0$). 31

Figure I-8 : Organisations des différents diélectriques composant le milieu étudié, dans le cas d'un modèle « alpha », pour lesquelles le coefficient α est égal à -1 (arrangement en série des constituants par rapport à la direction du champ électrique appliqué \vec{E}) ou à 1 (arrangement en parallèle des constituants par rapport à la direction du champ \vec{E}) (d'après Comparon, 2005). 34

Figure I-9 : Schéma du processus itératif de la théorie DEM (d'après Cosenza et al., 2003). 38

Chapitre 2

Figure II-1 : Circuit électronique équivalent au dispositif de mesure utilisé alliant un multimètre vectoriel (composants violets) à une cellule capacitive représentée par un circuit RC (R_{tot} et C_{tot}). 46

Figure II-2: Dimensions des bords en plexiglass de la cellule capacitive. 48

Figure II-3. : Dispositif de mesure employé pour mesurer la permittivité diélectrique complexe d'un échantillon de sol placé dans une cellule capacitive reliée au voltmètre vectoriel. 48

Figure II-4: Circuit électronique équivalent à la cellule capacitive représentée par un circuit RC mis en série avec la capacité K du vernis isolant. 50

Figure II-5: Paramètres électriques C_{tot} et $G_{tot} = 1/R_{tot}$ calculé à partir du modèle Cole-Cole possédant les caractéristiques suivantes : $\epsilon_\infty = 5$, $\epsilon_s = 100$, $\tau_0 = 2.10^{-6}s$ et $c = 1$. 51

Figure II-6: Dimensions caractéristiques de l'échantillon étudié, ainsi que de la couche isolante de vernis. 52

Figure II-7: Variations de la capacité K de la couche de vernis isolante en polyuréthane pour des fréquences de mesure comprises entre 1 kHz et 10 MHz, mesurées à l'aide de la cellule capacitive contenant une solution saturée en chlorure de sodium. 53

Figure II-8 : Permittivité diélectrique relative réelle d'un échantillon de plexiglas en fonction de la fréquence de mesure, pour trois valeurs de résistance électrique R_1 . 54

Figure II-9 : Résistivimètre RMCA-4 (CNRS). 55

Figure II-10 : : Dispositif de mesure de la résistivité électrique fréquentielle composé du résistivimètre SECR-1, du porte-échantillon (partie inférieure de la cellule capacitive) et du quadripôle carré électrique.	56
Figure II-11 : Dispositif de mesure de la résistivité électrique fréquentielle composé du multimètre vectoriel PSM 1735 (NumetriQ), de l'atténuateur, du porte-échantillon (partie inférieure de la cellule capacitive) et du quadripôle carré électrique.	57
Figure II-12 : Schéma du dispositif employé et valeurs de résistances mesurées afin de tester l'aptitude des trois résistivimètres à mesurer des résistances sur une large gamme de valeurs.	57
Figure II-13 : Comparaison entre les valeurs des résistances mesurées à l'aide du résistivimètre RMCA-4 et celles fournies par le fabricant.	58
Figure II-14 : Mesures effectuées sur des résistances de valeurs connues comprises entre $0,55 \Omega$ et $100 \text{ k}\Omega$ en fonction de la fréquence de mesure ($f \in [1 ; 10^7]$ Hz) à l'aide du multimètre PSM 1735.	59
Figure II-15 : Mesures effectuées sur des résistances de valeurs connues comprises entre $0,55 \Omega$ et $100 \text{ k}\Omega$ en fonction de la fréquence de mesure ($f \in [10^2 ; 3.10^4]$ Hz) à l'aide du résistivimètre multifréquentiel SECR-1.	60
Figure II-16 : Schéma et photo du quadripôle carré électrique utilisé pour mesuré la conductivité électrique d'un échantillon de sol contenu dans le porte-échantillon de la cellule capacitive.	61
Figure II-17 : Schéma explicitant la prise en compte de sources images, symétriques à l'électrode d'injection par rapports aux bords de l'échantillon, dans le calcul du potentiel mesuré en M, réalisé par la méthode des images (toutes les images du point source A ne sont pas représentées).	63
Figure II-18 : Variations des parties réelles et imaginaires de la résistivité apparente de l'échantillon modélisées en fonction de la fréquence de mesure pour différentes conductivités électriques (comprises entre 1 et 1000 mS/m) et permittivités diélectriques relatives (comprises entre 1 et 55) de l'échantillon de sol, pour un vernis isolant d'épaisseur égale à $100 \mu\text{m}$ à l'aide du calcul statique et du calcul complet.	65
Figure II-19 : a) Conductivité électrique complexe mesurée à l'aide du quadripôle électrique carré pour des solutions possédant des concentrations en NaCl comprises entre 0 et 10 g/L comparées aux mesures effectuées à l'aide du conductivimètre Multi 340i WTW ; b) Résistance de contact calculée pour chaque mesure effectuée au PSM1735.	66
Figure II-20 : Courbe des refus cumulés du sable de Fontainebleau NE 14 utilisé (Annexe A1)	68
Figure II-21 : Principe de la semeuse employé afin d'obtenir une répartition du sable constante sur pour l'ensemble de l'échantillon (d'après Cubas, 2009)	73

Figure II-22 : Echantillon de sable en cours de saturation à l'aide d'un « goutte-à-goutte » placé à deux extrémités de la cellule.	73
Figure II-23 : Variations de la permittivité diélectrique relative réelle et imaginaire en fonction de : A) la fréquence pour différentes teneur en eau volumique et B) la teneur en eau volumique pour différentes fréquences de mesure, comparées avec la permittivité diélectrique donnée par le polynôme de Topp.	76
Figure II-24 : Variations de résistivité électrique DC en fonction de la teneur en eau volumique pour quatre échantillons possédant des électrolytes de conductivité électrique différente. Les résistivités ont été toutes mesurées avec le résistivimètre RMCA-4 à l'exception de celle pour laquelle $\sigma_w = 1,5 \mu S/cm$ où le PSM 1735 a été employé.	77
Figure II-25 : Variations des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence, représentée pour trois teneurs en eau volumiques différentes (6 %, 22 % et 32 %) et quatre conductivités électrolytique : 1,5 $\mu S/cm$ (eau déminéralisée), 103 $\mu S/cm$, 559 $\mu S/cm$ (eau du robinet) et 1 S/m.	78
Figure II-26 : Parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique relative mesurées pour deux modes de dépôt différents de l'échantillon : dépôt manuel et dépôt à l'aide de la semeuse permettant une répartition de densité homogène sur l'ensemble de l'échantillon.	80
Figure II-27 : Variations des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective relative en fonction de : a) la fréquence de mesure et de b) la teneur en eau volumique θ pour un échantillon composé de 20 % de kaolinite .	85
Figure II-28 : Variations des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective relative en fonction de : a) la fréquence de mesure et de b) la teneur en eau volumique θ pour un échantillon composé de 40 % de kaolinite .	86
Figure II-29 : Variations des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective relative en fonction de : a) la fréquence de mesure et de b) la teneur en eau volumique θ pour un échantillon composé de 20 % de bentonite .	89
Figure II-30 : Variations des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective relative en fonction de : a) la fréquence de mesure et de b) la teneur en eau volumique θ pour un échantillon composé de 40 % de bentonite .	90
Figure II-31 : Variations des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective relative en fonction de : a) la fréquence de mesure et de b) la teneur en eau volumique θ pour un échantillon de sol naturel remanié provenant de la parcelle P16 de l'INRA d'Estrée-Mons .	93
Figure II-32 : Variations des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique effective relative en fonction de : a) la fréquence de mesure et de b) la teneur en eau volumique θ pour un échantillon de sol naturel remanié provenant de la parcelle P8 de l'INRA d'Estrée-Mons .	94

