



HAL
open science

Estimation et modélisation de la distribution spatiale de l'eau au sein d'un couvert végétal: Mise en oeuvre d'un dispositif multipôle fonctionnant en régime quasi-statique

J. Helbert

► **To cite this version:**

J. Helbert. Estimation et modélisation de la distribution spatiale de l'eau au sein d'un couvert végétal: Mise en oeuvre d'un dispositif multipôle fonctionnant en régime quasi-statique. Sciences du Vivant [q-bio]. Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines; CIMEL Electronique, 2001. Français. NNT : . tel-02834167

HAL Id: tel-02834167

<https://hal.inrae.fr/tel-02834167>

Submitted on 7 Jun 2020

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.



Université de Versailles
Saint-Quentin-en-Yvelines



Unité Environnement
et Grandes Cultures



CIMEL Électronique

THÈSE

présentée devant

l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines
en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE VERSAILLES
SAINT-QUENTIN-EN-YVELINES

Spécialité : Méthodes Physiques en Télédétection

par

Jérôme HELBERT

Estimation et modélisation de la distribution spatiale de l'eau au sein d'un couvert végétal.

Mise en œuvre d'un dispositif multipôle fonctionnant en
régime quasi-statique.

Soutenue publiquement le 12 mars 2001 devant le jury composé de :

M.	G. CAUDAL	Professeur, Université de Versailles Saint-Quentin	Président
M.	F. BARET	Directeur de recherche, INRA	Rapporteur
Mme	O. PICON	Professeur, Université de Marne-la-Vallée	Rapporteur
M.	P. ANDRIEUX	Professeur, Université de Paris VI	Examineur
M.	J.-P. BUIS	Directeur technique, CIMEL Électronique	Examineur
M.	J. MASSÉ	Responsable du département R&D, ITCF	Examineur
M.	P. BOISSARD	Chargé de recherche, INRA	Co-Directeur de thèse

Remerciements

Bien qu'attribué à une personne unique, un travail de thèse ne pourrait être réalisé sans l'aide de différents intervenants. C'est pourquoi je tiens à remercier ici les personnes et les institutions qui m'ont accompagné tout au long de ce travail de recherche.

En premier lieu, je suis très reconnaissant envers l'INRA qui a soutenu ce projet et m'a permis d'effectuer cette étude dans d'excellentes conditions. En particulier, je remercie Raymond Bonhomme d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse.

Je souhaiterais également remercier MM. Jean-Pierre Buis et Gérard Clave, directeurs technique et administratif de CIMEL Électronique, qui se sont investis pour mener à bien la réalisation du dispositif multipôle.

Merci à Gérard Caudal, correspondant local du DEA « Méthodes physiques en télédétection » sur l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, d'avoir accepté de présider le jury de thèse.

Je souhaiterais par ailleurs remercier les personnes qui ont accepté de consacrer une partie de leur temps précieux pour relire et annoter ce document : Odile Picon, professeure rattachée au laboratoire « Systèmes de communication » de l'université de Marne-la-Vallée, et Frédéric Baret, directeur de recherche à l'unité de Bioclimatologie du centre INRA d'Avignon.

Merci également aux examinateurs de ce travail : Jacques Massé, responsable du département de recherche et de développement à l'ITCF, et Pierre Andrieux, professeur rattaché au laboratoire de Géophysique appliquée de l'université de Paris VI.

Je remercie très chaleureusement Paul Boissard, co-directeur de cette thèse et initiateur de cette recherche, pour son aide et pour la confiance qu'il m'a témoignées au cours des différents travaux que j'ai effectués à l'INRA sous sa responsabilité.

À travers son dynamisme et l'originalité de sa démarche scientifique, il a su me faire découvrir et apprécier le monde de la recherche. Je n'énumérerai pas l'ensemble de ses qualités humaines ; je dirai seulement que je les ai énormément appréciées pendant ces années de travail à ses côtés.

Si ce travail a pu être réalisé, c'est en très grande partie grâce à lui. Pour tout cela, je lui suis très reconnaissant. Merci Paul.

Merci également à Arnaud Coste, ingénieur chez CIMEL Électronique, qui s'est occupé des tests et des interventions « chirurgicales » sur le dispositif multipôle, et à Marina Vidrascu, chercheur à l'INRIA de Rocquencourt, pour m'avoir aidé à m'orienter dans le code source de MODULEF.

Merci aux personnes du centre qui sont intervenues dans mon travail et qui m'ont conseillé : Philippe Huet, pour la thématique « agriculture de précision », Daniel Poudroux, pour la résolution des problèmes informatiques, Jacques Troizier pour la mise en place des parcelles expérimentales, Pierre Belluomo pour son aide lors des mesures expérimentales, Marina Pavlidès et Claudine Lauransot pour les recherches bibliographiques et la documentation.

Ce travail n'aurait pas été aussi agréable sans la compagnie de mes collègues. Un grand merci à tout le personnel de l'unité, aux thésards, et plus particulièrement à mes co-locataires de bureau successives (Nouraya, Carole et Josianne) ainsi qu'à Emmanuel.

J'adresse un immense merci à toutes les personnes de mon entourage qui m'ont encouragé pendant ces trois années, notamment mes parents qui m'ont donné la curiosité et l'envie d'apprendre et qui m'ont constamment soutenu dans mes choix et orientations.

Enfin, je remercie très affectueusement Sylvie, qui chaque jour m'a encouragé et qui m'a témoigné son soutien dans les moments un peu plus difficiles.

Pluralitas non est ponenda sine neccesitate.
La complexité ne doit pas être proposée sans nécessité.

William of Ockham, 1285-1349.

Table des matières

I	Introduction	11
1	Introduction	13
1.1	Contenu en eau et état des cultures	13
1.1.1	Croissance et développement des plantes	13
1.1.2	Relations avec la biomasse	14
1.1.3	Plantes et stress hydriques	15
1.2	Contexte socio-économique	17
1.3	Contexte technologique	19
1.4	Plan du document	20
II	Méthodes de mesure pour le suivi de la végétation	21
2	Techniques de suivi des cultures	23
2.1	Méthodes destructives	23
2.2	Méthodes non destructives	24
2.2.1	Techniques de télédétection	24
2.2.2	Autres techniques	34
3	Présentation du dispositif multipôle	39
3.1	Origine de l'instrument	39
3.2	Application au suivi des cultures	40
3.3	Principe de fonctionnement	42
3.3.1	Géométrie et électronique du quadripôle	42
3.3.2	Aspects théoriques de la mesure	43
3.3.3	Lien entre permittivité et contenu en eau	45
3.3.4	Choix de la fréquence de fonctionnement	47
3.4	Résultats obtenus avec le prototype	47
III	Étude théorique du dispositif multipôle	51
4	Simulation du dispositif multipôle	53
4.1	Problème à résoudre	53

4.1.1	Résolution analytique	53
4.1.2	Résolution numérique	54
4.2	Mise en œuvre des simulations	55
4.2.1	Adaptation du logiciel au problème à résoudre	56
4.2.2	Maillage du domaine de simulation	57
4.2.3	Paramètres d'entrée de la simulation	59
4.2.4	Post-traitement	62
4.3	Résultat des simulations	63
4.3.1	Effet de la taille des électrodes	64
4.3.2	Effet des propriétés électriques du sol	65
4.3.3	Effet des propriétés électriques des organes végétaux	68
5	Inversion des données de la simulation	73
5.1	Choix de la méthode d'inversion	73
5.1.1	Essais préliminaires	73
5.1.2	Choix des réseaux de neurones	75
5.2	Élaboration du réseau	76
5.2.1	Type de réseau et algorithmes utilisés	76
5.2.2	Fichiers d'apprentissage et de généralisation	77
5.3	Résultats de l'inversion	77
5.3.1	Méthodes itératives	78
5.3.2	Méthodes matricielles	81
IV	Mesures <i>in situ</i> et validation expérimentale du dispositif multipôle	93
6	Expérimentations réalisées	95
6.1	Description de l'instrument	95
6.1.1	Brancard	95
6.1.2	Système électronique	98
6.2	Protocole expérimental	99
6.2.1	Parcelle expérimentale	99
6.2.2	Protocole de mesure avec le dispositif multipôle	101
6.2.3	Estimation destructive du contenu en eau des plantes de blé	102
6.3	Variables explicatives de la différence de potentiel	103
6.3.1	Mesures hors végétation	104
6.3.2	Influence de la végétation	105
7	Suivi du contenu en eau des plantes	111
7.1	Détection de la fin du palier hydrique	111
7.2	Estimation du contenu en eau des plantes de blé	112
7.3	Estimation du contenu en eau des organes des plantes de blé	115

7.3.1	Estimation du contenu en eau des épis de blé	116
7.3.2	Estimation du contenu en eau des tiges de blé	117
7.4	Effet de l'hétérogénéité de peuplement sur les mesures	117
7.4.1	Mise en évidence de l'effet de l'hétérogénéité	120
7.4.2	Influence de l'hétérogénéité sur la qualité de l'estimation du contenu en eau des plantes	120
V	Conclusion	127
8	Conclusion	129
8.1	Synthèse des résultats obtenus	129
8.1.1	Résultats théoriques	129
8.1.2	Validation expérimentale	130
8.2	Perspectives	131
VI	Annexes	135
A	Électromagnétisme	137
A.1	Équations de Maxwell	137
A.1.1	Équations de Maxwell dans le vide	137
A.1.2	Équation de Maxwell dans les milieux matériels	139
A.2	Équations constitutives	141
A.3	Permittivité diélectrique et conductivité électrique	141
A.4	De l'électromagnétisme à l'électrostatique	143
A.4.1	Simplification des équations de Maxwell	143
A.4.2	Existence d'un potentiel électrique	145
B	Méthode des éléments finis	147
B.1	Méthode des différences finies	147
B.2	Principe de la méthode des éléments finis	149
B.3	Maillage des domaines	150
B.3.1	Génération de maillages bidimensionnels	150
B.3.2	Génération de maillages tridimensionnels	151
B.4	Construction des matrices élémentaires	152
B.4.1	Formulation de Galerkin	152
B.4.2	Formulation de Ritz	153
C	Principes variationnels	155
D	Méthode des moments	157
D.1	Problème à résoudre	157
D.2	Équation d'Helmholtz	157

D.3	Principe d'équivalence de Rayleigh-Gans	159
D.4	Mise en œuvre de la méthode	161
E	Réseaux neuronaux	163
E.1	Généralités	163
E.2	Les différents types de réseau	164
E.3	Les réseaux RBF	165
E.3.1	Principe des réseaux RBF	165
E.3.2	Optimisation des réseaux RBF	171
	Liste des figures	173
	Liste des tableaux	179
	Bibliographie	183
	Liste des publications	197

Première partie

Introduction

Chapitre 1

Introduction

L'eau représente de 50% à 90% de la masse totale des végétaux. Elle est donc l'élément constitutif principal des plantes et assure à ce titre trois rôles essentiels :

- le maintien grâce à la turgescence de la structure spatiale des plantes ainsi que la croissance des cellules ;
- la circulation et l'acheminement des nutriments vers les cellules ;
- la régulation par transpiration de la température des organes.

L'eau est donc très fortement liée au fonctionnement des végétaux et la connaissance du contenu en eau des plantes peut apporter de nombreuses informations sur l'état des cultures.

D'un point de vue socio-économique, la demande de plus en plus pressante pour une agriculture propre et durable implique une connaissance précise de l'état des cultures afin d'ajuster au mieux l'apport des produits phytosanitaires, des fertilisants, ainsi que le recours à l'irrigation.

Dans ce contexte, le développement de nouveaux capteurs permet de répondre aux réglementations agri-environnementales grâce à un diagnostic plus précis des besoins des cultures.

1.1 Contenu en eau et état des cultures

1.1.1 Croissance et développement des plantes

Lors de leur développement, les plantes puisent l'eau présente dans le sol afin de la redistribuer parmi leurs différents organes. Chaque stade de développement est caractérisé par l'apparition de nouveaux organes ou bien par une transformation physiologique des organes existants. Ces modifications entraînent alors généralement une nouvelle répartition de la distribution de l'eau dans la plante suivant les besoins des organes.

La figure (1.1) montre la distribution de l'eau dans les différents organes d'une plante de blé pour trois stades différents : floraison, début du palier hydrique et fin du remplissage des grains. Ce graphique met en évidence l'augmentation du contenu en eau des épis jusqu'à la fin du remplissage tandis que le contenu en eau des tiges et des feuilles tend globalement à diminuer. Ceci correspond, comme l'ont montré Gurnade et Malet (1981), à une redistribution de l'eau des feuilles vers l'épi de la plante.

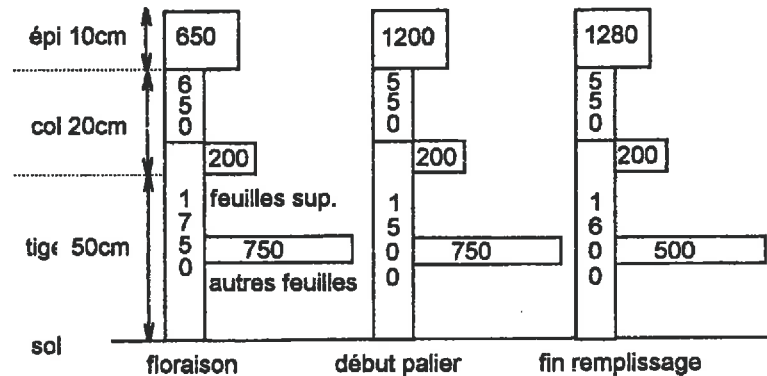


Figure 1.1 – Distribution de l'eau dans les différents organes d'une plante de blé pour trois stades de développement ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$). D'après Ph. Huet, communication personnelle.

De la même façon, la figure (1.2(a)) montre l'évolution du contenu en eau des épis de blé depuis l'épiaison jusqu'à la maturité. On peut observer notamment que le contenu en eau reste stable pendant une longue période alors que la matière sèche augmente : c'est le palier hydrique. Par ailleurs, à la fin du palier hydrique, le contenu en eau décroît et la matière sèche devient constante, ce qui est le signe de la maturité physiologique des grains. La maturité est atteinte lorsque la teneur en eau est de 35 % (Gate, 1995).

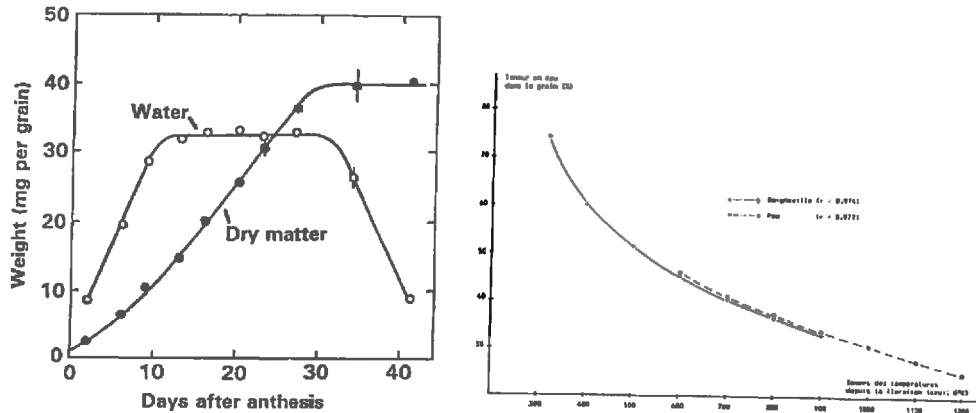
Concernant le maïs, il est également possible de tracer l'évolution de la teneur en eau des grains, depuis la floraison jusqu'à la maturité (figure (1.2(b))). Comme pour le blé, la maturité est atteinte lorsque la teneur en eau devient inférieure à 35% (Bloc *et al.*, 1984).

Ainsi, le stade de développement des plantes peut être caractérisé à partir du suivi de leur contenu en eau.

1.1.2 Relations avec la biomasse

La connaissance du contenu en eau des plantes est également très intéressante car elle permet l'estimation de la biomasse de la végétation.

Plusieurs études ont mis en évidence des relations entre la masse des organes et leur contenu en eau, notamment celles de Schnyder et Baum (1992), et de Huet



(a) Évolution du contenu en eau des épis de blé depuis l'épiaison jusqu'à la fin du palier hydrique. D'après Schnyder et Baum (1992).

(b) Évolution de la teneur en eau des grains de maïs depuis la floraison jusqu'à la maturité. D'après Bloc *et al.* (1984).

Figure 1.2 – Variation temporelle de l'eau dans les épis de blé (a) et de maïs (b).

et al. (1989a,b). En particulier on observe sur les figures (1.3(a)) et (1.3(b)) une bonne corrélation entre le contenu en eau des grains de blé et leur masse. Ceci s'observe également pour les épis entiers, comme le montre la figure (1.3(c)). Une mesure du contenu en eau des organes des plantes permet ainsi l'estimation de la masse de ces organes.

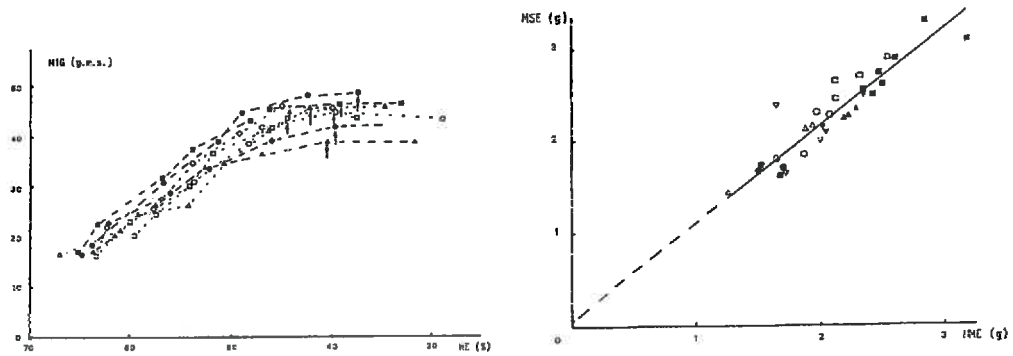
À partir d'une estimation du contenu en eau total d'une culture à un instant donné, il est donc possible d'estimer la biomasse de cette culture, mais également de prévoir le rendement final. La connaissance de la biomasse est également utilisée pour estimer les apports en azote d'une culture (Lemaire et Salette, 1984).

Par ailleurs, la formation de biomasse à partir de l'énergie solaire interceptée dépend également du contenu en eau de la végétation (Steinmetz *et al.*, 1990); plus le contenu en eau est élevé et plus la conversion en biomasse est efficace. La connaissance du contenu en eau de la végétation à un instant donné est donc importante pour ajuster les modèles de production tels que STICS (Brisson *et al.*, 1998).

1.1.3 Plantes et stress hydriques

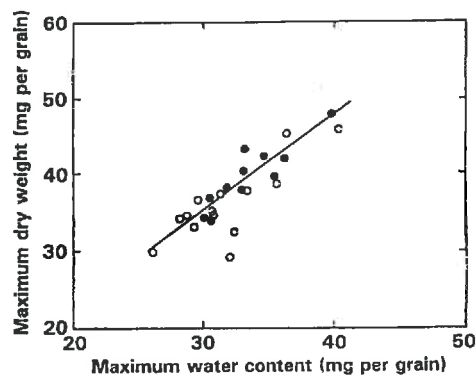
Un stress hydrique a pour conséquence une diminution du flux d'eau dans la plante due à la fermeture des stomates⁽¹⁾ afin d'éviter une trop forte transpiration. Cette fermeture n'est cependant jamais déclenchée dès l'apparition du stress. Les

⁽¹⁾ Organes permettant les échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère.



(a) Évolution de la masse du grain (MIG) en fonction de l'humidité de l'épi (HE). D'après Huet *et al.* (1989a).

(b) Corrélation entre le maximum d'eau accumulé dans l'épi de blé (MME) et la biomasse finale de l'épi. D'après Huet *et al.* (1989b).



(c) Corrélation entre le contenu en eau maximal des épis de blé et la masse sèche maximale des épis. D'après Schnyder et Baum (1992).

Figure 1.3 – Relations entre contenu en eau et biomasse.

plantes définissent en effet des priorités entre le ralentissement de la production de biomasse et la perte en eau. La production de biomasse est généralement prioritaire lorsque les déficits hydriques sont peu marqués. Il en résulte donc que les plantes perdent une partie de leur eau lors d'épisodes de stress peu sévères. En règle générale, les plantes cultivées peuvent perdre environ 25 % de leur eau totale sans subir de dommages irréversibles (voir figure (1.4)), le fonctionnement physiologique étant affecté pour des pertes en eau supérieures à 15% (Tardieu *et al.*, 1995). Ceci est une valeur relative et dépend du type de plante considéré : les plantes isohydriques (maïs par exemple) possèdent une régulation stomatique efficace et perdent généralement moins d'eau que les plantes anisohydriques, telles le tournesol, qui ont une régulation stomatique non optimale.

Ainsi, le suivi du contenu en eau d'une culture est un bon indicateur du stress hydrique subi par les plantes et peut servir pour le pilotage de l'irrigation. Par ailleurs, des variations rapides du contenu en eau sont révélatrices de déficits hydriques, tandis que les variations sur plusieurs jours mettent en évidence l'accroissement de biomasse. Par conséquent, les deux phénomènes peuvent être isolés assez facilement.

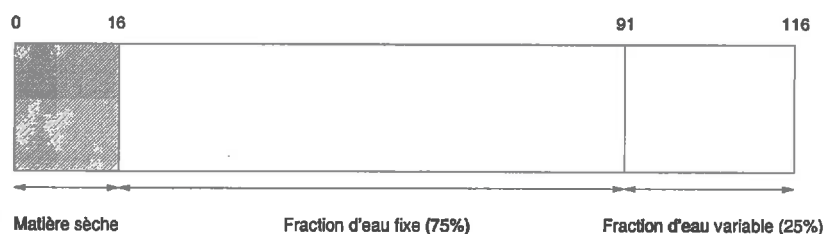


Figure 1.4 – Comparaison des masses d'eau et de matière sèche d'une plante, pour une masse d'eau ramenée à 100 grammes. La plante peut tolérer une perte de 25% de sa masse d'eau sans être irréversiblement atteinte. Adapté de Levitt (1972).

1.2 Contexte socio-économique

Le contexte socio-économique actuel est marqué par une pression de plus en plus forte de l'opinion publique pour une agriculture saine et respectueuse de l'environnement. Or, depuis la fin de la seconde guerre mondiale, l'objectif principal était l'accroissement des rendements, rendu possible par la sélection des variétés mais aussi par l'utilisation intensive et grandissante de produits phytosanitaires (herbicides, insecticides et fongicides). Dorénavant, le développement de l'agriculture raisonnée est devenu une des priorités des gouvernements afin de préserver les ressources naturelles. Cet objectif passe par un encouragement financier à diminuer et à limiter au besoin strict des cultures l'utilisation des

intrants. Par ailleurs, la fin du soutien des prix du blé dans l'Union européenne incite fortement à diminuer le recours à ces produits phytosanitaires dont le prix est très élevé (Meynard, 2000).

D'autre part, la préservation des ressources naturelles passe également par une réduction de la consommation d'eau. Les gouvernements actuels, conscients des problèmes humains que pourrait poser la raréfaction (volontaire ou non) de la disponibilité en l'eau, ont tenté de réglementer l'utilisation de l'eau. Ces lois visent avant tout à sensibiliser et à mettre en avant l'idée d'une mise à disposition d'un bien commun à tous⁽²⁾⁽³⁾. Ceci est un effort louable, surtout pour les pays développés pour lesquels l'eau représente encore une source non épuisable — rappelons que les pays développés sont en très grande majorité situés sous des climats où la disponibilité en eau est nettement supérieure à la consommation.

Le recours à l'agriculture raisonnée est également motivé par des arguments sanitaires. Bien qu'un des objectifs des lois sur l'eau soit de fournir à chaque habitant une quantité d'eau minimale indispensable à la consommation et à l'hygiène, la qualité de l'eau à disposition est également un problème majeur⁽⁴⁾⁽⁵⁾. En particulier, les activités industrielles et agricoles sont sources de pollutions importantes et des dispositions doivent être prises pour éviter les pollutions aquatiques⁽⁶⁾. Concernant l'agriculture, les principales pollutions proviennent de l'épandage d'engrais et de produits phytosanitaires⁽⁷⁾⁽⁸⁾ et de leur ruissellement dans les nappes à cause d'irrigations bien souvent trop abondantes et trop fréquentes.

La gestion précise des intrants et de l'eau en agriculture est donc un des points essentiels pour d'une part limiter l'impact sur l'environnement et d'autre part réduire les coûts de production.

⁽²⁾Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau, article premier.

⁽³⁾Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique, signée les 14 et 15 octobre 1994 à Paris.

⁽⁴⁾Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau.

⁽⁵⁾Décret n° 98-911 du 5 octobre 1998 portant publication de la convention sur la protection et l'utilisation des cours d'eau transfrontières et des lacs internationaux, faite à Helsinki le 17 mars 1992.

⁽⁶⁾Arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation.

⁽⁷⁾Même arrêté du 2 février 1998. Voir plus précisément la section IV (Épandage) du chapitre V (Valeurs limites d'émissions).

⁽⁸⁾Décret n° 96-163 du 4 mars 1996 relatif aux programmes d'action à mettre en oeuvre en vue de la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole.

1.3 Contexte technologique

Le contexte socio-économique actuel incite à développer une agriculture raisonnée respectueuse de l'environnement tout en maintenant une production élevée.

Bien que ces deux objectifs soient *a priori* antagonistes, une nouvelle agriculture, dite de « précision », est apparue pour relever ce double défi. À côté des techniques agricoles traditionnelles, l'agriculture de précision a pour but d'adapter les apports (fertilisants, produits phytosanitaires, eau) aux besoins stricts des cultures.

Cette modulation des apports est bidimensionnelle. D'une part l'échantillonnage spatial est nécessaire pour moduler les apports en fonction de l'état des plantes à un endroit donné de l'exploitation. D'autre part, le suivi temporel des plantes d'une culture est important pour suivre la réponse des végétaux aux intrants et aux conditions climatiques.

Ainsi, les modulations spatiale et temporelle des apports permettent une meilleure distribution des intrants, adaptée aux besoins des plantes, et limitent de ce fait les impacts sur l'environnement ainsi que les coûts pour l'exploitant.

De nouveaux instruments ont donc été développés afin d'atteindre les objectifs de l'agriculture de précision. L'offre est maintenant diversifiée et on peut trouver sur le marché des capteurs permettant de détecter des carences en azote, des foyers de maladies, la présence de mauvaises herbes ... En couplant ces capteurs aux systèmes d'injection d'intrants, il est alors possible de n'épandre qu'aux endroits où le besoin de la culture est réel. Mais en ce qui concerne le suivi non destructif contenu en eau des plantes, il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode universelle et opérationnelle assez précise. En effet, l'eau étant une variable intrinsèque des plantes, son estimation requiert des technologies particulières.

Dans ce cadre, ce document présente une étude théorique et expérimentale d'un nouvel appareil de mesure destiné au suivi *in situ* et non destructif du contenu en eau des plantes d'une culture. Il s'agit d'un dispositif multipôle fonctionnant en régime quasi-statique, dont le développement du principe de mesure par la société CIMEL Électronique a fait l'objet d'une étude précédente (Féchant, 1996). Ce premier travail a consisté à réaliser l'électronique de l'instrument et a permis de montrer que la mesure était sensible au contenu en eau des épis d'une culture de blé. L'objet de cette nouvelle étude est de montrer que le dispositif multipôle permet l'accès à la distribution verticale de l'eau présente dans les couverts végétaux. Plus précisément, il s'agit de montrer qu'il est possible d'obtenir une cartographie du contenu en eau des strates horizontales d'une culture. Le but est également d'évaluer la précision de la mesure par rapport à la méthode destructive de référence et de mettre en évidence l'influence des constituants du

milieu sondé (sol, organes végétaux) sur la mesure.

1.4 Plan du document

Une première partie, constituée de deux chapitres, présente tout d'abord les principales méthodes utilisées pour l'estimation du contenu en eau et/ou de la biomasse des cultures ainsi que pour le suivi du statut hydrique des plantes (chapitre 2). Le chapitre suivant concerne plus précisément le dispositif multipôle étudié dans ce document : après une présentation du principe de fonctionnement de l'appareil, nous rappelons les premiers résultats obtenus par Féchant (1996) avec ce prototype.

La seconde partie du document est une étude théorique de l'instrument de mesure. Le chapitre 4 expose un travail de simulation utilisant la méthode des éléments finis et permettant de calculer la mesure donnée par l'instrument en fonction des propriétés électriques des milieux sondés. Le chapitre 5 propose une inversion des données de la simulation par une méthode neuronale montrant qu'il est possible d'estimer les propriétés des milieux à partir des mesures.

La dernière partie présente les résultats des expérimentations effectuées avec le prototype. Le chapitre 6 expose la configuration de l'instrument en ordre de fonctionnement ainsi que les mesures effectuées et les variables agronomiques auxquelles est sensible l'instrument. Nous présentons ensuite dans le chapitre 7 deux applications agronomiques : le suivi de l'évolution du contenu en eau des épis de blé au cours de la maturation et l'estimation du contenu en eau des organes des plantes de blé.

Enfin, les annexes de ce document regroupent des éléments théoriques, en particulier des notions sur l'électromagnétisme, la méthode des éléments finis, ou bien encore une présentation des réseaux de neurones. Le lecteur non familiarisé avec ces différentes notions pourra ainsi se référer aux annexes consacrées.

Deuxième partie

Méthodes de mesure pour le suivi de la végétation

Chapitre 2

Techniques de suivi des cultures

Le besoin de connaître précisément le contenu en eau des plantes ou la biomasse des cultures a entraîné le développement de nombreuses méthodes de mesure et l'utilisation d'instruments variés.

Ce chapitre présente les principales techniques ayant été développées, avec tout d'abord un paragraphe sur les méthodes destructives de référence. Nous exposons ensuite des méthodes indirectes d'estimation du contenu en eau ou de la biomasse, pour la plupart fondées sur les principes de la télédétection.

2.1 Méthodes destructives

Les méthodes destructives ont été les premières développées car elles donnent directement accès à la variable que l'on souhaite estimer. Ce sont des techniques longues, souvent fastidieuses et lourdes à mettre en œuvre. Mais elles permettent d'obtenir des résultats précis, ce qui les place encore actuellement parmi les méthodes de référence (ITCF, 1989).

Ces méthodes sont toutes fondées sur des techniques d'échantillonnage afin d'avoir une bonne estimation de la grandeur recherchée tout en limitant le temps de manipulation et d'expérimentation (Catchpole et Wheeler, 1992; Lush et Franz, 1991).

En toute généralité, ces méthodes consistent à prélever des plantes puis à estimer la masse d'eau qu'elles contiennent. La masse d'eau est déterminée en soustrayant la masse des plantes sèches à la masse de ces mêmes plantes fraîches. L'eau des plantes est éliminée par séchage en étuve, la durée du séchage variant généralement en 24 et 48 heures suivant la température employée (entre 80 °C et 100 °C).

On voit donc que ces méthodes directes, dites gravimétriques ou pondérales, permettent de connaître précisément le contenu en eau des plantes. L'incertitude sur l'estimation de la masse d'eau est de l'ordre de 5 %, à laquelle il faut ajouter

l'incertitude liée à la méthode d'échantillonnage au champ. La précision peut donc être raisonnablement évaluée à environ 10 %. De plus, ces méthodes permettent d'avoir accès à la distribution verticale de l'eau dans la plante. Il suffit pour cela de peser séparément les organes des plantes, par exemple les épis, puis les feuilles et les tiges. Mais bien que précises, les méthodes pondérales ont plusieurs inconvénients :

- l'échantillonnage est une technique longue et fastidieuse ;
- la méthode est destructive, ce qui signifie :
 - une perte de rendement, certes insignifiante si l'estimation du contenu en eau est ponctuelle, mais qui peut être beaucoup moins négligeable en cas de suivi régulier — tant spatialement que temporellement — du contenu en eau,
 - une obligation d'opérer la pesée de matière fraîche rapidement avant que les plantes ne perdent de l'eau ;
- il faut avoir à disposition un matériel de laboratoire, en particulier une étuve et une balance.

En pratique, il est donc impossible d'avoir connaissance, à une date donnée, de la distribution horizontale de l'eau dans l'ensemble d'une culture.

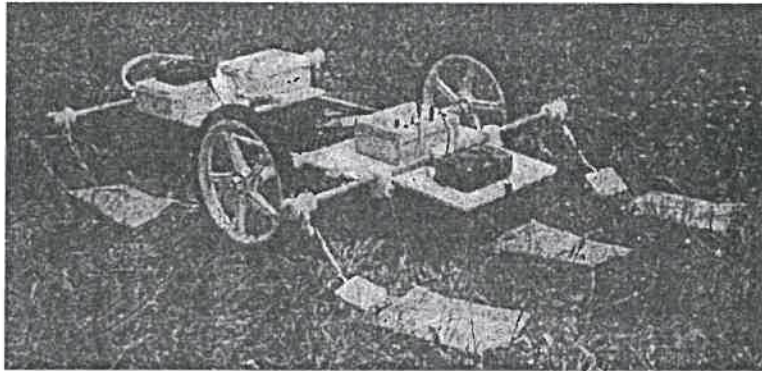
2.2 Méthodes non destructives

Afin de suivre efficacement le développement des plantes d'une culture, nous avons donc besoin de méthodes non destructives. Ces méthodes doivent permettre d'acquérir des données rapidement et autoriser le suivi d'une même parcelle au cours du temps, ce qui est impossible avec les méthodes destructives. De nombreuses techniques, de précisions variables, existent pour suivre les cultures (Tucker, 1980). Les paragraphes suivants en présentent les principales.

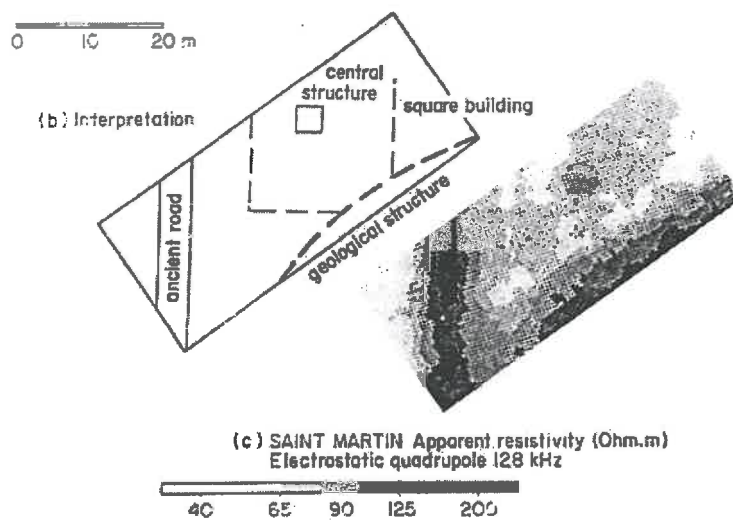
2.2.1 Techniques de télédétection

La télédétection a pour objectif de « déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (Paul *et al.*, 1982). Le principe de la mesure est le même quelque soit la technique utilisée : il s'agit de quantifier les modifications subies par un signal source connu après son interaction avec une cible dont on souhaite déterminer les caractéristiques.

Le signal source peut être émis par un corps naturel (rayonnement solaire par exemple) ou bien être créé par un appareillage approprié (émetteur micro-onde, laser ...). On parle alors respectivement de télédétection passive et de télédétection active.



(a) Quadripôle utilisé en prospection archéologique. D'après Tabbagh *et al.* (1993).



(b) Carte du sous-sol obtenue avec le quadripôle mettant en évidence d'antiques constructions romaines. D'après Tabbagh *et al.* (1993).

Figure 3.1 – Exemple d'utilisation de la méthode électrostatique pour des études archéologiques

(radiométrie, hyperfréquences). Le quadripôle travaille donc à une échelle intermédiaire qui n'a jusqu'à présent pas été explorée.

3.3 Principe de fonctionnement

3.3.1 Géométrie et électronique du quadripôle

Le quadripôle réalisé par Féchant est constitué de quatre électrodes situées aux sommets d'un carré de 40 cm de côté. Un générateur crée un courant alternatif de fréquence 447 kHz et d'amplitude $200 \mu\text{A}$, injecté dans le milieu sondé par l'intermédiaire de deux électrodes. Deux autres électrodes servent alors à mesurer une différence de potentiel qui est fonction des propriétés électriques du milieu (figure (3.2)). Les électrodes sont des boîtiers conducteurs, parallélépipédiques de 13 cm de côté et 8 cm d'épaisseur⁽³⁾. Elles sont placées horizontalement dans la strate que l'on souhaite sonder, par exemple au niveau des épis d'une culture de blé (figure (3.3)).

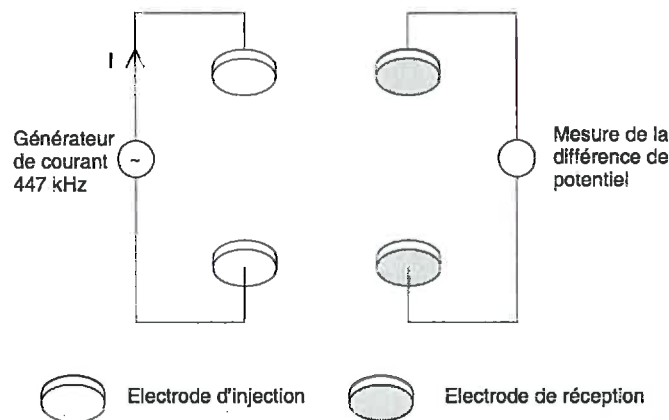
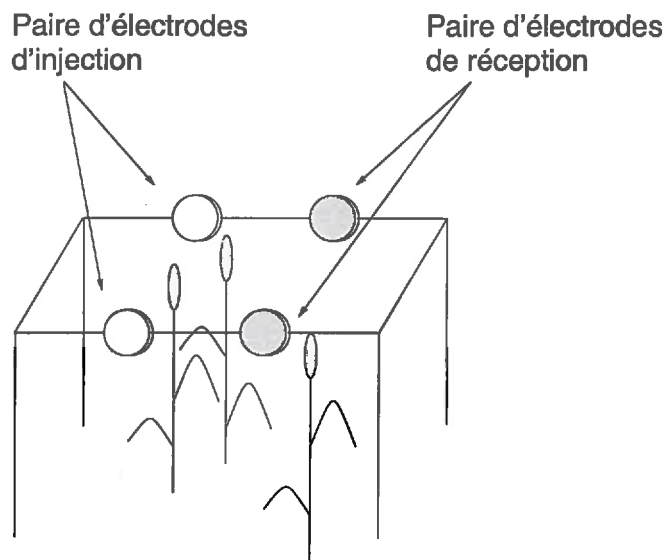


Figure 3.2 – Schéma simplifié du quadripôle. Vue de dessus.

Du point de vue électronique, l'étage d'injection se compose tout d'abord d'un oscillateur à 447 kHz (figure (3.4)). Le courant créé est asservi en amplitude ($200 \mu\text{A}$) grâce à un contrôleur de gain. Ce courant crée alors une différence de potentiel entre les électrodes d'injection. Une horloge est également synchronisée sur le courant d'injection afin de générer des tops utilisés par le récepteur. Ces tops sont transmis par fibre optique afin d'éviter tout fil parasite. L'électronique d'injection et l'alimentation électrique sont entièrement contenues dans l'une des électrodes d'injection.

L'étage de réception permet de mesurer la différence de potentiel entre les deux électrodes de réception. Cette grandeur est mesurée à l'aide d'un amplificateur de

⁽³⁾Il est prévu que les futurs quadripôles possèdent des électrodes cylindriques de taille à peu près similaire (12 cm de diamètre, 5 cm d'épaisseur).