Figure II-33 : Représentation de la teneur en eau volumique en fonction de la partie réelle de la permittivité diélectrique relative, pour des fréquences de mesure égales à 1,024 MHz et 2,048 MHz, pour les échantillons de sol provenant des parcelles P8 et P16 de l'INRA d'Estrée-Mons.	95
Figure II-34 : Représentation de la permittivité diélectrique relative totale $\epsilon_{r,totale}$ mesurée pour des fréquences comprises entre 1 et 2 MHz, en fonction de la permittivité diélectrique relative HF, $\epsilon_{r,dipolaire}$ (déterminée à partir de la relation de Topp), pour différents types d'échantillons.	97
Figure II-35 : Variations de la résistivité électrique DC en fonction de la teneur en eau volumique pour quatre échantillons possédant des électrolytes de conductivité électrique différente. Les résistivités ont été toutes mesurées avec le résistivimètre RMCA-4 à l'exception de celle pour laquelle $\sigma_w = 1,5 \mu S/cm$ où le PSM 1735 a été employé.	98
Figure II-36 : Variations de la résistivité électrique basse fréquence ($f = 1$ kHz) en fonction de la teneur en eau volumique pour des mélanges argilo-sableux étudiés, mesurées à l'aide du PSM1735. Les barres d'erreur, correspondant à 4 positions différentes du quadripôle électrique, donnent une indication sur l'hétérogénéité de l'échantillon.	99
Figure II-37 : Variations de la résistivité électrique DC en fonction de la teneur en eau volumique pour des échantillons de sols provenant des parcelles P16 et P8 du site de l'INRA d'Estrée-Mons, mesurée à l'aide du RMCA-4.	99
Figure II-38 : Représentation du rapport des permittivités diélectriques relatives totales $\epsilon_{r,totale}$ et HF $\epsilon_{r,dipolaire}$, pour des fréquences de mesure comprises entre 1 et 2 MHz, en fonction de la conductivité électrique DC σ_{DC} mesurée à l'aide du quadripôle électrique pour différents types d'échantillons.	100

Chapitre 3

Figure III-1 : Représentation des 5 configurations de type Slingram testées dans les modélisations qui suivent.	106
Figure III-2 : Variations induites dans la mesure du champ primaire H_p mesuré par la bobine réceptrice lorsqu'on introduit une erreur angulaire θ dans le positionnement de R_x , pour une bobine émettrice T_x d'axe vertical.	108
Figure III-3 : Seuils de bruit mesurés en fonction de l'écartement Tx-Rx pour une hypothèse optimiste et pessimiste. Prise en compte du bruit EM ambiant et géométrique (d'après Bourgeois et Lenain, 2002).	110
Figure III-4 : Réponse en phase et en quadrature du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction de la résistivité électrique et de la permittivité diélectrique relative d'un terrain homogène pour 5 configurations Slingram et une fréquence de mesure égale à 200 kHz .	116

Figure III-5 : Réponse en phase et en quadrature du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction de la résistivité électrique et de la permittivité diélectrique relative d'un terrain homogène pour 5 configurations Slingram et une fréquence de mesure égale à 500 kHz .	116
Figure III-6 : Réponse en phase et en quadrature du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction de la résistivité électrique et de la permittivité diélectrique relative d'un terrain homogène pour 5 configurations Slingram et une fréquence de mesure égale à 750 kHz .	117
Figure III-7 : Réponse en phase et en quadrature du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction de la résistivité électrique et de la permittivité diélectrique relative d'un terrain homogène pour 5 configurations Slingram et une fréquence de mesure égale à 1 MHz .	117
Figure III-8 : Réponse en phase et en quadrature du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction de la résistivité électrique et de la permittivité diélectrique relative d'un terrain homogène pour 5 configurations Slingram et une fréquence de mesure égale à 2,5 MHz .	118
Figure III-9 : Réponse en phase et en quadrature du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction de la résistivité électrique et de la permittivité diélectrique relative d'un terrain homogène pour 5 configurations Slingram et une fréquence de mesure égale à 5 MHz .	118
Figure III-10 : Réponse en phase et en quadrature du rapport du champ secondaire sur le champ primaire en fonction de la résistivité électrique et de la permittivité diélectrique relative d'un terrain homogène pour 5 configurations Slingram et une fréquence de mesure égale à 10 MHz .	119
Figure III-11 : Réponses en phase et en quadrature des rapports H_s/H_p pour un terrain tabulaire à 2 couches en fonction de l'épaisseur de la 1 ^{ère} couche, en configurations de mesure PERP et VCP, pour une fréquence de 5 MHz et un écartement T_x-R_x de 0,5 m (courbes noires =: seuil de détection).	122
Figure III-12 : Réponses en phase et en quadrature des rapports H_s/H_p pour un terrain tabulaire à 2 couches en fonction de l'épaisseur de la 1 ^{ère} couche, en configurations de mesure PERP et VCP, pour une fréquence de 5 MHz et un écartement T_x-R_x de 1 m (courbes noires =: seuil de détection).	122
Figure III-13 : Réponses en phase et en quadrature des rapports H_s/H_p pour un terrain tabulaire à 2 couches en fonction de l'épaisseur de la 1 ^{ère} couche, en configurations de mesure PERP et VCP, pour une fréquence de 5 MHz et un écartement T_x-R_x de 1,5 m (courbes noires =: seuil de détection).	123
Figure III-14 : Réponses en phase et en quadrature des rapports H_s/H_p pour un terrain tabulaire à 2 couches en fonction de l'épaisseur de la 1 ^{ère} couche, en configurations de mesure PERP et VCP, pour une fréquence de 5 MHz et un écartement T_x-R_x de 2 m (courbes noires =: seuil de détection).	123

Figure III-15 : Réponses en phase et en quadrature des rapports H_s/H_p pour un terrain tabulaire à 2 couches en fonction de l'épaisseur de la 1 ^{ère} couche, en configurations de mesure PERP et VCP, pour une fréquence de 5 MHz et un écartement Tx-Rx de 1,2 m (courbes noires =: seuil de détection).	124
Figure III-16 : Réponse en phase et en quadrature du terrain tabulaire à 3 couches décrit ci-dessus, en fonction de la profondeur du toit de la couche mobile conductrice et de sa permittivité diélectrique relative $\epsilon_{r,2}$, pour les configurations de mesure PERP et VCP, pour des fréquences de mesure comprises entre 1 et 10 MHz et pour un écartement Tx-Rx de 1,2 m (courbes rouges =: seuil de détection de la couche conductrice).	127
Figure III-17: Variation de la conductivité électrique σ (mS/m) et la permittivité diélectrique relative ϵ_r , en fonction des valeurs de la partie réelle $\text{Re}(H_s/H_p)$ et de la partie imaginaire $\text{Im}(H_s/H_p)$, pour des bobines émettrice T_x et réceptrice R_x perpendiculaires espacées de 1,2 m, à 0,2 m au-dessus du sol et pour 3 fréquences de mesure : 1,56 MHz ; 3,03 MHz ; 4,49 MHz.	131
Figure III-18 : Représentation du dispositif de mesure de type Slingram en configuration PERP avec un DMH de moment \vec{M} et une bobine réceptrice mesurant la composante verticale \vec{H}_{zs} du champ créé par une cible en sous-sol.	133
Figure III-19 : Dispositif de mesure composé du prototype posé sur son chariot en fonctionnement sur le site expérimental de l'ORE ACBB (INRA).	134
Figure III-20 : Positionnement des éléments composant le prototype.	134
Figure III-21 : Bobine émettrice R_x .	135
Figure III-22 : Bobine réceptrice T_x .	135
Figure III-23 : Principaux composants des circuits électriques placés au centre du dispositif.	136
Figure III-24 : a) Géométrie du problème modélisé (d'après Thiesson, 2007). b) Exemple d'étalonnage à la boule - profil latéral.	137
Figure III-25 : Comparaison des modèles et des mesures effectuées en déplaçant la sphère suivant des profils latéral et transversal à 1,56 MHz. Au centre du dispositif, une mesure à vide a été répétée afin de contrôler la variation de la valeur de référence de l'appareil.	139
Figure III-26 : Comparaison entre les mesures des champs magnétiques avec altitude par rapport au sol et un modèle de sol homogène ($\rho = 200 \Omega.m$ et $\epsilon_r = 15$).	140
Figure III-27 : Résistivimètre RM15 couplé au multiplexeur MPX-15 associé au porte-électrodes.	141
Figure III-28 : Résistivimètre RMCA-4 relié à un jeu de 4 électrodes.	142

Figure III-29 : CS60 relié à sa console de commande.	142
Figure III-30 : Localisation de la zone de prospection sur le site de l'INRA d'Orléans (Ardon).	143
Figure III-31 : Teneurs en eau massiques mesurées tous les 30 cm en septembre 2010 et tous les 10 cm en mars et en mai 2011, jusqu'à une profondeur de 90 cm.	145
Figure III-32 : Cartes de la résistivité électrique apparente de la parcelle étudiée à l'INRA d'Orléans, établie avec le résistivimètre RMCA-4 pour une configuration pôle-pôle et un écartement inter-électrode de 1 m. Localisation des sondages électriques et des points de mesure de teneurs en eau massiques.	146
Figure III-33 : Modèles à 3 couches de résistivité électrique obtenus à partir des données de sondage électrique(en configuration Wenner α) de septembre 2010 et mars 2011 aux points PiLj définis sur la figure III-32.	147
Figure III-34 : Cartes de conductivité électrique apparente et de permittivité diélectrique apparente obtenues à l'aide du prototype EM moyennes fréquences pour une fréquence d'émission de 1,56 MHz.	149
Figure III-35 : Carte de teneurs en eau volumiques obtenue à partir de la mesure de la permittivité diélectrique relative à l'aide du prototype de mesure à 1,56 MHz, en utilisant la relation de Topp (Topp et al, 1980).	151
Figure III-36 : Localisation des zones de prospection sur le site de l'ORE ACBB.	152
Figure III-37 : Emplacements des différentes zones prospectées positionnés sur la carte des sols de l'ORE - ACBB (d'après Lindor et Sarrazin, et Brunet, communication personnelle).	153
Figure III-38 : Localisation des zones prospectées P1, P2 et P3 sur la carte des textures superficielles (entre 0 et 20 cm de profondeur) des sols (d'après Lindor et Sarrazin, et Brunet, communication personnelle).	154
Figure III-39 : Etat des trois zones de prospection le 18/03/2011. a) vue de la zone P1 sur la zone P2 ; b) vue depuis la zone P3 sur la zone P2.	155
Figure III-40 : Etat des trois zones de prospection le 11/05/2011. a) vue de la zone P1 ; b) vue de la zone P3.	156
Figure III-41 : Mesures de teneurs en eau massique effectuée à plusieurs profondeurs (tous les 30 cm) sur les trois zones de prospection de l'INRA d'Estrée-Mons ainsi que leur caractérisation texturale.	157
Figure III-42 : Sondages électriques effectués sur les trois zones de prospection P1, P2 et P3, au centre de la zone, d'orientation est-ouest, le 11 mai 2011.	158
Figure III-43 : Sondages électriques (Wenner α) effectués sur les zones de prospection P1 et P2, d'orientation Est-Ouest, le 12 décembre 2011. P1S1 : sondage centré sur la zone de sol nu ; P1S2 : sondage centré sur la zone de couvert de colza ; P2S1 : sondage	160

centré sur la zone en culture placée sous la tente ; P2S2 : sondage centré sur la zone en culture hors de la tente.

Figure III-44 : Cartographie de la résistivité électrique de la zone P1 (11 mai 2011), à l'aide du résistivimètre RMCA-4, pour un écartement inter-électrode de 1 m. 161

Figure III-45 : Cartographie électrique des zones de prospection P1, P2 et P3 réalisée le 18 mars 2011 avec le résistivimètre RM15-D, pour 3 écartements inter-électrodes différents ($a=0,5-1-1,5$ m). 162

Figure III-46 : Cartographie de la résistivité électrique sur les zones P1 et P2 élargies (9×16 m), le 14 décembre 2011, à l'aide du résistivimètre RM15-D, pour 3 écartements inter-électrodes différents ($a=0,5-1-1,5$ m). 163

Figure III-47 : Cartes de conductivité électrique apparente σ obtenues à l'aide du dispositif EM BF CS60, sur les trois zones de prospection définies, à trois périodes différentes (mars, mai et décembre 2011). 165

Figure III-48 : Cartes de susceptibilité magnétique K_{ph} obtenues à l'aide du dispositif EM BF CS60, sur les trois zones de prospection définies, à trois périodes différentes (mars, mai et décembre 2011). 167

Figure III-49 : Cartes de conductivité électrique apparente σ mesurée à l'aide du prototype CE120 à 1,56 MHz, sur les trois parcelles sélectionnées P1, P2 et P3 du site de l'INRA d'Estrée-Mons, à trois dates différentes. 170

Figure III-50 : Cartes de permittivité diélectrique relative apparente ϵ_r mesurée à l'aide du prototype CE120 à 1,56 MHz, sur les trois parcelles sélectionnées P1, P2 et P3 du site de l'INRA d'Estrée-Mons, à trois dates différentes. 171

Figure III-51 : Cartes de teneurs en eau volumiques restituées à partir des mesures de permittivités diélectriques obtenues à l'aide du prototype CE120, sur les trois zones de prospection définies, à trois périodes différentes (mars, mai et décembre 2011). 173

Figure III-52 : Localisation du lieu-dit La Violette (Grand, Vosges) et photo aérienne du site avec interprétation des contrastes observés dans la végétation en terme de fracturation. 174

Figure III-53 : Cartes de résistivité électrique mesurée à l'aide du RM15-D pour trois écartements inter-électrode : 0,5 m, 1 m et 1,5 m. 175

Figure III-54 : Sondages électriques (Wenner α) et modèles associés après inversion aux points (9 ; 14) et (10 ; 23) de la zone de prospection (Figure III-55b). 176

Figure II-55 : 176

a) Carte de conductivité électrique apparente réalisée à l'EM31, en amont de notre étude (Brinon, 2012) avec localisation de la zone de prospection et des points de sondage électrique.

b) Positionnement des points de sondages et de la zone de prospection du prototype sur la carte de résistivité électrique apparente obtenue avec le résistivimètre RM15-D pour un écartement inter-électrodes $a=1$ m.