Figure 3.3 – Schéma du quadripôle *in situ*.

différence référencé à la terre. Une démodulation synchrone est ensuite réalisée à l'aide des tops transmis depuis l'étage d'injection et l'on peut alors mesurer avec un multimètre les composantes de la différence de potentiel (composantes en phase et en quadrature avec le courant d'injection).

3.3.2 Aspects théoriques de la mesure

Il existe une différence essentielle entre la mise en œuvre d'un quadripôle utilisé pour l'étude d'un sous-sol conducteur et celle d'un quadripôle utilisé pour des mesures dans l'air ou dans un champ de blé.

Pour les champs électriques créés, l'air est en effet un isolant parfait ; aucune charge électrique ne s'y déplace. On est donc dans le cadre de l'électrostatique même si la fréquence est voisine de 500 kHz. À chaque instant, les champs émis et reçus sont en phase.

Un champ de blé représente quant à lui un milieu isolant quasi-parfait. Aucune charge libre n'y circule puisque le film d'eau présent au sein et/ou à la surface de la végétation est discontinu. Mais les molécules d'eau et les ions dissous rendent ce milieu polarisable. Les lois de l'électrostatique permettent encore de décrire les phénomènes grâce à l'introduction du vecteur « induction » ou « déplacement électrique » (\vec{D}) qui tient compte de la polarisation du milieu (voir annexe (A.1.2)).

Pour un courant I fixé et connu, la différence de potentiel V entre les électrodes de réception dépend alors de la *permittivité relative apparente* ϵ_r^* du milieu (voir équation (A.62)). L'admittance $Y = \frac{I}{V}$ est imaginaire et proportionnelle à la permittivité ϵ_r^* . La permittivité permet de rendre compte du cas des diélectriques

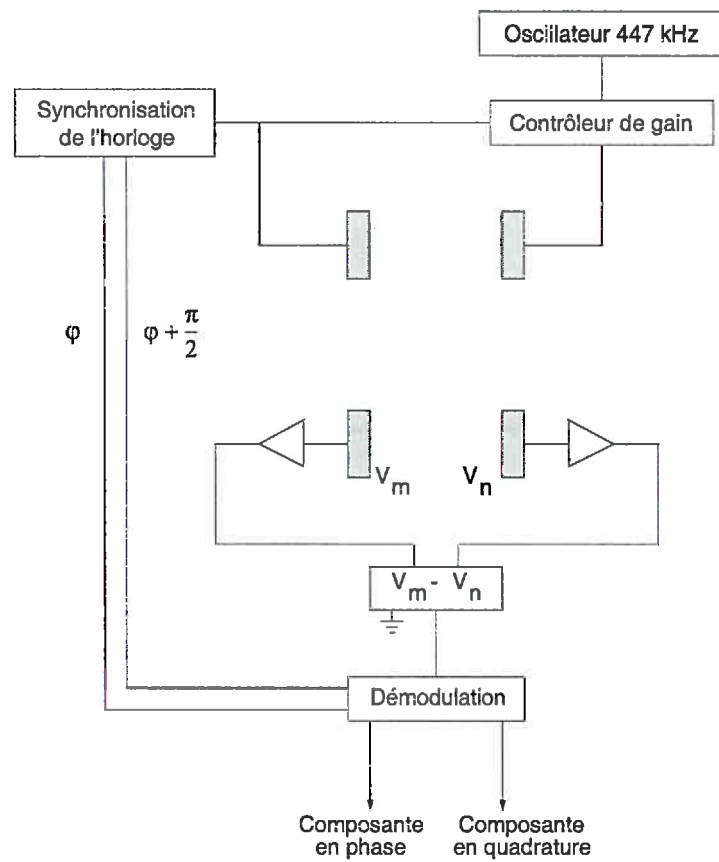


Figure 3.4 – Schéma électronique du quadripôle.

non parfaits en introduisant l'angle de perte ou un terme de conduction (voir annexe A et en particulier le paragraphe (A.3)) :

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r'' \quad (3.1)$$

$$= \varepsilon_r' - i \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0}, \quad (3.2)$$

où ε_r' est la permittivité diélectrique relative du milieu⁽⁴⁾ (sans unité), σ sa conductivité électrique ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$), f la fréquence du signal (Hz) et ε_0 la permittivité du vide ($8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$) ($i = \sqrt{-1}$). La permittivité étant complexe, le signal possède donc deux composantes. De plus, la différence de potentiel est une fonction imaginaire de la permittivité ε_r^* (voir paragraphe (A.4.2)). La première composante, en phase avec le courant injecté, correspond donc à la partie conductivité de la permittivité. La seconde, en quadrature avec le courant, correspond à la partie réelle de la permittivité diélectrique.

3.3.3 Lien entre permittivité et contenu en eau

Permittivité réelle et contenu en eau

La permittivité des matériaux est fortement corrélée à leur contenu en eau notamment à cause du contraste entre la permittivité de l'eau (80) et celle des matériaux classiques (généralement entre 1 et 5). D'une manière générale, la permittivité est une fonction croissante du contenu en eau (Charbonnière, 1970).

En particulier pour l'étude des sols, la connaissance de la permittivité diélectrique permet d'estimer précisément leur contenu en eau (Chanzy *et al.*, 1997). Même si de nombreux facteurs peuvent influencer la mesure (Gaudu *et al.*, 1993), notamment la température (Wraith et Or, 1999), des modèles, plus ou moins complexes, ont été proposés pour relier la permittivité diélectrique au contenu en eau du sol, comme ceux de Topp *et al.* (1980), ou bien de Or et Wraith (1999). Dans la gamme de fréquences utilisée par le quadripôle, la permittivité des sols est généralement comprise entre 5 et 30 (von Hippel, 1961).

Concernant la végétation, il n'existe pas de modèle permettant l'estimation *in situ* du contenu en eau de la végétation à partir d'une mesure de la permittivité. Par contre, en conditions de laboratoire (après prélèvement de plantes), certaines études ont mis en évidence l'existence de relations entre permittivité et contenu en eau. Féchant et Tabbagh (1999) ont ainsi établi une relation linéaire entre la permittivité des épis de blé à la fréquence de 430 kHz et leur contenu en eau. De même, dans le domaine des micro-ondes, la permittivité des grains de blé est lié à leur contenu en eau et à leur température (Kraszewski *et al.*, 1996; Nelson

⁽⁴⁾Dès à présent, on ne considérera que des permittivités relatives et on omettra le terme *relatives* pour alléger le texte.

et al., 1998) et des modèles peuvent ainsi être proposés (Kraszewski *et al.*, 1997, 1998a). Par ailleurs, les mêmes observations ont pu être réalisées lors d'expériences effectuées sur des grains de maïs (Trabelsi *et al.*, 1997) et sur des fruits et des légumes (Funebo et Ohlsson, 1999). Enfin, la relation entre permittivité et contenu en eau a également été mise en évidence dans des fréquences beaucoup plus faibles (fréquences audibles) pour différents types de grains et de semences (Stetson et Nelson, 1972).

En conclusion, il apparaît que la permittivité diélectrique réelle des matériaux, et en particulier de la végétation, est, en toute généralité, une fonction croissante de leur contenu en eau. Par conséquent, la composante de la différence de potentiel en quadrature avec le courant injecté doit être inversement corrélée au contenu en eau de la végétation.

Permittivité imaginaire et contenu en eau

L'eau étant un bon conducteur, elle influe énormément sur la permittivité imaginaire des matériaux.

Les mesures de conductivité électrique sont donc très utilisées pour caractériser le contenu en eau, notamment celui des sols. Ainsi, il a été montré que la conductivité électrique d'un sol, une fois corrigée des effets de la température, est une fonction linéaire du contenu en eau (Sheets et Hendrickx, 1995). Cependant, il apparaît que la salinité des sols intervient également pour une grande part dans la valeur de la conductivité et que la conductivité électrique dépend alors de la combinaison entre le contenu en eau et la salinité (Hendrickx *et al.*, 1992). Aux fréquences comparables à celle utilisée par le quadripôle, la conductivité des sols varie généralement entre 10^{-4} et $10^{-1} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$, ce qui équivaut à des permittivités imaginaires comprises entre 4 et 4000 environ (von Hippel, 1961; Phillips *et al.*, 1963).

En ce qui concerne la végétation, on peut de nouveau citer l'étude en laboratoire de Funebo et Ohlsson (1999) qui met en avant les relations entre permittivité imaginaire et température et contenu en eau pour différents fruits et légumes.

De la même façon que pour la permittivité réelle, on a donc des relations entre la permittivité imaginaire et le contenu en eau des matériaux. Mais dans le cas des couverts végétaux et pour des conditions atmosphériques sèches, le milieu est non conducteur car principalement composé d'air. Par contre, après un épisode, il est fort probable que le couvert végétal devienne conducteur à cause de l'eau présente à la surface des plantes.

En théorie, la composante de la différence de potentiel en phase avec le courant doit donc être négligeable car liée à la conductivité électrique du couvert végétal. Mais il ne faut cependant pas omettre une possible contribution du sol au signal mesuré.

3.3.4 Choix de la fréquence de fonctionnement

Le choix de la fréquence a été établi par Féchant selon des critères métrologiques.

Tout d'abord, afin d'obtenir une bonne précision de mesure, il est nécessaire de limiter la fréquence car plus la fréquence est élevée et moins l'amplification des signaux est bonne. Une borne supérieure a ainsi été fixée à 1 MHz.

Ensuite, le milieu sondé est composé de nombreux corps (les plantes) au sein d'un milieu homogène (l'air). Pour des fréquences peu élevées, ceci crée une augmentation de la permittivité apparente à cause de l'accumulation de charges électriques à l'interface des plantes et de l'air. Cet effet ionique, connu sous le nom de Maxwell-Wagner (Kittel, 1998; Coelho et Aladenize, 1993), doit être limité le plus possible afin de ne pas perturber la mesure effectuée avec le quadripôle. Ainsi, Féchant a fixé la valeur 100 kHz comme limite inférieure à la fréquence de fonctionnement.

La fréquence du courant a donc été choisie à 450 kHz. À cette fréquence, la mesure possède également l'avantage d'être indépendante de la géométrie des plantes car la longueur d'onde λ du courant est très grande par rapport à la dimension des plantes : pour une fréquence $f = 450$ kHz, $\lambda \simeq 667$ m. Ainsi, le champ électromagnétique rayonné par les électrodes d'injection est supposé être seulement absorbé par l'eau présente dans la végétation et le sol. Les interactions surfaciques sont donc limitées et la mesure est alors de type volumique.

D'un point de vue théorique, la longueur d'onde du signal étant très supérieure aux dimensions caractéristiques des plantes, il est possible d'appliquer l'hypothèse quasi-statique qui permet de négliger les phénomènes de propagation. Ainsi, le quadripôle est dit *électrostatique* : à chaque instant, la phase du signal est identique en tout point du volume de mesure (voir paragraphe (A.4)).

3.4 Résultats obtenus avec le prototype

Le quadripôle réalisé par Féchant a été testé sur une culture de blé dans le but d'estimer le contenu en eau des épis des plantes.

Auparavant, et dans le but d'étalonner le quadripôle, Féchant a simulé le passage d'un cube plastique rempli d'eau entre les électrodes et a comparé ces résultats aux mesures obtenues. La résolution de ce problème a été effectuée à l'aide de la méthode des moments, algorithme surtout utilisé dans les problèmes de rayonnement (voir annexe D). Les résultats montrent que le quadripôle répond conformément aux calculs théoriques mais que les valeurs de différences de potentiel sont 40% plus faibles que les valeurs prévues (figure (3.5)).

Le protocole de mesure sur couvert de blé consistait à mesurer la différence de potentiel de la composante en quadrature et de comparer cette valeur au contenu en eau obtenu par la méthode destructive. Plusieurs résultats ont été obtenus

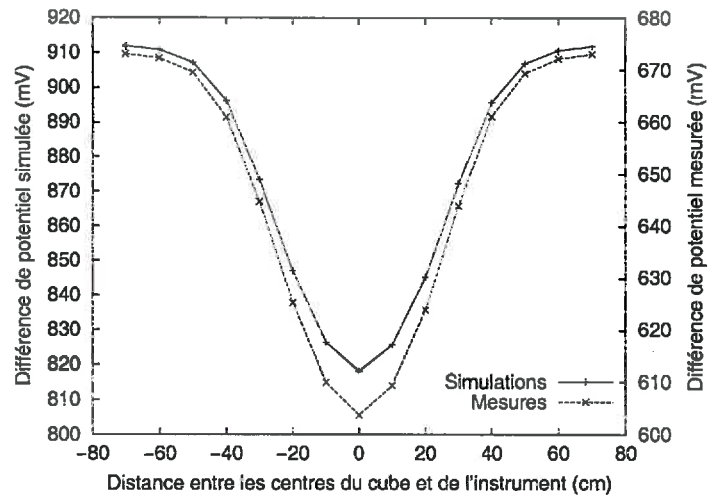


Figure 3.5 – Comparaison entre la mesure et la simulation par la méthode des moments de la réponse du quadripôle en présence d'un cube diélectrique. Adapté de Féchant (1996).

avec ce prototype.

Tout d'abord, il apparaît que l'appareil est bien sensible au contenu en eau des épis de blé, comme le montre la figure (3.6(a)). On voit nettement la corrélation inverse entre la différence de potentiel mesurée et le contenu en eau, et en particulier la décroissance du signal en fonction du contenu en eau.

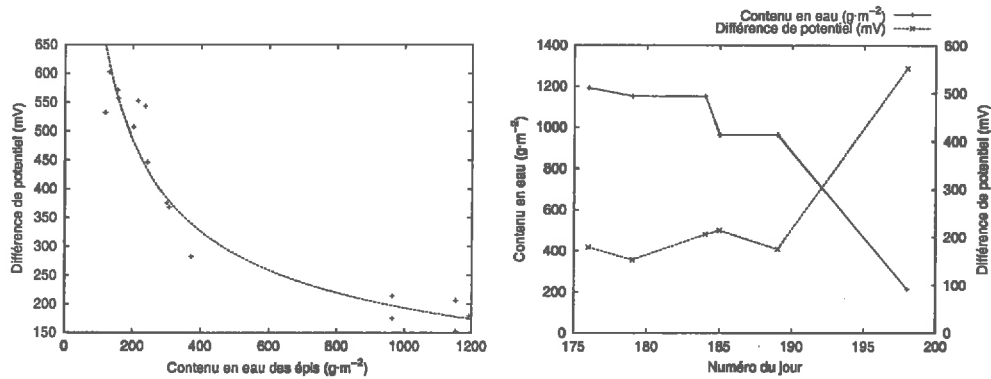
Ensuite, le quadripôle permet un suivi temporel de la végétation : sur la figure (3.6(b)), on peut noter que le quadripôle permet de déceler le palier hydrique du blé ainsi que la baisse du contenu en eau qui indique la maturité des grains.

Enfin, le quadripôle peut être également utile pour mettre en évidence une hétérogénéité de la distribution de l'eau au sein d'une parcelle, comme le montre la figure (3.6(c)), sur laquelle sont reportées des mesures réalisées en différents endroits d'une même parcelle.

Bien que ces résultats valident tout à fait le principe de la mesure, on peut noter que le bruit sur les différences de potentiel est relativement important. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ces perturbations : la variabilité des conditions climatiques (notamment de la température de l'air), la fiabilité de l'appareil en lui-même, mais également l'influence du sol et surtout l'influence des tiges comme exposé dans Féchant *et al.* (1999).

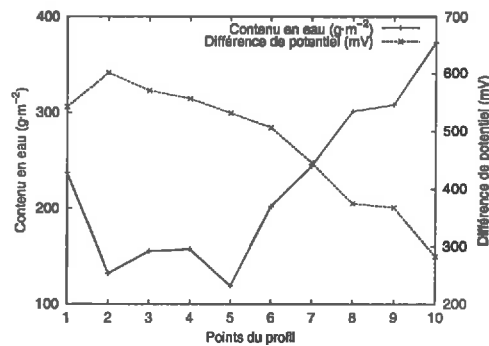
L'étude de Féchant a donc montré la faisabilité de la méthode électrostatique et un aperçu des possibilités du quadripôle. Le travail présenté dans ce document approfondit les résultats obtenus lors de cette première étude. Tout d'abord une modélisation théorique du fonctionnement du quadripôle permet de caractériser la réponse de l'instrument en fonction des propriétés électriques des milieux son-

dés. Ensuite, une étude expérimentale permet de comparer les mesures avec les résultats expérimentaux et de montrer que l'on a accès à la distribution spatiale de l'eau dans les couverts végétaux.



(a) Corrélation entre la mesure effectuée au quadripôle et le contenu en eau des épis de blé.

(b) Détection de la fin du palier hydrique à l'aide du quadripôle électrostatique.



(c) Mise en évidence de l'hétérogénéité spatiale du contenu en eau des épis de blé.

Figure 3.6 – Mesures effectuées sur un couvert de blé avec le prototype de quadripôle électrostatique. Adapté de Féchant (1996).

— RÉSUMÉ - CONCLUSION (CHAPITRE 3) —

L'estimation du contenu en eau de la végétation par une mesure de la permittivité diélectrique des plantes apparaît comme une méthode prometteuse pour le suivi de la végétation. Une première étude de faisabilité a montré qu'il est possible à l'aide d'un quadripôle électrostatique — instrument issu des techniques de prospection géophysique — d'estimer assez précisément le contenu en eau des épis d'une culture de blé.

Troisième partie

Étude théorique du dispositif multipôle

Chapitre 4

Simulation du dispositif multipôle

Ce chapitre présente une simulation de la réponse du dispositif multipôle en fonction des propriétés électriques des milieux (permittivité et conductivité) et pour différentes conditions de mesure : instrument placé dans la végétation ou au-dessus du sol nu. Après une présentation du problème à résoudre, nous présentons la méthode de simulation que nous avons choisie. Ensuite est exposé le travail préparatoire à la simulation et, dans un dernier temps, les principaux résultats obtenus.

4.1 Problème à résoudre

Le but de la simulation est de calculer la différence de potentiel entre les électrodes de réception (composante en quadrature), connaissant le courant entre les électrodes d'injection et les propriétés électriques des milieux en présence (sol, végétation, air) ; le travail suivant étant alors d'estimer par inversion les valeurs des permittivités à partir des différences de potentiel.

Suivant la précision de la modélisation de l'instrument, nous pouvons être conduits à deux types de solutions : soit une résolution analytique, soit une résolution nécessitant l'emploi d'une méthode numérique.

4.1.1 Résolution analytique

Une solution analytique existe dans le cas où la modélisation du quadripôle est simplifiée. En particulier, si l'on suppose des électrodes ponctuelles, le calcul du potentiel devient possible analytiquement :

1. les sources étant ponctuelles, il est possible d'utiliser le principe de superposition : le potentiel total est la somme des potentiels créés par chaque électrode (Durand, 1964). Ainsi, le problème se résout en cherchant le potentiel créé par une seule électrode. Dans ce cas, si l'on considère une électrode

ponctuelle placée dans un milieu tabulaire homogène stratifié horizontalement, le système se simplifie car la droite verticale passant par l'électrode est axe de symétrie du système. Ainsi, le système peut être décrit en coordonnées cylindriques (ρ, z) au lieu des coordonnées cartésiennes (x, y, z) , ce qui fait économiser l'utilisation d'une variable ;

2. par ailleurs, le fait de considérer des électrodes ponctuelles simplifie également le calcul de la différence de potentiel. En effet, les électrodes de réception étant des points mathématiques sans dimension, elles ne perturbent pas le potentiel créé par les électrodes d'injection. Ainsi les électrodes de réception n'existent pas physiquement dans la modélisation ; la différence de potentiel entre les électrodes de réception est alors simplement la différence de potentiel entre les deux points de l'espace où elles sont supposées se situer.

Grâce à l'hypothèse des électrodes ponctuelles, le système devient totalement déterminé connaissant la charge électrique portée par chaque électrode d'injection. Le problème se résout en trouvant une solution à l'équation de Poisson (voir annexe (A.4.2))

$$\Delta V = -\frac{\rho}{\varepsilon}, \quad (4.1)$$

dont la solution est, dans le cas des milieux stratifiés infiniment étendus, une combinaison linéaire d'intégrales faisant intervenir des fonctions de Bessel de première espèce et d'ordre zéro (Durand, 1966b).

Ce type de modèle simplifié a été utilisé par Féchant (1996) pour estimer la permittivité des épis à partir des différences de potentiel mesurées avec le quadripôle, en supposant la permittivité des tiges constante et en négligeant l'effet du sol.

4.1.2 Résolution numérique

Afin de se rapprocher le plus possible de la géométrie du quadripôle, on peut choisir de considérer des électrodes réelles, c'est-à-dire ayant des dimensions non nulles.

Ceci entraîne plusieurs conséquences. D'une part, le théorème de superposition ne s'applique plus compte tenu de la présence de sources non ponctuelles. D'autre part, le potentiel électrostatique ne peut plus être décrit en coordonnées cylindriques car le système ne possède pas de symétrie particulière. Enfin, il faut tenir compte des propriétés électriques des électrodes de réception car celles-ci modifient le champ électromagnétique par leur présence.

Le problème peut alors être abordé de deux manières différentes :

- soit on calcule le potentiel à partir de son expression littérale comprenant une intégrale de surface (voir paragraphe (A.4)) :

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iint_S \frac{\rho_\sigma dS}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|}. \quad (4.2)$$

Mais il est alors nécessaire de connaître précisément la distribution superficielle de charge ρ_s à la surface des électrodes, ce qui est difficile car la distribution de charge à la surface d'une électrode est influencée par la présence des autres électrodes. De plus, cette méthode est difficile à mettre en œuvre car le calcul des intégrales de surface est assez complexe, même pour des distributions de charges simples (voir les exemples présentés dans Durand (1964)). Cette méthode n'est donc pas appropriée à la résolution du problème posé ;

- soit on tente de trouver une solution à l'équation de Laplace

$$\Delta V = 0. \quad (4.3)$$

Dans ce cas, il faut connaître les conditions aux limites du problème, notamment les valeurs du potentiel sur les électrodes d'injection. Il s'agit donc de calculer le potentiel de chaque électrode d'injection connaissant la valeur du courant injecté. Ceci étant plus facile à déterminer que les distributions superficielles de charge, nous avons donc choisi de résoudre l'équation de Laplace.

Bien que cette résolution soit possible analytiquement dans des configurations très simples (Farlow, 1982; Zwillinger, 1992), il est souvent nécessaire de calculer numériquement une approximation de la solution. Deux techniques sont employées dans ce but : la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis. La géométrie du quadripôle devant être précisément décrite, la résolution du problème est traitée par les éléments finis, qui offrent plus de souplesse pour la modélisation des éléments de la scène à simuler (voir annexe B).

4.2 Mise en œuvre des simulations

Le fonctionnement du quadripôle est simulé par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel MODULEF, mis au point par l'INRIA (*Institut national pour la recherche en informatique et automatique*) et distribué librement sur le site <http://www-rocq.inria.fr/modulef> (du Toit *et al.*, 1995). MODULEF est

un ensemble de 3000 procédures écrites en FORTRAN 77 permettant la résolution complète de problèmes physiques faisant intervenir des équations différentielles : thermique, mécanique, dynamique des fluides, électromagnétisme ... La bibliothèque MODULEF permet ainsi la génération de maillages (2D et 3D), l'approximation par éléments finis, la résolution de systèmes linéaires ainsi que la visualisation des solutions. Les paragraphes suivants détaillent la mise au point de la simulation et exposent les principaux résultats obtenus.

4.2.1 Adaptation du logiciel au problème à résoudre

La bibliothèque MODULEF n'est pas initialement prévue pour traiter des problèmes d'électrostatique. Cependant, les équations de la thermique sont très proches de celles de l'électrostatique. En particulier, on peut noter que l'équation de Poisson est semblable à l'équation de la chaleur dans le cas stationnaire. En effet, l'équation de la chaleur permettant de calculer la température T s'écrit (Alonso et Finn, 1995)

$$\gamma \frac{\partial T}{\partial t} + \lambda \Delta T = f, \quad (4.4)$$

où γ est la chaleur volumique du milieu, λ la conductivité thermique et f les sources de chaleur. En régime permanent les variations temporelles sont nulles et il ne reste donc que

$$\lambda \Delta T = f. \quad (4.5)$$

Cette équation est alors mathématiquement équivalente à l'équation de Poisson

$$\varepsilon \Delta V = -\rho. \quad (4.6)$$

La simulation du quadripôle électrostatique est donc réalisée en utilisant les éléments finis de thermique mais en introduisant une chaleur volumique γ nulle afin d'éliminer le calcul de la variation temporelle.

Par ailleurs, la permittivité ε des matériaux est très souvent une grandeur complexe. Or, la grandeur correspondante en thermique est la conductivité λ qui est exclusivement réelle. Le code du logiciel MODULEF a donc été modifié afin de pouvoir utiliser des variables complexes dans les équations de la thermique. En particulier, les variables ont été déclarées comme type `complex` au lieu de `real` et les alignements des nombres dans les tableaux sont effectués sur deux octets au lieu d'un seul (un octet pour la partie réelle et un pour la partie imaginaire).

4.2.2 Maillage du domaine de simulation

La première étape de la simulation est le maillage du domaine dans lequel on recherche la valeur du potentiel électrostatique. Deux types de maillages sont utilisés pour les différentes simulations réalisées :

- un maillage permettant de simuler l'instrument au sein d'une culture de blé ;
- un maillage modélisant le quadripôle placé dans l'air, au-dessus du sol.

Modélisation du quadripôle

Le quadripôle est modélisé par quatre cylindres représentant les paires d'électrodes d'injection et de réception. Chaque cylindre a un rayon de 6 cm et une épaisseur de 5 cm⁽¹⁾. Les centres des quatre cylindres forment un carré horizontal de 40 cm de côté.

Quadripôle placé dans la végétation : cas d'une culture de blé

Lorsque l'on simule le quadripôle dans la végétation, il faut considérer quatre milieux : l'air, les épis, les tiges (plus précisément les tiges et les feuilles) et le sol. Le milieu sondé est alors modélisé par une superposition de strates horizontales homogènes. L'hypothèse d'homogénéité des milieux peut être adoptée car la longueur d'onde λ associée à la fréquence de fonctionnement f du quadripôle ($f = 450 \text{ kHz} \Leftrightarrow \lambda = 667 \text{ m}$) est très grande par rapport aux dimensions des organes des plantes et à la distance inter-plante. Le milieu sondé est donc structuré en quatre strates horizontales : premièrement le sol, puis les tiges, les épis, et enfin l'air. Le quadripôle est placé dans la strate des épis d'épaisseur 20 cm. La strate des tiges a quant à elle une épaisseur de 80 cm. Pour les strates du sol et de l'air il est également nécessaire de fixer une valeur d'épaisseur car la méthode des éléments finis s'applique à des domaines fermés, contrairement à la pratique où le volume de mesure est infini. Il faut donc que les bords supérieurs et inférieurs du domaine de simulation soient assez éloignés des électrodes afin que leur influence sur le calcul du potentiel soit la plus faible possible. Et de même, il faut que l'espace latéral soit assez large. Suite à ces considérations et après quelques essais sur différents maillages, la borne inférieure du domaine de simulation est fixée à 5 m sous les électrodes et la borne supérieure à 5 m au-dessus. De plus, la section horizontale du domaine de simulation est un carré de 10 m de côté dont le centre appartient à l'axe de symétrie du quadripôle.

Finalement, le domaine de simulation est donc un cube de 10 m de côté dont le centre coïncide avec le centre de gravité du quadripôle. La figure (4.1) présente une vue schématique en perspective du quadripôle placé dans la végétation

⁽¹⁾Conformément aux dimensions des électrodes des futurs quadripôles.

(échelle non respectée). Une section verticale du maillage généré par MODULEF est représentée sur la figure (4.2).

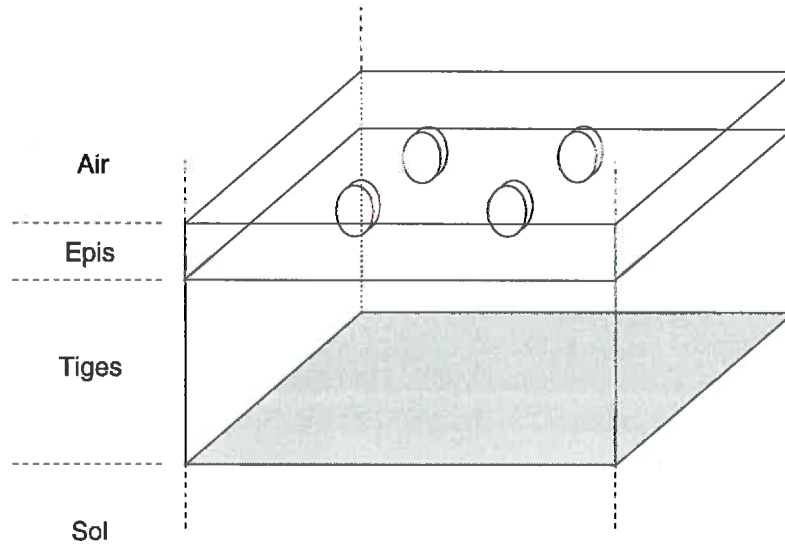


Figure 4.1 – Schéma du quadripôle placé dans la végétation (échelle non respectée).

Quadripôle placé au-dessus du sol

Un maillage plus simple a également été généré pour simuler le quadripôle hors des cultures. Ce maillage est directement déduit du maillage précédent et ne contient plus que deux milieux : l'air et le sol (figure (4.3)). Ce maillage a été utilisé en particulier pour quantifier l'influence du sol sur les mesures.

Adaptation à la modélisation d'un dispositif multipôle

À partir du maillage du quadripôle, il est possible de générer des maillages de dispositifs multipôles en ajoutant une paire d'électrodes de réception.

Par exemple, celle-ci peut être ajoutée dans la strate des épis, à côté des premières électrodes de réception, comme le montre la figure (4.4(a)). Il est également intéressant de placer la paire supplémentaire dans les autres strates : la figure (4.4(b)) montre un exemple de dispositif multipôle possédant sa deuxième paire d'électrodes de réception dans la strate des tiges sous les électrodes d'injection. Un même type de dispositif multipôle peut également être réalisé en plaçant la paire supplémentaire sous la première paire d'électrodes de réception. La figure (4.4(c)) présente quant à elle un dispositif multipôle avec une paire de réception supplémentaire dans l'air au-dessus des électrodes d'injection. De la même façon que précédemment, la paire supplémentaire peut être placée au-dessus de la première paire de réception.

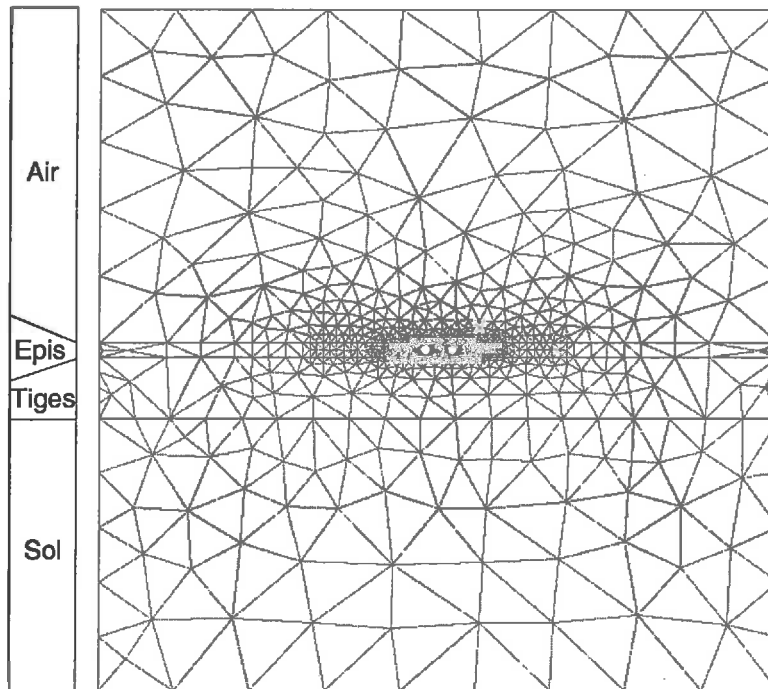


Figure 4.2 – Section verticale du maillage tridimensionnel. Sont visibles dans la strate des épis une électrode d'injection et une électrode de réception.

4.2.3 Paramètres d'entrée de la simulation

Les paramètres d'entrée de la simulation concernent d'une part l'instrument lui-même et d'autre part les milieux dans lesquels s'effectue la mesure.

Courant d'injection

Le principal paramètre concernant le quadripôle est la valeur du courant injecté. Celle-ci est fixée à $200 \mu\text{A}$. Cependant, la simulation ne calcule que des valeurs de potentiel électrostatique et requiert de connaître ce potentiel sur les électrodes d'injection. Et malheureusement, il est impossible de passer simplement du courant d'injection au potentiel présent sur les électrodes. La solution retenue est donc de porter les électrodes d'injection à une différence de potentiel arbitraire (1 V dans notre cas), d'effectuer la simulation, puis d'effectuer un post-traitement afin de rétablir la véritable différence de potentiel entre les électrodes d'injection en fonction du courant injecté et ainsi de corriger la valeur du potentiel électrostatique en chaque noeud du domaine de simulation (voir paragraphe (4.2.4)).

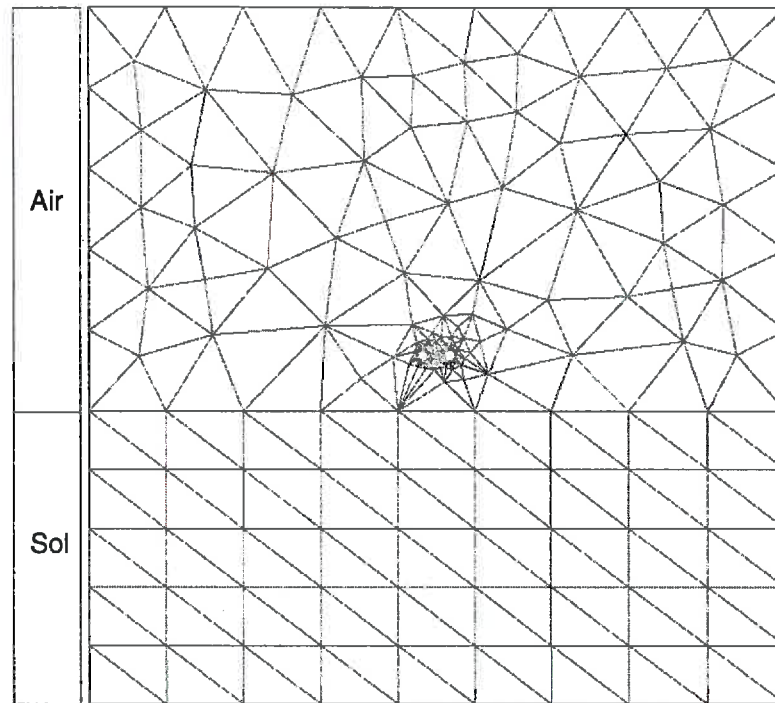


Figure 4.3 – Section verticale du maillage tridimensionnel dans le cas où ne sont considérés que l'air et le sol.

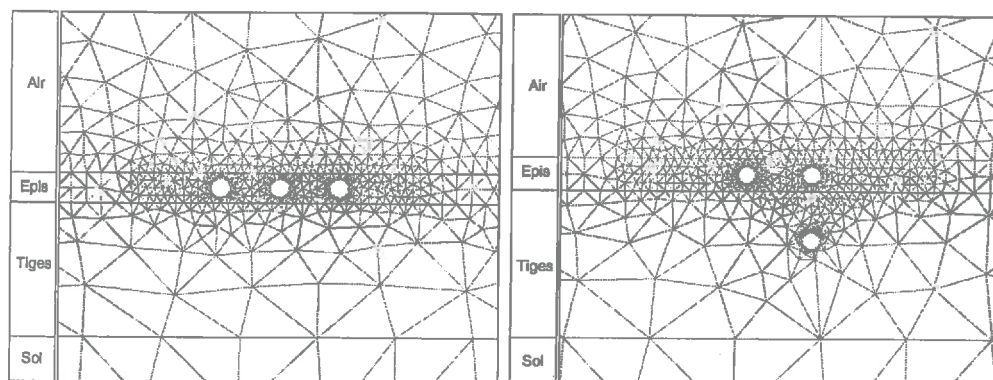
Propriété des électrodes de réception

Le quadripôle est constitué de deux électrodes de réception servant à mesurer une différence de potentiel. Dans le cadre de la simulation, ces électrodes sont supposées être des conducteurs parfaits, de sorte que le potentiel électrostatique est constant à la surface de chaque électrode (Durand, 1966a). Dans le corps de la simulation, les électrodes sont donc déclarées comme des cylindres équipotentiels sur lesquels la valeur du potentiel est à calculer. La différence de potentiel entre les électrodes est alors simplement la différence de potentiel entre un point de la première électrode de réception et un point de la seconde.

Propriétés électriques des milieux

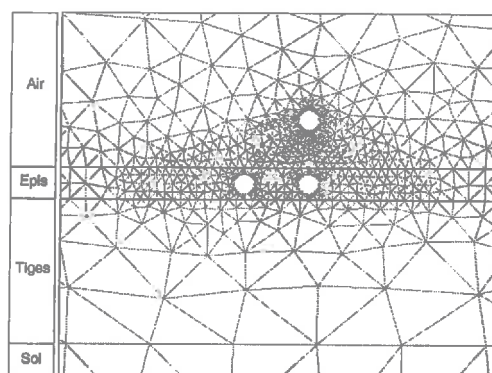
Le deuxième type de paramètre concerne les propriétés électriques des milieux simulés. Pour chaque milieu (sol, tiges, épis et air), on doit entrer des valeurs de permittivité.

On suppose tout d'abord que la permittivité de l'air est égale à 1. Ensuite, pour les épis, les permittivités utilisées sont comprises entre 1 et 20 afin d'avoir une grande dynamique au niveau des différences de potentiel. Pour les tiges, le contenu en eau est beaucoup plus faible — voir la figure (1.1) — et les permittivi-



(a) Détail d'une section verticale du maillage utilisé pour simuler un dispositif multipôle comportant deux paires d'électrodes de réception placées dans la strate des épis.

(b) Détail d'une section verticale du maillage utilisé pour simuler un dispositif multipôle comportant deux paires d'électrodes de réception (une paire dans la strate des épis et une paire dans la strate des tiges au-dessous des électrodes d'injection).



(c) Détail d'une section verticale du maillage utilisé pour simuler un dispositif multipôle comportant deux paires d'électrodes de réception (une paire dans la strate des épis et une paire dans l'air libre au-dessus des électrodes d'injection).

Figure 4.4 – Exemples de maillages utilisés pour simuler différents dispositifs multipôles.

tés entrées dans la simulation sont choisies arbitrairement entre 1 et 5. Enfin, on a également vu dans le paragraphe (3.3.3) que la permittivité des sols varie suivant la nature des matériaux constitutifs et l'humidité. La simulation s'effectue ainsi avec des permittivités réelles comprises entre 5 et 30.

Grâce aux modifications apportées, MODULEF peut traiter des permittivités imaginaires. Concernant la végétation, la partie imaginaire de la permittivité est nulle car les couverts végétaux sont en pratique non conducteurs⁽²⁾. Pour les sols, les valeurs de permittivité imaginaire sont très variables en fonction de la nature des matériaux constitutifs et de l'humidité (von Hippel, 1961; Phillips *et al.*, 1963; Tabbagh *et al.*, 1993). Pour une fréquence considérée de 450 kHz, la résistivité des sols peut varier de 10 à 10000 $\Omega \cdot m$, ce qui correspond à des valeurs de conductivité comprises entre 10^{-1} et 10^{-4} $S \cdot m^{-1}$. Les valeurs de ε'' sont alors comprises entre 4 et 4000.