Figure III-56 : Cartes résistivité électrique et de susceptibilité magnétique mesurées à l'aide du CS60 avec un maillage carré de 1 m de côté.	178
Figure III-57 : Cartes résistivité électrique et de susceptibilité magnétique mesurées à l'aide du CS60 avec un maillage carré de 1 m de côté comparées avec le réseau de fractures (lignes rouges) observé à l'aide de la cartographie électrique au RM15-D.	178
Figure III-58 : Cartes conductivité électrique et de permittivité diélectrique relative mesurées à l'aide du prototype à 1,56 MHz avec un maillage carré de 1 m de côté.	179
Figure III-59 : Cartes conductivité électrique et de permittivité diélectrique mesurées à l'aide du prototype à 1,56 MHz avec un maillage carré de 1 m de côté comparées avec le réseau de fractures (lignes rouges) observé à l'aide de la cartographie électrique au RM15-D.	179

Annexes

Annexe A1

Fiche technique du sable de Nemours NE14 utilisé

NE 14

Fiche Technique Type

Composition chimique type

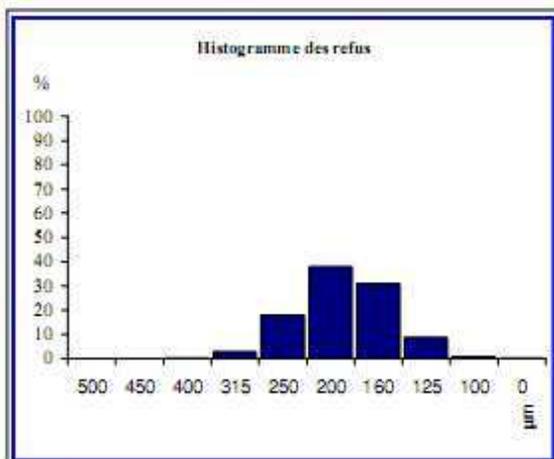
SiO ₂ sup. à	99,87 %
Fe ₂ O ₃ moy. à	0,011 %
Al ₂ O ₃ moy. à	0,040 %
TiO ₂ moy. à	0,015 %
CaO moy. à	0,005 %
K ₂ O moy. à	0,002 %

Caractéristiques physiques types

densité réelle (Pycnomètre)	2,65
dureté (Mohs)	7
pH	# 7
densité apparente sable sec ("Prolabo")	1,5
surface spécifique ("G F")	NC
coefficient d'angulosité ("G F")	1,1
perte au feu (à 1000°C)	maxi 0,05 %
résistance pyroscopique (SFC ISO R528) ...	1750 °C

GRANULOMETRIE MOYENNE STATISTIQUE

(% en masse - Valeurs indicatives)



TAMISAGE

ouverture des mailles µm	refus cumulés %
> 500 µm	0,0
> 450 µm	0,0
> 400 µm	0,3
> 315 µm	3,3
> 250 µm	21,3
> 200 µm	59,2
> 160 µm	90,1
> 125 µm	99,0
> 100 µm	99,8
> 0 µm	100,0

CORRESPONDANCE Série R20 ISO 565

ouverture des mailles µm	refus cumulés %
> 2000 µm	0,0
> 1400 µm	0,0
> 1000 µm	0,0
> 630 µm	0,0
> 500 µm	0,0
> 315 µm	3,6
> 250 µm	22,0
> 180 µm	75,3
> 125 µm	98,9
> 63 µm	100,0
passé	0,0

Classe µm	refus par tamis %
> 500 µm	0,0
500-450 µm	0,0
450-400 µm	0,3
400-315 µm	3,0
315-250 µm	18,0
250-200 µm	37,9
200-160 µm	30,9
160-125 µm	8,9
125-100 µm	0,8
Passant	0,2

Classe µm	refus par tamis %
> 2000 µm	0,0
2000-1400 µm	0,0
1400-1000 µm	0,0
1000 - 630 µm	0,0
630 - 500 µm	0,0
500-315 µm	3,6
315 - 250 µm	18,4
250 - 180 µm	53,3
180 - 125 µm	23,6
125 - 63 µm	1,1
< 63 µm	0,0



SIBELCO
FRANCE



LABORATOIRE DE NEMOURS
2, Rue de Foijuit
77140 Saint-Pierre-Lès-Nemours
Tel : +33 (0)1 64 26 72 74 Fax : +33 (0)1 64 29 22 22

SIÈGE SOCIAL ET DIRECTION COMMERCIALE
141 Avenue de CLICHY 75848 PARIS Cedex 17
Tel : +33 (0)1 53 76 82 00 Fax : +33 (0)1 42 25 32 23
site web : www.Sibelco.fr

NF : 2012-1

Annexe A2

Résultats des analyses de diffraction des rayons X

Dans cette annexe, nous présentons les résultats des analyses de diffraction des Rayons X de sept échantillons dont quatre d'argile en poudre et trois de sables à partir de la fraction argileuse et des échantillons bruts respectivement (Figures A2.1 à A2.5). Sur les diagrammes respectifs de chaque échantillon brut de sables, les valeurs $d(\text{Å})$ en noir correspondent aux pics suggérés par le logiciel EVA dans son paramétrage classique tandis que les valeurs en bleu ont été rajoutées manuellement (après zoom) pour des pics mal définis (trop larges ou en épaulement). En rose la courbe originale, en noir celle après soustraction du fond continu. Pour mieux voir les pics aux grands angles les échelles (counts) ne sont pas les mêmes entre 2-33 et 33-64° 2θ (Figure A2.1).

Concernant les échantillons d'argile, l'analyse diffractométrique de la fraction argileuse est basée sur la comparaison de trois diffractogrammes sur les pâtes orientées (Figures A2.2 à A2.5) :

- un essai à l'état naturel (N en vert) ;
- un essai sur une pâte saturée à l'éthylène glycol pendant 12 heures sous vide afin de provoquer le gonflement de certains minéraux argileux (G en bleu) ;
- un essai sur une pâte chauffée à 490° C pendant 2h ; ce traitement provoque la destruction de la kaolinite et la déshydratation des minéraux smectitiques (C en rouge).