La valeur de la permittivité de l'air étant fixée, les simulations sont donc réalisées en choisissant les permittivités des épis, des tiges et du sol. Ainsi, chaque différence de potentiel calculée dépend d'un triplet $(\varepsilon_{Epis}, \varepsilon_{Tiges}, \varepsilon_{Sol})$.

4.2.4 Post-traitement

Une fois le calcul du potentiel réalisé, les données de sortie sont traitées afin d'obtenir la valeur de la différence de potentiel entre les électrodes de réception en fonction du courant injecté. L'objectif est de convertir la valeur du courant d'injection en différence de potentiel entre les électrodes d'injection. Ceci a été réalisé en implémentant un ensemble de programmes en FORTRAN utilisant des fonctions de la bibliothèque MODULEF, notamment les fonctions de lecture des données relatives aux maillages. L'algorithme est décrit ci-dessous :

1. la simulation, réalisée en imposant une différence de potentiel arbitraire entre les électrodes d'injection (1 V), calcule un potentiel V_s en chaque noeud du maillage ;
2. la densité superficielle de charge σ_s à la surface des électrodes d'injection est calculée grâce à la formule précisant la discontinuité du champ électrique à la traversée d'un conducteur parfait (Durand, 1966b)

$$\sigma_s = -\varepsilon \left(\frac{\partial V_s}{\partial n} \right)_{\text{Electrode}}, \quad (4.7)$$

où ε est la permittivité diélectrique du milieu dans lequel sont plongées les électrodes d'injection et $\frac{\partial}{\partial n}$ la dérivée suivant la normale à la surface des électrodes ;

⁽²⁾Sauf après un épisode pluvieux où l'eau présente à la surface des plantes peut rendre le couvert partiellement conducteur.

3. la charge totale Q_s portée par une électrode d'injection est alors calculée à partir de la densité de charge superficielle σ_s

$$Q_s = \int_{\text{Electrode}} \sigma_s dS. \quad (4.8)$$

Cette intégrale de surface est estimée par une procédure de Monte Carlo, méthode rapide et précise qui ne nécessite pas de calcul de surfaces élémentaires (Press *et al.*, 1992);

4. par ailleurs, la charge totale réelle Q_r portée par cette électrode est connue grâce au courant d'injection I ⁽³⁾

$$Q_r = \frac{I}{i\omega}; \quad (4.9)$$

5. il est alors possible d'introduire un coefficient de correction k entre la charge totale réelle Q_r et la charge totale calculée Q_s

$$k = \frac{Q_r}{Q_s}; \quad (4.10)$$

6. la distribution de charge réelle est donc $\sigma_r = k\sigma_s$ et le potentiel en chaque point du maillage devient

$$V_r = kV_s. \quad (4.11)$$

Ainsi on obtient en chaque point du maillage le potentiel électrostatique V_r généré par l'injection du courant I . Et il est alors possible d'avoir la différence de potentiel entre les électrodes de réception. Remarquons que l'équation (4.9) fait intervenir le facteur i , qui rend compte du déphasage de $\frac{\pi}{2}$ entre le courant injecté et la différence de potentiel (voir paragraphe (3.3.2)).

4.3 Résultat des simulations

De nombreuses simulations ont été effectuées afin de calculer la réponse de l'instrument en fonction de ses caractéristiques géométriques et des propriétés des milieux sondés.

La durée d'une simulation est très variable suivant le nombre d'éléments du maillage composant la scène. Pour les maillages les plus simples, la durée totale est inférieure à une dizaine de minutes, mais pour les maillages les plus importants, la durée est d'environ 30 minutes en temps CPU, ce qui peut représenter plusieurs heures de calcul sur les machines partagées⁽⁴⁾. Ces temps de calcul im-

⁽³⁾ On a en effet $I = \frac{dQ_r}{dt}$. Et $\frac{d}{dt} \equiv i\omega$ en régime harmonique (voir annexe A).

⁽⁴⁾ Stations de travail SUN biprocesseur 250 MHz et DEC 500 MHz.

portants s'expliquent premièrement par le fait que la simulation s'effectue en trois dimensions, et deuxièmement parce que les électrodes et leur voisinage doivent être précisément décrits pour pouvoir effectuer le post-traitement.

Les paragraphes suivants exposent les résultats de ces différentes simulations⁽⁵⁾.

4.3.1 Effet de la taille des électrodes

Le maillage utilisé pour cette étude est un maillage composé d'un seul milieu⁽⁶⁾ afin de simuler le quadripôle dans une configuration de rayonnement en « espace libre ». L'effet de la taille des électrodes peut être visualisé sur la figure (4.5). On peut remarquer que cet effet est non négligeable sur la différence de potentiel — les valeurs de différence de potentiel sont très différentes de la valeur obtenue par calcul analytique en supposant des électrodes ponctuelles —, ce qui permet de valider une de nos hypothèses, à savoir qu'il est nécessaire de simuler la géométrie réelle de l'appareil en tenant compte de l'espace occupé par les électrodes. On voit également qu'une courbe de tendance peut être tracée entre les données issues des simulations et le point obtenu par calcul analytique, ce qui montre que la méthode des éléments finis donne des résultats corrects.

Par ailleurs, on note que les données de la simulation sont assez dispersées autour de la courbe de régression. Ceci s'explique par le fait que le calcul effectué lors du post-traitement, en particulier le calcul de la dérivée du potentiel électrostatique (voir paragraphe (4.2.4)), dépend du raffinement du maillage autour des électrodes. Or la précision du maillage est différente suivant la taille des électrodes simulées, ce qui provoque la variabilité des résultats obtenus.

Remarque. Il est impossible avec la méthode des éléments finis de retrouver les résultats analytiques obtenus dans le cas d'électrodes supposées ponctuelles. En effet, le potentiel électrostatique tendant vers l'infini à l'emplacement d'une distribution de charge devenant infiniment petite, il ne serait pas possible de définir dans MODULEF une différence de potentiel entre deux électrodes ponctuelles. Pour cette raison, le rayon des électrodes d'injection doit être une valeur finie — et pas trop petite pour éviter les trop grandes valeurs de potentiel qui produiraient des dépassements de capacité de calcul.

□

⁽⁵⁾Sauf mention contraire, les différences de potentiel calculées correspondent aux valeurs de la composante en *quadrature* du signal.

⁽⁶⁾Maillage non présenté dans le paragraphe (4.2.2).

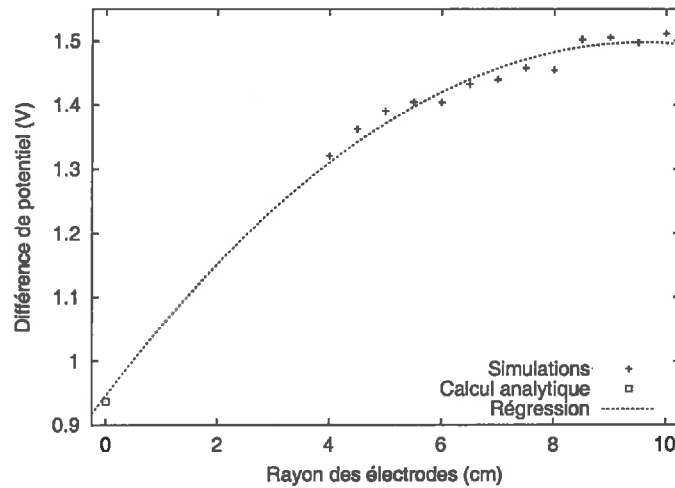


Figure 4.5 – Différence de potentiel entre les électrodes de réception en fonction du rayon des électrodes.

4.3.2 Effet des propriétés électriques du sol

Les simulations mettant en évidence l'influence du sol sur la mesure sont effectuées en utilisant le maillage du quadripôle présenté sur la figure (4.3). Afin que l'étude soit plus complète le quadripôle est simulé à différentes altitudes au-dessus du sol.

Effet de la permittivité complexe des sols. Nous avons vu dans le paragraphe (3.3.3) que la permittivité des sols est complexe car la conductivité des sols ajoute une composante imaginaire à la permittivité. L'effet de cette permittivité complexe sur la différence de potentiel doit donc être évaluée.

Pour cela, de nouvelles simulations sont effectuées, mais en utilisant cette fois-ci la version complexe de MODULEF que nous avons mise au point. Le maillage utilisé est celui de la figure (4.3). La permittivité de l'air est fixée à 1 et les permittivités réelle et imaginaire du sol sont variables. La permittivité réelle varie linéairement entre 5 et 30 (incrément de 5), tandis que la partie imaginaire varie géométriquement entre 4 et 4096 (raison géométrique égale à 4). Les composantes en phase et en quadrature des différences de potentiel sont alors calculées pour des électrodes placées à 40 cm, 60 cm, 80 cm et 1 m au-dessus du sol.

Le tableau (4.1) montre la variation de la composante en phase pour l'ensemble des permittivités complexes entrées dans la simulation. On note que la variation absolue de la composante en phase atteint 30 mV, ce qui est faible par rapport aux valeurs de la composante en quadrature (de l'ordre du volt). La variation relative est beaucoup plus importante car les valeurs de la composante en phase varie de quasiment 0 mV à 30 mV.

En ce qui concerne la composante en quadrature de la différence de potentiel, on note tout d'abord que les valeurs calculées en présence d'un sol conducteur sont très proches de celles calculées en présence d'un sol uniquement diélectrique (tableau (4.2)). Si on s'intéresse plus précisément à ces valeurs, on peut voir que la variation maximale en présence d'un sol conducteur, qui correspond aux électrodes placées à 40 cm du sol, est de l'ordre de 50 mV et représente une variation relative de moins de 4%. Sans tenir compte de la conductivité des sols, la variation maximale est de 25 mV, soit 2% en variation relative. Pour les trois autres altitudes, on s'aperçoit que les valeurs de la conductivité du sol ne modifie que très légèrement la composante en quadrature du signal.

Ainsi, on peut conclure que la composante imaginaire de la permittivité diélectrique du sol a moins d'influence sur la composante en quadrature que la permittivité réelle, pour les configurations géométriques d'électrodes qui nous intéressent. Seule la composante en phase de la différence de potentiel est affectée par la conductivité électrique du sol. Il est donc possible de négliger la partie imaginaire de la permittivité car nous cherchons dans cette étude à mettre en évidence les effets diélectriques des corps. Le paragraphe suivant détaille un peu plus l'influence de la permittivité réelle du sol sur les différences de potentiel calculées.

	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm
ΔV_{Phase} (mV)	30,6	10,7	4,29	2,03
$\frac{\Delta V_{\text{Phase}}}{V_{\text{Phase}}}$ (%)	99,7	99,7	99,7	99,7

Tableau 4.1 – Variations absolue et relative de la composante en phase des différences de potentiel pour l'ensemble des permittivités complexes entrées dans les simulations. Valeurs en fonction de l'altitude des électrodes au-dessus du sol.

		40 cm	60 cm	80 cm	100 cm
Avec conductivité	$\Delta V_{\text{Quadrature}}$ (mV)	50,3	17,9	7,17	3,37
	$\frac{\Delta V_{\text{Quadrature}}}{V_{\text{Quadrature}}}$ (%)	3,9	1,3	0,49	0,23
Sans conductivité	$\Delta V_{\text{Quadrature}}$ (mV)	24,8	13,0	5,98	3,05
	$\frac{\Delta V_{\text{Quadrature}}}{V_{\text{Quadrature}}}$ (%)	2,0	1,0	0,46	0,22

Tableau 4.2 – Variations absolue et relative de la composante en quadrature des différences de potentiel dans le cas où l'on tient compte ou non de la conductivité du sol. Valeurs en fonction de l'altitude des électrodes au-dessus du sol.

Effet de la permittivité réelle des sols. Les résultats des simulations précédentes, effectuées dans le cas où l'on néglige la conductivité électrique, sont

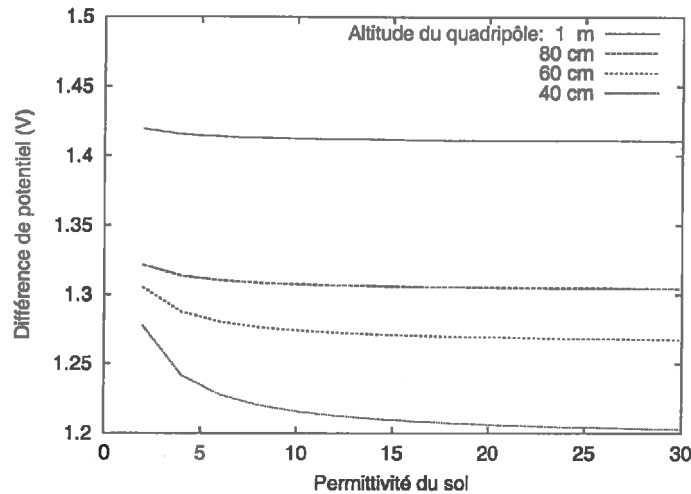


Figure 4.6 – Influence du sol sur la mesure pour différentes altitudes du quadripôle.

repris. Des simulations supplémentaires sont réalisées pour des permittivités de sol très faibles ($\epsilon < 5$) afin de bien mettre en évidence la dépendance de la différence de potentiel avec la permittivité réelle du sol⁽⁷⁾. Les résultats sont visibles sur la figure (4.6) où on peut voir notamment que la variation de la différence de potentiel est d'autant plus importante que le quadripôle est proche du sol (ceci rejoint l'observation faite pour le tableau (4.2)). Mais surtout, on peut noter que la gamme de variation de la différence de potentiel est presque entièrement couverte pour les permittivités comprises entre 2 et 7 ou 8. Ceci signifie donc que seuls les sols relativement secs ont une réelle influence sur les différences de potentiel.

On peut montrer par ailleurs que la permittivité du sol n'influe pas sur les résultats des différences de potentiel dans le cas où l'instrument est simulé dans le couvert végétal. Pour prouver cette hypothèse, la réponse du dispositif multipôle présenté sur la figure (4.4(b)) est calculée pour différentes valeurs de permittivité d'épis, de tiges et de sol. Cent simulations ont ainsi été réalisées, les permittivités étant choisies aléatoirement. Une analyse de variance⁽⁸⁾ est alors effectuée afin d'isoler les variables qui expliquent les différences de potentiel. Les résultats sont présentés dans le tableau (4.3) pour des simulations effectuées à deux altitudes différentes : V_1 est la différence de potentiel sur la première paire d'électrodes de réception — située à 80 cm au-dessus du sol —, V_2 est la différence de potentiel sur la seconde paire — située à 40 cm au-dessus du sol. Cette analyse de variance montre clairement que les différences de potentiel ne dépendent pas de la permit-

⁽⁷⁾Ces simulations ne peuvent toutefois pas être considérées comme réalistes car les permittivités inférieures à 5 ne se rencontrent que dans le cas de sols extrêmement secs.

⁽⁸⁾Les analyses statistiques présentées dans ce document ont été réalisées à l'aide du logiciel S-PLUS (Venables et Ripley, 1994).

tivité du sol ($\Pr(F > F_o) > 0,05$) mais uniquement des permittivités des épis et des tiges ($\Pr(F > F_o) < 0,05$).

Par conséquent, on peut considérer que le sol ne crée qu'un léger bruit sur les différences de potentiel, dans le cas des configurations géométriques d'électrodes présentées dans ce document.

	$\varepsilon_{\text{Epis}}$		$\varepsilon_{\text{Tiges}}$		ε_{Sol}	
	F_o	$\Pr(F > F_o)$	F_o	$\Pr(F > F_o)$	F_o	$\Pr(F > F_o)$
V_1	390	0,00	85	0,00	0,03	0,86
V_2	307	0,00	32	0,00	0,05	0,82

Tableau 4.3 – Analyse de variance : influence de la permittivité des épis, des tiges et du sol sur les différences de potentiel V_1 et V_2 (F_o : coefficient de Fisher ; $\Pr(F > F_o)$: probabilité pour que $F > F_o$).

4.3.3 Effet des propriétés électriques des organes végétaux

Le résultats les plus importants concernent les effets de la végétation (tiges et épis) sur la différence de potentiel.

Pour chaque type d'appareil (quadripôle et dispositif multipôle), cent simulations sont réalisées afin de couvrir un domaine de permittivités assez large. La permittivité des épis est ainsi comprise entre 1 et 20 (incrément de 1), la permittivité des tiges étant elle comprise entre 1 et 5 (incrément de 1 également). Afin de s'affranchir de la variabilité de la contribution du sol, la permittivité du sol est fixée à une valeur moyenne égale à 20.

Résultats pour le quadripôle

Le quadripôle est simulé à l'aide du maillage reproduit sur la figure (4.2). Les résultats sont présentés sur la figure (4.7). On peut voir sur ce graphique que le signal est inversement corrélé à la permittivité des épis et des tiges : la différence de potentiel entre les électrodes de réception décroît quand la permittivité des épis et/ou des tiges augmente. On note également que l'influence de la strate des tiges diminue lorsque la permittivité des épis augmente.

La différence de potentiel entre les électrodes de réception dépend donc à la fois de la permittivité des épis et de celle des tiges. Dans cette configuration géométrique il est alors impossible, à partir d'une différence de potentiel, de déterminer la permittivité diélectrique des épis (ou des tiges) car, pour une mesure unique de la différence de potentiel, on a une infinité de couples ($\varepsilon_{\text{Epis}}$, $\varepsilon_{\text{Tiges}}$).

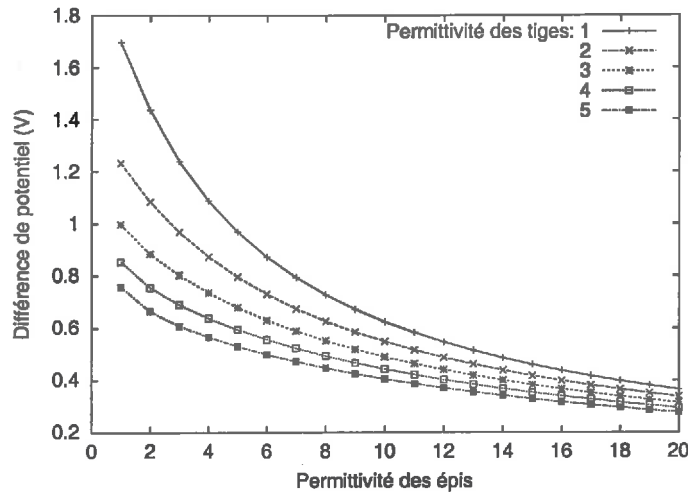


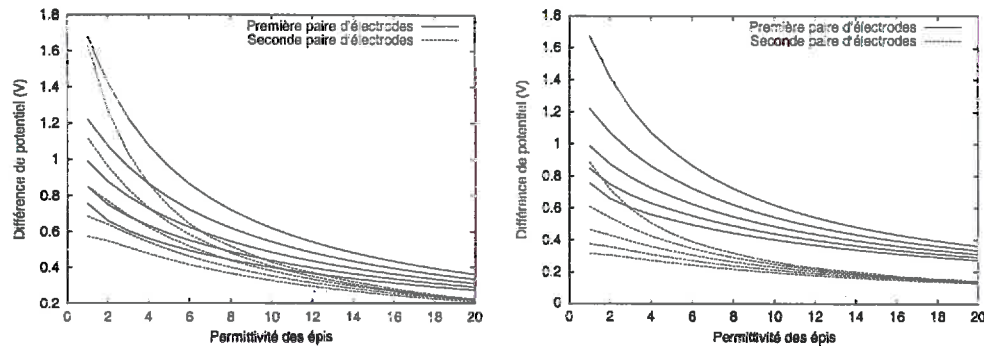
Figure 4.7 – Différence de potentiel entre les électrodes de réception en fonction de la permittivité des épis pour plusieurs permittivités des tiges.

Résultats pour les dispositifs multipôles

La solution proposée consiste à utiliser deux paires d'électrodes de réception au lieu d'une seule. Ainsi, pour un courant d'injection fixé, on récupère simultanément deux différences de potentiel, ce qui rend théoriquement possible la détermination simultanée de la permittivité des épis et de celle des tiges. Le choix de la géométrie étant libre, cinq dispositifs multipôles sont proposés :

- un dispositif multipôle dont la première paire d'électrodes de réception est située comme précédemment dans la strate des épis et la seconde placée dans la strate des tiges sous les électrodes d'injection (figure (4.4(b)));
- un dispositif multipôle dont la première paire d'électrodes de réception est située dans la strate des épis et la seconde placée dans la strate des tiges sous la première paire d'électrodes de réception ;
- un dispositif multipôle dont la première paire d'électrodes de réception est située dans la strate des épis et la seconde placée dans l'air au-dessus des électrodes d'injection (figure (4.4(c)));
- un dispositif multipôle dont la première paire d'électrodes de réception est située dans la strate des épis et la seconde placée dans l'air au-dessus de la première paire d'électrodes de réception ;
- un dispositif multipôle dont les trois paires d'électrodes sont à la même altitude dans la strate des épis (figure (4.4(a))).

Les résultats obtenus sont présentés sur les figures (4.8), (4.9) et (4.10). Par rapport au cas étudié dans le paragraphe précédent, nous obtenons pour chaque couple $(\epsilon_{Epis}, \epsilon_{Tiges})$, un unique couple (V_1, V_2) , où V_1 et V_2 sont respectivement



(a) Cas du dispositif multipôle ayant la seconde paire d'électrodes de réception sous les électrodes d'injection (figure (4.4(b))).

(b) Cas du dispositif multipôle ayant la seconde paire d'électrodes de réception sous la première paire d'électrodes de réception.

Figure 4.8 – Différence de potentiel entre les électrodes de réception en fonction de la permittivité des épis pour plusieurs permittivités des tiges. Cas d'appareils composés de deux paires d'électrodes de réception, l'une dans la strate des épis et l'autre dans la strate des tiges.

les différences de potentiel sur la première et la seconde paire d'électrodes de réception. Il devient alors possible de passer des différences de potentiel aux permittivités et ainsi de déduire de la mesure le contenu en eau des épis de blé.

La comparaison des graphiques conduit à quelques remarques :

- tout d'abord, il apparaît que les différents dispositifs multipôles simulés mesurent quasiment les mêmes différences de potentiel sur la première paire d'électrodes de réception ;
- mais concernant la deuxième paire, il existe de grandes différences, à la fois sur l'amplitude et sur la dynamique des mesures :
 - on peut noter d'une part que la distance séparant les électrodes de réception et les électrodes d'injection influe sur les différences de potentiel : plus cette distance est grande et plus la réponse est faible. Ceci est bien visible en comparant les figures (4.8(a)) et (4.8(b)), et les figures (4.9(a)) et (4.9(b)),
 - d'autre part, il est possible de remarquer que les dispositifs multipôles possédant une paire de réception dans l'air (figure (4.9)) sont moins sensibles à la permittivité des tiges que les dispositifs multipôles ayant une paire d'électrodes de réception dans la strate des tiges (figure (4.8)) car les courbes des différences de potentiel sont plus proches les unes des autres. La raison en est certainement que pour ces dispositifs

multipôles la deuxième paire d'électrodes de réception est située loin des tiges,

- concernant le dernier type de dispositif multipôle (figure (4.10)), on peut remarquer que celui-ci possède la réponse la plus faible, la raison étant que la deuxième paire d'électrodes de réception est plus éloignée des électrodes d'injection que dans le cas des autres dispositifs multipôles. De plus, cet éloignement a pour conséquence de réduire la dynamique des différences de potentiel.

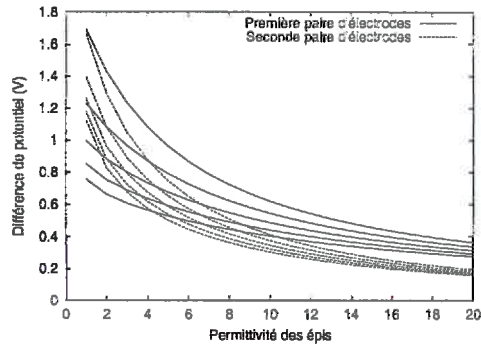
Cette étude de simulation montre clairement que les différents dispositifs multipôles ont des sensibilités qui dépendent fortement de leur géométrie. La précision sur l'estimation de la permittivité des organes végétaux à partir de la mesure de différences de potentiel est donc directement liée à l'emplacement des électrodes de réception par rapport aux électrodes d'injection. À partir de ces remarques, le chapitre suivant présente une méthode d'inversion et une analyse de la qualité de l'estimation des permittivités suivant la configuration géométrique des dispositifs multipôles.

— RÉSUMÉ - CONCLUSION (CHAPITRE 4) —

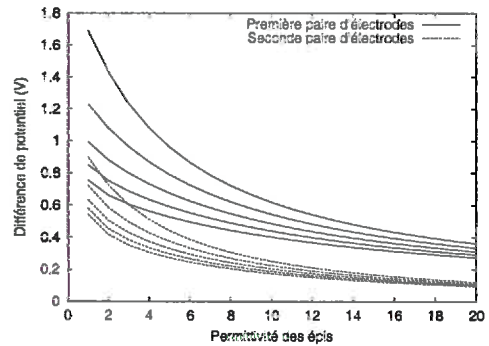
Le fonctionnement du quadripôle électrostatique placé dans une culture de blé a été simulé à l'aide de la méthode des éléments finis.

Les résultats de cette étude théorique montrent que la mesure donnée par l'instrument dépend à la fois de la permittivité des épis et de celle des tiges. Nous avons également montré que le sol a très peu d'influence sur la mesure dans les configurations que nous avons retenues pour l'étude des couverts végétaux (électrodes relativement éloignées du sol).

L'ajout d'une seconde paire d'électrodes de réception permet d'obtenir deux mesures simultanées dans le but d'estimer ensuite séparément la permittivité des épis et celle des tiges. Les différentes configurations géométriques testées montrent que la position des électrodes de réception par rapport aux électrodes d'injection influence le résultat des mesures.



(a) Cas du dispositif multipôle ayant la seconde paire d'électrodes de réception au-dessus des électrodes d'injection (figure (4.4(c))).



(b) Cas du dispositif multipôle ayant la seconde paire d'électrodes de réception au-dessus de la première paire d'électrodes de réception.

Figure 4.9 – Différence de potentiel entre les électrodes de réception en fonction de la permittivité des épis pour plusieurs permittivités des tiges. Cas d'appareils composés de deux paires d'électrodes de réception, l'une dans la strate des épis et l'autre dans l'air.

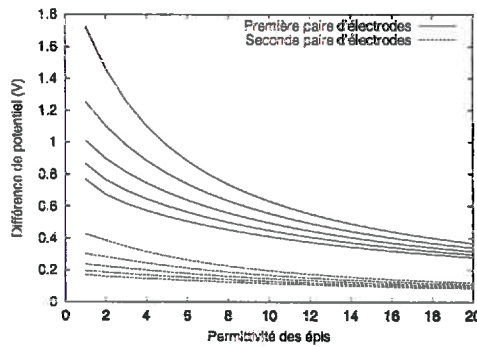


Figure 4.10 – Différence de potentiel entre les électrodes de réception en fonction de la permittivité des épis pour plusieurs permittivités des tiges. Cas d'un appareil composé de deux paires d'électrodes de réception placées au même niveau dans la strate des épis (figure (4.4(a))).

Chapitre 5

Inversion des données de la simulation

Suite à l'étude de simulation présentant le problème direct, nous étudions la résolution du problème inverse, c'est-à-dire l'estimation de la permittivité des milieux connaissant la différence de potentiel entre les électrodes de réception. Il s'agit donc de passer d'un compact V de \mathbb{R}^2 , représentant l'ensemble des différences de potentiel, à un compact P de \mathbb{R}^2 représentant l'ensemble des permittivités.

Après avoir présenté les résultats de l'inversion obtenus par une méthode de régression non linéaire, nous proposons différents algorithmes mettant en œuvre des réseaux neuronaux et comparons leurs performances suivant la configuration géométrique du dispositif multipôle.

5.1 Choix de la méthode d'inversion

De nombreuses méthodes existent concernant l'inversion des données (Tarranto, 1987). Parmi celles-ci, on peut citer :

- les techniques de régression, linéaires ou non linéaires, par la méthode des moindres carrés ;
- les méthodes de Monte Carlo ;
- l'inversion par résolution d'équations intégrales : Backus-Gilbert (Backus et Gilbert, 1970), noyau de Dirichlet ;
- les méthodes neuronales . . .

5.1.1 Essais préliminaires

Nous avons choisi tout d'abord d'inverser les données des simulations à l'aide des techniques de régression non linéaire classiques. La régression s'effectue en

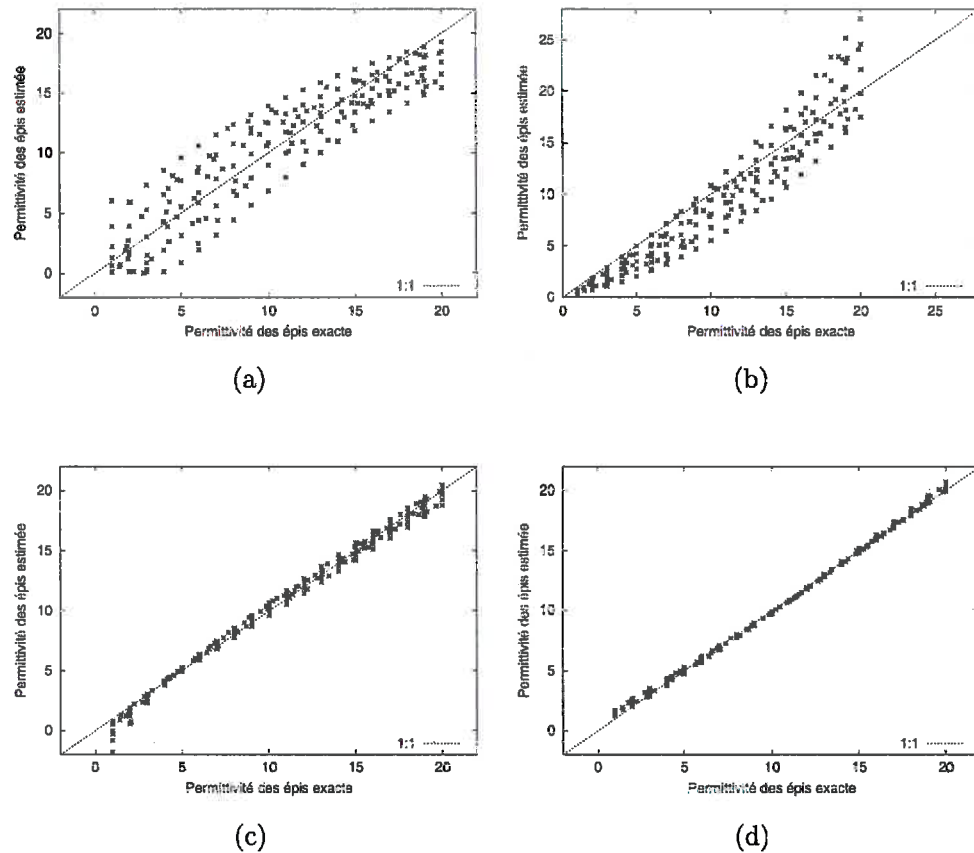


Figure 5.1 – Comparaison entre la permittivité exacte des épis et la permittivité estimée par régression non linéaire pour plusieurs modèles.

deux étapes : on choisit un modèle avec un certain nombre de paramètres, puis on calcule la valeur de ces paramètres de manière à ajuster au mieux le modèle aux données présentées.

Plusieurs modèles ont ainsi été testés sur les données de la simulation. Les données proviennent de la simulation du dispositif multipôle qui possède toutes ses électrodes à la même altitude (voir figure (4.4(a))). Le fichier comporte 200 triplets $(V_1, V_2, \varepsilon)^{(1)}$. Les résultats sont présentés sur la figure (5.1) ainsi que dans le tableau (5.1).

On peut voir tout d'abord que les différents modèles ne sont pas équivalents en terme de qualité d'inversion. En particulier, les deux premiers modèles ne sont pas assez précis. Les deux derniers modèles sont nettement meilleurs mais on peut

⁽¹⁾100 simulations originales + 100 simulations réalisées avec des permittivités d'épi, de tige et de sol tirées aléatoirement. Ces cent simulations supplémentaires ont été réalisées pour les estimations effectuées à l'aide des réseaux de neurones (voir paragraphe (5.2.2)).

Modèle	Figure	Valeur des paramètres	Variance
$\varepsilon = (V_1 - a)^2(V_2 - b)^2$	(a)	$a = 1,18$ $b = 4,95$	5,1
$\varepsilon = \frac{a}{V_1^2} + \frac{b}{V_2^2}$	(b)	$a = 4,12$ $b = -0,188$	5,1
$\varepsilon = \frac{a}{V_1} + \frac{b}{V_2}$	(c)	$a = 24,3$ $b = -5,70$	0,25
$\varepsilon = kV_1^aV_2^b$	(d)	$k = 1310$ $a = -5,58$ $b = 4,60$	0,062

Tableau 5.1 – Performance comparée des différents modèles de régression.

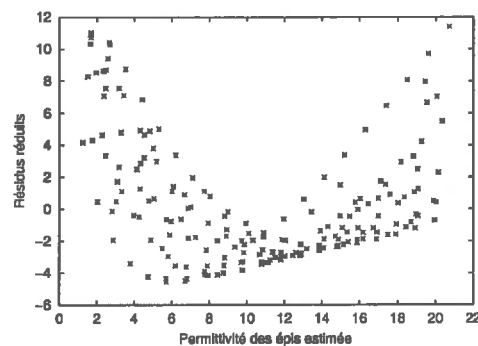


Figure 5.2 – Comparaison entre les résidus réduits et les permittivités estimées par le modèle (d) du tableau (5.1).

observer que la distribution des points autour de la première bissectrice n'est pas aléatoire : pour le modèle (c), il y a sous-estimation pour les plus faibles et les plus fortes permittivités tandis que les valeurs moyennes de la permittivité sont surestimées⁽²⁾ ; l'effet contraire se produit pour le modèle (d). Ceci se remarque plus facilement sur la figure (5.2) où sont tracés les résidus du modèle (d) en fonction des valeurs estimées des permittivités.

5.1.2 Choix des réseaux de neurones

Suite aux résultats obtenus par la méthode précédente, nous nous sommes orientés vers l'utilisation d'une méthode de régression non paramétrique, et plus

⁽²⁾Dans le cas d'une distribution de charge uniforme, le potentiel électrostatique et la permittivité sont liés par une fonction inverse (voir équation (A.62)). Mais ceci n'est pas vérifié ici à cause de la répartition non uniforme des charges électriques à la surface des électrodes.

précisément vers les réseaux de neurones.

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que les méthodes de régression paramétriques ont pour objet d'estimer les valeurs des paramètres d'une fonction choisie. Dans le cas d'une estimation non paramétrique, il s'agit de déterminer un ensemble de fonctions, choisies parmi une classe de fonctions, approximant au mieux les données. Il s'agit donc de résoudre le problème suivant : connaissant les données d'entrée X et de sortie Y , trouver les fonctions f telles que

$$y_j = \sum_{i=1}^N f_i(x_j) + \epsilon, \quad (5.1)$$

de sorte que l'erreur d'estimation ϵ soit la plus faible possible.

L'avantage des méthodes non paramétriques est qu'elles permettent de résoudre de nombreux problèmes pour lesquels une formulation fonctionnelle n'est pas requise. En particulier, dans le cas qui nous concerne où il suffit simplement de relier un couple de variables à une autre variable.

Les réseaux de neurones entrent dans l'ensemble des outils permettant d'effectuer des régressions non paramétriques (Sarle, 1994). Les réseaux de neurones, objets de nombreuses recherches depuis les années 1960, sont actuellement largement utilisés dans de nombreux domaines, tant en classification, en reconnaissance de formes, en automatique, qu'en estimation et inversion de données. Nous avons donc choisi d'utiliser les réseaux de neurones car ceux-ci offrent un bon compromis entre performances et facilité de mise en œuvre. Par ailleurs, la littérature abondante sur le sujet est un élément important dans le choix de cette technique. Pour de plus amples détails, les paragraphes (E.1) et (E.2) présentent un aperçu des réseaux de neurones.

D'autres méthodes non paramétriques peuvent également être considérées, mais celles-ci sont moins utilisées. On peut citer par exemple les approximations par splines (Venables et Ripley, 1994), par ondelettes, les régressions locales, par projection, ou bien encore la logique floue (Venables et Ripley, 1994; Juditsky *et al.*, 1994) ...

5.2 Élaboration du réseau

5.2.1 Type de réseau et algorithmes utilisés

Le réseau utilisé pour effectuer l'inversion des données de la simulation est un réseau de type RBF (*Radial basis functions*, Fonctions radiales de base), qui se prête bien aux problèmes d'estimation.

Les résultats obtenus avec différents algorithmes sont présentés dans les paragraphes suivants. Les algorithmes utilisés, parmi ceux détaillés dans la section (E.3), sont les suivants :

- méthode de descente de gradient ;
- méthode de descente de gradient avec sélection de centres par agrégation ;
- estimation des poids synaptiques par moindres carrés ;
- sélection des centres et de la largeur des fonctions radiales par *forward selection* et estimation des poids synaptiques par moindres carrés.

Les algorithmes de descente de gradient ont été implémentés en langage C tandis que les algorithmes faisant appel à des calculs matriciels ont été développés sous OCTAVE (logiciel libre équivalent à MATLAB, disponible sur <http://www.che.wisc.edu/octave/index.html>).

5.2.2 Fichiers d'apprentissage et de généralisation

Afin d'effectuer l'inversion des données, le réseau doit tout d'abord être entraîné sur des données d'apprentissage. Le réseau lit donc en entrée le fichier d'apprentissage contenant les résultats issus des simulations. Ce fichier est un tableau à trois colonnes : permittivité des épis (ou des tiges, suivant le problème qui nous intéresse), différence de potentiel entre les électrodes de la première paire d'électrodes de réception, différence de potentiel entre les électrodes de la seconde paire d'électrodes de réception. Comme présenté dans le paragraphe (4.3.3), les permittivités des milieux ont été choisies de manière à couvrir le mieux la dynamique des courbes représentant les différences de potentiel en fonction des permittivités. En particulier, la permittivité des épis varie de 1 à 20 par pas de 1 tandis que celle des tiges varie de 1 à 5, par pas de 1 également. La permittivité du sol est par ailleurs fixée à 20. On a ainsi un fichier d'apprentissage constitué de 100 données.

Une fois l'apprentissage effectué, la qualité du réseau est testée grâce aux données de généralisation. Celles-ci sont également issues des simulations mais, à la différence du fichier d'apprentissage, les différences de potentiel correspondent à des permittivités tirées aléatoirement dans l'ensemble $[1 : 20] \times [1 : 5]$. La permittivité du sol est également choisie aléatoirement dans l'ensemble $[5 : 30]$ afin de brouter légèrement les différences de potentiel et donc de mieux tester la qualité du réseau. Ce fichier comporte aussi 100 données.

5.3 Résultats de l'inversion

Cette section présente les résultats de l'inversion des données de la simulation obtenus pour les différents types d'algorithme.

5.3.1 Méthodes itératives

Descente de gradient

La méthode de descente de gradient permet d'estimer la valeur des poids synaptiques du réseau à partir des caractéristiques des fonctions radiales de base (coordonnées du centre et largeur de la fonction).

Comme pour les régressions non linéaires classiques (paragraphe (5.1.1)), le réseau a été testé avec les résultats de la simulation du dispositif multipôle comportant toutes les électrodes dans la strate des épis. La figure (5.3) montre l'évolution de l'erreur E du réseau en fonction des itérations. On peut voir notamment que l'erreur décroît tout d'abord très rapidement lors des premières itérations puis moins vite ensuite.