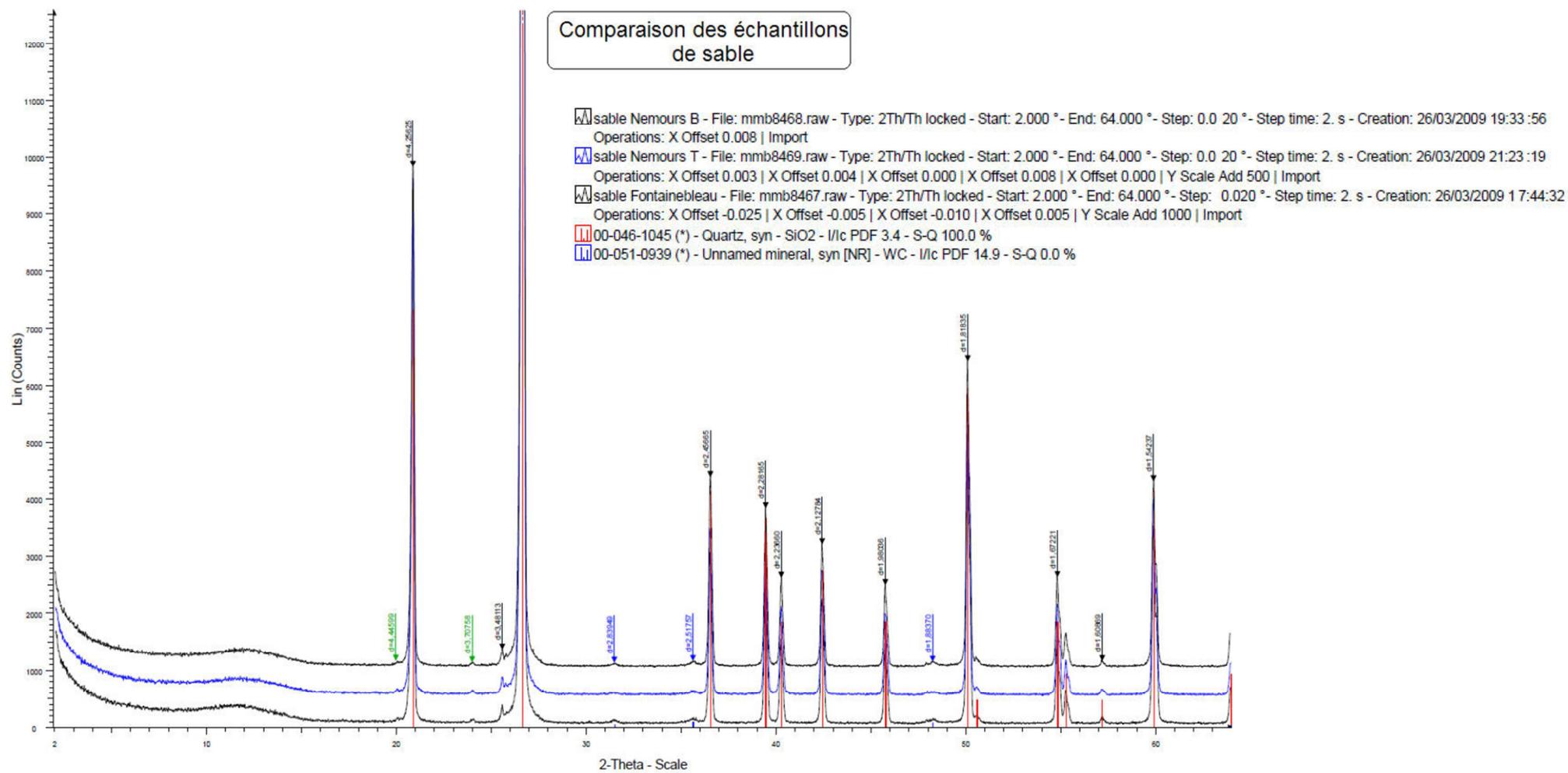


Figure A2.1 : Diffractogrammes réalisés à partir de trois échantillons bruts de sables (Bartier et Blanc-Valleron, 2009)

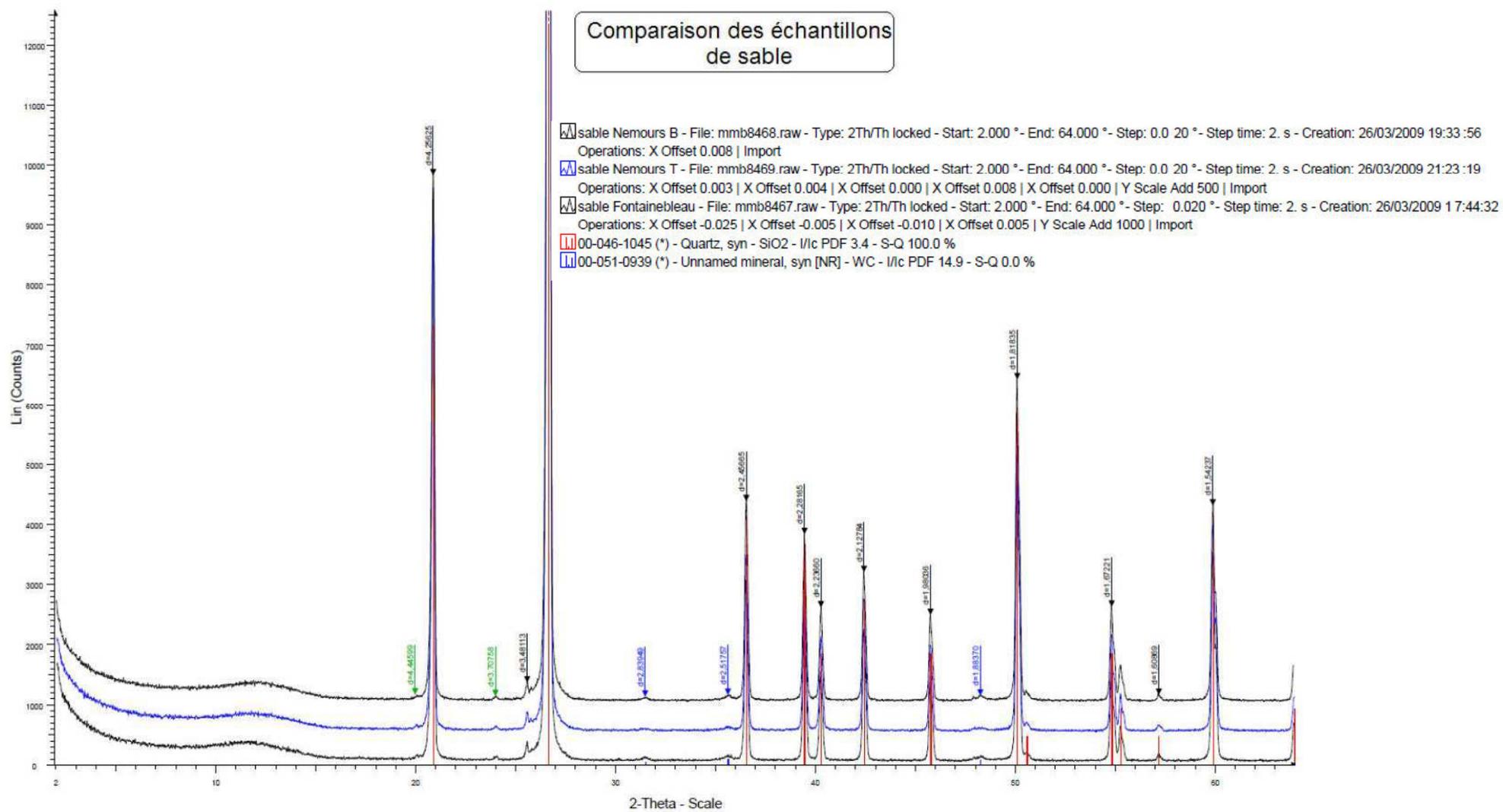


Figure A2.1 : Diffractogrammes réalisés à partir de trois échantillons bruts de sables (Bartier et Blanc-Valleron, 2009)

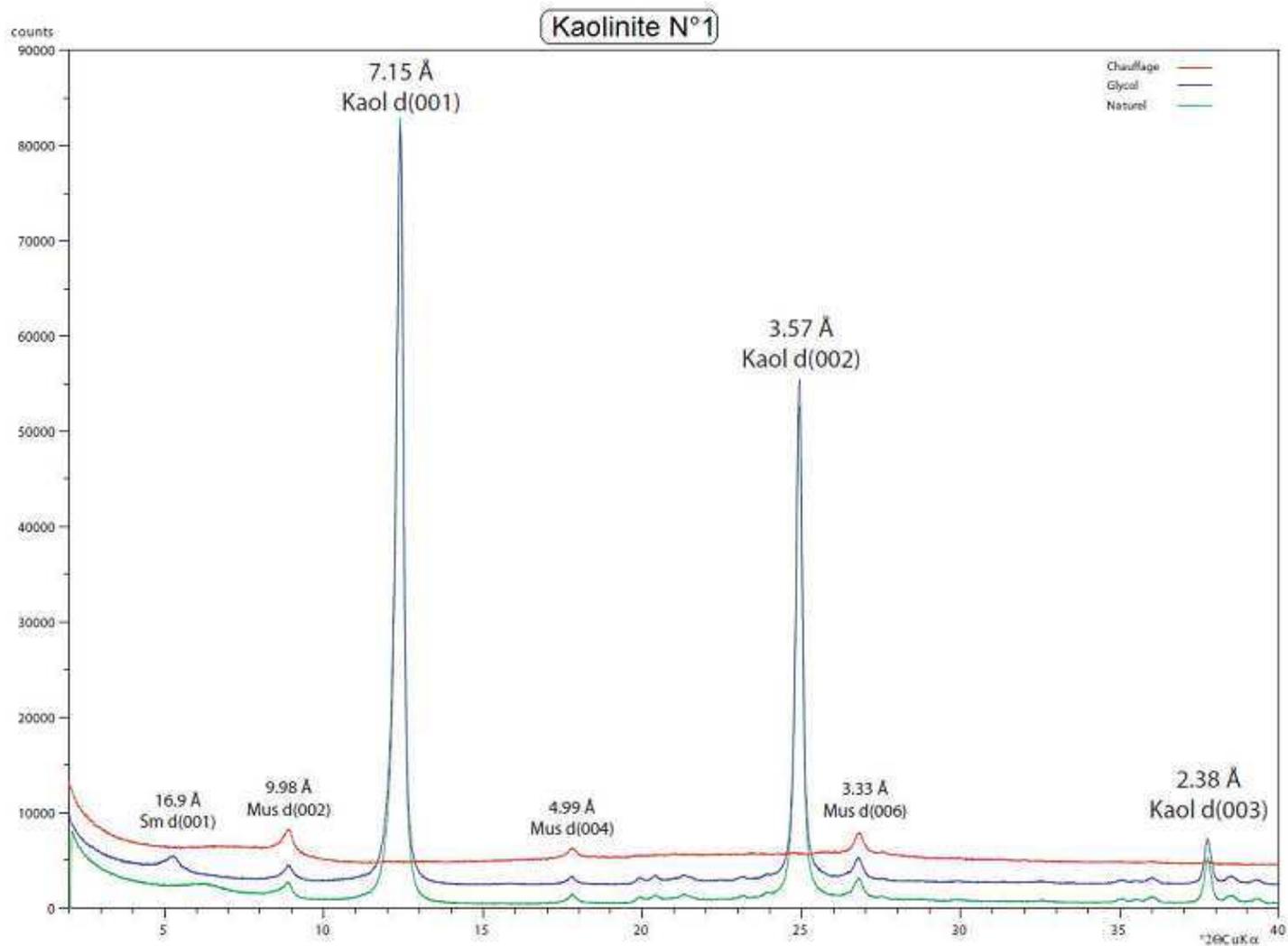


Figure A2.1 : Diffractogrammes réalisés à partir de la fraction argileuse de l'échantillon « Kaolinite n°1 » (Bartier et Blanc-Valleron, 2009)

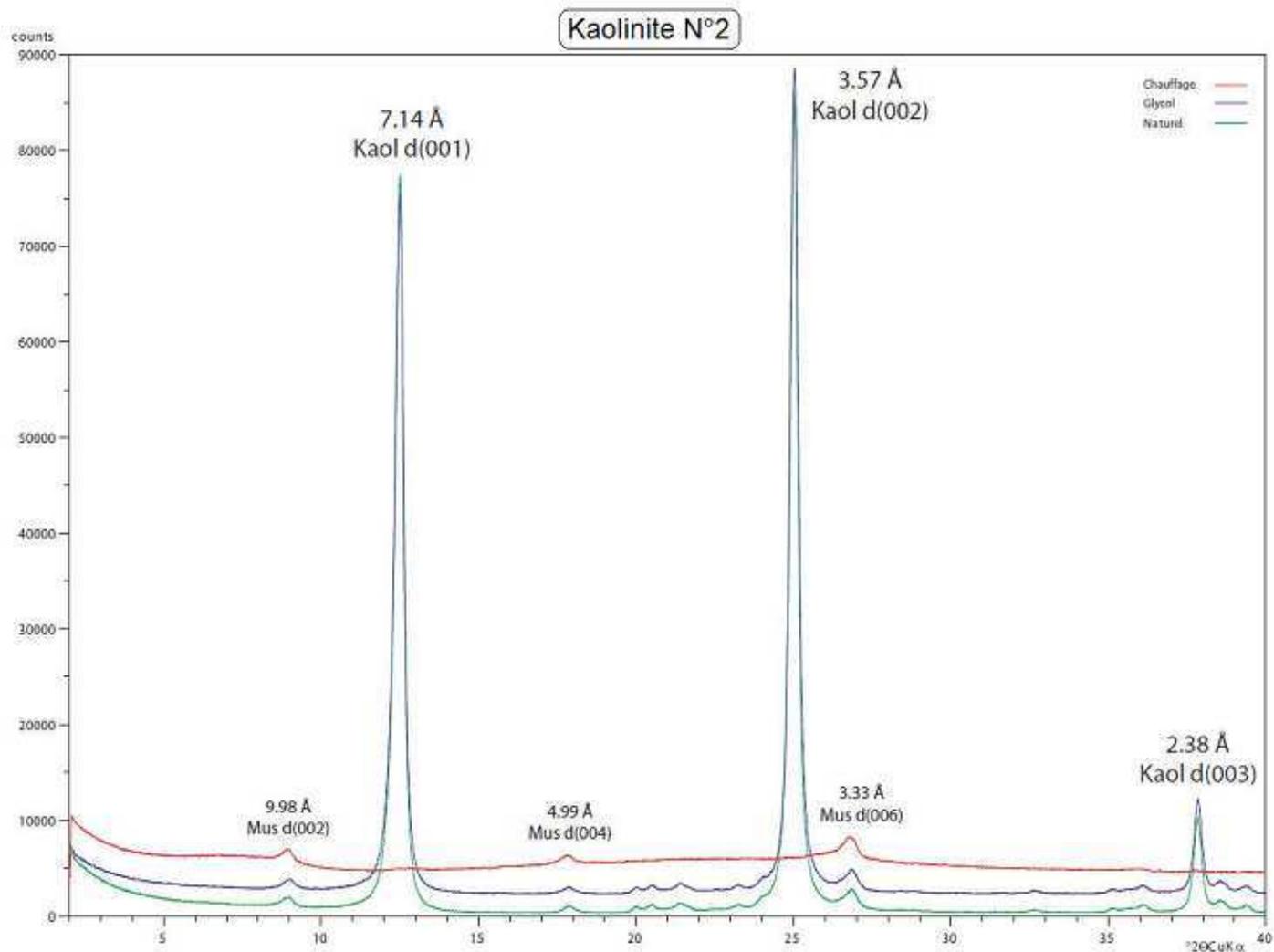


Figure A2.1 : Diffractogrammes réalisés à partir de la fraction argileuse de l'échantillon « Kaolinite n°2 » (Bartier et Blanc-Valleron, 2009)