Les performances générales du réseau sont visibles sur les figures (5.4(a)) et (5.4(b)). Que ce soit sur l'estimation de la permittivité des épis ou bien sur celle des tiges, on peut voir que la capacité d'apprentissage du réseau est assez moyenne, de même que la capacité de généralisation. Mais, contrairement aux résultats des régressions précédentes, il n'y a pas d'erreur systématique sur les permittivités estimées.

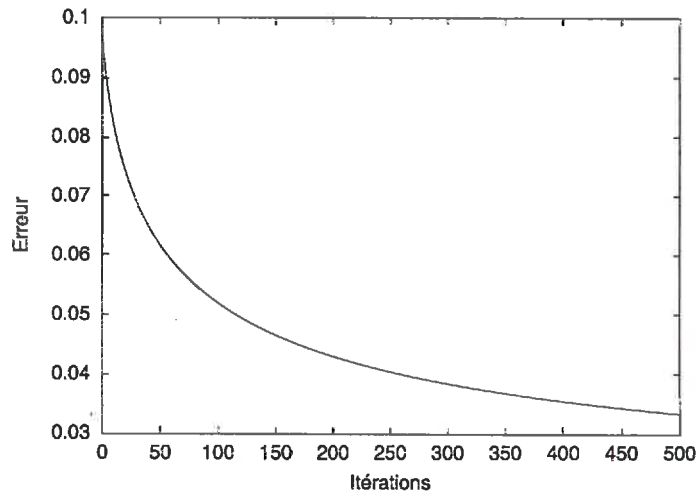
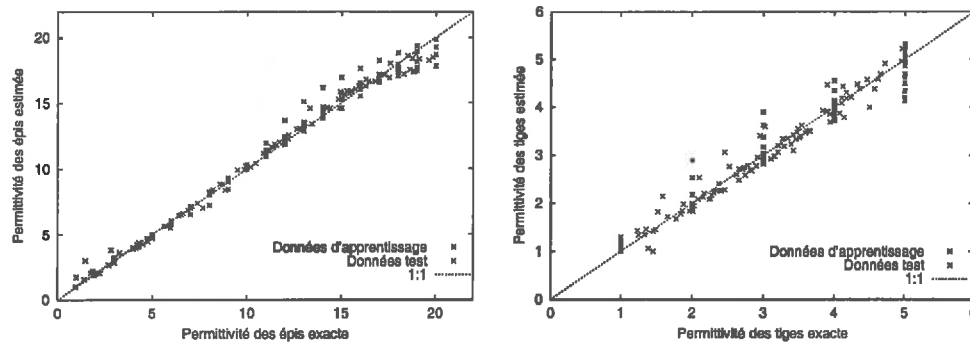


Figure 5.3 – Évolution de l'erreur E du réseau sur les données d'apprentissage en fonction du nombre d'itérations.

Afin d'avoir une meilleure inversion, il est possible de réduire la largeur des fonctions de base. Sur le premier exemple, les largeurs sont de $4 \cdot 10^{-3}$ V pour la première différence de potentiel et de 10^{-4} V pour la seconde différence de potentiel. Le second test est effectué avec des largeurs de fonction respectivement égales à 10^{-3} V et $2 \cdot 10^{-5}$ V.

La figure (5.5) montre alors l'évolution de l'erreur du réseau en fonction du nombre d'itérations. On peut voir en particulier que l'erreur sur les données d'ap-



(a) Comparaison entre la permittivité exacte des épis et la permittivité estimée par le réseau de neurones.

(b) Comparaison entre la permittivité exacte des tiges et la permittivité estimée par le réseau de neurones.

Figure 5.4 – Résultats de l'inversion obtenus par la méthode de descente de gradient.

prentissage est plus faible que précédemment. De plus, on observe sur les figures (5.6(a)) et (5.6(b)) une meilleure qualité d'inversion. Il est par ailleurs possible de noter que l'inversion est moins bonne lorsque la permittivité est proche des frontières du domaine : ceci est simplement dû à un effet de bord.

Il est également possible en réduisant encore la largeur des fonctions radiales de base d'améliorer l'apprentissage du réseau mais il se produit alors un phénomène de sur-apprentissage : l'erreur sur les données d'apprentissage est très faible mais l'erreur en généralisation devient beaucoup plus importante, et l'erreur moyenne du réseau tend alors à augmenter.

Sélection des centres et descente de gradient

Afin de réduire la complexité du réseau et de diminuer les temps de calcul, il est possible de limiter le nombre de fonctions radiales. Ceci peut être réalisé grâce à l'algorithme d'agrégation présenté en annexe (paragraphe (E.3.2)). On entre tout d'abord une valeur seuil pour la force d'attraction afin de déterminer le nombre de centres constituant le réseau de neurones. La largeur des fonctions est ensuite calculée en considérant la distance séparant les différents centres sélectionnés.

La figure (5.7(a)) représente l'ensemble des centres disponibles pour le réseau ainsi que les centres sélectionnés par l'algorithme d'agrégation. Le nombre de bases sélectionnées est de 50, soit un centre sur deux. La figure (5.7(b)) présente les résultats de l'inversion. On note que l'inversion est très moyenne : les points d'apprentissage sont dispersés autour de la première bissectrice, autant que les points de généralisation. Les mauvaises performances sont donc dues principalement à un mauvais apprentissage, et tout d'abord à une largeur des fonctions

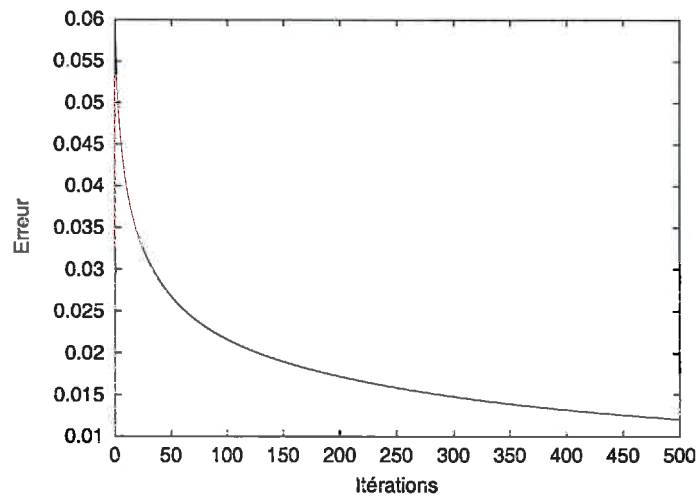
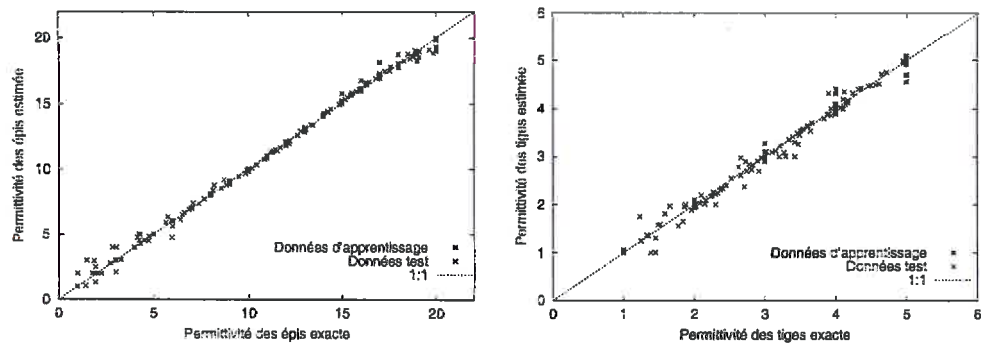


Figure 5.5 – Évolution de l'erreur E du réseau sur les données d'apprentissage en fonction du nombre d'itérations dans le cas de fonctions moins larges que sur la figure (5.3).



(a) Comparaison entre la permittivité exacte des épis et la permittivité estimée par le réseau de neurones.

(b) Comparaison entre la permittivité exacte des tiges et la permittivité estimée par le réseau de neurones.

Figure 5.6 – Résultats de l'inversion par la méthode de descente de gradient. Cas de fonctions de base plus étroites que pour les figures (5.4(a)) et (5.4(b)).

radiales non adaptée. Si on réduit arbitrairement les largeurs, l'apprentissage devient meilleur mais les performances en généralisation n'en sont pas pour autant améliorées. Il y a donc également un problème au niveau de la sélection des centres.

Donc, bien que l'algorithme d'agrégation permette de limiter efficacement la complexité des réseaux neuronaux, l'inconvénient de cette méthode est que la sélection des centres s'effectue sur un critère uniquement géométrique, sans analyse préalable de la fonction erreur du réseau. Le fait que ce soit une valeur entrée par l'utilisateur — la valeur seuil pour l'attraction — qui détermine ensuite tous les calculs est également un inconvénient de cet algorithme.

5.3.2 Méthodes matricielles

Moindres carrés

La méthode des moindres carrés est un algorithme simple pour entraîner le réseau de neurones. Les seules données à spécifier sont les largeurs des fonctions radiales. Plusieurs essais permettent de cerner les valeurs adéquates pour ces largeurs. Les résultats sont présentés sur les figures (5.8(a)), (5.8(b)) et (5.8(c)).

Sur la figure (5.8(a)), la largeur des fonctions est bien trop importante, ce qui a pour effet de masquer les variations de la fonction reliant les différences de potentiel à la permittivité des épis. Il en résulte qu'il est impossible d'estimer la permittivité à partir des différences de potentiel.

Pour la figure (5.8(b)) par contre, les fonctions radiales sont très étroites. Par conséquent, un sur-apprentissage se produit : l'inversion est très bonne sur les données d'apprentissage mais elle est très mauvaise pour les données de généralisation ; seules les données de généralisation très proches des centres des fonctions radiales permettent d'obtenir des résultats cohérents.

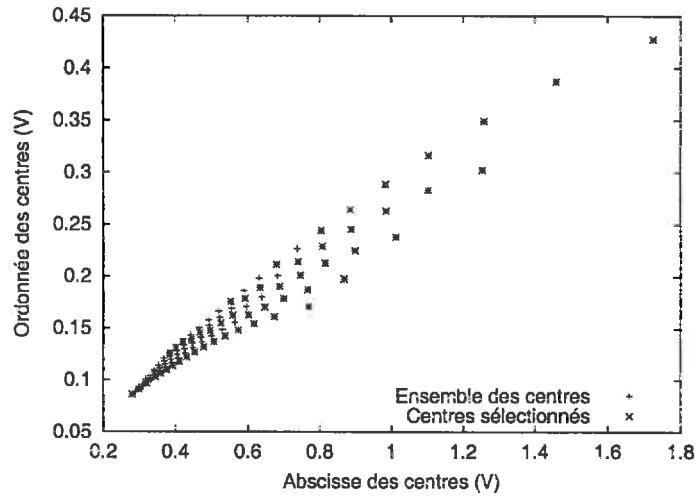
Enfin, la figure (5.8(c)) montre un résultat obtenu pour des valeurs de largeurs intermédiaires aux deux résultats précédents. Bien que les estimations de la permittivité soient meilleures que sur les figures (5.8(a)) et (5.8(b)), on ne peut pas considérer ces résultats comme corrects.

Comme on le voit, la méthode d'apprentissage par moindres carrés est donc insuffisante pour résoudre le problème posé.

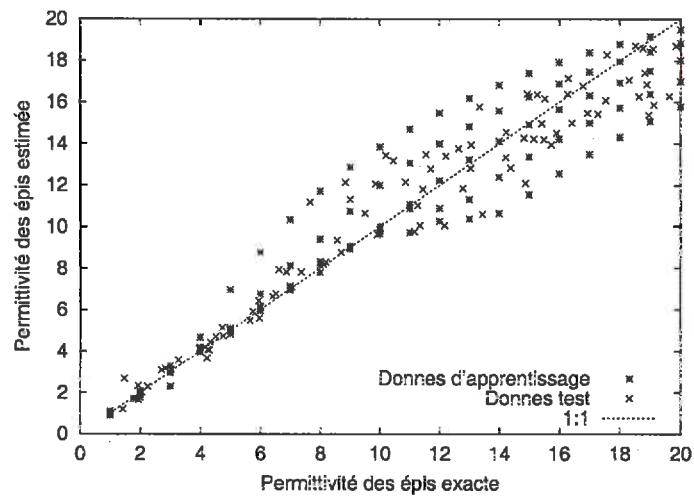
Forward selection et moindres carrés

L'algorithme de *forward selection* est maintenant ajouté à la méthode des moindres carrés afin d'améliorer la précision du réseau.

Grâce à l'analyse de l'erreur E du réseau, cet algorithme sélectionne les fonctions radiales qui permettent de représenter au mieux les données d'apprentissage (voir paragraphe (E.3.2)). L'ensemble des fonctions disponibles correspond aux fonctions centrées sur les données d'apprentissage. Par ailleurs, pour chaque don-

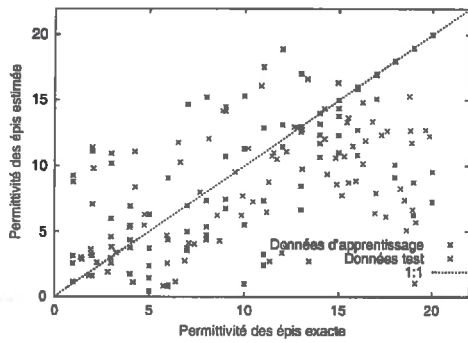


(a) Centres sélectionnés par la méthode d'agrégation.

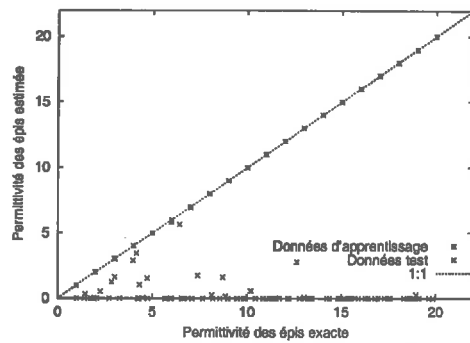


(b) Comparaison entre la permittivité exacte des épis et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones.

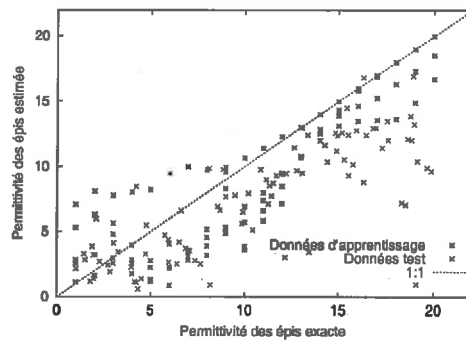
Figure 5.7 – Résultats de l'inversion obtenus par la méthode d'agrégation et de descente de gradient.



(a) Effet d'une largeur de fonction trop importante.



(b) Effet d'une largeur de fonction trop faible.



(c) Cas où la largeur des fonctions radiales est la mieux adaptée.

Figure 5.8 – Comparaison entre la permittivité exacte des épis et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones par la méthode des moindres carrés.

née d'apprentissage, il est possible de proposer plusieurs fonctions de largeurs différentes. Ainsi l'algorithme de *forward selection* permet de déterminer à la fois les meilleurs centres et les meilleures largeurs des fonctions radiales de base.

L'algorithme est ainsi testé sur les données de la simulation du dispositif multipôle comportant toutes les électrodes à la même altitude. Sur la figure (5.9(a)) sont présentés les emplacements de tous les centres ainsi que ceux qui ont été finalement retenus par l'algorithme. Ainsi, sur 100 centres possibles, seuls 37 sont retenus. La figure (5.9(b)) représente quant à elle les résultats de l'inversion. On peut voir notamment que la qualité du réseau est très bonne, tant en apprentissage qu'en généralisation. On a seulement une petite imprécision pour les très faibles valeurs de la permittivité, sans doute due au fait que les centres sont éloignés les uns des autres; ceci est visible sur la figure (5.9(a)) pour les grandes différences de potentiel (rappel : les faibles permittivités correspondent aux grandes différences de potentiel).

Le tableau (5.2) permet de comparer les performances de la meilleure régression non linéaire à celles du réseau de neurones : on note ainsi que la méthode de *forward selection* est nettement plus efficace que la régression.

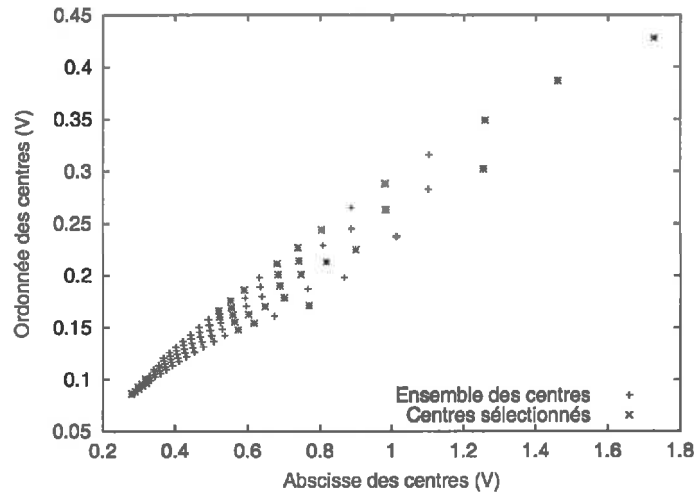
Méthode d'inversion	Variance
Régression non linéaire $\varepsilon = kV_1^a V_2^b$	0,062
<i>Forward selection</i>	
Données d'apprentissage	0,000286
Données de généralisation	0,00538

Tableau 5.2 – Performance comparée entre la meilleure régression et la méthode de *forward selection* pour le dispositif multipôle ayant toutes les électrodes dans la strate des épis.

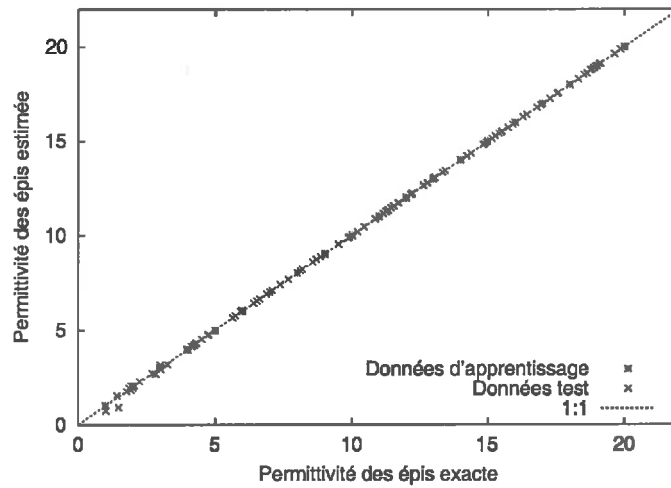
La précision du réseau étant très satisfaisante, l'algorithme choisi pour les inversions est donc celui de *forward selection* avec estimation des poids par moindres carrés⁽³⁾.

Estimation de la permittivité des épis. La performance du réseau sur l'estimation de la permittivité des épis peut alors être évaluée pour chaque dispositif multipôle : le tableau (5.3) indique les variances en apprentissage et en généralisation, les figures (5.9(b)), (5.10) et (5.11) permettent de comparer visuellement les permittivités estimées et les permittivités vraies :

⁽³⁾Il est également possible d'utiliser une méthode de régularisation à la place des moindres carrés mais ceci n'a pas été testé lors de cette étude.



(a) Centres sélectionnés par la méthode de *forward selection*.



(b) Comparaison entre la permittivité exacte des épis et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones.

Figure 5.9 – Résultats de l'inversion par la méthode de *forward selection* dans le cas du dispositif multipôle ayant toutes les électrodes dans la strate des épis.

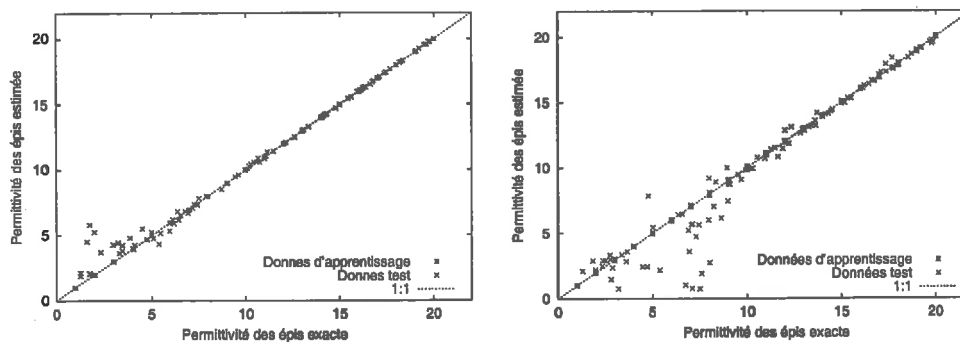
- on remarque tout d’abord que ces performances sont moins bonnes pour les dispositifs multipôles possédant une paire d’électrodes de réception dans la strate des tiges. Ceci rejoint la remarque formulée dans le paragraphe (4.3.3) qui met en avant le fait que les dispositifs multipôles avec des électrodes dans la strate des tiges sont nettement plus sensibles à la permittivité des tiges. Par conséquent, il s’ensuit que l’estimation de la permittivité des épis est rendue plus délicate. On peut supposer également que le sol perturbe légèrement la différence de potentiel lorsque les électrodes sont dans la strate des tiges ;
- ensuite, en ne considérant que les dispositifs multipôles ayant la seconde paire d’électrodes de réception dans l’air ou dans la strate des tiges, on note que les inversions sont meilleures lorsque les secondes électrodes de réception sont proches des électrodes d’injection. Il suffit en effet de comparer les lignes 2 et 3 du tableau, ainsi que les lignes 4 et 5. Cette caractéristique est également visible en comparant les graphiques de la figure (5.10) et ceux de la figure (5.11) ;
- d’une manière générale, on peut voir sur les graphiques que les inversions sont moins précises pour les faibles valeurs de permittivité. Ceci s’explique par le fait que les centres des fonctions de base sont beaucoup plus éloignés les uns des autres pour les faibles permittivités (*i.e.* pour les fortes différences de potentiel, voir figure (5.9(a))), ce qui implique une interpolation plus aléatoire entre ces centres. Cette observation est d’autant plus vraie que la distance séparant les centres est importante. Ainsi, l’inversion des données des dispositifs multipôles très sensibles à la permittivité des tiges — c’est-à-dire ceux ayant des électrodes dans la strate des tiges — est plus touchée par ce phénomène.

Afin d’améliorer l’inversion, il est toujours possible de refaire quelques simulations avec des faibles valeurs de permittivités pour les ajouter ensuite au fichier d’apprentissage et ainsi réduire la distance entre les centres des fonctions de base. Ceci serait très intéressant dans le cas du dispositif multipôle ayant la seconde paire d’électrodes de réception au-dessus de la première paire d’électrodes de réception car on peut voir sur la figure (5.11(b)) que la variance en généralisation est expliquée par un seul point aberrant (en supprimant brutalement ce point, la variance en généralisation n’est plus que de 0,030421 au lieu de 0,27808).

En conclusion, les meilleures inversions sont obtenues pour le dispositif multipôle possédant toutes ses électrodes dans la strate des épis et pour les dispositifs multipôles ayant leur seconde paire d’électrodes de réception dans l’air (avec une préférence pour le dispositif multipôle avec les secondes électrodes au-dessus des électrodes d’injection).

Type de multipôle	Variances
1. Toutes les électrodes dans la strate des épis	0,000286 0,00538
2. Seconde paire sous les électrodes d'injection	0,000009 0,484
3. Seconde paire sous les électrodes de réception	0,004774 2,9990
4. Seconde paire au-dessus des électrodes d'injection	0,000038 0,00113
5. Seconde paire au-dessus des électrodes de réception	0,000148 0,27808

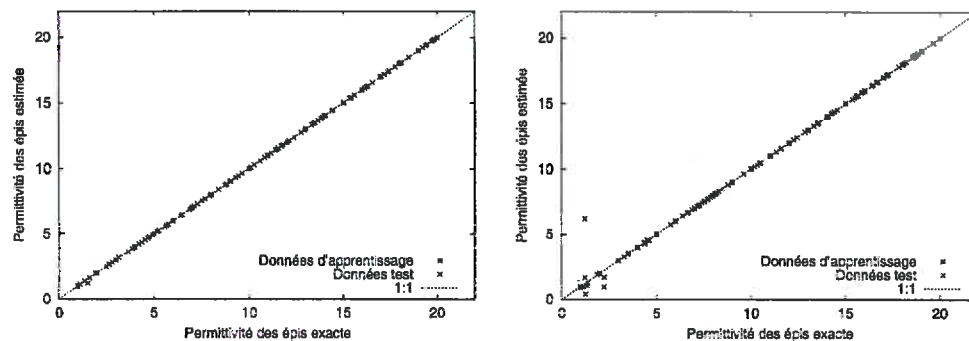
Tableau 5.3 – Performance des estimations de la permittivité des épis pour les différents dispositifs multipôles. Les variances dans chaque cellule sont respectivement la variance sur les données d'apprentissage et la variance sur les données de généralisation.



(a) Dispositif multipôle avec la deuxième paire d'électrodes de réception sous les électrodes d'injection.

(b) Dispositif multipôle avec la deuxième paire d'électrodes de réception sous la première paire d'électrodes de réception.

Figure 5.10 – Comparaison entre la permittivité exacte des épis et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones par la méthode de *forward selection*. Dispositif multipôle ayant une paire d'électrodes de réception dans la strate des tiges.



(a) Dispositif multipôle avec la deuxième paire d'électrodes de réception au-dessus des électrodes d'injection.

(b) Dispositif multipôle avec la deuxième paire d'électrodes de réception au-dessus de la première paire d'électrodes de réception.

Figure 5.11 – Comparaison entre la permittivité exacte des épis et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones par la méthode de *forward selection*. Dispositifs multipôles ayant une paire d'électrodes de réception dans l'air libre.

Estimation de la permittivité des tiges. Le réseau de neurones est également utilisé pour estimer la permittivité des tiges. Le tableau (5.4) indique les performances du réseau (variances en apprentissage et en généralisation) pour chaque type de dispositif multipôle testé. Les figures (5.12), (5.13) et (5.14) permettent de comparer visuellement les permittivités estimées et les permittivités vraies.

On note tout d'abord que les performances sont moins bonnes que pour l'estimation de la permittivité des épis. Ceci s'explique par le fait que les points d'apprentissage sont moins bien répartis dans le domaine des permittivités des tiges (seulement cinq permittivités différentes pour les tiges contre vingt pour les épis).

Ensuite, on peut remarquer que la performance des estimations de la permittivité des tiges suit le même classement que pour l'estimation de la permittivité des épis : l'estimation est meilleure pour les dispositifs multipôles ayant la paire d'électrodes supplémentaire dans l'air ou pour le dispositif multipôle possédant toutes les électrodes à la même altitude. On peut donc supposer que la permittivité du sol perturbe très légèrement la différence de potentiel entre les électrodes situées dans la strate des tiges, et que ceci rend l'estimation de la permittivité des tiges plus difficile.

Remarque. La technique d'inversion par réseau de neurones est une méthode non linéaire, donc sujette à de fortes instabilités. Pour tester la stabilité du réseau, il est possible d'ajouter un bruit gaussien aux différences de potentiel du jeu de

Type de multipôle	Variances
1. Toutes les électrodes dans la strate des épis	0,0152 0,00890
2. Seconde paire sous les électrodes d'injection	0,00000 0,165
3. Seconde paire sous les électrodes de réception	0,00131 0,349
4. Seconde paire au-dessus des électrodes d'injection	0,000006 0,010652
5. Seconde paire au-dessus des électrodes de réception	0,00000 0,103

Tableau 5.4 – Performance des estimations de la permittivité des tiges pour les différents dispositifs multipôles. Les variances dans chaque cellule sont respectivement la variance sur les données d'apprentissage et la variance sur les données de généralisation.

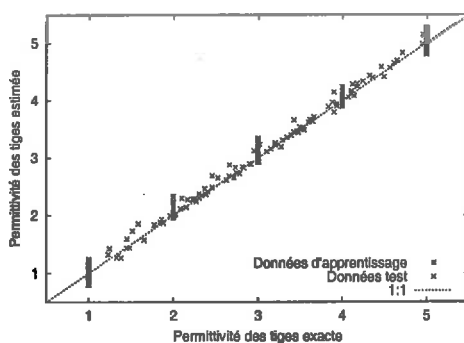
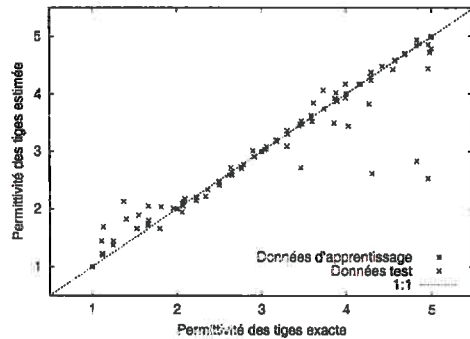
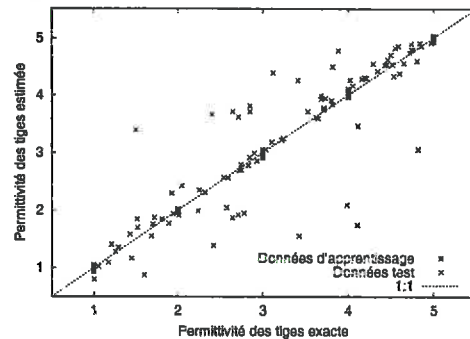


Figure 5.12 – Comparaison entre la permittivité exacte des tiges et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones par la méthode de *forward selection*. Dispositif multipôle avec la deuxième paire d'électrodes de réception sous les électrodes d'injection.

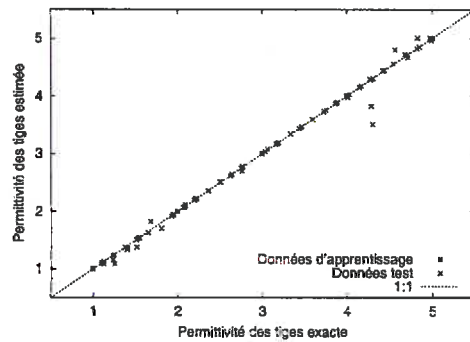


(a) Dispositif multipôle avec la deuxième paire d'électrodes de réception sous les électrodes d'injection.

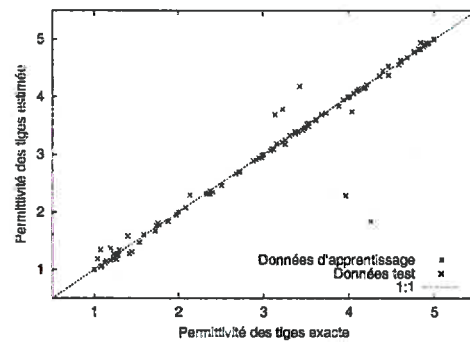


(b) Dispositif multipôle avec la deuxième paire d'électrodes de réception sous la première paire d'électrodes de réception.

Figure 5.13 – Comparaison entre la permittivité exacte des tiges et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones par la méthode de *forward selection*. Dispositif multipôle ayant une paire d'électrodes de réception dans la strate des tiges.



(a) Dispositif multipôle avec la deuxième paire d'électrodes de réception au-dessus des électrodes d'injection.



(b) Dispositif multipôle avec la deuxième paire d'électrodes de réception au-dessus de la première paire d'électrodes de réception.

Figure 5.14 – Comparaison entre la permittivité exacte des tiges et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones par la méthode de *forward selection*. Dispositifs multipôles ayant une paire d'électrodes de réception dans l'air libre.

données de généralisation et de calculer la précision obtenue sur l'estimation des permittivités.

L'écart-type de la distribution gaussienne est ajusté de sorte à obtenir un niveau de bruit de 5%. Les différences de potentiel bruitées sont alors présentées à l'entrée des réseaux de neurones.

La précision de l'estimation de la permittivité des épis est alors différente suivant la configuration du dispositif multipôle, mais suit le même classement que les estimations sans bruit. D'une manière générale, l'erreur moyenne commise sur l'estimation de la permittivité des épis est comprise entre 5% et 10% pour les dispositifs multipôles ayant les électrodes supplémentaires à proximité des électrodes d'injection (soit au-dessus, soit en dessous des électrodes d'injection). Mais l'erreur peut atteindre 20% pour le dispositif multipôle avec les électrodes supplémentaires sous la première paire d'électrodes de réception.

La figure (5.15) montre les résultats obtenus pour le dispositif multipôle ayant la seconde paire d'électrodes de réception au-dessus des électrodes d'injection. On peut voir sur cette figure que le réseau s'est bien adapté aux données bruitées — la très grande majorité des points est comprise entre les droites représentant $\pm 10\%$ d'incertitude — et qu'il n'y a pas de corrélation entre les résidus, contrairement aux résultats obtenus par la méthode de régression non linéaire classique.

Ces incertitudes sur l'estimation de la permittivité sont indicatives et montrent uniquement que la technique d'inversion par la méthode neuronale est stable. Il serait tout à fait possible d'augmenter la précision de l'inversion en prenant un jeu d'apprentissage plus important.

□

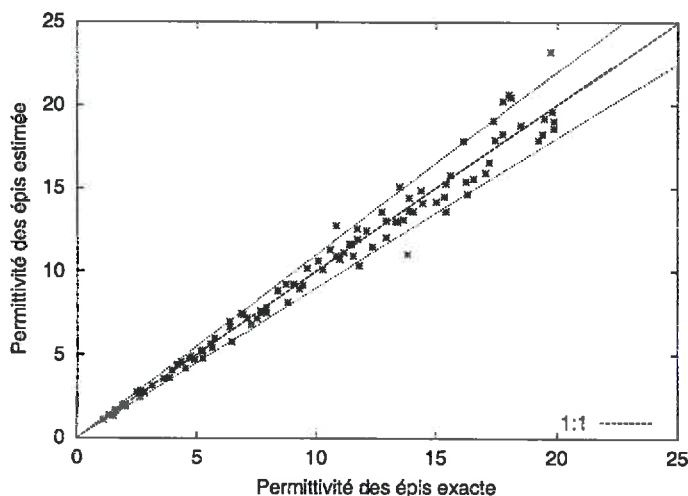


Figure 5.15 – Comparaison entre la permittivité exacte des épis et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones par la méthode de *forward selection*. Estimation réalisée sur des données bruitées et pour le dispositif multipôle ayant une paire d'électrodes de réception au-dessus des électrodes d'injection.

RÉSUMÉ - CONCLUSION (CHAPITRE 5)

Les données issues des simulations ont été inversées afin d'estimer la permittivité des épis et celle des tiges. Nous avons vu que les techniques classiques de régression non linéaire ne donnent pas de bons résultats. L'implémentation d'un réseau de neurones artificiels de type RBF permet quant à elle de retrouver précisément les valeurs des permittivités des épis à partir des valeurs de différence de potentiel. Il est également possible de retrouver la permittivité des tiges mais la précision est moins bonne à cause d'un jeu d'apprentissage moins adapté.

La précision des inversions dépend par ailleurs de la disposition des électrodes du dispositif multipôle. On a noté que l'estimation de la permittivité des épis est meilleure pour les dispositifs multipôles comportant leur seconde paire d'électrodes de réception soit dans la strate des épis, soit au-dessus du couvert végétal. Ce point doit donc être pris en compte dans la configuration géométrique du dispositif multipôle choisie pour l'estimation *in situ* du contenu en eau des plantes.

Quatrième partie

Mesures *in situ* et validation
expérimentale du dispositif
multipôle

Chapitre 6

Expérimentations réalisées

Suite à l'étude théorique, nous avons cherché à valider le prototype de dispositif multipôle en comparant les mesures fournies par l'instrument aux valeurs théoriques et en tentant d'estimer le contenu en eau des plantes à partir des différences de potentiel mesurées.

Ce chapitre présente tout d'abord le prototype de dispositif multipôle, en particulier la configuration des électrodes et le brancard permettant de déplacer l'ensemble de l'instrument sur le terrain.

Ensuite, le protocole de mesure au champ est détaillé, ainsi que le protocole utilisé pour l'estimation gravimétrique du contenu en eau des plantes.

Enfin, nous exposons les mesures réalisées et analysons les différences de potentiel mesurées en fonction de plusieurs variables agronomiques : contenus en eau et contenus en matière sèche des organes des plantes.

6.1 Description de l'instrument

La partie électronique de l'instrument (électrodes d'injection, électrodes de réception, démodulateur et multimètre) est fixée sur un brancard que nous avons spécialement conçu pour les expérimentations au champ. Les deux paragraphes suivants présentent d'une part le brancard et d'autre part la configuration des éléments dédiés à la mesure des différences de potentiel.

6.1.1 Brancard

Le brancard supportant l'instrument a été conçu pour satisfaire deux objectifs :

1. assurer le positionnement précis et stable des électrodes ;
2. être en mesure de pouvoir déplacer facilement le dispositif multipôle dans les couverts végétaux.

Par ailleurs, ce brancard doit également satisfaire deux contraintes :

1. perturber le plus faiblement possible la mesure ;
2. fournir une référence de masse au système électronique.

Tout ceci entraîne donc des choix concernant les matériaux à utiliser ainsi que l'architecture à adopter. Une vue générale du brancard est proposée sur la figure (6.1) et différents points sont détaillés dans les paragraphes ci-dessous.

Matériaux employés

Le matériau employé pour la structure du brancard est le PVC car il présente plusieurs avantages. C'est tout d'abord un matériau présentant une faible permittivité diélectrique ($\simeq 3$ à 4) et également faiblement conducteur ($\simeq 10^{-5} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$)⁽¹⁾. De la sorte, le brancard ne perturbe pas le champ électromagnétique rayonné par les électrodes d'injection. C'est ensuite un matériau robuste, permettant de réaliser une structure rigide indéformable, et léger. Le brancard a ainsi été élaboré à l'aide de tubes à section circulaire de diamètre 5 cm ⁽²⁾. Ces tubes sont nettement plus rigides que des plaques de PVC et permettent donc de gagner du poids.

Le brancard comporte également une plaque métallique qui sert de plan de masse et qui supporte le boîtier électronique de réception (démodulateur) et le multimètre de mesure. La plaque est reliée à la terre grâce à un piquet métallique qui sert également de béquille. Cet ensemble métallique est disposé le plus loin possible des électrodes afin de limiter la perturbation du champ électromagnétique.

Enfin, deux roues basse pression sont utilisées pour assurer un transport aisé. Ces roues permettent également d'amortir les chocs dus aux irrégularités du terrain et empêchent que le brancard ne s'enfonce dans les sols boueux.

L'ensemble mesure un peu plus de deux mètres de long et la largeur est d'environ 90 cm .

Dispositifs de positionnement des électrodes

Les électrodes peuvent être placées à différentes altitudes grâce à un double système de positionnement. Ceci permet de positionner précisément les électrodes dans la strate de végétation à étudier.

Pieds télescopiques. Le premier réglage de la hauteur du brancard s'effectue à l'aide de pieds télescopiques qui autorisent un débattement d'une cinquantaine

⁽¹⁾Les matériaux sont considérés comme conducteurs pour des conductivités supérieures à $1 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ environ.

⁽²⁾Tubes classiquement utilisés pour les canalisations d'évacuation d'eau.

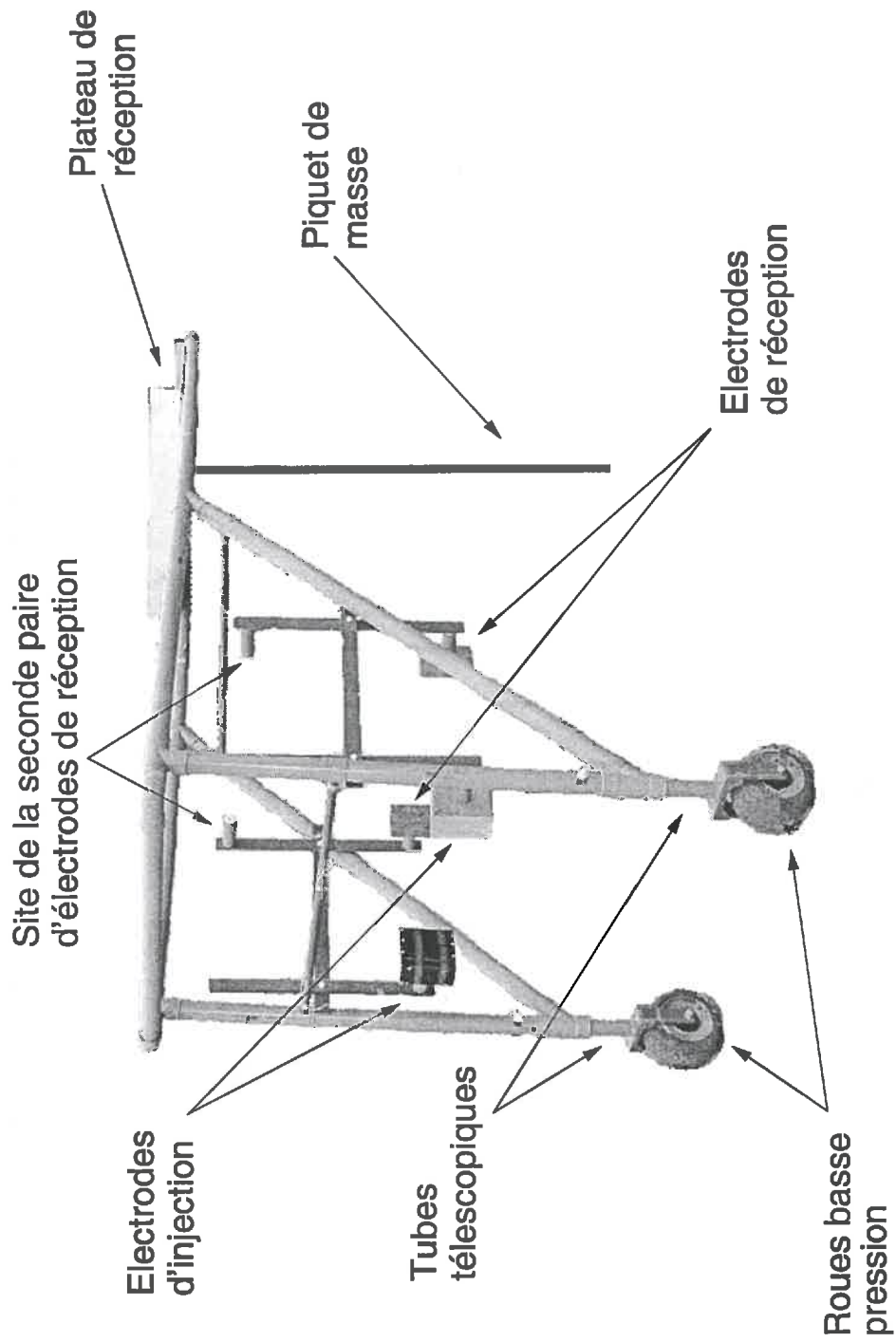


Figure 6.1 – Vue générale du brancard supportant les électrodes.

de centimètres. Ce système permet également d'ajuster la hauteur du brancard pour qu'il puisse passer au-dessus des plantes. L'altitude de la partie supérieure du brancard peut ainsi varier de 1,30 m à 1,80 m environ.

Ajustement de la hauteur des électrodes. On peut voir sur la figure (6.1) que les électrodes sont fixées sur une structure PVC en forme de « H », cette structure étant elle-même fixée à une barre horizontale solidaire du brancard (voir également la figure (6.3)). Cette structure peut ainsi être positionnée à différentes altitudes, grâce à des réglages présents sur les parties verticales du « H ».

Position des électrodes. Les électrodes peuvent être positionnées aux quatre extrémités des branches des « H ». Compte tenu de la configuration du brancard, il est préférable d'avoir les électrodes de réception près du plateau supportant les instruments de mesure. Ainsi, les électrodes d'injection sont disposées à l'avant du brancard (*i.e.* proches des roues) comme on peut le voir sur la figure (6.1). D'après les résultats théoriques, il est également préférable que la seconde paire d'électrodes de réception soit au-dessus du couvert. La configuration retenue est donc celle où la première paire d'électrodes de réception est au même niveau que les électrodes d'injection, la seconde mesure s'effectuant dans l'air, au-dessus de la première paire d'électrodes de réception. Pour éviter la présence de fils parasites, nous n'utilisons qu'une paire d'électrodes de réception que nous plaçons successivement à l'altitude des électrodes d'injection puis au-dessus du couvert.

6.1.2 Système électronique

Comme nous l'avons déjà vu dans le chapitre 3, le système électronique est constitué de deux étages disjoints : le système d'injection, composé des deux électrodes d'injection, et le système de réception, composé des électrodes de réception et d'un démodulateur permettant de mesurer les composantes des différences de potentiel. L'ensemble est représenté sur la figure (6.2).

Électrodes d'injection

Les électrodes d'injection sont des parallélépipèdes rectangles de dimension $13 \times 13 \times 8 \text{ cm}^3$.

La première électrode contient l'ensemble de l'électronique ainsi que l'alimentation par batterie. Cette électrode est en fait constituée de deux électrodes emboîtées : l'électrode interne renferme l'électronique et sert de garde à l'électrode externe.

La seconde électrode est vide. Elle a été réalisée en aluminium galvanisé d'épaisseur 1 mm. La figure (6.3) montre les deux électrodes d'injection positionnées l'une en face de l'autre. La seconde électrode d'injection est portée à un

potentiel opposé à la première électrode grâce à un fil électrique visible sur cette même figure.

Électrodes de réception et système de mesure du signal

Les électrodes de réception sont de simples carrés d'aluminium galvanisé de $13 \times 13 \text{ cm}^2$ et d'épaisseur 1 mm (figure (6.3)).

Le potentiel de chaque électrode est amené au démodulateur à l'aide d'un fil électrique de faible diamètre pour limiter les capacités parasites⁽³⁾. Ces deux fils sont fixés le long des tubes du brancard de manière à garder la même configuration électrique. Des mesures réalisées avec différentes positions de fils montrent que le signal mesuré peut varier d'environ 5 mV. Il est donc important que les fils soient correctement placés le long des tubes.

La référence de phase, permettant de réaliser la démodulation synchrone, est acheminée depuis la première électrode d'injection à l'aide d'une fibre optique. Le démodulateur décompose le signal suivant ses deux composantes (phase et quadrature) et un multimètre branché à la sortie du démodulateur permet alors de mesurer la différence de potentiel entre les électrodes de réception.

6.2 Protocole expérimental

6.2.1 Parcelle expérimentale

L'expérimentation a été conduite sur un couvert de blé de variété Isengrain. La densité moyenne d'épis au mètre carré observée sur les placettes est de 680, l'inter-rang est de 17,5 cm.

Les mesures se sont déroulées du 6 juillet (jour 188) au 2 août 2000 (jour 215). La figure (6.4) montre la teneur en eau des épis et des tiges mesurée pour chaque jour d'expérimentation. On voit nettement que la teneur en eau des épis décroît au cours du temps, tout d'abord lentement jusqu'au jour 205. Cette décroissance est plus marquée après le jour 205, ce qui est significatif de la fin du palier hydrique du blé. La teneur en eau des tiges décroît également avec le temps, mais moins rapidement et de façon linéaire. On peut remarquer par ailleurs que les points sont assez dispersés autour des courbes de régression et que notamment la teneur en eau pour le jour 201 est plus faible que celle des jours 202 et 203. Ceci s'explique par le fait que les prélèvements ont été effectués en des endroits distincts de la parcelle expérimentale où le blé pouvait être plus ou moins avancé en terme de maturation.

Les plantes de blé ont donc pu être suivies pendant un mois, de la fin du palier hydrique jusqu'à la récolte.

⁽³⁾Ces fils sont trop fins pour être visibles sur la figure (6.3).

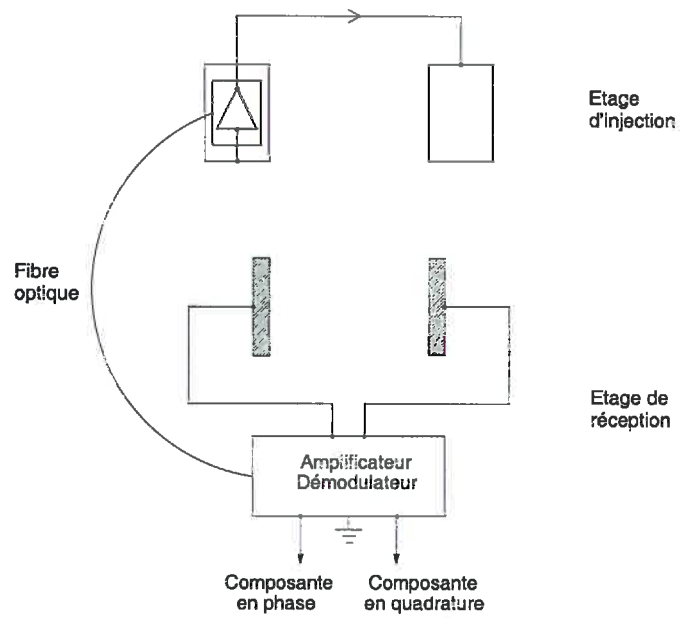


Figure 6.2 – Représentation des systèmes d'injection et de réception.

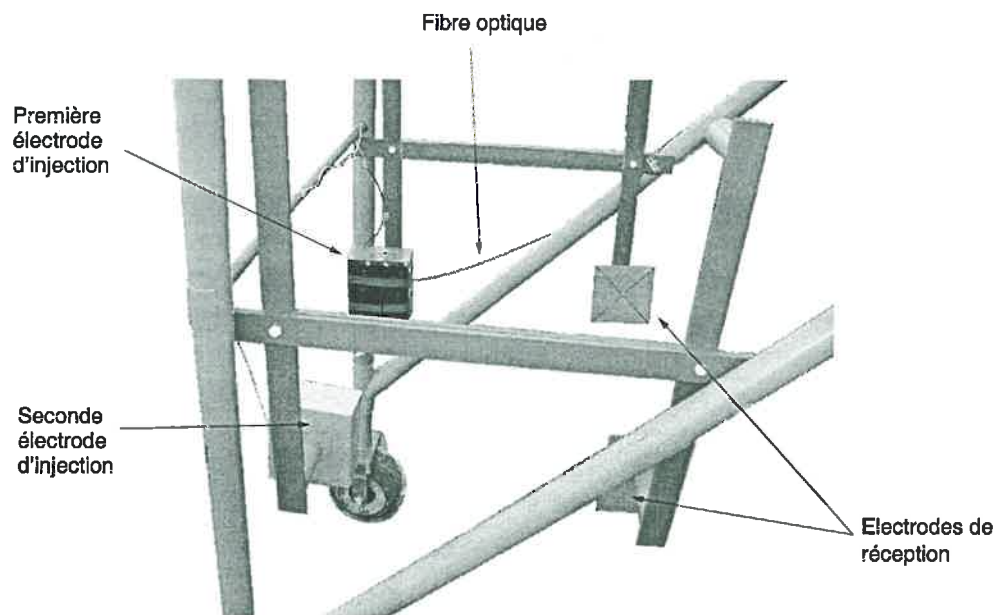


Figure 6.3 – Vue rapprochée des électrodes d'injection et de réception.

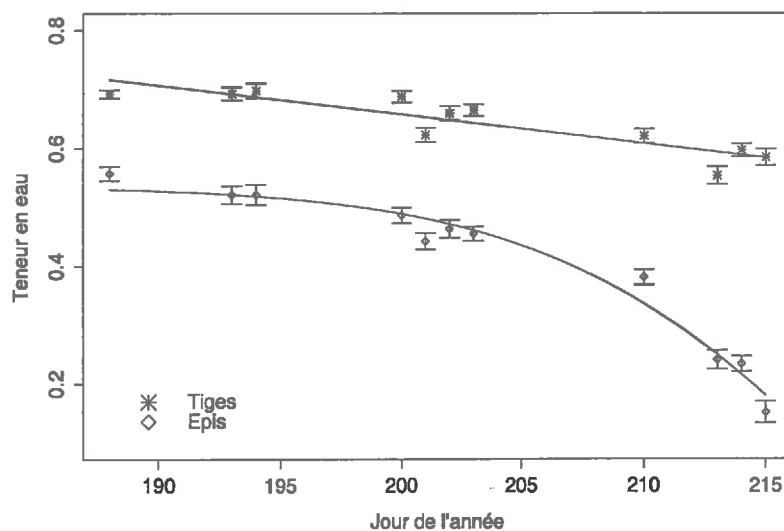


Figure 6.4 – Évolution de la teneur en eau des épis et des tiges du blé au cours du temps.

6.2.2 Protocole de mesure avec le dispositif multipôle

Le protocole de mesure élaboré pour suivre la végétation est le suivant :

1. le dispositif multipôle est mis en fonctionnement, on patiente une dizaine de minutes avant la première mesure, de sorte que les composants électroniques atteignent une température stable ;
2. une première mesure est réalisée hors de la culture, au-dessus du sol, afin de contrôler le bon fonctionnement de l'instrument ;
3. une placette cultivée ($50 \times 50 \text{ cm}^2$) est ensuite choisie et délimitée afin de réaliser les mesures dans le couvert de blé ;
4. le dispositif multipôle est disposé sur cette placette. Une différence de potentiel est mesurée entre les électrodes de réception situées au niveau des épis ;
5. les électrodes de réception sont ensuite placées au-dessus du couvert et une autre différence de potentiel est mesurée ;
6. le dispositif multipôle est alors retiré du couvert de blé, et on éclaircit la placette en prélevant quelques plantes ;
7. les points 4 et 5 sont alors répétés ;
8. on éclaircit à nouveau la placette et on effectue les mesures de différence de potentiel (points 4 et 5) ;

9. les plantes restantes sont prélevées et une mesure au-dessus de la placette vide est alors réalisée.

Ce même protocole (point 1 exclus) est ensuite répété pour une autre placette.

6.2.3 Estimation destructive du contenu en eau des plantes de blé

L'estimation destructive du contenu en eau est considérée comme la méthode de référence. Elle permet de comparer précisément le contenu en eau de la végétation avec les mesures effectuées avec le dispositif multipôle. La méthode d'estimation est la suivante :

1. au laboratoire, les épis sont séparés des tiges ; on mesure alors le poids frais de l'ensemble des épis et de l'ensemble des tiges ;
2. les organes végétaux sont ensuite placés dans une étuve où il sèchent à une température de 80 °C pendant 48 heures ;
3. les épis et les tiges sont pesés de nouveau ; la différence de masse avec le poids frais nous donne la masse d'eau contenue dans ces deux organes ; cette valeur est ensuite divisée par la surface de prélèvement ($50 \times 50 \text{ cm}^2$) afin d'obtenir le contenu en eau au mètre carré ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$).

La précision de cette méthode dépend de nombreux facteurs. Tout d'abord, le poids frais en eau doit être déterminé rapidement après le prélèvement des plantes sous peine d'avoir une perte d'eau par les plantes. Ensuite, le séchage doit être le plus efficace possible afin d'évacuer totalement l'eau des plantes — remarquons qu'il reste toujours un peu d'eau dans les tissus végétaux et que, de ce fait, la mesure de la masse d'eau donne toujours une valeur sous-estimée. Enfin, il ne faut pas négliger le biais introduit par la méthode d'échantillonnage (notamment la superficie prélevée) ainsi que la précision des pesées.

Un calcul d'erreur permet d'estimer l'incertitude sur le contenu en eau. Le contenu en eau par mètre carré C_e s'écrit

$$C_e = \frac{m_e}{S}, \quad (6.1)$$

où m_e est la masse d'eau des plantes et S la surface de prélèvement. En prenant le logarithme de l'équation ci-dessus on obtient

$$\ln C_e = \ln m_e - \ln S. \quad (6.2)$$

En différenciant et en transformant les infinitésimaux en accroissements, on aboutit à

$$\frac{\Delta C_e}{C_e} = \frac{\Delta m_e}{m_e} + \frac{\Delta S}{S}. \quad (6.3)$$

L'erreur sur l'estimation du contenu en eau par unité de surface se compose donc de deux termes. Le premier, $\frac{\Delta m_e}{m_e}$, correspond à l'incertitude sur la mesure de la masse d'eau par la méthode de séchage. On peut l'estimer à $\pm 5\%$ au moins. Le second terme, $\frac{\Delta S}{S}$, rend compte de l'imprécision due à l'échantillonnage. On vérifie aisément que cette imprécision diminue lorsque la surface S de prélèvement augmente. L'incertitude ΔS se calcule à partir de l'erreur de mesure commise sur chaque longueur L du carré de prélèvement. On a

$$S = L^2. \quad (6.4)$$

D'où

$$\ln S = 2 \ln L, \quad (6.5)$$

$$\frac{\Delta S}{S} = 2 \frac{\Delta L}{L}. \quad (6.6)$$

En supposant une incertitude de $\pm 2,5$ cm sur chaque côté de la surface d'échantillonnage, on obtient

$$\frac{\Delta S}{S} = 0,1, \quad (6.7)$$

Et donc

$$\frac{\Delta C_e}{C_e} = \pm 15\%. \quad (6.8)$$

L'estimation du contenu en eau par la méthode gravimétrique n'est donc finalement pas très précise mais constitue la seule méthode de contrôle qui soit opérationnelle et facile à mettre en œuvre.

6.3 Variables explicatives de la différence de potentiel

Nous cherchons dans cette section à mettre en évidence les variables dont dépendent les différences de potentiel mesurées.

6.3.1 Mesures hors végétation

Les mesures effectuées en dehors de la parcelle agricole permettent de contrôler le signal mesuré par le dispositif multipôle.

Valeurs mesurées

La valeur moyenne de la composante en quadrature, mesurée sur la première paire d'électrodes de réception⁽⁴⁾, est de 236 mV et son écart-type est légèrement inférieur à 15 mV. Entre les électrodes de la seconde paire d'électrodes de réception, la différence de potentiel moyenne vaut 164 mV avec un écart-type de 12 mV. Ces valeurs sont nettement inférieures à celles prévues par la théorie (de l'ordre du volt). Ceci est dû à au fait que les capacités d'entrée du système de réception sont trop élevées. On peut également supposer que le courant réellement injecté est plus faible que celui désiré (200 μ A). Néanmoins, ceci ne doit pas être un inconvénient pour le suivi de la végétation. Ainsi, on ne cherchera pas à estimer la permittivité de la végétation à partir des valeurs de différence de potentiel mesurées — ceci conduirait à des valeurs de permittivité aberrantes — mais nous établirons de préférence des relations directes entre différences de potentiel et contenus en eau.

En ce qui concerne les valeurs de la composante en phase, les mesures montrent que la valeur moyenne sur la première paire d'électrodes de réception est égale à 87 mV, avec un écart-type de 12 mV. La valeur moyenne de la différence de potentiel mesurée sur la seconde paire d'électrodes de réception est 56 mV avec un écart-type de 4,5 mV. Contrairement à la théorie, la composante en phase n'est donc pas du tout négligeable par rapport à la composante en quadrature. Ces fortes valeurs excluent un effet du sol sur la composante en phase⁽⁵⁾. Il doit s'agir plutôt d'un défaut dans la démodulation synchrone du signal mesuré : les tops de démodulation ne seraient pas en phase avec le signal injecté, ce qui induirait l'apparition de fortes valeurs sur la composante en phase et réduirait les valeurs de la composante en quadrature.

Influence de l'environnement

Les mesures réalisées hors des placettes montrent une légère dispersion des différences de potentiel autour des valeurs moyennes. On peut supposer que ces dispersions sont liées aux conditions de mesure et notamment aux conditions environnementales comme par exemple la température de l'air ou l'hygrométrie.

⁽⁴⁾Rappel : la première paire d'électrodes de réception est située à la même hauteur que les électrodes d'injection, dans la strate des épis ; la seconde paire d'électrodes de réception est située dans l'air, au-dessus de la première paire d'électrodes de réception.

⁽⁵⁾En théorie, les différences de potentiel entre les électrodes de réception sont très faibles (inférieures au millivolt) pour la composante en phase et pour les configurations géométriques considérées.

Mais, d'une part, il n'apparaît aucune corrélation entre la température du jour et les valeurs mesurées, et, d'autre part, toutes les mesures ont été réalisées par temps sec et en absence de rosée. On ne peut cependant totalement rejeter l'hypothèse de l'effet de la température sur les mesures car les températures prises en compte dans le calcul de corrélation sont des températures relevées par une station météorologique et peuvent donc être très différentes des températures locales autour de l'instrument.

6.3.2 Influence de la végétation

Aperçu graphique

L'ensemble des mesures effectuées avec le quadripôle peut être directement relié aux contenus en eau estimés par la méthode gravimétrique. La figure (6.5) montre les composantes en quadrature des différences de potentiel mesurées entre les deux paires d'électrodes de réception, tandis que la figure (6.6) présente les composantes en phase des différences de potentiel⁽⁶⁾.

Plus précisément, la figure (6.5(a)) présente la différence de potentiel V_1 entre les électrodes de la première paire d'électrodes de réception en fonction du contenu en eau des épis estimé par la méthode gravimétrique. La figure (6.5(b)) montre la différence de potentiel V_2 entre les électrodes de la seconde paire d'électrodes de réception en fonction du contenu en eau des épis. Les figures (6.5(c)) et (6.5(d)) montrent de même les valeurs V_1 et V_2 en fonction du contenu en eau des tiges estimé par la méthode gravimétrique. On note que l'on retrouve le type de courbes que l'on observe sur les figures des résultats théoriques : la décroissance de la différence de potentiel avec le contenu en eau des épis et des tiges est bien visible. Cependant, comme nous l'avons déjà remarqué, les valeurs mesurées sont plus faibles qu'en théorie.

En ce qui concerne les composantes en phase (figure (6.6)), on note que les valeurs mesurées sont beaucoup plus fortes que les valeurs prédites par la théorie. On peut remarquer par ailleurs que les valeurs mesurées dépendent du contenu en eau des épis et des tiges comme observé pour les composantes en quadrature. Comme précédemment, on peut donc légitimement supposer un défaut de synchronisation dans la démodulation des signaux car théoriquement la composante en phase ne devrait pas dépendre du contenu en eau de la végétation.

Il est donc possible, et utile, de considérer à la fois les composantes en phase et en quadrature en formant le module du vecteur « différence de potentiel ».

⁽⁶⁾Les incertitudes représentées sur les figures sont de ± 5 mV sur les différences de potentiel et $\pm 15\%$ sur les contenus en eau.

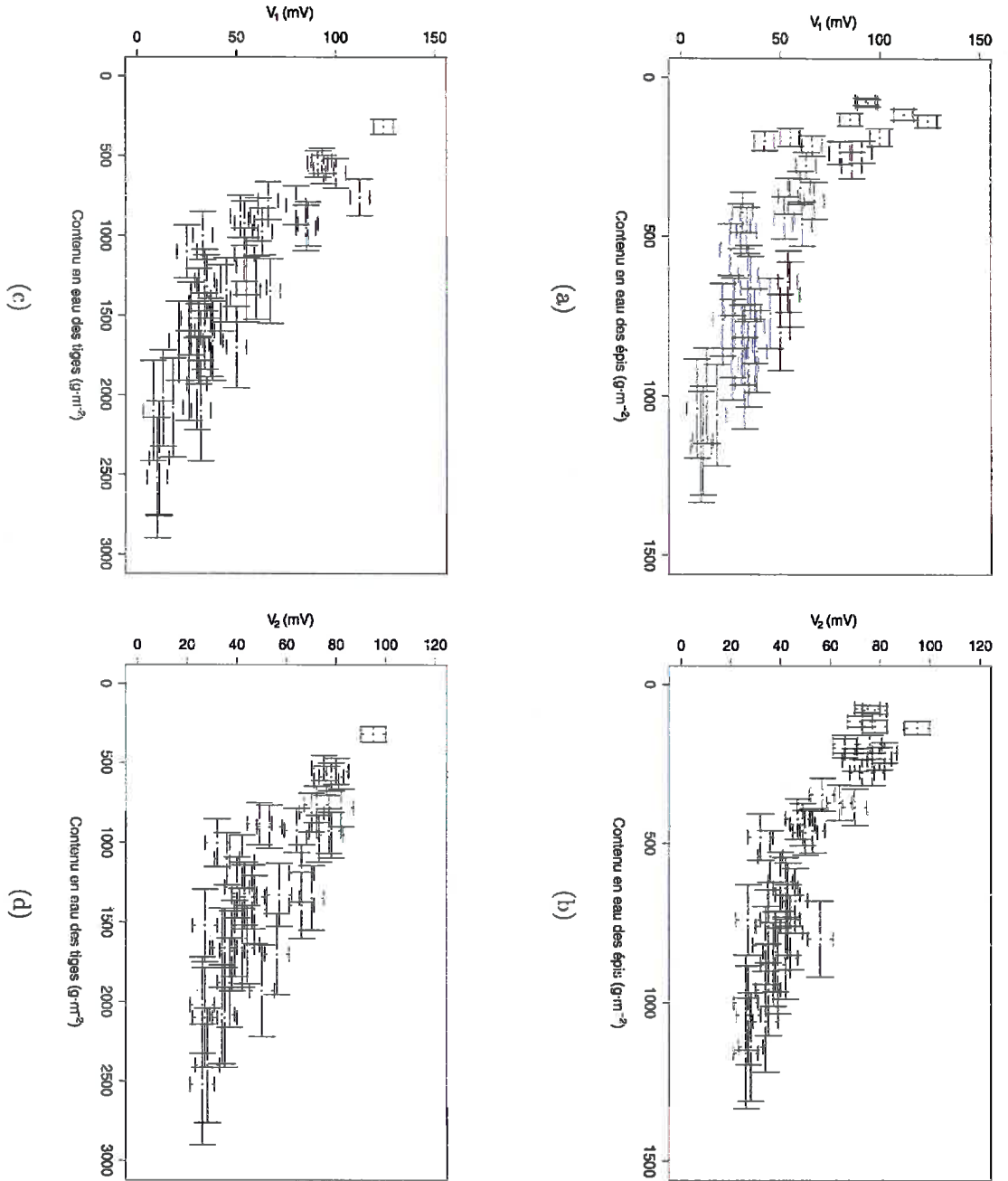


Figure 6.5 – Mesures des composantes en quadrature effectuées au multipôle en fonction des contenus en eau des épis et des tiges.

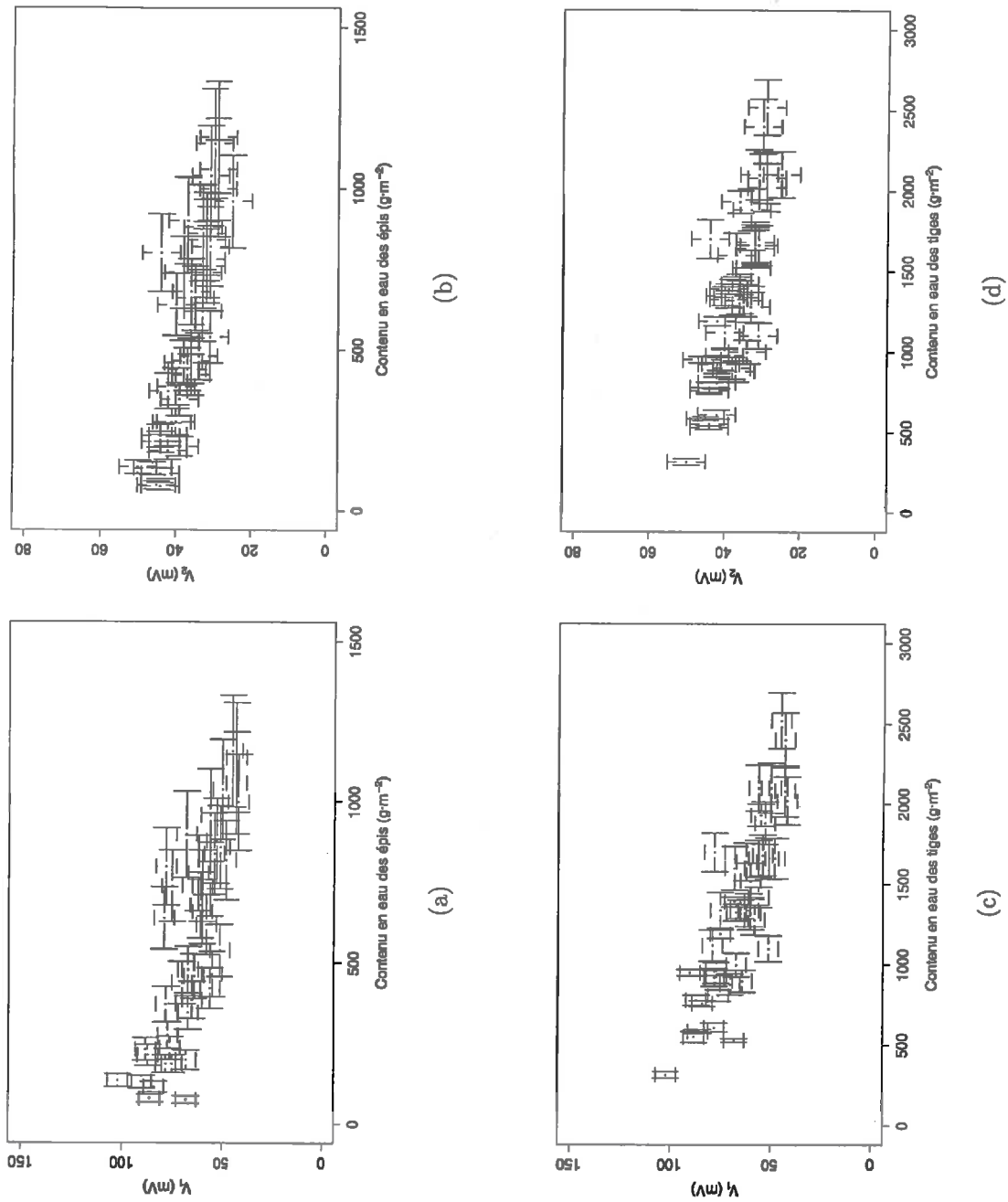


Figure 6.6 – Mesures des composantes en phase effectuées au multipôle en fonction des contenus en eau des épis et des tiges.

Analyse des mesures

Une analyse de variance permet de déceler plus précisément les variables dont dépendent les différences de potentiel mesurées.

Le tableau (6.1) met en évidence le fait que le module de la différence de potentiel entre les électrodes de la première paire d'électrodes de réception (V_1) dépend à la fois du contenu en eau des épis ($\text{Pr}=0,00<0,01$) et de celui des tiges ($\text{Pr}=0,00<0,01$). Par contre, la matière sèche n'influence pas cette différence de potentiel ($\text{Pr}=0,416>0,05$ et $\text{Pr}=0,744>0,05$).

Ce tableau montre également l'influence des épis et des tiges sur la différence de potentiel entre les électrodes de la seconde paire d'électrodes de réception (V_2). On peut noter que cette différence de potentiel dépend principalement du contenu en eau des épis de blé ($\text{Pr}=0,00<0,01$). La matière sèche présente dans les épis, ainsi que la matière sèche et l'eau des tiges⁽⁷⁾, n'ont pas d'effet sur la mesure (probabilités supérieures à 0,05).

	V_1		V_2	
	F_o	$\text{Pr}(F > F_o)$	F_o	$\text{Pr}(F > F_o)$
Contenu en eau des épis	77,4	0,00**	152	0,00**
Contenu en matière sèche des épis	0,670	0,416 ^{NS}	3,60	0,0658 ^{NS}
Contenu en eau des tiges	32,6	0,00**	0,157	0,694 ^{NS}
Contenu en matière sèche des tiges	0,108	0,744 ^{NS}	0,0389	0,845 ^{NS}

Tableau 6.1 – Effet du contenu en eau des épis et des tiges, du contenu en matière sèche des épis et des tiges, sur les différences de potentiel V_1 et V_2 (F_o : coefficient de Fisher ; $\text{Pr}(F > F_o)$: probabilité d'avoir $F > F_o$; ** : significatif au niveau $\alpha=0,01$; ^{NS} : non significatif).

Remarque. Il faut bien faire ici la différence entre contenu en eau et teneur en eau. L'instrument de mesure n'est pas sensible à la teneur en eau des organes des plantes : ceci s'observe facilement dans le tableau (6.2) contenant les données issues d'une série de mesures. Chaque ligne contient la différence de potentiel mesurée, le contenu en eau des épis estimée après séchage et enfin la teneur en eau. La première ligne présente les résultats obtenus dans une placette de blé de densité normale. La seconde ligne présente les résultats obtenus dans la

⁽⁷⁾Les tiges n'ont pas d'influence sur la différence de potentiel mesurée sur la seconde paire d'électrodes de réception car ces électrodes, situées au-dessus du couvert végétal, se trouvent loin de la strate des tiges.

même placette mais après prélèvement de quelques plantes. La dernière ligne présente les résultats obtenus toujours dans la même placette mais après un second prélèvement.

	V_1 (mV)	Contenu en eau ($g \cdot m^{-2}$)	Teneur en eau
Placette 1	34	900	0,429
Placette 1 bis	45	740	0,430
Placette 1 ter	54	640	0,438

Tableau 6.2 – Exemple de mesures montrant l'indépendance de la différence de potentiel vis-à-vis de la teneur en eau des épis de blé.

On voit que la teneur en eau des épis est constante⁽⁸⁾ alors que la différence de potentiel et le contenu en eau ne le sont absolument pas.

L'instrument n'est donc pas sensible à la teneur en eau mais à la masse d'eau présente dans les plantes. Le dispositif multipôle mesure donc bien des grandeurs *extensives*.

□

— RÉSUMÉ - CONCLUSION (CHAPITRE 6) —

Un brancard, permettant de maintenir et de positionner les électrodes du dispositif multipôle, a été construit afin de réaliser des mesures *in situ*.

Les expérimentations réalisées montrent que les différences de potentiel mesurées dépendent uniquement du contenu en eau de la végétation ; la matière sèche a une influence négligeable.

Il apparaît par ailleurs que la composante en phase des différences de potentiel est d'une grandeur comparable à la composante en quadrature. Pour plus de précision dans les mesures, il est donc indispensable de considérer le module des différences de potentiel, calculé à partir des composantes en phase et en quadrature.

⁽⁸⁾La durée entre les différentes mesures est trop courte pour que les variations du flux d'eau dans les plantes soient sensibles et modifient la teneur en eau.

Chapitre 7

Suivi du contenu en eau des plantes

Ce chapitre présente deux applications agronomiques menées afin de valider la méthode de mesure utilisée par le dispositif multipôle : la détection des stades de développement des plantes, en particulier la fin du palier hydrique du blé, et l'estimation du contenu en eau des plantes. Nous montrons également dans un troisième temps que le dispositif multipôle permet d'estimer assez précisément le contenu en eau des organes des plantes, plus particulièrement le contenu en eau des épis et des tiges des plantes de blé.

7.1 Détection de la fin du palier hydrique

La fin du palier hydrique est significative de la maturité physiologique du blé. Pendant le remplissage des grains, le contenu en eau reste constant et forme donc un palier. À la fin de ce remplissage, le contenu en eau décroît très rapidement et le blé peut être récolté.

Comme les différences de potentiel mesurées avec le dispositif multipôle sont inversement corrélées au contenu en eau des plantes, il doit être possible de suivre le palier hydrique puis le dessèchement des épis de blé.

La figure (7.1) montre l'évolution temporelle du contenu en eau des épis de blé entre les jours 188 et 215 (du 6 juillet au 2 août 2000). On note que le contenu en eau des épis reste constant entre les jours 188 et 203, correspondant au palier hydrique⁽¹⁾. Après le jour 203, on remarque une décroissance rapide du contenu en eau. La maturité physiologique du blé est donc atteinte au jour 203.

Sur cette même figure sont reportées les mesures V_1 de différence de potentiel effectuées avec le dispositif multipôle. Comme pour le contenu en eau des épis, on

⁽¹⁾Le contenu en eau n'est pas strictement constant car les mesures de contenu en eau, nécessitant le prélèvement des plantes, ont été réalisées sur des placettes différentes et donc des endroits où les plantes pouvaient ne pas être exactement au même avancement de maturation.

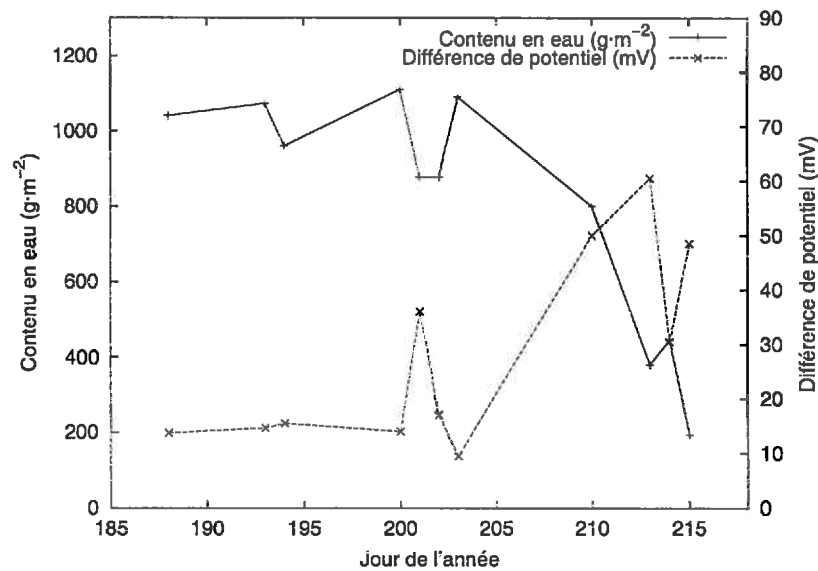


Figure 7.1 – Évolution au cours du temps du contenu en eau des épis de blé et de la différence de potentiel mesurée avec le dispositif multipôle. Mise en évidence de la fin du palier hydrique.

note que les différences de potentiel sont constantes⁽²⁾ jusqu'au jour 203. Ensuite, les différences de potentiel augmentent jusqu'au jour 215.

La figure (7.1) montre donc clairement que le dispositif multipôle permet de détecter la fin du palier hydrique. La corrélation inverse entre contenu en eau et différence de potentiel est également bien visible. Le dispositif multipôle est donc adapté au suivi des stades de développement des plantes caractérisés par une variation du contenu en eau.

7.2 Estimation du contenu en eau des plantes de blé

L'estimation E_{Plantes}^* du contenu en eau des plantes de blé s'effectue à partir des différences de potentiel V_1 et V_2 mesurées entre les électrodes de réception.

Après plusieurs tests de fonctions de régression⁽³⁾, notre choix s'est arrêté sur une fonction de la forme

$$E_{\text{Plantes}}^* = \alpha \exp\left(-\frac{V}{\beta}\right). \quad (7.1)$$

⁽²⁾ Aux observations près concernant l'hétérogénéité de maturité.

⁽³⁾ Il n'est pas envisageable ici d'utiliser un réseau de neurones car le nombre de mesures disponibles, 41, est trop faible pour constituer les ensembles d'apprentissage et de généralisation.

Dans cette formulation, V représente la composante en phase, la composante en quadrature, ou le module, de la première ou de la seconde différence de potentiel.