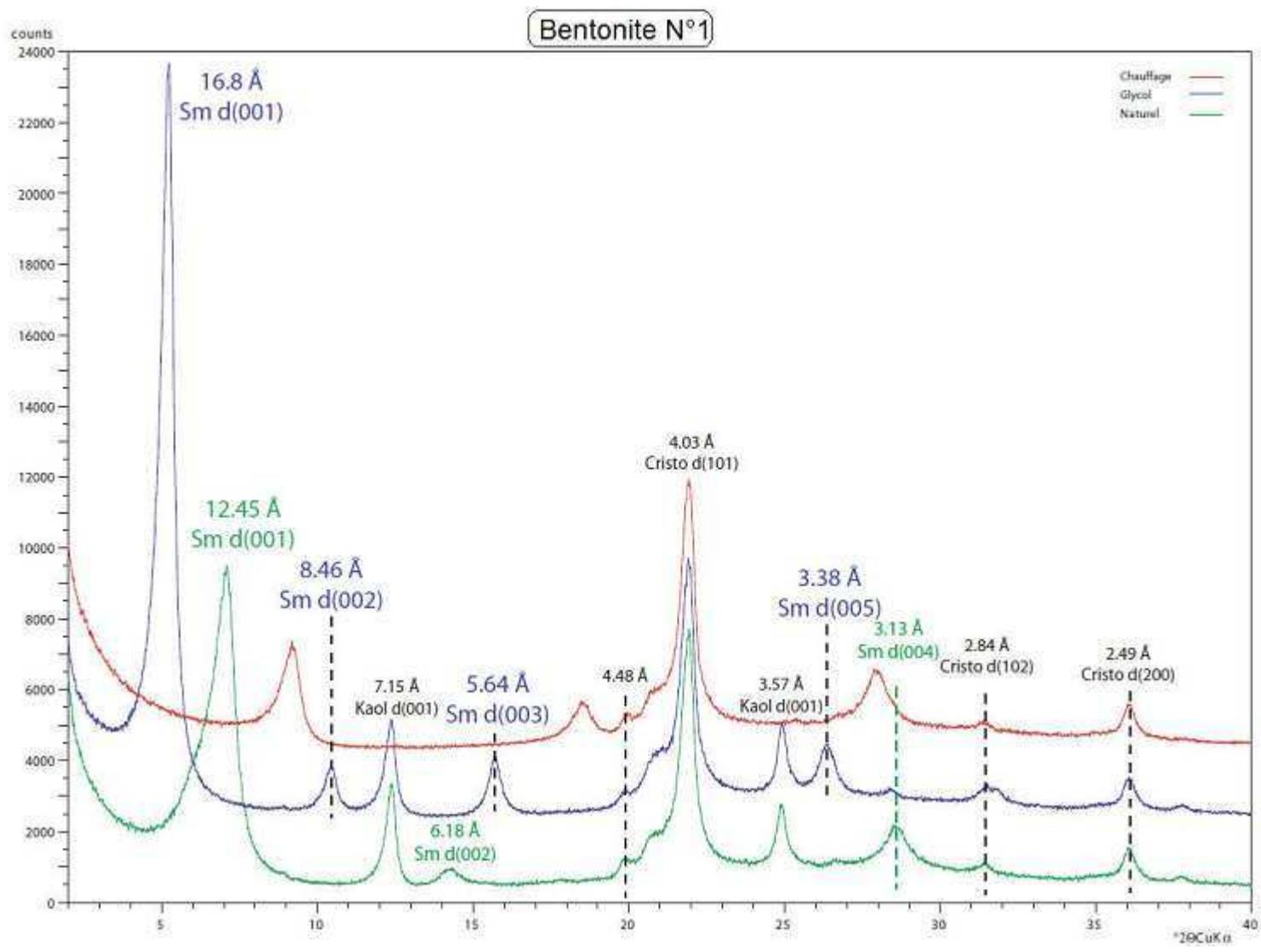


Figure A2.1 : Diffractogrammes réalisés à partir de la fraction argileuse de l'échantillon « Bentonite n°1 » (Bartier et Blanc-Valleron, 2009)

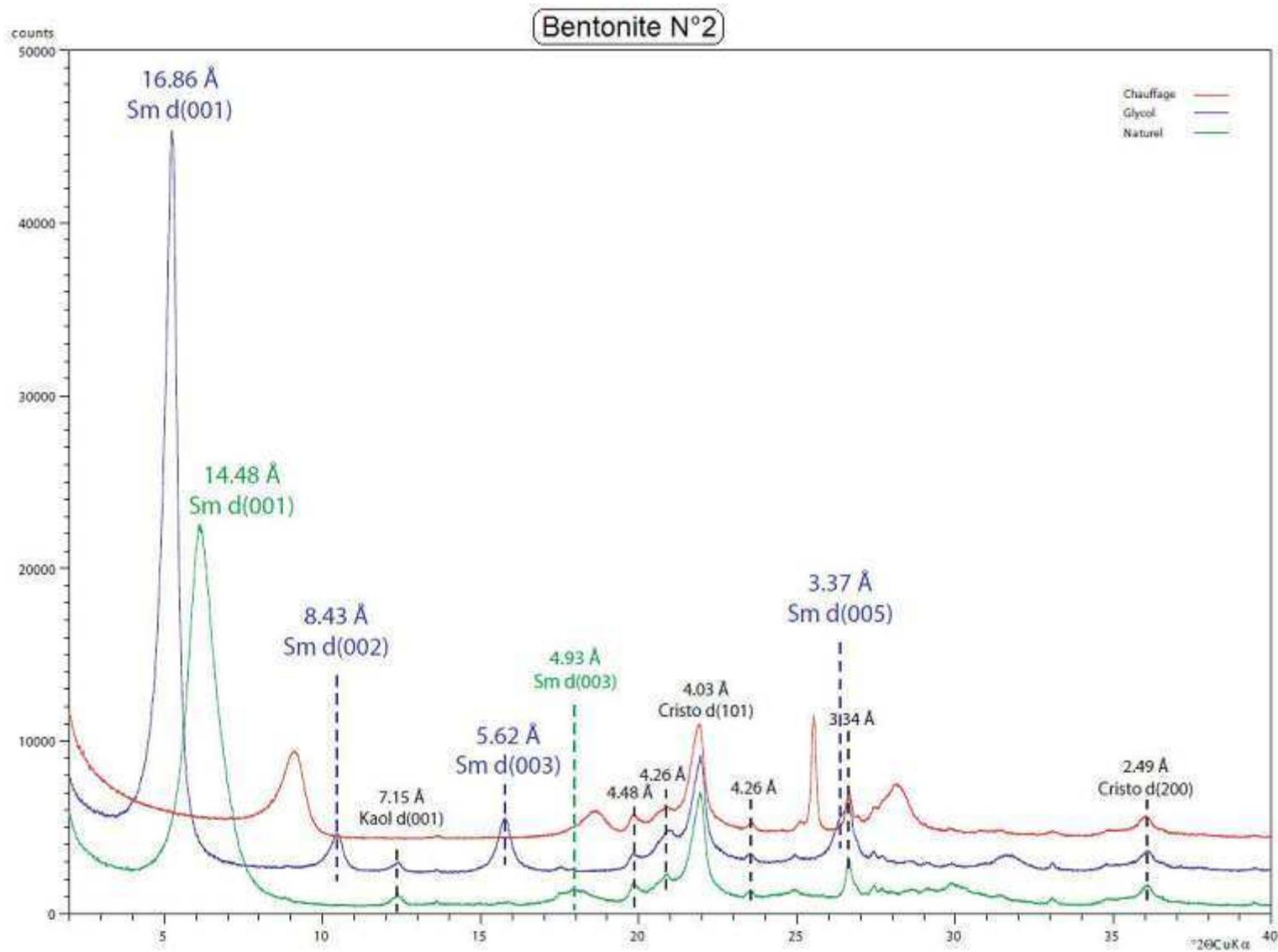


Figure A2.1 : Diffractogrammes réalisés à partir de la fraction argileuse de l'échantillon « Bentonite n°2 » (Bartier et Blanc-Valleron, 2009)

Annexe A3

Calcul du champ magnétique réémis par une sphère, mesuré par un dispositif Slingram

La modélisation est effectuée en assimilant les bobines à des dipôles et la boule à un dipôle magnétique placé suffisamment loin de l'émettrice pour qu'elle puisse être considérée dans un champ uniforme.

Hypothèses :

- La perméabilité magnétique est celle du vide : $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$
- On se place dans un repère local lié à la sphère : $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$
- Bobine réceptrice R_x horizontale : $\vec{F} = F_z \cdot \vec{u}_z$

On considère un champ magnétique extérieur uniforme dont la direction va dépendre de la position de la sphère par rapport à l'émettrice. Pour le calcul ci-après, on choisit un champ magnétique vertical.

- Dans un repère lié à la sphère, le potentiel de Schelkunof associé à un champ uniforme en coordonnées sphériques s'écrit : $F_r = F_z \cos(\theta)$
 $F_\theta = -F_z \sin(\theta)$

Ce potentiel vérifie l'équation de Helmholtz : $\Delta F + k^2 F = 0$, qui se ramène à :

- Dans la sphère : $\frac{\partial^2 F_z}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial F_z}{\partial r} - k^2 F_z = 0$
Cette équation différentielle possède des solutions de la forme : $F_z = \beta \frac{sh(kr)}{r} + cste$
- Dans l'air : $\frac{\partial^2 F_z}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial F_z}{\partial r} = 0$
Cette équation différentielle possède des solutions de la forme : $F_z = \frac{\alpha}{r} + cste$
Cette équation est valable car le nombre d'onde est très faible dans l'air
($\sigma_{air} \rightarrow 0 \text{ S/m}$ et $\varepsilon_{air} = \varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$)

Le potentiel F_z dépend donc uniquement de la distance au centre de la sphère ($F_z = F_z(r)$). Pour déterminer les valeurs des coefficients α et β , on utilise les conditions aux limites. A l'interface sphère/air, les trois composantes du champ magnétique H_r , H_θ et H_φ sont continues. La sphère ayant une perméabilité magnétique égale à celle du vide, on a :

- Au sein de la sphère, le champ magnétique créé vaut :

$$[H_r]_{sphère} = -\frac{2}{i\omega\mu_0} \frac{\cos\theta}{r} \frac{\partial F_z}{\partial r} = \beta \frac{2\cos\theta}{i\omega\mu_0 r^3} (sh(kr) - kr ch(kr))$$

$$[H_\theta]_{sphère} = \frac{1}{i\omega\mu_0} \sin\theta \left(\frac{\partial^2 F_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial F_z}{\partial r} \right) = \beta \frac{\sin\theta}{i\omega\mu_0 r^3} ((k^2 r^2 + 1) sh(kr) - kr ch(kr))$$

$$[H_\varphi]_{sphère} = 0$$

- Dans l'air, le champ magnétique est la somme du champ magnétique généré par la sphère et du champ magnétique primaire \vec{H}_0

$$\vec{H}_0 = \begin{pmatrix} H_0 \cos\theta & \vec{u}_r \\ -H_0 \sin\theta & \vec{u}_\theta \\ 0 & \vec{u}_\varphi \end{pmatrix}$$

$$[H_r]_{air} = \alpha \frac{2\cos\theta}{i\omega\mu_0 r^3} + H_0 \cos\theta$$

$$[H_\theta]_{air} = \alpha \frac{\sin\theta}{i\omega\mu_0 r^3} - H_0 \sin\theta$$

$$[H_\varphi]_{air} = 0$$

A l'interface sphère/air ($r=a$) :

$$[H_r]_{sphère} = [H_r]_{air} \Leftrightarrow -2\beta (ka \cdot ch(ka) - sh(ka)) = 2\alpha + i\omega\mu_0 H_0 a^3$$

$$[H_\theta]_{sphère} = [H_\theta]_{air} \Leftrightarrow \beta ((k^2 a^2 + 1) \cdot sh(ka) - ka \cdot ch(ka)) = \alpha - i\omega\mu_0 H_0 a^3$$

D'où :

$$\alpha = i\omega\mu_0 H_0 a^3 \left(1 - \frac{3(k^2 a^2 + 1) \cdot sh(ka) - ka \cdot ch(ka)}{k^2 a^2 \cdot sh(ka)} \right)$$

$$\beta = -\frac{3}{2} \frac{i\omega\mu_0 H_0 a^3}{k^2 a^2 \cdot sh(ka)}$$

Ces expressions peuvent encore être simplifiées par des approximations basées sur la valeur du produit ka , dépendante des caractéristiques des objets étudiés.

k est le nombre d'onde associé à la sphère : $k = (1 - i) \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma_{sphère} \omega}{2}} \sqrt{1 + i \frac{\varepsilon_{sphère} \omega}{\sigma_{sphère}}}$

La sphère en aluminium, de 10 cm de diamètre, utilisée pour effectuer l'étalonnage possède une conductivité électrique $\sigma_{sphère}$ égale à $1,96 \cdot 10^7$ S/m et une permittivité diélectrique relative égale à 9,5, et donc une permittivité diélectrique valant : $\varepsilon_{sphère} = 9,5 \cdot \varepsilon_0$.

Dans ces conditions, $\sigma_{sphère} \gg \varepsilon_{sphère} \omega$ pour toute la gamme considérée ($f \leq 10$ MHz).

Le nombre d'onde associé à la sphère se réduit donc à $k = (1 - i) \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma_{sphère} \omega}{2}}$

Au sein de la sphère en aluminium, pour la gamme de fréquences étudiée ($f \geq 10$ kHz), le module $|ka|$ est donc très supérieur à 1 : $|ka| \gg 1$

D'où : $ch(ka) = sh(ka) \approx e^{ka}/2$

Les coefficients α et β peuvent donc se réduire à :

$$\alpha = i\omega\mu_0 H_0 a^3 \left(-\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{1-ka}{k^2 a^2} \right) = -\frac{1}{2} i\omega\mu_0 a^3 \cdot H_0$$

$$\beta = -\frac{3e^{-ka}}{k^2 a^2} i\omega\mu_0 a^3 \cdot H_0$$

Le coefficient α étant un imaginaire pur, le champ magnétique mesuré dans l'air sera donc exclusivement réel :

$$[H_r]_{air} = \left(-\frac{a^3}{r^3} + 1 \right) H_0 \cos\theta$$

$$[H_\theta]_{air} = \left(-\frac{a^3}{2r^3} - 1 \right) H_0 \sin\theta$$

$$[H_\varphi]_{air} = 0$$

La sphère sera donc équivalente à un dipôle magnétique de moment égal à : $M = \frac{4\pi}{3} H_0 a^3$

Les mesures de la réponse de l'appareil à la présence d'une sphère conductrice devront donc être réelles (déphasage nul) et permettrons de déterminer le coefficient d'étalonnage de la partie réelle du champ.