Les deux différences de potentiel peuvent être utilisées simultanément pour estimer le contenu en eau des plantes. Le modèle choisi est alors

$$E_{\text{Plantes}}^* = \alpha \exp\left(-\frac{V_1}{\beta}\right) + \gamma \exp\left(-\frac{V_2}{\delta}\right). \quad (7.2)$$

Le tableau (7.1) montre les corrélations obtenues entre les contenus en eau estimés par la méthode gravimétrique et ceux estimés à partir des modèles ci-dessus. Plusieurs remarques peuvent être formulées :

- on peut voir tout d'abord que les modèles choisis pour estimer le contenu en eau des plantes sont bons car les coefficients des droites de régression (a et b) sont proches des coefficients de la première bissectrice (1 et 0). Il est possible de vérifier que ces coefficients peuvent être assimilés à 1 et 0 respectivement : pour un niveau de confiance de 95% (*i.e.* un risque $\alpha=5\%$) et un modèle à 2 degrés de liberté, on doit avoir

$$\begin{aligned} 1 &\in [a \pm t_{2;1-\frac{\alpha}{2}} \sigma_a], \\ 0 &\in [b \pm t_{2;1-\frac{\alpha}{2}} \sigma_b], \end{aligned}$$

avec $t_{2;1-\frac{\alpha}{2}}$ la valeur du coefficient de Student ($t_{2;1-\frac{\alpha}{2}} = 4,303$). σ_a et σ_b sont les valeurs des écarts-types du coefficient directeur et de l'ordonnée à l'origine. On voit donc immédiatement que les coefficients directeurs a peuvent être assimilés à 1 et que les ordonnées à l'origine b peuvent être considérées comme égales à 0 ;

- il est ensuite possible de comparer la performance des modèles en fonction des différences de potentiel choisies. On peut ainsi noter que V_2 donne les moins bons résultats (le meilleur coefficient de détermination r^2 vaut 0,8023), certainement parce que les électrodes de la seconde paire d'électrodes de réception sont situées au-dessus du couvert végétal. Les différences de potentiel V_1 mesurées sur la première paire d'électrodes de réception donne de meilleurs résultats ($0,7672 < r^2 < 0,8468$), mais les meilleures estimations sont obtenues en utilisant les deux différences de potentiel. Dans ce cas, le coefficient de détermination atteint 0,8592 ;
- enfin, on peut également remarquer que les meilleures performances sont réalisées grâce au module des différences de potentiel mesurées. La composante en quadrature donne des résultats légèrement moins bons, mais supérieurs à ceux de la composante en phase.

Différence de potentiel	Composante	r^2	σ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	a	b ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	σ_a	σ_b ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	n
V_1	Phase	0,7672	411	1,01	-14,1	0,0888	178	41
	Quadrature	0,8344	347	0,992	16,9	0,0708	143	41
	Module	0,8468	333	0,998	5,40	0,0679	137	41
V_2	Phase	0,7781	401	1,04	-82,8	0,0888	178	41
	Quadrature	0,7671	411	1,00	-9,11	0,0886	178	41
	Module	0,8023	379	0,997	7,58	0,0792	159	41
V_1 et V_2	Phase	0,8252	356	1,01	-30,1	0,0747	151	41
	Quadrature	0,8424	338	1,00	-8,06	0,0695	140	41
	Module	0,8592	320	1,00	-0,150	0,0648	131	41

Tableau 7.1 – Corrélations entre les contenus en eau estimés par la méthode gravimétrique et ceux estimés à partir des mesures de différence de potentiel (r^2 : coefficient de détermination ; σ : écart-type sur l'estimation du contenu en eau ; a : coefficient directeur de la droite de régression ; b : ordonnée à l'origine ; σ_a et σ_b : écarts-types sur a et b ; n : nombre d'observations).

La figure (7.2) permet de comparer les contenus en eau estimés à l'aide de la méthode gravimétrique et ceux estimés à partir des modules des deux différences de potentiel V_1 et V_2 . On peut noter que la répartition des points autour de la première bissectrice est globalement satisfaisante. Seuls deux points, situés sous la droite entre les abscisses 2000 et 3000 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, s'écartent réellement de la première bissectrice. D'après le tableau (7.1), le coefficient de détermination vaut 0,8592 et l'écart-type 320 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$. Des estimations relativement précises du contenu en eau des plantes peuvent donc être réalisées avec le dispositif multipôle, en utilisant de préférence les deux composantes des deux différences de potentiel.

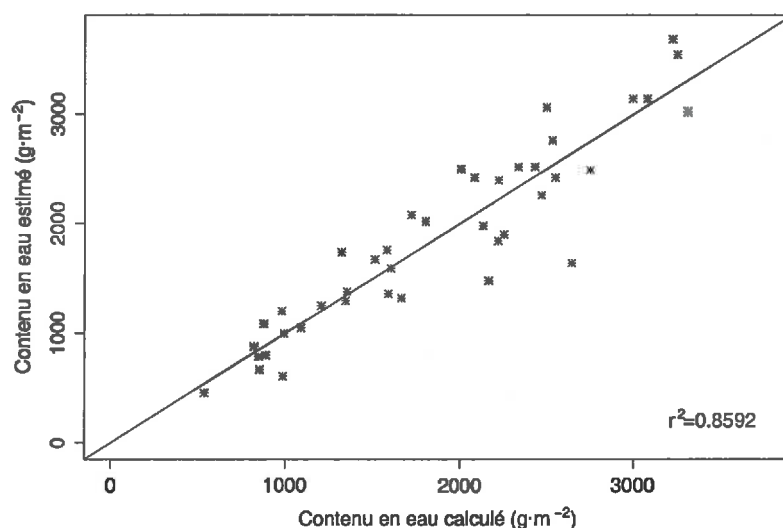


Figure 7.2 – Comparaison entre le contenu en eau des plantes estimé par la méthode gravimétrique et le contenu en eau des plantes calculé à partir des modules des deux différences de potentiel mesurées avec le dispositif multipôle.

7.3 Estimation du contenu en eau des organes des plantes de blé

Nous avons vu dans le chapitre 5 concernant l'inversion des données qu'il est théoriquement possible d'estimer simultanément la permittivité des épis et celle des tiges.

Une analyse de variance (tableau (7.2)) montre que les différences de potentiel mesurées — et non plus simulées — dépendent des contenus en eau des épis et des tiges. Il est donc possible d'estimer le contenu en eau des organes à partir des mesures effectuées avec le dispositif multipôle.

Plus précisément, on peut noter que le contenu en eau des épis peut être déterminé à partir des deux différences de potentiel (probabilités inférieures à 0,01), tandis que le contenu en eau des tiges peut être déterminé en utilisant seulement la première différence de potentiel⁽⁴⁾.

	Contenu en eau des épis		Contenu en eau des tiges	
	F_o	$\Pr(F > F_o)$	F_o	$\Pr(F > F_o)$
V_1	132	0,000**	113	0,000**
V_2	16.5	0,000**	0,177	0,677 ^{NS}

Tableau 7.2 – Analyse de variance mettant en évidence les variables explicatives du contenu en eau des épis et du contenu en eau des tiges (F_o : coefficient de Fisher; $\Pr(F > F_o)$: probabilité d'avoir $F > F_o$; ** : significatif au niveau $\alpha=0,01$; ^{NS} : non significatif).

7.3.1 Estimation du contenu en eau des épis de blé

Le contenu en eau des épis (E_{Epis}^*) est donc estimé à partir des deux différences de potentiel (V_1 et V_2). La fonction choisie pour estimer le contenu en eau des épis s'écrit

$$E_{\text{Epis}}^* = \alpha \exp \left(-\frac{V_1}{\beta} - \frac{V_2}{\gamma} \right) \quad (7.3)$$

Comme précédemment, on peut considérer soit la composante en phase, soit la composante en quadrature, soit le module des différences de potentiel. Le tableau (7.3) montre les performances des estimations suivant les composantes utilisées.

D'après le tableau, on peut voir que le modèle d'estimation du contenu en eau des épis est correct car il ne présente pas de biais ($a \simeq 1$ et $b \simeq 0$).

Les estimations obtenues en ne considérant que la composante en phase sont assez mauvaises ($r^2=0,7858$, $\sigma=153 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). La composante en quadrature donne des résultats satisfaisants ($r^2=0,8405$, $\sigma=132 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), mais on note que les estimations sont meilleures lorsque l'on considère les modules des différences de potentiel. On obtient alors un coefficient de détermination égal à 0,8607 et un écart-type égal à $123 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. La figure (7.3) montre un aperçu graphique permettant de comparer le contenu en eau des épis estimé par la méthode gravimétrique avec le contenu en eau calculé à partir du module des différences de potentiel. Comme pour l'estimation du contenu en eau total des plantes, on peut remarquer que deux points situés autour de l'abscisse $800 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ sont nettement sous la première bissectrice.

⁽⁴⁾La seconde paire d'électrodes de réception est en effet positionnée de sorte à être sensible au contenu en eau des épis.

7.3.2 Estimation du contenu en eau des tiges de blé

En ce qui concerne les tiges, on utilise un modèle qui ne tient compte que de la première différence de potentiel :

$$E_{\text{Epis}}^* = \alpha \exp\left(-\frac{V_1}{\beta}\right) . \quad (7.4)$$

Les comparaisons entre contenus en eau estimés par la méthode gravimétrique et déduits du modèle ci-dessus sont reportées dans le tableau (7.4). Le coefficient de détermination varie de 0,7461 à 0,8166 suivant la composante considérée. On peut remarquer une nouvelle fois que la composante en phase donne les moins bons résultats et le module les meilleurs. L'incertitude la plus faible est de 233 g·m⁻². La figure (7.4) montre un aperçu graphique permettant de comparer le contenu en eau des tiges estimé par la méthode gravimétrique avec le contenu en eau des tiges calculé à partir du module de la différence de potentiel V_1 . La distribution des points autour de la première bissectrice est correcte à part un point située vers l'abscisse 1800 g·m⁻² qui se situe un peu plus loin de la droite que les autres points.

Par ailleurs, si l'on compare les valeurs des coefficients de détermination des tableaux (7.3) et (7.4), il est possible de remarquer que la qualité de l'estimation du contenu en eau des tiges est moins bonne que celle relative à l'estimation du contenu en eau des épis. La configuration choisie, avec en particulier la seconde paire d'électrodes de réception au-dessus du couvert, est donc favorable à l'estimation du contenu en eau des épis.

Le dispositif multipôle est donc un instrument bien adapté à la mesure du contenu en eau des plantes d'une culture. Les mesures réalisées sont assez précises et surtout il est possible d'avoir accès à la distribution verticale de l'eau grâce à une estimation simultanée du contenu en eau des épis et de celui des tiges⁽⁵⁾.

7.4 Effet de l'hétérogénéité de peuplement sur les mesures

Le dispositif multipôle est fondé sur la propagation libre d'ondes électromagnétiques. Par conséquent, le rayonnement électromagnétique généré par les électrodes d'injection interagit à la fois avec le milieu situé entre les électrodes et avec le milieu situé autour de l'instrument.

⁽⁵⁾ On pourrait penser ici que l'estimation des contenus en eau des épis et des tiges est facilitée par la corrélation qui existe entre contenu en eau des épis et contenu en eau des tiges. Cependant, le coefficient de détermination liant ces deux variables n'est que de 0,80 et donc la connaissance du contenu en eau de l'un des organes ne permet pas d'estimer précisément le contenu en eau de l'autre organe.

Composante	r^2	σ (g·m ⁻²)	a	b (g·m ⁻²)	σ_a	σ_b (g·m ⁻²)	n
Phase	0,7858	153	1,03	-18,5	0,0858	53,2	41
Quadrature	0,8405	132	1,02	-13,9	0,0711	44,4	41
Module	0,8607	123	1,01	-8,64	0,0652	40,8	41

Tableau 7.3 – Corrélations entre le contenu en eau des épis estimé par la méthode gravimétrique et celui estimé à partir des mesures de différence de potentiel (r^2 : coefficient de détermination; σ : écart-type sur l'estimation du contenu en eau; a : coefficient directeur de la droite de régression; b : ordonnée à l'origine; σ_a et σ_b : écarts-types sur a et b ; n : nombre d'observations).

Composante	r^2	σ (g·m ⁻²)	a	b (g·m ⁻²)	σ_a	σ_b (g·m ⁻²)	n
Phase	0,7461	274	1,01	-7,38	0,0939	131	41
Quadrature	0,7994	244	0,988	17,4	0,0793	111	41
Module	0,8166	233	0,994	8,71	0,0755	106	41

Tableau 7.4 – Corrélations entre le contenu en eau des tiges estimé par la méthode gravimétrique et celui estimé à partir des mesures de différence de potentiel (r^2 : coefficient de détermination; σ : écart-type sur l'estimation du contenu en eau; a : coefficient directeur de la droite de régression; b : ordonnée à l'origine; σ_a et σ_b : écarts-types sur a et b ; n : nombre d'observations).

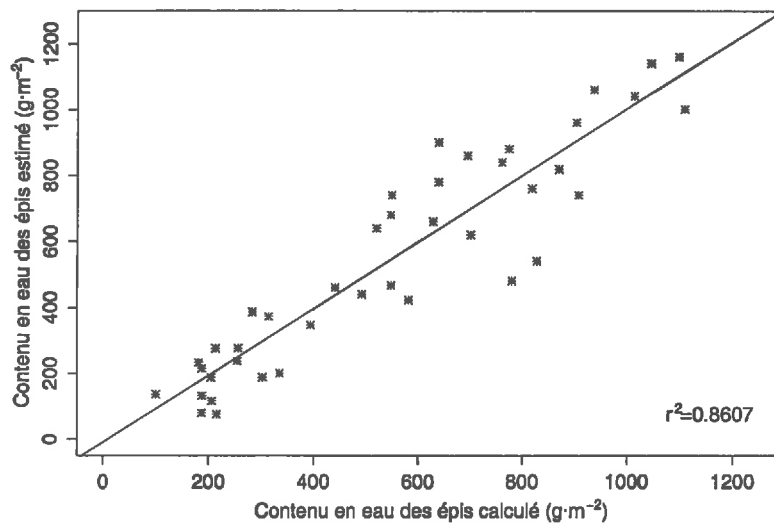


Figure 7.3 – Comparaison entre le contenu en eau des épis estimé par la méthode destructive et le contenu en eau des épis calculé à partir des modules des deux différences de potentiel mesurées avec le dispositif multipôle.

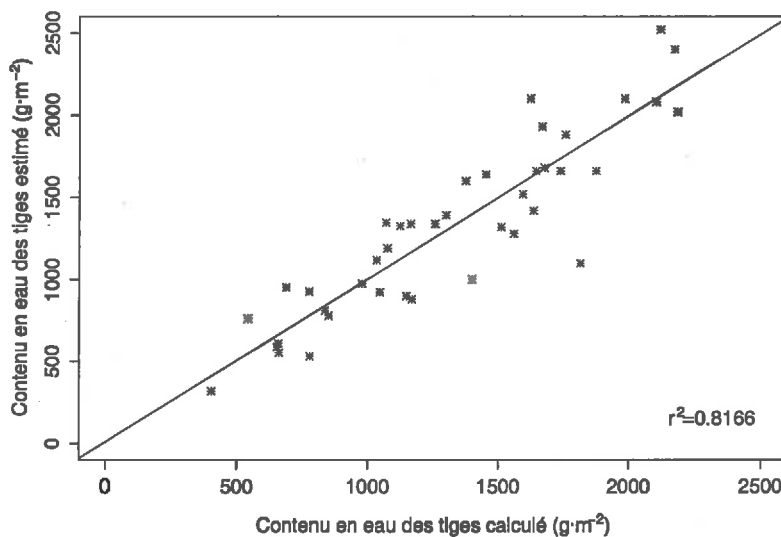


Figure 7.4 – Comparaison entre le contenu en eau des tiges estimé par la méthode destructive et le contenu en eau des tiges calculé à partir du module de la différence de potentiel V_1 mesurée avec le dispositif multipôle.

Nous avons vu dans le paragraphe (6.2.2) qu'une grande partie des mesures a été effectuée sur des placettes éclaircies. Une certaine hétérogénéité de peuplement, et donc de contenu en eau, a ainsi été créée. Donc, dans les expérimentations que nous avons menées, le milieu situé entre les électrodes est variable (modification de la densité de peuplement) tandis que le milieu situé autour de l'instrument est stable (aucune plante prélevée)⁽⁶⁾.

Il est donc important d'étudier l'influence de ce milieu « extérieur » sur les différences de potentiel mesurées et sur la qualité de l'estimation du contenu en eau des plantes situées entre les électrodes.

7.4.1 Mise en évidence de l'effet de l'hétérogénéité

Comme il est difficile de déterminer le contenu en eau des plantes extérieures, nous pouvons supposer qu'il est identique au contenu en eau des plantes situées entre les électrodes du dispositif multipôle lorsqu'aucune plante n'a été prélevée. Alors, il est possible de déterminer si les plantes extérieures ont une influence sur les différences de potentiel.

Le tableau (7.5) montre en effet que l'eau des plantes situées hors des placettes ont une influence sur les différences de potentiel. En ce qui concerne la première différence de potentiel (V_1), on peut voir que les valeurs dépendent du contenu en eau des épis et des tiges des plantes situées dans et en dehors des placettes (probabilités inférieures à 0,05, voire à 0,01). Quant à la seconde différence de potentiel (V_2), elle n'est sensible qu'au contenu en eau des épis des plantes situées dans et en dehors des placettes (les tiges n'ont pas d'influence).

Ainsi, l'hétérogénéité de contenu en eau a un réel effet sur les mesures réalisées avec le dispositif multipôle.

7.4.2 Influence de l'hétérogénéité sur la qualité de l'estimation du contenu en eau des plantes

Dans le but de mieux appréhender l'influence de l'hétérogénéité de contenu en eau sur les différences de potentiel, nous avons divisé l'ensemble des mesures en trois classes :

1. la première classe regroupe les mesures effectuées sur les placettes pour lesquelles le contenu en eau des plantes est compris entre 80% et 100% du contenu en eau normal. Cette classe représente la moitié des mesures ;
2. la deuxième classe regroupe les mesures effectuées sur les placettes pour lesquelles le contenu en eau des plantes est compris entre 55% et 80% du

⁽⁶⁾On réalise ainsi un contraste de permittivité entre les deux milieux, ce qui crée un effet de frontière (discontinuité de la dérivée du potentiel électrostatique normale à la surface de séparation des milieux).

	V_1		V_2	
	F_o	$\Pr(F > F_o)$	F_o	$\Pr(F > F_o)$
Contenu en eau des épis de la placette	135	0,000**	189	0,000**
Contenu en eau des tiges de la placette	14,1	0.000**	0,374	0,545 ^{NS}
Contenu en eau des épis hors de la placette	7,60	0,009**	17,3	0,000**
Contenu en eau des tiges hors de la placette	5,24	0,028*	0,975	0,330 ^{NS}

Tableau 7.5 – Analyse de variance montrant que le contenu en eau des épis et des tiges des plantes situées hors des placettes ont une influence sur les mesures (F_o : coefficient de Fisher ; $\Pr(F > F_o)$: probabilité d'avoir $F > F_o$; ** : significatif au niveau $\alpha=0,01$; * : significatif au niveau $\alpha=0,05$; ^{NS} : non significatif).

contenu en eau normal. La population de cette classe s'élève à 30% de l'ensemble des mesures ;

3. enfin, la troisième classe rassemble les mesures effectuées sur les placettes pour lesquelles le contenu en eau des plantes est inférieur à 55% du contenu en eau normal, ce qui représente 20% des données.

La figure (7.5) représente le contenu en eau des plantes estimé par la méthode gravimétrique en fonction du contenu en eau des plantes calculé à partir des différences de potentiel. Elle reprend les données portées sur la figure (7.2), mais nous avons en plus identifié les points suivant leur classe d'appartenance et tracé les droites de régression calculées pour chaque classe. Il est alors possible de voir que les droites de régression des deux premières classes sont quasiment confondues avec la première bissectrice tandis que la droite de régression de la troisième classe se détache nettement.

Pour confirmer les observations de la figure (7.5), nous avons également reporté dans le tableau (7.6) les coefficients des droites de corrélation calculés pour les trois classes de points et pour les trois problèmes qui nous intéressent : estimation du contenu en eau des plantes entières, du contenu en eau des épis et du contenu en eau des tiges. Il apparaît clairement que les droites de régression calculées sur les points de la classe 3 sont très différentes des droites de régression calculées sur les points des deux autres classes. En particulier, on peut voir que les pentes des droites de la classe 3 sont éloignées de la valeur 1 (0,584 ; 0,657 et 0,538) et ne peuvent être statistiquement égales à 1. Ainsi, les valeurs des paramètres des modèles sont bien ajustés pour l'ensemble des points des deux premiers sous-ensembles (classes 1 et 2), mais pas pour les données de la classe 3. Donc, le comportement du dispositif multipôle est différent en présence de très fortes hétérogénéités de contenu en eau. Par ailleurs, les pentes des droites de

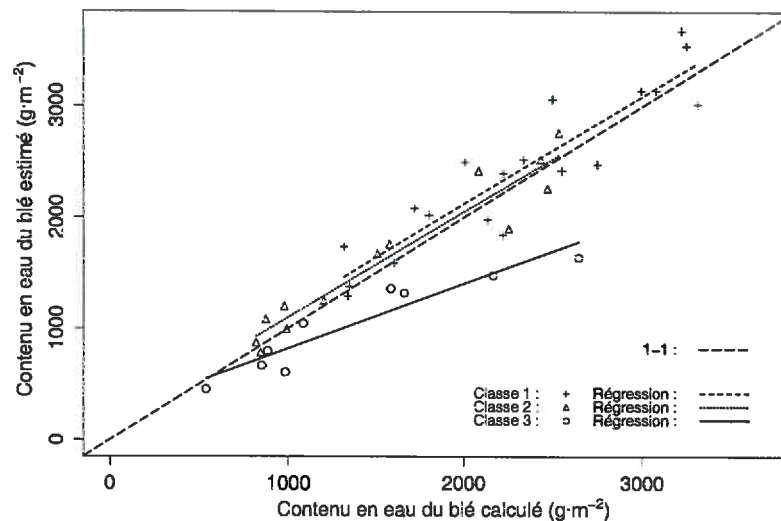


Figure 7.5 – Comparaison entre le contenu en eau des plantes estimé par la méthode destructive et le contenu en eau des plantes calculé à partir des différences de potentiel mesurées avec le quadripôle.

régression de la classe 3 sont inférieures à 1, ce qui signifie que les contenus en eau calculés à partir des modèles sont surestimés et prennent donc en compte le contenu en eau des plantes situées hors des placettes. Par conséquent, il est possible d'affirmer que le dispositif multipôle mesure en réalité un contenu en eau « moyen » entre les plantes des placettes et celles situées autour de l'instrument. Enfin, on peut voir également sur la figure (7.5) que cet effet est non linéaire et est d'autant plus marqué que le contenu en eau est élevé.

Ainsi, l'hétérogénéité a un effet plus important lorsque le rapport des contenus en eau entre la placette et l'extérieur est faible *et* que la différence de contenu en eau entre la placette et l'extérieur est forte. En toute généralité, on peut dire qu'il faut éviter les situations où le contenu en eau des placettes est inférieur à 60% du contenu en eau normal *et* où la différence de contenu en eau supérieure à environ $500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$.

À titre de comparaison, les deux points de la classe 3 les plus éloignés de la première bissectrice présentent des différences de contenu en eau de 700 et $1000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ par rapport au contenu en eau observé à densité normale.

Il est donc possible d'obtenir de meilleures estimations du contenu en eau des plantes en évitant d'effectuer des mesures dans des endroits de forte hétérogénéité de contenu en eau. Par exemple, si l'on supprime les deux plus mauvais points visibles sur la figure (7.5), le coefficient de détermination r^2 sur l'estimation du contenu en eau des plantes entières passe de 0,8592 à 0,9181 avec une incertitude

Contenu en eau estimé	Classe	r^2	σ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	a	b ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	σ_a	σ_b ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	Test $a = 1$	Test $b = 0$	n
Plantes	1	0,845	286	0,996	190	0,100	240	**	**	19
	2	0,922	197	0,951	148	0,0832	143	**	**	13
	3	0,891	151	0,584	236	0,0774	118	NS	**	9
Épis	1	0,863	118	0,999	36,2	0,0967	72,1	**	**	19
	2	0,880	103	1,03	-5,03	0,115	59,9	**	**	13
	3	0,817	85,0	0,657	31,2	0,117	54,7	*	**	9
Tiges	1	0,770	94,0	0,967	131	0,128	212	**	**	19
	2	0,863	157	0,886	183	0,106	128	**	**	13
	3	0,878	213	0,538	219	0,0757	80,9	NS	**	9

Tableau 7.6 – Corrélations entre les contenus en eau estimés par la méthode gravimétrique et ceux calculés à partir des mesures de différence de potentiel. Identification des résultats pour les trois classes considérées (r^2 : coefficient de détermination; σ : écart-type sur l'estimation du contenu en eau; a : coefficient directeur de la droite de régression; b : ordonnée à l'origine; σ_a et σ_b : écarts-types sur a et b ; n : nombre d'observations; ** : significatif au risque 10%; * : significatif au risque 5%; NS : non significatif).

de $249 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ au lieu de $320 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Les mêmes améliorations peuvent être obtenues pour l'estimation du contenu en eau des épis et des tiges. En ce qui concerne les épis, r^2 passe de 0,8607 à 0,9072 et l'erreur moyenne de $123 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ à $103 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Pour les tiges, le coefficient de détermination devient égal à 0,8771 (au lieu de 0,8166) et l'incertitude vaut maintenant $195 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ à la place de $233 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$.

Une manière plus radicale consiste à éliminer l'ensemble des points de la classe 3. On a alors les résultats suivants. Pour l'estimation du contenu en eau des plantes entières : $r^2=0,9074$ et $\sigma=242 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Pour les épis : $r^2=0,8920$ et $\sigma=108 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Pour les tiges : $r^2=0,8516$ et $\sigma=190 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$.

On obtient donc des résultats équivalents en supprimant seulement les deux plus mauvais points ou bien en supprimant l'ensemble des points de la classe 3. Et donc, l'imprécision de l'instrument ne provient pas uniquement du rapport de contenu en eau entre les placettes et l'extérieur mais également de la différence de contenu en eau.

Remarque 1. Les hétérogénéités créées pour tester le dispositif multipôle sont très fortes, à la fois en amplitude et en variation spatiale. En effet, on a vu que le contenu en eau pouvait être réduit de plus de 50% sur une distance ne dépassant pas 50 cm. Les hétérogénéités que l'on rencontre naturellement au champ peuvent atteindre environ 50% sur des parcelles très hétérogènes, mais ces variations se produisent sur des distances de l'ordre de plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres. Les conditions dans lesquelles a été testé le dispositif multipôle englobent et dépassent donc très largement celles rencontrées naturellement. Ainsi, on peut affirmer que la précision du dispositif multipôle est bonne dans les conditions normales de peuplement végétal, le biais présent sur les données expérimentales ne se produisant que dans des cas de très fortes hétérogénéités rarement observées naturellement.

□

Remarque 2. Nous avons montré dans le paragraphe (6.2.3) que l'incertitude sur l'estimation gravimétrique du contenu en eau peut atteindre 15%. Cette incertitude est donc partiellement responsable de la dispersion des points observée sur les figures (7.2), (7.3) et (7.4) — et donc explique également en partie les incertitudes sur l'estimation du contenu en eau à partir de la mesure des différences de potentiel.

□

Remarque 3. L'erreur moyenne sur le contenu en eau des épis estimé à partir des différences de potentiel est de l'ordre de $103 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Le contenu en eau moyen observé sur les données expérimentales est de $550 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Si l'on considère une incertitude de 15% sur l'estimation destructive du contenu en eau des épis, on aboutit à une erreur de $83 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Pour les tiges, l'erreur moyenne est de $195 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$

pour l'estimation non destructive et de $199 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ pour l'estimation pondérale. Concernant les plantes entières, l'incertitude de la méthode non destructive est de l'ordre de $250 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ contre $280 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ pour la méthode gravimétrique.

On voit donc que les méthodes gravimétrique et électrostatique ont des performances très proches. Le tableau 7.7 permet de comparer les précisions de la méthode électrostatique et de la méthode pondérale.

Contenu en eau estimé	Méthode électrostatique		Méthode pondérale	
	Préc. absolue	Préc. relative	Préc. absolue	Préc. relative
Plantes entières	$250 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$	13,4%	$280 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$	15%
Épis	$103 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$	18,7%	$83 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$	15%
Tiges	$195 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$	14,7%	$199 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$	15%

Tableau 7.7 – Comparaison des précisions de la méthode électrostatique et de la méthode pondérale.

□

RÉSUMÉ - CONCLUSION (CHAPITRE 7)

Le dispositif multipôle fournit des mesures de différence de potentiel corrélées au contenu en eau de la végétation. Deux applications agronomiques ont été mises en œuvre afin de valider le principe de mesure. Nous avons tout d'abord suivi le développement des plantes au cours du temps et pu détecter à l'aide du dispositif multipôle la fin du palier hydrique du blé révélatrice de la maturité physiologique des grains. Ensuite, nous avons montré qu'il est possible d'estimer le contenu en eau des plantes, et surtout qu'il est également possible d'accéder à la distribution verticale de l'eau au sein d'un couvert végétal en estimant simultanément le contenu en eau des épis et des tiges des plantes.

Par ailleurs, le dispositif multipôle permet de détecter des hétérogénéités horizontales de distribution du contenu en eau. Mais nous avons vu qu'il faut être prudent sur la signification des mesures en présence de très fortes hétérogénéités de contenus en eau, toutefois rarement rencontrées en conditions naturelles.

Enfin, nous avons remarqué que les estimations de contenu en eau fournies par le dispositif multipôle sont d'une précision comparable à celle de la méthode pondérale.

Cinquième partie

Conclusion

Chapitre 8

Conclusion

L'agriculture actuelle, caractérisée par l'essor de l'agriculture de précision et la nécessité de raisonner les apports d'intrants, requiert la connaissance précise de l'état des cultures à un instant donné. Ceci a entraîné depuis quelques années le développement et l'utilisation intensive de nouveaux instruments de mesure capables de diagnostiquer précisément et rapidement.

Bien que l'offre en matière de capteur soit de plus en plus diversifiée, aucun instrument n'est à l'heure actuelle disponible pour l'estimation *in situ* du contenu en eau des plantes.

Un prototype de quadripôle électrostatique, a été élaboré par la société CIMEL Électronique, afin d'avoir accès au contenu en eau des plantes (Féchant, 1996). Cet instrument a été conçu afin de répondre à quatre critères, qui sont : une mesure *in situ*, non destructive, instantanée, et qui doit donner accès à la distribution spatiale de l'eau dans les couverts végétaux.

Les premiers résultats obtenus par Féchant ont montré la faisabilité de la méthode.

Le travail présenté dans ce document a consisté à étudier la réponse théorique du quadripôle — et plus généralement des dispositifs multipôles — et à valider le principe de mesure grâce à une expérimentation conduite au champ.

8.1 Synthèse des résultats obtenus

8.1.1 Résultats théoriques

Dans un premier temps, un travail de modélisation, fondé sur la méthode des éléments finis, a permis de caractériser le fonctionnement du dispositif multipôle en régime quasi-statique dans diverses conditions environnementales. En particulier, les effets des divers matériaux en présence dans le milieu sondé ont été précisément quantifiés. Pour un couvert de blé stratifié horizontalement, les résultats montrent que l'instrument est sensible à la permittivité des épis et des

tiges des plantes de blé. Il apparaît également que le sol influence très peu la réponse des dispositifs multipôles pour les configurations géométriques étudiées.

Deux variables indépendantes influencent donc les différences de potentiel : la permittivité des épis et celle des tiges. Une mesure unique de différence de potentiel est donc insuffisante pour retrouver les valeurs de permittivités des organes. Différentes configurations, utilisant une seconde paire d'électrodes de réception, ont alors être proposées afin d'obtenir deux mesures simultanées permettant ensuite d'estimer la permittivité des épis et des tiges à partir des différences de potentiel.

Dans un second temps, nous avons cherché à inverser les données de la simulation afin de prouver que le dispositif multipôle peut accéder à la distribution verticale de l'eau dans les couverts végétaux.

Les méthodes classiques de régression non linéaire ont montré leur limite pour l'inversion des données issues de la simulation de l'appareil.

L'implémentation d'un algorithme de régression non paramétrique utilisant les réseaux de neurones dans le cas d'un problème bidimensionnel est ainsi proposée. La comparaison des performances entre les deux types de régression montre un net avantage pour les méthodes neuronales. L'inversion des données grâce au réseau de neurones artificiels permet ainsi d'estimer précisément la permittivité des épis de blé à partir de la connaissance des différences de potentiel. De la même façon, il est également possible de retrouver la permittivité des tiges de blé.

Ainsi, nous avons montré que les différences de potentiel peuvent être inversées pour estimer les permittivités — et donc les contenus en eau — des strates horizontales d'un couvert végétal (strate des épis et strate des tiges).

8.1.2 Validation expérimentale

Le prototype de dispositif multipôle, mis au point par Féchant (1996), a été utilisé afin de valider la méthode de mesure. Un brancard permettant de supporter les électrodes et le système de réception a été élaboré. Grâce à ce système, l'instrument peut être aisément déplacé dans les cultures afin de réaliser des mesures.

Une expérimentation menée sur une culture de blé a alors montré que le dispositif multipôle fournit des mesures de différences de potentiel inversement corrélées au contenu en eau de la végétation, comme prévu par la théorie. Le *suivi des variations du contenu en eau* de la végétation au cours du temps est donc tout à fait réalisable dans la mesure où toute variation des différences de potentiel est révélatrice d'une modification du contenu en eau des plantes. Nous avons ainsi mis en évidence les variations du contenu en eau des épis de blé, en particulier la décroissance du contenu en eau après la fin du palier hydrique.

Le dispositif multipôle permet également d'estimer le contenu en eau des plantes. Nous avons vu que les mesures de différences de potentiel sont bien corrélées au contenu en eau des plantes entières, mais qu'il est aussi possible d'estimer simultanément le contenu en eau des épis et le contenu en eau des tiges. Ceci est une réelle avancée dans les systèmes instrumentaux dédiés à l'étude des couverts végétaux car jusqu'à présent aucun instrument n'était capable d'accéder instantanément au profil vertical de l'eau d'une culture.

Les estimations obtenues sont également précises, bien que nous ayons remarqué que de très fortes hétérogénéités de contenu en eau peuvent limiter la précision des estimations.

Les performances du dispositif multipôle sont en effet très bonnes car les incertitudes sur l'estimation du contenu en eau sont du même ordre de grandeur que l'incertitude donnée par la méthode destructive classique. L'erreur moyenne commise sur les estimations gravimétriques du contenu en eau des épis est d'environ $85 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ contre $103 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ pour les estimations non destructives. Concernant le contenu en eau des tiges, le dispositif multipôle donne une incertitude de $195 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ contre $199 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ pour la méthode gravimétrique. Pour les plantes entières, la méthode gravimétrique donne une erreur de $280 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, supérieure à l'incertitude de la méthode électrostatique ($250 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$).

8.2 Perspectives

Le prototype de dispositif multipôle est un instrument très prometteur pour l'estimation du contenu en eau de la végétation. Grâce à ses qualités liées au principe de mesure — mesures instantanées, non destructives, *in situ*, et accès à la distribution verticale de l'eau —, le dispositif multipôle ouvre de nouvelles perspectives.

D'un point de vue agronomique, la connaissance du contenu en eau des plantes, et donc de la biomasse, est intéressante dans le cadre de la modélisation du fonctionnement des cultures et notamment de la croissance en biomasse. En effet, des mesures effectuées régulièrement au cours du cycle pourraient être assimilées dans ces modèles afin de les recalibrer. Ainsi, les sorties des modèles seraient plus précises et permettraient de meilleures prévisions.

D'un point de vue plus opérationnel, la principale utilisation de ce type d'appareil concerne l'agriculture de précision où la nécessité de connaître l'état d'une culture à un instant donné est très importante. En particulier, on peut songer à fixer un dispositif multipôle sur une machine agricole pourvue d'un système de positionnement par satellite.

Ceci permettrait de réaliser des cartes de distribution de contenu en eau mettant en évidence des hétérogénéités de biomasse, et donc des régions présentant

des retards de maturité ou bien des éclaircissements en terme de peuplement végétal. Le rendement potentiel d'une culture serait aussi rendu possible.

Grâce à un suivi régulier au cours du temps, il serait également possible d'obtenir la dynamique de croissance d'une culture et d'adapter ainsi les itinéraires techniques (modulation des apports de fertilisants notamment).

Des placettes témoin pourraient aussi être délimitées de sorte à effectuer un suivi continu du contenu en eau des plantes. Ceci permettrait de mettre en évidence des variations fines du contenu en eau à l'échelle de la journée.

Par ailleurs, le principe de mesure n'est pas limité à un seul type de culture. La distribution verticale de l'eau d'une culture peut théoriquement être atteinte pour toutes les cultures dont les organes sont disposés en strates horizontales. On peut bien sûr citer les cultures céréalières (blé, maïs, sorgho, riz . . .), mais également des cultures oléagineuses comme par exemple le tournesol. De nombreuses filières agricoles pourraient donc être intéressées par la commercialisation de ce nouvel instrument de mesure.

Dans le cas de cultures non stratifiées (pois ou colza par exemple), le contenu en eau d'organes précis ne peut être estimé mais il est toutefois possible d'avoir une estimation globale du contenu en eau des plantes et donc une estimation de la biomasse, ce qui est important pour l'ajustement des intrants aux besoins stricts des cultures.

Des mesures sur des cultures en début de cycle peuvent également être envisagées. Cependant, l'effet du sol ne serait plus du tout négligeable à cause de la faible hauteur des plantes jeunes. Il serait donc indispensable d'étudier plus en détail la contribution du sol dans les valeurs de différence de potentiel. De telles mesures permettraient alors d'avoir une information à la fois sur le contenu en eau des plantes et sur les propriétés électriques des sols.

Le dispositif multipôle pourrait également être utilisé sur de la végétation non cultivée. Une perspective intéressante est l'estimation de l'inflammabilité des plantes, en particulier en région méditerranéenne où le problème de la prévention des incendies reste majeur. De plus, à l'heure actuelle, le contrôle de l'inflammabilité des végétaux est effectué hebdomadairement par mesure pondérale du contenu en eau des plantes. L'avantage du dispositif multipôle pour ce type d'application est donc appréciable.

Une tout autre application pourrait également être le suivi continu des plantes cultivées sous serre afin de réguler le climat et la nutrition des plantes. Des mesures continues au dispositif multipôle pourraient ainsi être intégrées et utilisées en temps réel pour le pilotage automatique des serres.

Enfin, du point de vue du développement de l'instrument, une nouvelle version vient de voir le jour. Ce nouveau prototype, beaucoup plus abouti électroniquement, permettra de réaliser des mesures plus précises. Il devrait être testé cette

année sur diverses cultures. Grâce à ce nouvel instrument, d'autres applications, demandant plus de précision, seraient envisageables comme par exemple le suivi de stress hydriques.

Sixième partie

Annexes

Annexe A

Électromagnétisme

Ce chapitre présente quelques généralités concernant l'électromagnétisme. Nous introduisons tout d'abord les équations de Maxwell, fondements de l'électromagnétisme, puis les relations entre les différents champs électriques et magnétiques, les notions de permittivité et de conductivité, et enfin les équations de l'électrostatique.

A.1 Équations de Maxwell

A.1.1 Équations de Maxwell dans le vide

Les champs électromagnétiques pouvant se propager dans le vide sont solutions des équations de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (\text{A.1})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (\text{A.2})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad (\text{A.3})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (\text{A.4})$$

où :

- \vec{E} est le *champ électrique*, en $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$;
- \vec{B} est l'*induction magnétique*, en T ou $\text{Wb}\cdot\text{m}^{-2}$;
- \vec{J} est la *densité de courant*, en $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$;
- ρ est la *densité de charge*, en $\text{C}\cdot\text{m}^{-3}$;
- ϵ_0 est la *permittivité du vide*, $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \simeq 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$;

– μ_0 est la *perméabilité du vide*, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$.

En appliquant l'opérateur de divergence à l'équation d'Ampère (A.4) et en utilisant l'équation de Gauss (A.1), on obtient l'expression de la conservation de la charge électrique :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \quad (\text{A.5})$$

Les grandeurs \vec{J} et ρ sont les sources qui créent les champs. On suppose que ces champs n'ont pas d'effet sur les sources, et qu'il existe donc des forces, dont on ne cherche pas à connaître l'origine, qui maintiennent la distribution des sources en l'état.

Les champs vectoriels satisfaisant les équations de Maxwell sont généralement supposés harmoniques et s'écrivent alors

$$\vec{A}^*(\vec{r}, t) = \vec{a}^* e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}. \quad (\text{A.6})$$

\vec{a}^* est l'amplitude complexe du champ, \vec{k} est le *vecteur d'onde* (m^{-1}) et ω la *pulsation*⁽¹⁾ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) ($i^2 = -1$). Le champ \vec{A}^* dépend du point \vec{r} où l'on se trouve et du temps t . On peut noter que l'hypothèse harmonique permet de simplifier les opérateurs de dérivation. En particulier :

$$\frac{\partial}{\partial t} \equiv i\omega \quad \text{et} \quad \vec{\nabla} \equiv -i\vec{k}. \quad (\text{A.7})$$

Les équations de Maxwell peuvent donc être réécrites en faisant disparaître les variations temporelles :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (\text{A.8})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -i\omega \vec{B}, \quad (\text{A.9})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad (\text{A.10})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + i\omega \varepsilon_0 \mu_0 \vec{E}. \quad (\text{A.11})$$

De même, l'équation de conservation des charges électriques (A.5) se simplifie :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -i\omega \rho. \quad (\text{A.12})$$

⁽¹⁾La pulsation est reliée à la fréquence f du signal par la formule : $\omega = 2\pi f$.

A.1.2 Équation de Maxwell dans les milieux matériels

Les milieux matériels contiennent un très grand nombre de sources, formées à l'échelle microscopique par les noyaux et les électrons des atomes et des ions. Afin d'obtenir les équations de Maxwell dans la matière, on se place à l'échelle microscopique et l'on considère alors que l'on est en présence d'une distribution de charges dans le vide. Les champs microscopiques (\vec{e}, \vec{b}) satisfont alors les équations du paragraphe (A.1.1).

Les champs macroscopiques sont obtenus en effectuant un moyennage spatial des grandeurs microscopiques :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \langle \vec{e}(\vec{r}, t) \rangle \quad \vec{B}(\vec{r}, t) = \langle \vec{b}(\vec{r}, t) \rangle. \quad (\text{A.13})$$

On obtient alors le système d'équations suivant :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\langle \rho \rangle}{\epsilon_0}, \quad (\text{A.14})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (\text{A.15})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad (\text{A.16})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \langle \vec{J} \rangle + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (\text{A.17})$$

et

$$\vec{\nabla} \cdot \langle \vec{J} \rangle + \frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial t} = 0. \quad (\text{A.18})$$

Notons que $\langle \vec{J} \rangle$ et $\langle \rho \rangle$ ne sont pas les sources des champs mais des caractéristiques intrinsèques du milieu matériel considéré. Afin de tenir compte de ces propriétés, on introduit la *polarisation électrique* \vec{P}_e (C·m⁻²) définie par

$$\langle \rho \rangle = -\vec{\nabla} \cdot \vec{P}_e, \quad (\text{A.19})$$

$$\langle \vec{J} \rangle = \frac{\partial \vec{P}_e}{\partial t}. \quad (\text{A.20})$$

L'équation (A.14) devient alors, en utilisant (A.19),

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho - \vec{\nabla} \cdot \vec{P}_e}{\epsilon_0}, \quad (\text{A.21})$$

où ρ est le terme qui correspond aux sources des champs. Ainsi, on aboutit à l'expression $\vec{\nabla} \cdot (\varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}_e) = \rho$. On peut alors introduire le vecteur \vec{D} , appelé *induction électrique* ou *déplacement électrique* ($\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$), tel que

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}_e. \quad (\text{A.22})$$

Et donc,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho. \quad (\text{A.23})$$

De la même façon, il est possible de reformuler l'équation (A.17) en introduisant les sources \vec{J} des champs :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \langle \vec{J} \rangle \right) + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (\text{A.24})$$

En utilisant (A.20) on obtient

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{P}_e}{\partial t} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right), \quad (\text{A.25})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right). \quad (\text{A.26})$$

On introduit alors le *champ magnétique* \vec{H} ($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$) :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}. \quad (\text{A.27})$$

D'où

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (\text{A.28})$$

Les équations de Maxwell deviennent donc :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho, \quad (\text{A.29})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (\text{A.30})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad (\text{A.31})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (\text{A.32})$$

Les inconnues de ce système sont les quatre champs $(\vec{E}, \vec{D}, \vec{B}, \vec{H})$. Les grandeurs connues sont les sources ρ et \vec{J} . On a donc douze inconnues — chaque champ a trois composantes — pour six équations indépendantes — deux équations sont liées par l'équation de conservation de la charge. Pour lever l'indétermination du système, il faut donc introduire deux équations supplémentaires : les équations constitutives.

A.2 Équations constitutives

Les équations constitutives relient les champs \vec{D} et \vec{B} à \vec{E} et \vec{H} respectivement. Dans le cas de milieux *linéaires*, elles sont de la forme

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \int_{\vec{r}'} \int_t \bar{\bar{\epsilon}}(\vec{r}, \vec{r}', t, t') \vec{E}(\vec{r}, \vec{r}', t, t') dt d\vec{r}', \quad (\text{A.33})$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \int_{\vec{r}'} \int_t \bar{\bar{\mu}}(\vec{r}, \vec{r}', t, t') \vec{H}(\vec{r}, \vec{r}', t, t') dt d\vec{r}'. \quad (\text{A.34})$$

$\bar{\bar{\epsilon}}$ est le tenseur de *permittivité diélectrique*, $\bar{\bar{\mu}}$ le tenseur de *perméabilité magnétique*. Plusieurs cas permettent de simplifier les équations (A.33) et (A.34) :

- si le milieu est *local*, l'intégration sur \vec{r}' disparaît ;
- si le milieu est *instantané*, l'intégration sur t' disparaît ;
- si le milieu est *isotrope*, les tenseurs $\bar{\bar{\epsilon}}$ et $\bar{\bar{\mu}}$ se réduisent à des scalaires ϵ et μ ;
- si le milieu est *homogène*, la dépendance en \vec{r} disparaît.

Dans le cadre de cette étude, on ne considère que des milieux linéaires locaux, instantanés, isotropes et homogènes. De plus, on suppose que les milieux sont non magnétiques, *i.e.* $\mu = \mu_0$. On a alors simplement

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \epsilon \vec{E}(\vec{r}, t), \quad (\text{A.35})$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \vec{H}(\vec{r}, t). \quad (\text{A.36})$$

A.3 Permittivité diélectrique et conductivité électrique

La permittivité diélectrique, telle qu'elle a été introduite dans le paragraphe précédent, est un objet purement mathématique permettant de former l'équation constitutive (A.33). Dans ce paragraphe est présentée la signification physique de la permittivité et est introduite la conductivité électrique des matériaux.

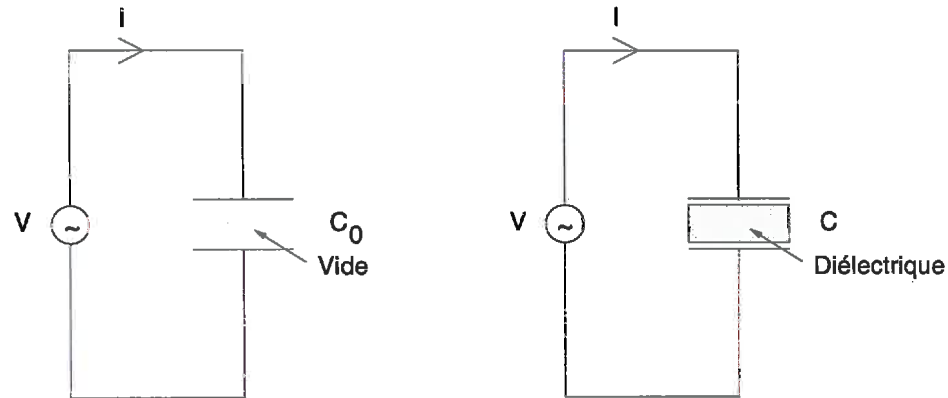


Figure A.1 – Capacité d'un condensateur en fonction du matériau présent entre les armatures.

La permittivité diélectrique ε d'un matériau est souvent définie par le rapport de deux capacités exprimées en farads (F) : soient C_0 la capacité d'un condensateur ayant pour diélectrique le vide et C la capacité du même condensateur, mais ayant pour diélectrique le matériau considéré (figure A.1). La permittivité diélectrique du matériau est alors

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0} \varepsilon_0, \quad (\text{A.37})$$

où ε_0 est la permittivité du vide. Le rapport $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ est la permittivité diélectrique *relative* du matériau.

Aucun matériau n'étant totalement isolant, il existe toujours un courant de perte entre les plaques du condensateur. Pour tenir compte de ce phénomène, on introduit une permittivité complexe ε^* telle que

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon''. \quad (\text{A.38})$$

ε' est la permittivité réelle, définie précédemment comme le rapport des capacités ($\varepsilon' = \varepsilon$). $i\varepsilon''$ est la permittivité imaginaire et représente les pertes ($i^2 = -1$). Considérons un condensateur de capacité complexe C^* , d'épaisseur l dont les armatures ont une surface S . Soumis à une différence de potentiel V , ce condensateur porte la charge q et est parcouru par un courant I . On a alors

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{d(C^*V)}{dt} = C^* \frac{dV}{dt} = i\omega C^* V. \quad (\text{A.39})$$

Or

$$C^* = \varepsilon^* \frac{C_0}{\varepsilon_0} = \varepsilon^* \frac{S}{l} \quad \text{et} \quad V = \|\vec{E}\| l. \quad (\text{A.40})$$

Donc

$$I = i\omega\varepsilon^* S \|\vec{E}\|. \quad (\text{A.41})$$

La densité de courant J est alors égale à

$$J = \frac{I}{S} = i\omega\varepsilon^* \|\vec{E}\| = (i\omega\varepsilon' + \omega\varepsilon'') \|\vec{E}\|. \quad (\text{A.42})$$

La partie réelle de l'équation (A.42) correspond à la loi d'Ohm locale : $\vec{J} = \sigma\vec{E}$, où σ est la *conductivité* ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$). Par analogie, on a donc

$$\sigma = \omega\varepsilon''. \quad (\text{A.43})$$

Et finalement

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i \frac{\sigma}{\omega} = \varepsilon' - i \frac{\sigma}{2\pi f}. \quad (\text{A.44})$$

Ou bien, en introduisant la permittivité relative par rapport à l'air :

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r'', \quad (\text{A.45})$$

$$= \varepsilon_r' - i \frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega}, \quad (\text{A.46})$$

$$= \varepsilon_r' - i \frac{\sigma}{2\pi\varepsilon_0 f}. \quad (\text{A.47})$$

D'un point de vue physique, la permittivité diélectrique réelle caractérise la faculté d'un matériau à emmagasiner de l'énergie, tandis que la conductivité caractérise la faculté de dissipation de l'énergie sous forme thermique (effet Joule).

A.4 De l'électromagnétisme à l'électrostatique

A.4.1 Simplification des équations de Maxwell

L'application des équations de Maxwell ((A.29) à (A.32)), des équations constitutives ((A.35) et (A.36)) et de la loi d'Ohm ($\vec{J} = \sigma\vec{E}$) dans un milieu caractérisé

par les paramètres μ , ε et σ , peut conduire à une séparation des champs électrique et magnétique :

$$\Delta \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (\text{A.48})$$

$$\Delta \vec{H} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0. \quad (\text{A.49})$$

Les champs sont monochromatiques de pulsation ω donc les deux équations précédentes deviennent

$$(\Delta + k^2) \vec{E} = 0 \text{ et} \quad (\text{A.50})$$

$$(\Delta + k^2) \vec{H} = 0, \quad (\text{A.51})$$

où k est le nombre d'onde exprimé en m^{-1} tel que

$$k^2 = i\mu\omega(\sigma - i\varepsilon\omega). \quad (\text{A.52})$$

C'est-à-dire

$$k = e^{i\frac{\pi}{4}} [\mu\omega(\sigma - i\varepsilon\omega)]^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{A.53})$$

Suivant les valeurs respectives de σ et de ε , on se situe dans les domaines de la propagation électromagnétique ou de la diffusion. Si la distance émetteur-récepteur est beaucoup plus faible que la longueur d'onde de propagation et/ou de la longueur d'onde de diffusion, l'approximation des courants continus, et donc la théorie électrostatique, s'applique. Dans le cas du quadripôle électrostatique fonctionnant à 450 kHz, on obtient les ordres de grandeur suivants :

- dans l'air, $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$, $\varepsilon = \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ et $\sigma = 0 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$.
Ce qui donne une longueur d'onde de propagation de 666 m ;
- au sein des épis de blé supposés parfaitement diélectriques, $\mu = \mu_0$, $\varepsilon = 20 \cdot \varepsilon_0$ et $\sigma = 0 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. D'où une longueur d'onde de propagation de 149 m ;
- au sein des épis de blé considérés comme un milieu diélectrique imparfait avec un angle de perte⁽²⁾ dont la tangente est de l'ordre de 10%, $\mu = \mu_0$, $\varepsilon = 20 \cdot \varepsilon_0$ et $\sigma = 0,1 \cdot \varepsilon\omega = 5 \cdot 10^{-5} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. Le terme de propagation est largement prépondérant sur celui de diffusion mais k reste inchangé (longueur d'onde de 149 m) ;

⁽²⁾L'angle de perte est défini par : $\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$.

- à la surface d'un sol relativement conducteur, on aurait par exemple $\mu = \mu_0$, $\varepsilon = 20 \cdot \varepsilon_0$ et $\sigma = 10^{-1} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$, ce qui conduit à une longueur d'onde de diffusion de 15 m.

Ces exemples montrent que les longueurs d'onde de propagation et de diffusion sont toujours supérieures aux dimensions de l'instrument. On peut donc considérer l'approximation quasi-statique (approximation des champs alternatifs de très faible fréquence), qui est formellement très proche de la théorie électrostatique. Dans ce cas, les variations temporelles des champs sont nulles et les équations de Maxwell se simplifient alors sous la forme suivante (Bruhat, 1963) :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho, \quad (\text{A.54})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = 0, \quad (\text{A.55})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad (\text{A.56})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}. \quad (\text{A.57})$$

On peut remarquer en particulier qu'il existe un champ magnétique, créé par le courant électrique \vec{J} , mais qu'il n'y a pas interaction entre les champs électrique et magnétique contrairement au cas maxwellien.

Dans le cadre strict de l'électrostatique, le courant est nul donc $\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = 0$ et il n'existe aucun champ magnétique. Si l'on ne s'intéresse pas au champ magnétique, les formules de l'électrostatique peuvent donc être utilisées avec des permittivités complexes pour traiter des problèmes où interviennent des courant alternatifs de fréquences suffisamment faibles.

A.4.2 Existence d'un potentiel électrique

D'après l'équation (A.55), le champ électrique \vec{E} dérive d'un potentiel V car, pour toute grandeur scalaire G

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} G) = 0. \quad (\text{A.58})$$

Ainsi, on peut écrire $\vec{E} = -\vec{\nabla} V^{(3)}$. L'équation de Gauss (A.54) devient alors

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \vec{\nabla} \cdot (\varepsilon^* \vec{E}) \\ &= -\vec{\nabla} \cdot (\varepsilon^* \vec{\nabla} V) \\ &= -\vec{\nabla} \varepsilon^* \cdot \vec{\nabla} V - \varepsilon^* \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} V) \\ &= -\vec{\nabla} \varepsilon^* \cdot \vec{\nabla} V - \varepsilon^* \Delta V = \rho. \end{aligned} \quad (\text{A.59})$$

⁽³⁾Le signe $-$ devant l'opérateur $\vec{\nabla}$ est une convention purement arbitraire de l'électromagnétisme.

Comme $\vec{\nabla}\varepsilon^* = 0$ (milieu homogène), l'équation (A.59) se simplifie et on obtient l'équation de Poisson

$$\Delta V = -\frac{\rho}{\varepsilon^*}, \quad (\text{A.60})$$

où Δ désigne l'opérateur laplacien. Si $\rho = 0$, on aboutit à l'équation de Laplace :

$$\Delta V = 0. \quad (\text{A.61})$$

Le potentiel satisfaisant l'équation de Poisson (A.60) a alors pour expression

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon^*} \iiint_{\mathcal{V}} \frac{\rho d\tau}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|}. \quad (\text{A.62})$$

L'intégration porte sur le volume \mathcal{V} des charges qui créent le potentiel. \vec{r} est le point de l'espace où l'on cherche V et \vec{r}' la position des charges. Pour une distribution de charges surfacique ρ_σ , on a

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon^*} \iint_S \frac{\rho_\sigma dS}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|}. \quad (\text{A.63})$$

Notons que $\iiint_{\mathcal{V}} \rho d\tau$ est la charge électrique Q contenue dans le volume \mathcal{V} . Or $I = \frac{dQ}{dt} = i\omega Q$, donc $Q = \frac{I}{i\omega}$. L'intégrale $\iiint_{\mathcal{V}} \frac{\rho d\tau}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|}$ est donc un imaginaire pur par l'intermédiaire du terme i (déphasage de $\frac{\pi}{2}$ par rapport au courant I).

Annexe B

Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode numérique élaborée pour résoudre des équations aux dérivées partielles (Zienkiewicz, 1979; Dhatt et Touzot, 1981; Raviart, 1981; Wait et Mitchell, 1985). Cet algorithme, apparu au début des années 1960 pour résoudre des problèmes de mécanique des structures, s'est rapidement développé avec l'évolution des moyens informatiques. Bien que cette méthode soit surtout employée dans le génie civil et les industries aéronautique et automobile, elle est adaptée à de nombreux problèmes physiques. Ainsi, son champ d'application couvre l'ensemble de la mécanique (mécanique des solides et des fluides), la thermique, et bien sûr l'électromagnétisme.

Ce chapitre présente tout d'abord la méthode des différences finies, base des éléments finis, puis aborde le principe des éléments finis. Sont ensuite exposées les techniques pour construire des maillages bi et tridimensionnels. Enfin, nous présentons les formulations mathématiques qui permettent la résolution numérique des équations.

B.1 Méthode des différences finies

La méthode des différences finies permet de trouver une approximation de la solution des équations différentielles en remplaçant les dérivées partielles des équations à résoudre par des accroissements discrets (Thom et Apelt, 1961; Carnahan *et al.*, 1969; Press *et al.*, 1992).

La première étape consiste à réaliser un maillage régulier du domaine sur lequel la solution est recherchée (figure (B.1)).

L'approximation des dérivées partielles est ensuite réalisée. Par exemple, pour une fonction f dépendant d'une variable x on obtient :

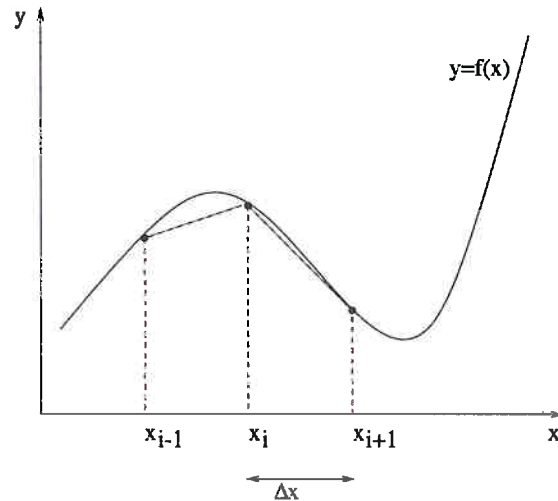


Figure B.1 – Illustration de la méthode des différences finies.

$$\frac{\partial f}{\partial x} \simeq \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i}, \quad (\text{B.1})$$

$$\simeq \frac{f(x_i) - f(x_{i-1}))}{x_i - x_{i-1}}, \quad (\text{B.2})$$

$$\simeq \frac{f(x_{i+\frac{1}{2}}) - f(x_{i-\frac{1}{2}})}{x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}}. \quad (\text{B.3})$$

L'équation (B.1) peut être qualifiée de différence avancée, l'équation (B.2) de différence retardée. L'équation (B.3) correspond quant à elle à une différence centrée⁽¹⁾.

L'expression de la dérivée seconde s'obtient en appliquant deux fois le schéma de la différence centrée :

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) \simeq \frac{f(x_{i+1}) - 2f(x_i) + f(x_{i-1}))}{\Delta x^2}, \quad (\text{B.4})$$

où $\Delta x = x_{i+1} - x_i$.

La méthode peut par exemple être appliquée à la résolution de l'équation de Laplace en coordonnées cartésiennes bidimensionnelles :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0. \quad (\text{B.5})$$

⁽¹⁾Ces termes différences proviennent des expressions anglo-saxonnes *forward difference*, *backward difference* et *central difference*.

En posant $x = i\Delta x$ et $y = j\Delta y$, on obtient, par la méthode des différences finies,

$$\frac{V_{i+1,j} - 2V_{i,j} + V_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{V_{i,j+1} - 2V_{i,j} + V_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0. \quad (\text{B.6})$$

D'où l'expression du potentiel V au point de coordonnées $(i\Delta x, j\Delta y)$:

$$V_{i,j} = \frac{\Delta y^2 (V_{i+1,j} + V_{i-1,j}) + \Delta x^2 (V_{i,j-1} + V_{i,j+1})}{2(\Delta x^2 + \Delta y^2)}. \quad (\text{B.7})$$

L'équation ci-dessus donne la valeur du potentiel V en $(i\Delta x, j\Delta y)$ en fonction de sa valeur autour du point $(i\Delta x, j\Delta y)$. Pour obtenir la valeur du potentiel en tout point de l'espace, il faut donc mettre en œuvre soit un processus itératif, soit une inversion de matrice.

B.2 Principe de la méthode des éléments finis

Soit un domaine Ω , de frontière $\partial\Omega$, dans lequel on cherche à résoudre

$$\begin{cases} \Delta V(\vec{x}) = -\frac{\rho(\vec{x})}{\varepsilon(\vec{x})}, & \vec{x} \in \Omega, \\ V(\vec{x}) = V_0, & \vec{x} \in \partial\Omega. \end{cases} \quad (\text{B.8})$$

Comme précédemment, la méthode des éléments finis consiste à effectuer un maillage de $\Omega \cup \partial\Omega$ et d'estimer la valeur de V en chaque noeud du réseau ainsi constitué.

Mais contrairement à la méthode des différences finies qui utilise un maillage de la scène suivant les directions du repère (donc des mailles à côtés orthogonaux et de plus de taille fixée), la méthode des éléments finis utilise des mailles de tailles différentes et dont les bords peuvent avoir des directions quelconques (figure (B.2)) (voir paragraphe (B.3)).

Outre le maillage du domaine de simulation, la méthode des éléments finis comporte plusieurs étapes :

- tout d'abord, il faut approximer en chaque noeud du réseau la fonction à estimer grâce à une interpolation (linéaire ou polynômiale). On a alors

$$\bar{V}(\vec{x}) = \sum_{j=1}^N V_j \varphi_j(\vec{x}), \quad (\text{B.9})$$

où la sommation porte sur les N noeuds du maillage et où $\varphi_j(\vec{x})$ sont des fonctions d'interpolation choisies. \bar{V} est donc totalement déterminé par la connaissance des coefficients V_j ;

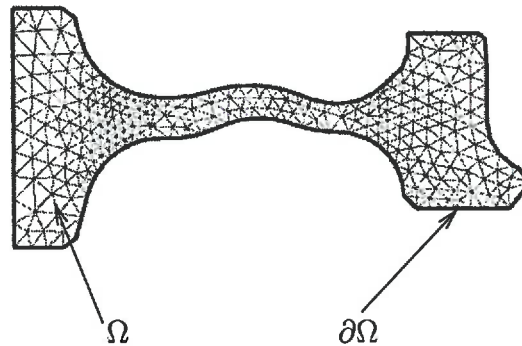


Figure B.2 – Exemple d'un maillage bidimensionnel Ω de frontière $\partial\Omega$. Adapté de George et Saltel (1991).

- ensuite, on construit une formulation intégrale du problème à résoudre (formulation variationnelle, orthogonalisation . . .) et, en appliquant l'approximation de la première étape, on forme un système linéaire représenté matriciellement (voir paragraphe (B.4));
- enfin, on résout le système linéaire ainsi constitué.

B.3 Maillage des domaines

Une phase importante de la méthode des éléments finis et dont dépend la qualité des résultats est le maillage du domaine de simulation.

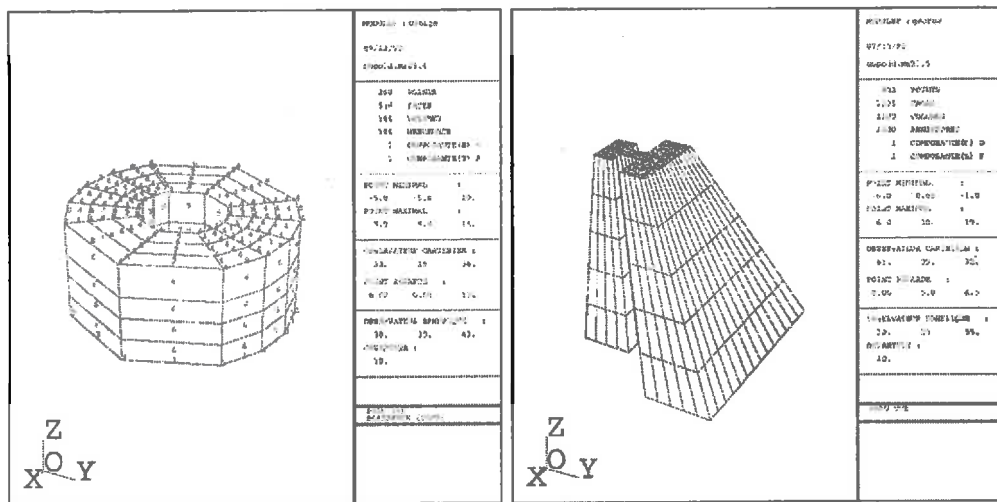
L'avantage de la méthode des éléments finis est que le maillage peut avoir des mailles de taille et de forme quelconques. Ainsi, le maillage peut être adapté exactement au domaine sur lequel est effectué la résolution des équations.

B.3.1 Génération de maillages bidimensionnels

Les maillages bidimensionnels sont construits en spécifiant au mailleur les frontières du domaine de simulation à l'aide de courbes et de segments. Des courbes ou lignes peuvent également être définies à l'intérieur du domaine dans des régions importantes (par exemple à l'interface de deux milieux de propriétés différentes). Ceci permet de définir le squelette du domaine.

Ensuite, il faut entrer le nombre de nœuds à générer sur chaque courbe et chaque ligne. On obtient ainsi une collection de nœuds fixés sur les frontières et à l'intérieur du maillage. Ces points servent alors de base pour la génération de tous les autres nœuds.

Par une méthode de propagation, comme par exemple celle de Voronoï, le mailleur construit l'ensemble des nœuds et forme les facettes du maillage. Ces



(a)

(b)

Figure B.3 – Exemple de maillages obtenus par la méthode d'extrusion. D'après George (1996).

facettes peuvent être de différentes natures suivant la forme du domaine de simulation. On peut introduire ainsi des triangles, des rectangles, des quadrilatères, à côtés droits ou courbes.

Enfin, il est possible de spécifier des références aux éléments du maillages : références de sous-domaine afin de tenir compte de propriétés physiques différentes entre différents éléments du maillage, ou bien références sur les frontières afin d'imposer des conditions aux limites.

B.3.2 Génération de maillages tridimensionnels

La génération des maillages tridimensionnels s'effectue généralement à partir d'un maillage bidimensionnel par la méthode dite d'extrusion (George, 1996). La méthode d'extrusion s'applique aux domaines à topologie cylindrique, c'est-à-dire aux domaines dont la forme peut être décrite par un empilement de couches successives d'un maillage bidimensionnel (figure (B.3)).

Une fois les couches recollées, il est possible de définir des références, de la même façon que pour les maillages bidimensionnels, afin d'obtenir le maillage désiré.

B.4 Construction des matrices élémentaires

Plusieurs formulations ont été proposées pour calculer ces coefficients V_j de l'équation (B.9). Les deux principales, les méthodes de Galerkin et de Ritz, sont exposées dans les paragraphes suivants.

B.4.1 Formulation de Galerkin

La formulation de Galerkin consiste à rendre orthogonal avec chaque fonction φ_i le résidu $R(\vec{x}) = \Delta \bar{V}(\vec{x}) + \frac{\rho(\vec{x})}{\varepsilon(\vec{x})}$. C'est-à-dire

$$\int_{\Omega} R(\vec{x}) \varphi_i(\vec{x}) d\vec{x} = 0. \quad (\text{B.10})$$

En explicitant l'équation (B.10) on obtient (on traite le cas unidimensionnel pour alléger l'écriture ; $\Omega = [x_0; x_1]$)

$$\int_{x_0}^{x_1} \left(\sum_{j=1}^N V_j \varphi_j(x) \right)'' \varphi_i(x) dx = - \int_{x_0}^{x_1} \frac{\rho(x)}{\varepsilon(x)} \varphi_i(x) dx, \quad (\text{B.11})$$

$$\sum_{j=1}^N V_j \int_{x_0}^{x_1} \varphi_j''(x) \varphi_i(x) dx = - \int_{x_0}^{x_1} \frac{\rho(x)}{\varepsilon(x)} \varphi_i(x) dx. \quad (\text{B.12})$$

Après intégration par parties du membre de gauche, on a

$$\sum_{j=1}^N V_j \int_{x_0}^{x_1} \varphi_j'(x) \varphi_i'(x) dx - \left[\sum_{j=1}^N V_j \varphi_j'(x) \varphi_i(x) \right]_{x_0}^{x_1} = \int_{x_0}^{x_1} \frac{\rho(x)}{\varepsilon(x)} \varphi_i(x) dx. \quad (\text{B.13})$$

En adoptant une notation matricielle, on aboutit à

$$\mathbf{A} \cdot \vec{V} = \vec{b}, \quad (\text{B.14})$$

où \mathbf{A} est une matrice $N \times N$ de composantes

$$a_{ij} = \int_{x_0}^{x_1} \varphi_j'(x) \varphi_i'(x) dx. \quad (\text{B.15})$$

\vec{V} est le vecteur dont on cherche à déterminer les composantes : $\vec{V} = [V_1 \dots V_N]^T$, et \vec{b} est le vecteur tel que

$$b_i = \int_{x_0}^{x_1} \frac{\rho(x)}{\varepsilon(x)} \varphi_i(x) dx + \left[\sum_{j=1}^N V_j \varphi_j'(x) \varphi_i(x) \right]_{x_0}^{x_1} \quad (\text{B.16})$$

On est alors en présence d'un système linéaire classique qui peut être résolu par des algorithmes usuels de calcul matriciel (Press *et al.*, 1992).

B.4.2 Formulation de Ritz

La méthode de Ritz utilise la formulation variationnelle de l'équation de Poisson (voir annexe C). L'équation de Poisson, qui permet de calculer le potentiel électrique V , s'écrit (voir paragraphe (A.4.2))

$$\varepsilon(\vec{x}) \Delta V = \varepsilon(\vec{x}) V_{\vec{x}}'' = -\rho(\vec{x}). \quad (\text{B.17})$$

On peut montrer que cette équation est solution de l'équation d'Euler-Lagrange (C.6) pour une fonctionnelle F telle que

$$F(V) = \frac{\varepsilon(\vec{x})}{2} V_{\vec{x}}'^2 - \rho(\vec{x}) V(\vec{x}). \quad (\text{B.18})$$

En effet, on a

$$\frac{\partial F}{\partial V} - \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \frac{\partial F}{\partial V_{\vec{x}}'} = -\rho(\vec{x}) - 2 \frac{\varepsilon(\vec{x})}{2} V_{\vec{x}}'' = -\rho(\vec{x}) - \varepsilon(\vec{x}) V_{\vec{x}}''. \quad (\text{B.19})$$

Et l'on retrouve l'équation de Poisson $\varepsilon(\vec{x}) V_{\vec{x}}'' = -\rho(\vec{x})$.

Ainsi, il est équivalent de résoudre l'équation de Laplace ou bien de minimiser l'intégrale

$$I(V) = \int_{\mathcal{D}} \left(\frac{\varepsilon(x)}{2} V_{\vec{x}}'^2 - \rho(\vec{x}) V(\vec{x}) \right) d\vec{x}.^{(2)} \quad (\text{B.20})$$

⁽²⁾ On peut remarquer que l'énergie électrique présente dans le volume \mathcal{D} s'écrit, en fonction du champ électrique (Bruhat, 1963; Durand, 1964),

$$W = \int_{\mathcal{D}} \varepsilon \frac{E^2}{2} d\tau.$$

Mais l'énergie peut aussi être écrite en fonction de la distribution des sources qui créent le champ électrique :

De façon identique à la méthode de Galerkin, la méthode de Ritz utilise l'approximation de V par \bar{V} (voir paragraphe (B.2)). On a alors, dans le cas unidimensionnel,

$$I(V) = \int_{x_0}^{x_1} \left(\frac{1}{2} V_x'^2 - \frac{\rho(x)}{\varepsilon(x)} V(x) \right) dx \quad (\text{B.21})$$

$$= \int_{x_0}^{x_1} \left(\frac{1}{2} \left(\sum_{j=1}^N V_j \varphi_j'(x) \right)^2 - \frac{\rho(x)}{\varepsilon(x)} \left(\sum_{j=1}^N V_j \varphi_j(x) \right) \right) dx. \quad (\text{B.22})$$

Pour que $I(V)$ soit minimale, il faut que $\frac{\partial I}{\partial V_i} = 0$. Soit :

$$\int_{x_0}^{x_1} \left(\sum_{j=1}^N V_j \varphi_j'(x) \varphi_i'(x) - \frac{\rho(x)}{\varepsilon(x)} \varphi_i(x) \right) dx = 0. \quad (\text{B.23})$$

On aboutit alors à l'équation suivante :

$$\sum_{j=1}^N V_j \int_{x_0}^{x_1} \varphi_j'(x) \varphi_i'(x) dx = \int_{x_0}^{x_1} \frac{\rho(x)}{\varepsilon(x)} \varphi_i(x) dx. \quad (\text{B.24})$$

Ce qui conduit à la même forme matricielle que la méthode de Galerkin mais pour des conditions aux limites nulles (voir équation (B.13)).

$$W = \int_{\mathcal{D}} \rho V d\tau.$$

Donc

$$\int_{\mathcal{D}} \left(\varepsilon \frac{E^2}{2} - \rho V \right) d\tau = 0.$$

Or $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$, soit, avec les notations utilisées : $\vec{E} = -V_{\vec{x}}' \frac{\vec{x}}{|\vec{x}|}$. On a donc

$$\int_{\mathcal{D}} \left(\varepsilon \frac{V_{\vec{x}}'^2}{2} - \rho V \right) d\tau = 0,$$

expression qui rend compte que l'intégrale (B.20) doit être minimale.

Annexe C

Principes variationnels

Les principes variationnels ont été développés afin de rendre extrémales des intégrales de la forme

$$I(u) = \int_{\mathcal{D}} F(\vec{x}, u(\vec{x}), u'_{\vec{x}}(\vec{x})) d\vec{x}. \quad (\text{C.1})$$

u est une fonction qui dépend des coordonnées du vecteur \vec{x} et qui est continue sur le domaine \mathcal{D} . $u'_{\vec{x}}$ sont les dérivées premières de u par rapport au vecteur \vec{x} . Les dérivées première et seconde de u par rapport à \vec{x} doivent également être continues sur \mathcal{D} .

Soit h un petit accroissement tel que $h \in C^1(\mathcal{D})$ et $h(\vec{x}) = 0$ pour $\vec{x} \in \partial\mathcal{D}$ (figure (C.1)). On a alors

$$I(u+h) = \int_{\mathcal{D}} F(\vec{x}, (u+h)(\vec{x}), (u+h)'_{\vec{x}}(\vec{x})) d\vec{x}. \quad (\text{C.2})$$

En effectuant un développement limité au premier ordre on obtient

$$I(u+h) = I(u) + \int_{\mathcal{D}} \frac{\partial F}{\partial u} h d\vec{x} + \int_{\mathcal{D}} \frac{\partial F}{\partial u'} h' d\vec{x} + o(\|h\| + \|h'\|). \quad (\text{C.3})$$

L'étape suivante consiste à intégrer par parties la seconde intégrale et à utiliser la propriété $h = 0$ sur $\partial\mathcal{D}$. On aboutit ainsi à l'expression

$$I(u+h) = I(u) + \int_{\mathcal{D}} \frac{\partial F}{\partial u} h d\vec{x} - \int_{\mathcal{D}} \frac{d}{d\vec{x}} \frac{\partial F}{\partial u'} h d\vec{x} + o(\|h\| + \|h'\|), \quad (\text{C.4})$$

c'est-à-dire

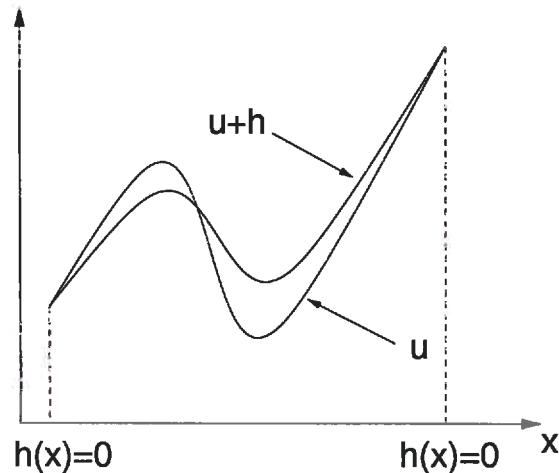


Figure C.1 – Accroissement h de la fonction u pour le calcul des variations avec $h = 0$ sur la frontière du domaine.

$$I(u+h) - I(u) = \int_{\mathcal{D}} \left(\frac{\partial F}{\partial u} - \frac{d}{d\vec{x}} \frac{\partial F}{\partial u'_{\vec{x}}} \right) h(\vec{x}) d\vec{x} + o(\|h\| + \|h'\|). \quad (\text{C.5})$$

La variation de I est nulle si $I(u+h) - I(u) = 0$. Par le lemme de Dubois-Raymond⁽¹⁾, on en déduit qu'il faut

$$\frac{\partial F}{\partial u} - \frac{d}{d\vec{x}} \frac{\partial F}{\partial u'_{\vec{x}}} = 0. \quad (\text{C.6})$$

L'équation (C.6) est appelée équation d'Euler-Lagrange. L'intégrale (C.1) est donc extrémale lorsque la fonction F vérifie l'équation d'Euler-Lagrange (C.6). Pour plus de détails sur les principes variationnels, le lecteur pourra se référer à Bérest (1997).

⁽¹⁾Ce lemme précise que si, $\forall h, \int_a^b f(x)h(x)dx = 0$, alors, $\forall x \in [a; b], f(x) = 0$.

Annexe D

Méthode des moments

La méthode des moments est un algorithme permettant de résoudre des problèmes d'électromagnétisme, en particulier les problèmes de rayonnement en présence d'obstacles.

Le paragraphe suivant expose le problème posé. Puis, après une section présentant l'équation de propagation des ondes (équation d'Helmholtz), est introduit le principe d'équivalence de Rayleigh-Gans qui permet de reformuler mathématiquement l'équation à résoudre. Enfin, le dernier paragraphe expose rapidement l'algorithme de la méthode des moments.

D.1 Problème à résoudre

On considère un volume V_s contenant les sources d'un rayonnement électromagnétique, créant un champ \vec{E}_i , et un objet de volume V_Ω de permittivité ε_Ω (figure (D.1)). Cet objet crée un champ diffracté \vec{E}_d qui se superpose au champ incident. Le but est alors de trouver le champ total \vec{E} , somme de \vec{E}_i et de \vec{E}_d . On a $\vec{D}(\vec{r}) = \varepsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r})$ avec

$$\varepsilon(\vec{r}) = \begin{cases} \varepsilon_\Omega(\vec{r}), & \text{si } \vec{r} \in V_\Omega, \\ \varepsilon_0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (\text{D.1})$$

D.2 Équation d'Helmholtz

On considère tout d'abord une configuration sans objet diffractant. On a donc uniquement une distribution de sources de volume V_s qui rayonnent dans un milieu de permittivité ε_0 . On part de l'équation de Faraday (A.9)

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -i\omega\vec{B}. \quad (\text{D.2})$$

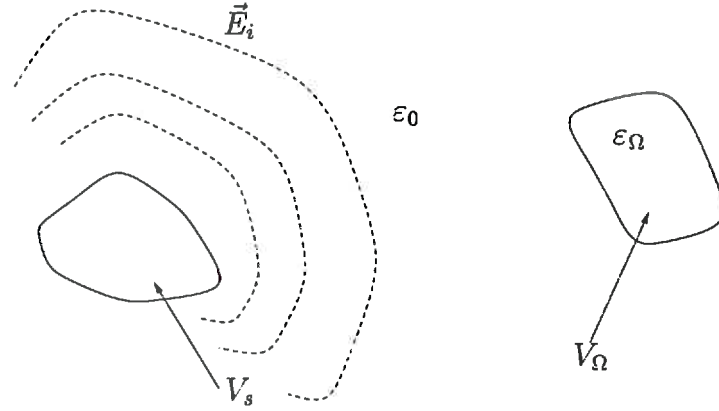


Figure D.1 – Configuration entre un volume V_s rayonnant un champ électromagnétique et un objet diffractant de volume V_Ω et de permittivité ε_Ω .

En prenant le rotationnel de l'équation précédente, il vient

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -i\omega \vec{\nabla} \wedge \vec{B}. \quad (\text{D.3})$$

Or $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ (équation (A.27)) et $\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$ (équation (A.32)). D'où

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \vec{E} - i\omega \mu_0 \vec{J}. \quad (\text{D.4})$$

Par ailleurs, on a, $\forall \vec{A}$,

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{A} = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \Delta \vec{A}. \quad (\text{D.5})$$

Donc

$$\Delta \vec{E} + k^2 \vec{E} = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) + i\omega \mu_0 \vec{J}, \quad (\text{D.6})$$

avec $k^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0$. Mais $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -i\omega \rho$ et $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$ (équations (A.5) et (A.29)). D'où, en éliminant ρ et en explicitant \vec{D} : $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{i}{\omega \varepsilon_0} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}$. On aboutit alors à l'équation d'Helmholtz du champ électrique :

$$\Delta \vec{E} + k^2 \vec{E} = \frac{i}{\omega \varepsilon_0} \left[\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{J}) + k^2 \vec{J} \right]. \quad (\text{D.7})$$

Dont la solution est

$$\vec{E} = \frac{i}{\omega \varepsilon_0} \left[\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot) + k^2 \right] \int_{V_s} \vec{J}(\vec{r}', \omega) G(\vec{r}, \vec{r}', \omega) d\vec{r}', \quad (\text{D.8})$$

avec $G(\vec{r}, \vec{r}', \omega)$ la fonction de Green associée au problème⁽¹⁾. En passant par la dyade de Green⁽²⁾, on obtient

$$\vec{E} = \frac{i}{\omega \varepsilon_0} \int_{V_s} \vec{G}^e(\vec{r}, \vec{r}', \omega) \cdot \vec{J}(\vec{r}', \omega) d\vec{r}'. \quad (\text{D.9})$$

D.3 Principe d'équivalence de Rayleigh-Gans

Le principe d'équivalence de Rayleigh-Gans consiste à considérer l'objet diffractant comme une distribution de courants volumiques. Le problème se résume donc à un problème de rayonnement en présence de deux sources :

- la source V_s , constituée du courant \vec{J} ;

⁽¹⁾ Les fonctions de Green $G(\vec{r}, \vec{r}', \omega)$ sont les solutions des équations

$$\Delta G(\vec{r}, \vec{r}', \omega) + k^2 G(\vec{r}, \vec{r}', \omega) = -\delta(\vec{r} - \vec{r}'),$$

où δ est la distribution de Dirac centrée en \vec{r}' . Pour résoudre une équation du type $\Delta \vec{A}(\vec{r}, \omega) + k^2 \vec{A}(\vec{r}, \omega) = -\vec{S}(\vec{r}, \omega)$, il suffit de remarquer que $\vec{S}(\vec{r}, \omega) = \vec{S} * \delta$ (la distribution de Dirac est l'élément neutre de la convolution), c'est à dire

$$\vec{S}(\vec{r}, \omega) = \int_{V_s} \vec{S}(\vec{r}', \omega) \delta(\vec{r} - \vec{r}') d\vec{r}'.$$

Donc

$$\begin{aligned} \Delta \int_{V_s} G(\vec{r}, \vec{r}', \omega) \vec{S}(\vec{r}', \omega) d\vec{r}' + k^2 \int_{V_s} G(\vec{r}, \vec{r}', \omega) \vec{S}(\vec{r}', \omega) d\vec{r}' &= - \int_{V_s} \delta(\vec{r} - \vec{r}') \vec{S}(\vec{r}', \omega) d\vec{r}' \\ &= -\vec{S}(\vec{r}, \omega). \end{aligned}$$

Et finalement $\vec{A}(\vec{r}, \omega) = \int_{V_s} G(\vec{r}, \vec{r}', \omega) \vec{S}(\vec{r}', \omega) d\vec{r}'$.

⁽²⁾ La dyade de Green est la solution de l'équation

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{G} - k^2 \vec{G} = -\vec{I} \delta(\vec{r} - \vec{r}').$$

C'est à dire

$$\vec{G}^e(\vec{r}, \vec{r}', \omega) = \left[\vec{I} k^2 + \vec{\nabla} \vec{\nabla} \right] G(\vec{r}, \vec{r}', \omega).$$

– la source V_Ω , constituée du courant \vec{J}_Ω .

On a alors

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H}(\vec{r}) - i\omega\varepsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}) = \vec{J}(\vec{r}), \quad (\text{D.10})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H}(\vec{r}) - i\omega\varepsilon_0(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}) - i\omega[\varepsilon(\vec{r}) - \varepsilon_0]\vec{E}(\vec{r}) = \vec{J}(\vec{r}). \quad (\text{D.11})$$

D'où

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H}(\vec{r}) - i\omega\varepsilon_0\vec{E}(\vec{r}) = \vec{J}(\vec{r}) + \vec{J}_\Omega(\vec{r}), \quad (\text{D.12})$$

avec

$$\vec{J}_\Omega(\vec{r}) = i\omega[\varepsilon(\vec{r}) - \varepsilon_0]\vec{E}(\vec{r}). \quad (\text{D.13})$$

On remarque alors que l'équation (D.12) est semblable à l'équation (A.32) mais pour une distribution de courant $\vec{J}_{total}(\vec{r})$ égale à $\vec{J}(\vec{r}) + \vec{J}_\Omega(\vec{r})$. La solution de cette équation se déduit directement de (D.8) :

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{i}{\omega\varepsilon_0} \left[\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot) + k^2 \right] \int_{V_s + V_\Omega} \vec{J}_{total}(\vec{r}', \omega) G(\vec{r}, \vec{r}', \omega) d\vec{r}'. \quad (\text{D.14})$$

Or

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_i(\vec{r}) + \vec{E}_d(\vec{r}). \quad (\text{D.15})$$

D'où

$$\vec{E}_i(\vec{r}) = \frac{i}{\omega\varepsilon_0} \left[\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot) + k^2 \right] \int_{V_s} \vec{J}(\vec{r}', \omega) G(\vec{r}, \vec{r}', \omega) d\vec{r}', \quad (\text{D.16})$$

$$\vec{E}_d(\vec{r}) = \frac{i}{\omega\varepsilon_0} \left[\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot) + k^2 \right] \int_{V_\Omega} [\varepsilon(\vec{r}') - \varepsilon_0] \vec{E}(\vec{r}') G(\vec{r}, \vec{r}', \omega) d\vec{r}'. \quad (\text{D.17})$$

Le champ électrique \vec{E} est donc totalement déterminé par le système d'équations (D.16) et (D.17). Ce système est cependant difficile à résoudre car le champ \vec{E} apparaît à la fois dans le membre de gauche et dans le membre de droite de l'équation (D.15) (en effet, \vec{E}_d dépend de \vec{E} d'après l'équation (D.17)).

D.4 Mise en œuvre de la méthode

La méthode des moments s'applique à la résolution des systèmes linéaires de la forme

$$\mathcal{L}f = s, \quad (\text{D.18})$$

où \mathcal{L} est l'opérateur linéaire, s le second membre de l'équation et f la solution recherchée. Dans le cas de l'approximation de Rayleigh-Gans, on a

$$\vec{E} = \vec{E}_i + \frac{i}{\omega\epsilon_0} \left[\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot) + k^2 \right] \int_{V_\Omega} [\epsilon(\vec{r}') - \epsilon_0] \vec{E}(\vec{r}') G(\vec{r}, \vec{r}', \omega) d\vec{r}', \quad (\text{D.19})$$

$$\vec{E} - \frac{i}{\omega\epsilon_0} \left[\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot) + k^2 \right] \int_{V_\Omega} [\epsilon(\vec{r}') - \epsilon_0] \vec{E}(\vec{r}') G(\vec{r}, \vec{r}', \omega) d\vec{r}' = \vec{E}_i. \quad (\text{D.20})$$

D'où

$$\mathcal{L} = \vec{I} \bullet - \frac{i}{\omega\epsilon_0} \left[\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot) + k^2 \right] \int_{V_\Omega} i\omega [\epsilon(\vec{r}') - \epsilon_0] G(\vec{r}, \vec{r}', \omega) \bullet d\vec{r}', \quad (\text{D.21})$$

et

$$\begin{cases} f = \vec{E}(\vec{r}), \\ s = \vec{E}_i(\vec{r}). \end{cases} \quad (\text{D.22})$$

L'intégrale est alors discrétisée en considérant le volume V_Ω comme un ensemble de cellules parallélépipédiques. Ensuite, il est possible de calculer le champ total $\vec{E}(\vec{r})$ par une méthode itérative à partir d'une valeur initiale $\vec{E}_0(\vec{r})$ du champ électrique.

Annexe E

Réseaux neuronaux

Ce chapitre expose les développements théoriques de la méthode des réseaux de neurones.

Après quelques généralités et un court aperçu des différents types de réseau, nous présentons le réseau implémenté dans cette étude ainsi que quelques algorithmes couramment utilisés.

E.1 Généralités

Un réseau de neurones artificiels, ou réseau neuromimétique, est un système de calcul composé d'unités élémentaires, les neurones, reliées entre elles par des *liens synaptiques* (Jodouin, 1994a,b). Chaque neurone du réseau est caractérisé par son état, ou *activation* a , déterminé par l'état des neurones situés en amont ainsi que par les *poids* des liens synaptiques w aboutissant à ce neurone (figure (E.1)) :

$$a = f \left(\sum_{i=1}^n a_i w_i \right). \quad (\text{E.1})$$

f est appelée la *fonction d'activation*.

Un réseau de neurones comporte une couche d'entrée, un ensemble de neurones cachés regroupés en une ou plusieurs couches cachées, et une couche de neurones de sortie (figure (E.2)).

Lorsqu'un vecteur de données est présenté au niveau de la couche d'entrée, les neurones des couches successives sont activés selon l'équation (E.1) jusqu'à la couche de sortie où l'on récupère un résultat sous la forme d'un vecteur. Du fait de la connectivité du réseau, le résultat obtenu dépend fortement de la valeur des poids synaptiques. Il est donc nécessaire que la valeur des poids synaptiques soit optimisée afin que le réseau puisse résoudre le problème qui lui est soumis. Ceci est réalisé lors de la phase d'*apprentissage*, au cours de laquelle les poids sont

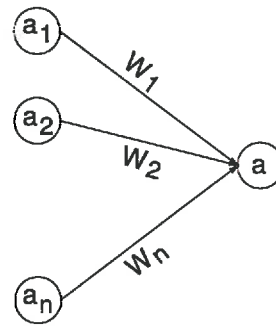


Figure E.1 – Liens entre un neurone et les neurones situés en amont.

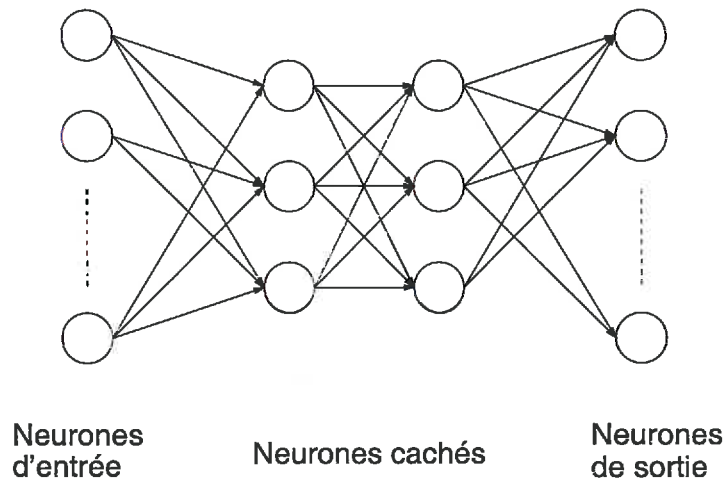


Figure E.2 – Architecture d'un réseau de neurones à couches

modifiés jusqu'à avoir une précision suffisante sur les neurones de sortie. Dans le cas d'un apprentissage *supervisé* (cas le plus utilisé), l'algorithme effectue la différence entre le vecteur de sortie calculé par le réseau et le vecteur de sortie désiré (fourni par l'utilisateur). Ainsi, grâce à une règle d'apprentissage, les poids sont modifiés en fonction de cette différence jusqu'à obtenir l'erreur la plus faible possible.

Une fois les poids synaptiques calculés, le réseau est entièrement déterminé et il peut être utilisé pour résoudre le problème qui lui est soumis ; c'est la phase de *généralisation*.

E.2 Les différents types de réseau

Une multitude de réseaux de neurones a été inventée pour traiter au mieux les problèmes rencontrés. Sans entrer dans des détails techniques et historiques (on pourra se référer à Blayo et Verleysen (1996) ou bien à Hristev (1998)), les réseaux les plus utilisés peuvent être classés en deux catégories :

- les réseaux à couches, qui ont été développés en premier. Leur architecture est simple : la propagation s'effectue successivement de la couche d'entrée à la couche de sortie, en passant par toutes les couches cachées. Les plus connus sont le Perceptron Multi-Couche, les réseaux RBF. Leur domaine d'application est assez large : estimation, aide à la décision, prévision de séries temporelles, classification, reconnaissance de forme ;
- les réseaux récurrents sont d'une architecture plus complexe car les liens synaptiques peuvent être bouclés. On peut citer les réseaux de Hopfield, de Kohonen, les machines de Boltzmann. Ils sont surtout utilisés en reconnaissance de forme et en classification.

E.3 Les réseaux RBF

Le réseau utilisé pour l'inversion des données de la simulation est un réseau de type RBF (*Radial Basis Functions*). Ce type de réseau a été choisi car il a la particularité d'être bien adapté à l'estimation et l'approximation de fonctions (Poggio et Girosi, 1990).

E.3.1 Principe des réseaux RBF

Dans le cadre de cette étude, on recherche une approximation de la fonction f liant la permittivité ε d'un milieu à deux différences de potentiel V_1 et V_2 : $\varepsilon = f(V_1, V_2)$.

Le principe est de décomposer cette fonction inconnue f sur une base de fonctions φ_i choisies, i variant de 1 à N . Formellement, on a

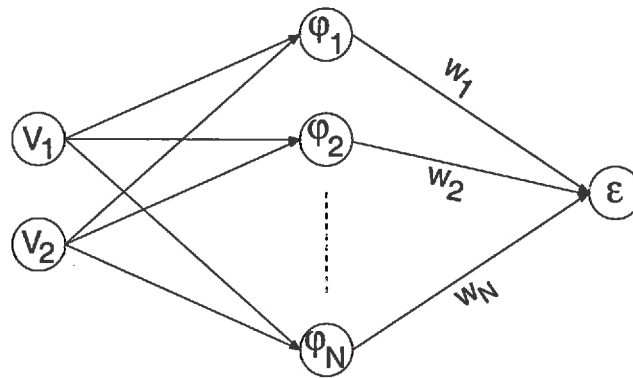
$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N w_i \varphi_i(V_1, V_2) = \sum_{i=1}^N w_i \varphi_i(\mathbf{V}), \quad (\text{E.2})$$

où les *poïds* w_i sont à déterminer connaissant les fonctions φ_i (figure (E.3)). Les réseaux RBF sont donc des réseaux à trois couches (*i.e.* à une seule couche cachée).

Supposons que la simulation nous ait fourni P valeurs ε_p correspondant à P couples $(V_{1,p}, V_{2,p})$. On construit donc le vecteur $\boldsymbol{\varepsilon}$, de dimension P , et la matrice Φ , de dimension $P \times N$, tels que

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = [\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_P], \quad (\text{E.3})$$

$$\boldsymbol{\phi}_p^T = [\varphi_1(\mathbf{V}_p), \dots, \varphi_N(\mathbf{V}_p)] \quad \text{pour tout } p \in [1 : P], \quad (\text{E.4})$$



Neurones
d'entrée

Neurones cachés

Neurone
de sortie

Figure E.3 – Architecture du réseau RBF utilisé pour l'inversion des données de la simulation.

et

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi_1^T \\ \vdots \\ \phi_P^T \end{pmatrix}. \quad (\text{E.5})$$

On a alors

$$\varepsilon = \Phi w, \quad (\text{E.6})$$

où w est le vecteur des poids, de dimension N . Ce vecteur est alors obtenu en passant par la pseudo-inverse de Φ

$$w = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \varepsilon, \quad (\text{E.7})$$

en supposant que $(\Phi^T \Phi)$ est inversible⁽¹⁾. Cette formule correspond à la solution obtenue par la méthode des moindres carrés (Tarantola, 1987).

Choix des fonctions φ_i

D'après l'équation (E.7), les poids w_i sont entièrement déterminés par les fonctions φ_i . Dans le cas des réseaux RBF, ces fonctions sont radiales et très souvent choisies sous forme de noyaux gaussiens :

⁽¹⁾Ce qui est vrai dans presque tous les cas.

$$\varphi_i(\mathbf{V}_p) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left\|\frac{\mathbf{V}_p - \mathbf{c}_i}{\sigma_i}\right\|^2\right). \quad (\text{E.8})$$

Les noyaux gaussiens sont souvent implémentés car ils offrent une grande souplesse d'utilisation; par exemple, en modifiant la valeur de σ_i , on peut très facilement étendre ou restreindre le domaine d'influence du noyau.

D'autres fonctions radiales peuvent être considérées pour des besoins plus précis (Hristev, 1998) ($x = \|\mathbf{V}_p - \mathbf{c}_i\|$) :

$$\varphi_i(x) = (x^2 + \sigma_i^2)^{-\alpha}, \alpha > 0, \quad (\text{E.9})$$

$$\varphi_i(x) = x^2 \log x, \quad (\text{E.10})$$

$$\varphi_i(x) = \sqrt{x^2 + \sigma_i^2}. \quad (\text{E.11})$$

Calcul des poids w_i

Outre le calcul direct donné par la formule (E.7), il existe plusieurs méthodes pour obtenir la valeurs des poids w_i . Les deux méthodes les plus utilisées sont la technique de descente de gradient et les méthodes de régularisation.

Méthode de descente de gradient. Considérons l'erreur E entre la valeur attendue de la permittivité et la valeur calculée par le réseau :

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P [y(\mathbf{V}_p) - \varepsilon_p]^2, \quad (\text{E.12})$$

où $y(\mathbf{V}_p)$ est la sortie calculée par le réseau et ε_p la valeur réelle qui correspond à \mathbf{V}_p :

$$y(\mathbf{V}_p) = \sum_{i=1}^N w_i \varphi_i(\mathbf{V}_p). \quad (\text{E.13})$$

La fonction d'erreur qui à w fait correspondre E est donc minimale lorsque

$$\frac{\partial E}{\partial w_i} = 0. \quad (\text{E.14})$$

L'algorithme de descente de gradient se déduit intuitivement de cette équation :

$$w_i(t) = w_i(t-1) - \eta \frac{\partial E(t-1)}{\partial w_i(t-1)}, \quad (\text{E.15})$$

où η est un paramètre d'apprentissage arbitraire ($\eta > 0$). Ainsi, l'apprentissage est itératif : la valeur des poids w_i à l'instant t est déterminée par celle à l'instant $t-1$.

Cette formule se comprend aisément à l'aide d'un graphique (figure (E.4)) : dans le cas 1, la dérivée de E est positive, donc $w_i(t) < w_i(t-1)$ et ainsi on se déplace vers un minimum de la fonction E ; dans le cas 2, $\frac{\partial E}{\partial w_i} < 0$ et donc $w_i(t) > w_i(t-1)$ afin de se diriger vers le minimum.

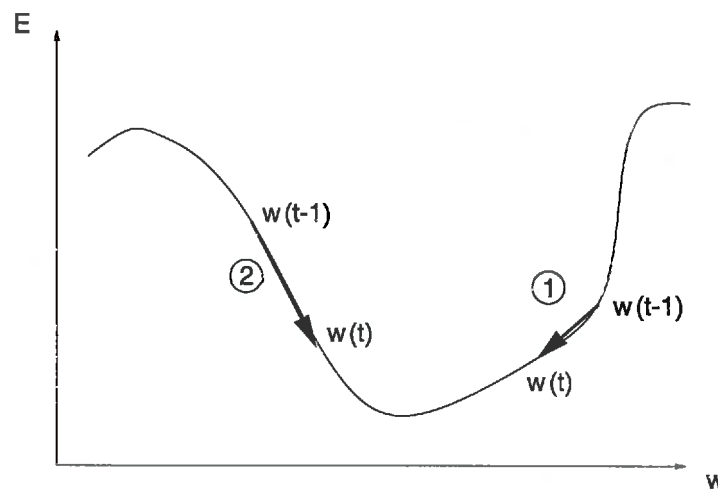


Figure E.4 – Illustration de la méthode de descente de gradient.

En explicitant la dérivée de la fonction E à l'aide de la formule (E.12), on obtient l'algorithme d'ajustement des poids :

$$w_i \leftarrow w_i - \eta \sum_{p=1}^P [y(\mathbf{V}_p) - \varepsilon_p] \varphi_i(\mathbf{V}_p). \quad (\text{E.16})$$

Si la valeur de η n'est pas trop grande, l'algorithme converge et la fonction E atteint un minimum. Sinon, il peut ne pas y avoir convergence. Par contre, il est possible que l'algorithme aboutisse dans un minimum local de la fonction E dans le cas où la valeur de η soit trop petite. Il est donc nécessaire de tester plusieurs valeurs de η pour obtenir des résultats corrects.

Méthode de régularisation. Les poids w_i peuvent également être calculés par une méthode de régularisation (Orr, 1996). Formons la fonction coût C :

$$C = \sum_{p=1}^P [y(\mathbf{V}_p) - \varepsilon_p]^2 + \sum_{j=1}^N \lambda_j w_j^2, \quad (\text{E.17})$$

où les λ_j sont les paramètres de régularisation ($\lambda_j > 0$). En dérivant la fonction C par rapport au j -ième poids w_j , on obtient

$$\frac{\partial C}{\partial w_j} = 2 \sum_{p=1}^P [y(\mathbf{V}_p) - \varepsilon_p] \frac{\partial y(\mathbf{V}_p)}{\partial w_j} + 2\lambda_j w_j. \quad (\text{E.18})$$

Or d'après l'équation (E.13),

$$\frac{\partial y(\mathbf{V}_p)}{\partial w_j} = \varphi_j(\mathbf{V}_p). \quad (\text{E.19})$$

D'où, en égalant l'équation (E.18) à zéro,

$$\sum_{p=1}^P y(\mathbf{V}_p) \varphi_j(\mathbf{V}_p) + \lambda_j w_j = \sum_{p=1}^P \varepsilon_p \varphi_j(\mathbf{V}_p). \quad (\text{E.20})$$

En passant en notation matricielle on obtient

$$\phi_j^T \mathbf{y} + \lambda_j w_j = \phi_j^T \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (\text{E.21})$$

avec $\boldsymbol{\varepsilon}$ tel que défini par la formule (E.3) et

$$\phi_j = \begin{pmatrix} \varphi_j(\mathbf{V}_1) \\ \vdots \\ \varphi_j(\mathbf{V}_p) \end{pmatrix}, \quad (\text{E.22})$$

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y(\mathbf{V}_1) \\ \vdots \\ y(\mathbf{V}_p) \end{pmatrix}. \quad (\text{E.23})$$

En regroupant les indices j , on obtient

$$\begin{pmatrix} \phi_1^T \mathbf{y} \\ \vdots \\ \phi_N^T \mathbf{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \lambda_1 w_1 \\ \vdots \\ \lambda_N w_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_1^T \boldsymbol{\varepsilon} \\ \vdots \\ \phi_N^T \boldsymbol{\varepsilon} \end{pmatrix}. \quad (\text{E.24})$$

Soit, d'une façon plus concise,

$$\Phi^T \mathbf{y} + \Lambda \mathbf{w} = \Phi^T \boldsymbol{\varepsilon} \quad (\text{E.25})$$

avec

$$\Phi = \begin{pmatrix} \varphi_1(\mathbf{V}_1) & \cdots & \varphi_N(\mathbf{V}_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_1(\mathbf{V}_P) & \cdots & \varphi_N(\mathbf{V}_P) \end{pmatrix}, \quad (\text{E.26})$$

et

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_N \end{pmatrix}. \quad (\text{E.27})$$

Or

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{w}, \quad (\text{E.28})$$

d'où, en reprenant l'équation matricielle (E.25),

$$\Phi^T \boldsymbol{\varepsilon} = \Phi^T \mathbf{y} + \Lambda \mathbf{w}, \quad (\text{E.29})$$

$$= \Phi^T \Phi \mathbf{w} + \Lambda \mathbf{w}, \quad (\text{E.30})$$

$$= (\Phi^T \Phi + \Lambda) \mathbf{w}. \quad (\text{E.31})$$

Et finalement

$$\mathbf{w} = (\Phi^T \Phi + \Lambda)^{-1} \Phi^T \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (\text{E.32})$$

Le vecteur \mathbf{w} des poids synaptiques est alors totalement défini. Deux cas particuliers existent :

1. si $\Lambda = \lambda \mathbf{I}$, c'est-à-dire si tous les λ sont identiques, l'équation (E.32) devient l'équation de régularisation standard ;
2. si tous les λ sont nuls, on retrouve l'équation (E.7) correspondant à la méthode des moindres carrés.

E.3.2 Optimisation des réseaux RBF

Quelle que soit la fonction radiale utilisée, la difficulté est de trouver un compromis entre le nombre N de fonctions à considérer, l'emplacement des centres \mathbf{c}_i et la largeur des gaussiennes σ_i . Dans le cas de réseaux non optimisés, tous les paramètres sont fixés à l'avance, mais plusieurs algorithmes permettent de les optimiser.

Limitation du nombre de fonctions

Algorithme d'agrégation. La première solution consiste à limiter le nombre de noyaux gaussiens du réseau en regroupant des points d'apprentissage et en ne considérant qu'un seul noyau par groupe (Gabrijel et Dobnikar, 1997). Cet algorithme est utilisé avant l'apprentissage du réseau de sorte que le nombre de fonctions est fixé une fois pour toutes.

Algorithme de *forward selection*. Un autre type d'algorithme utilisé est l'algorithme de *forward selection*. Il consiste à partir d'un réseau constitué d'une seule base. Puis d'autres bases sont ajoutées une à une, celles ajoutées en premier étant celles qui font décroître le plus l'erreur du réseau (équation (E.12)). Le processus est arrêté lorsque l'estimation de l'erreur du réseau sur les données de généralisation augmente. Ce type d'algorithme, dont la formulation n'est pas immédiate, est décrit en détail dans Orr (1996).

Modification du nombre de fonctions au cours de l'apprentissage. Les autres solutions ont comme principe d'optimiser le nombre de fonctions radiales au cours de l'apprentissage du réseau. Ces techniques sont connues sous le nom de techniques d'élagage (*pruning techniques*) (Hristev, 1998). Elles mettent en jeu des algorithmes de régularisation (Orr, 1995), ou bien des méthodes plus abouties faisant appel à la théorie de l'information comme par exemple la technique MDL (*Minimum Description Length*) (Hinton et van Camp, 1993; Leonardis et Bishorf, 1998).

Optimisation des écarts-types et de la position des centres

Méthode de descente de gradient. Les paramètres \mathbf{c}_i et σ_i peuvent être optimisés par le même algorithme que celui présenté pour le calcul des poids w_i . Partant de la fonction d'erreur E (équation (E.12)), et après dérivation par rapport à \mathbf{c}_i (respectivement σ_i), on obtient les formules d'ajustement des paramètres :

$$\mathbf{c}_i(t+1) = \mathbf{c}_i(t) - \eta_1 \frac{\partial E(t)}{\partial \mathbf{c}_i(t)}, \quad (\text{E.33})$$

$$\sigma_i(t+1) = \sigma_i(t) - \eta_2 \frac{\partial E(t)}{\partial \sigma_i(t)}, \quad (\text{E.34})$$

où η_1, η_2 sont les paramètres d'apprentissage arbitraires. En explicitant les dérivées partielles de E , on obtient

$$\mathbf{c}_i \leftarrow \mathbf{c}_i - \eta_1 \sum_{p=1}^P [y(\mathbf{V}_p) - \varepsilon_p] w_i \varphi_i(\mathbf{V}_p) \frac{\mathbf{V}_p - \mathbf{c}_i}{\sigma_i^2}, \quad (\text{E.35})$$

$$\sigma_i \leftarrow \sigma_i - \eta_2 \sum_{p=1}^P [y(\mathbf{V}_p) - \varepsilon_p] w_i \varphi_i(\mathbf{V}_p) \frac{\|\mathbf{V}_p - \mathbf{c}_i\|^2}{\sigma_i^3}. \quad (\text{E.36})$$

Méthode de régularisation. Un algorithme de régularisation, identique à celui exposé précédemment, peut également être utilisé pour ajuster la largeur des noyaux gaussiens (Orr, 1998). Cependant, la mise en œuvre d'un tel algorithme est assez délicate et constitue un travail de recherche à part entière.

Liste des figures

Liste des figures

1.1	Distribution de l'eau dans les différents organes d'une plante de blé pour trois stades de développement ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$). D'après Ph. Huet, communication personnelle.	14
1.2	Variation temporelle de l'eau dans les épis de blé (a) et de maïs (b). 15	
1.3	Relations entre contenu en eau et biomasse.	16
1.4	Comparaison des masses d'eau et de matière sèche d'une plante, pour une masse d'eau ramenée à 100 grammes. La plante peut tolérer une perte de 25% de sa masse d'eau sans être irréversiblement atteinte. Adapté de Levitt (1972).	17
2.1	Spectre électromagnétique.	25
2.2	Utilisation de la radiométrie pour l'estimation de la biomasse des cultures et du statut hydrique des plantes.	29
2.3	Application de la radiométrie infrarouge thermique en agrométéorologie.	30
2.4	Application de la radiométrie hyperfréquence en agrométéorologie. 32	
2.5	Application des radars en agrométéorologie.	33
2.6	Épaisseur d'eau équivalente estimée avec les cornets micro-ondes au cours d'une journée. Mesures effectuées à deux altitudes d'une culture de sarrasin. D'après Gosse et de Parcevaux (1970).	34
2.7	Exemple de sonde capacitive utilisée pour l'estimation du contenu en eau de la végétation.	36
3.1	Exemple d'utilisation de la méthode électrostatique pour des études archéologiques	41
3.2	Schéma simplifié du quadripôle. Vue de dessus.	42
3.3	Schéma du quadripôle <i>in situ</i>	43
3.4	Schéma électronique du quadripôle.	44
3.5	Comparaison entre la mesure et la simulation par la méthode des moments de la réponse du quadripôle en présence d'un cube diélectrique. Adapté de Féchant (1996).	48
3.6	Mesures effectuées sur un couvert de blé avec le prototype de quadripôle électrostatique. Adapté de Féchant (1996).	49

4.1	Schéma du quadripôle placé dans la végétation (échelle non respectée).	58
4.2	Section verticale du maillage tridimensionnel. Sont visibles dans la strate des épis une électrode d'injection et une électrode de réception.	59
4.3	Section verticale du maillage tridimensionnel dans le cas où ne sont considérés que l'air et le sol.	60
4.4	Exemples de maillages utilisés pour simuler différents dispositifs multipôles.	61
4.5	Différence de potentiel entre les électrodes de réception en fonction du rayon des électrodes.	65
4.6	Influence du sol sur la mesure pour différentes altitudes du quadripôle.	67
4.7	Différence de potentiel entre les électrodes de réception en fonction de la permittivité des épis pour plusieurs permittivités des tiges.	69
4.8	Différence de potentiel entre les électrodes de réception en fonction de la permittivité des épis pour plusieurs permittivités des tiges. Cas d'appareils composés de deux paires d'électrodes de réception, l'une dans la strate des épis et l'autre dans la strate des tiges.	70
4.9	Différence de potentiel entre les électrodes de réception en fonction de la permittivité des épis pour plusieurs permittivités des tiges. Cas d'appareils composés de deux paires d'électrodes de réception, l'une dans la strate des épis et l'autre dans l'air.	72
4.10	Différence de potentiel entre les électrodes de réception en fonction de la permittivité des épis pour plusieurs permittivités des tiges. Cas d'un appareil composé de deux paires d'électrodes de réception placées au même niveau dans la strate des épis (figure (4.4(a))).	72
5.1	Comparaison entre la permittivité exacte des épis et la permittivité estimée par régression non linéaire pour plusieurs modèles.	74
5.2	Comparaison entre les résidus réduits et les permittivités estimées par le modèle (d) du tableau (5.1).	75
5.3	Évolution de l'erreur E du réseau sur les données d'apprentissage en fonction du nombre d'itérations.	78
5.4	Résultats de l'inversion obtenus par la méthode de descente de gradient.	79
5.5	Évolution de l'erreur E du réseau sur les données d'apprentissage en fonction du nombre d'itérations dans le cas de fonctions moins larges que sur la figure (5.3).	80
5.6	Résultats de l'inversion par la méthode de descente de gradient. Cas de fonctions de base plus étroites que pour les figures (5.4(a)) et (5.4(b)).	80
5.7	Résultats de l'inversion obtenus par la méthode d'agrégation et de descente de gradient.	82

5.8	Comparaison entre la permittivité exacte des épis et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones par la méthode des moindres carrés.	83
5.9	Résultats de l'inversion par la méthode de <i>forward selection</i> dans le cas du dispositif multipôle ayant toutes les électrodes dans la strate des épis.	85
5.10	Comparaison entre la permittivité exacte des épis et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones par la méthode de <i>forward selection</i> . Dispositif multipôle ayant une paire d'électrodes de réception dans la strate des tiges.	87
5.11	Comparaison entre la permittivité exacte des épis et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones par la méthode de <i>forward selection</i> . Dispositifs multipôles ayant une paire d'électrodes de réception dans l'air libre.	88
5.12	Comparaison entre la permittivité exacte des tiges et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones par la méthode de <i>forward selection</i> . Dispositif multipôle avec la deuxième paire d'électrodes de réception sous les électrodes d'injection.	89
5.13	Comparaison entre la permittivité exacte des tiges et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones par la méthode de <i>forward selection</i> . Dispositif multipôle ayant une paire d'électrodes de réception dans la strate des tiges.	90
5.14	Comparaison entre la permittivité exacte des tiges et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones par la méthode de <i>forward selection</i> . Dispositifs multipôles ayant une paire d'électrodes de réception dans l'air libre.	90
5.15	Comparaison entre la permittivité exacte des épis et la permittivité estimée grâce au réseau de neurones par la méthode de <i>forward selection</i> . Estimation réalisée sur des données bruitées et pour le dispositif multipôle ayant une paire d'électrodes de réception au-dessus des électrodes d'injection.	92
6.1	Vue générale du brancard supportant les électrodes.	97
6.2	Représentation des systèmes d'injection et de réception.	100
6.3	Vue rapprochée des électrodes d'injection et de réception.	100
6.4	Évolution de la teneur en eau des épis et des tiges du blé au cours du temps.	101
6.5	Mesures des composantes en quadrature effectuées au multipôle en fonction des contenus en eau des épis et des tiges.	106
6.6	Mesures des composantes en phase effectuées au multipôle en fonction des contenus en eau des épis et des tiges.	107

7.1	Évolution au cours du temps du contenu en eau des épis de blé et de la différence de potentiel mesurée avec le dispositif multipôle. Mise en évidence de la fin du palier hydrique.	112
7.2	Comparaison entre le contenu en eau des plantes estimé par la méthode gravimétrique et le contenu en eau des plantes calculé à partir des modules des deux différences de potentiel mesurées avec le dispositif multipôle.	115
7.3	Comparaison entre le contenu en eau des épis estimé par la méthode destructive et le contenu en eau des épis calculé à partir des modules des deux différences de potentiel mesurées avec le dispositif multipôle.	119
7.4	Comparaison entre le contenu en eau des tiges estimé par la méthode destructive et le contenu en eau des tiges calculé à partir du module de la différence de potentiel V_1 mesurée avec le dispositif multipôle.	119
7.5	Comparaison entre le contenu en eau des plantes estimé par la méthode destructive et le contenu en eau des plantes calculé à partir des différences de potentiel mesurées avec le quadripôle. . .	122
A.1	Capacité d'un condensateur en fonction du matériau présent entre les armatures.	142
B.1	Illustration de la méthode des différences finies.	148
B.2	Exemple d'un maillage bidimensionnel Ω de frontière $\partial\Omega$. Adapté de George et Saltel (1991).	150
B.3	Exemple de maillages obtenus par la méthode d'extrusion. D'après George (1996).	151
C.1	Accroissement h de la fonction u pour le calcul des variations avec $h = 0$ sur la frontière du domaine.	156
D.1	Configuration entre un volume V_s rayonnant un champ électromagnétique et un objet diffractant de volume V_Ω et de permittivité ϵ_Ω	158
E.1	Liens entre un neurone et les neurones situés en amont.	164
E.2	Architecture d'un réseau de neurones à couches	164
E.3	Architecture du réseau RBF utilisé pour l'inversion des données de la simulation.	166
E.4	Illustration de la méthode de descente de gradient.	168

Liste des tableaux

Liste des tableaux

4.1	Variations absolue et relative de la composante en phase des différences de potentiel pour l'ensemble des permittivités complexes entrées dans les simulations. Valeurs en fonction de l'altitude des électrodes au-dessus du sol.	66
4.2	Variations absolue et relative de la composante en quadrature des différences de potentiel dans le cas où l'on tient compte ou non de la conductivité du sol. Valeurs en fonction de l'altitude des électrodes au-dessus du sol.	66
4.3	Analyse de variance : influence de la permittivité des épis, des tiges et du sol sur les différences de potentiel V_1 et V_2 (F_o : coefficient de Fisher ; $\Pr(F > F_o)$: probabilité pour que $F > F_o$).	68
5.1	Performance comparée des différents modèles de régression.	75
5.2	Performance comparée entre la meilleure régression et la méthode de <i>forward selection</i> pour le dispositif multipôle ayant toutes les électrodes dans la strate des épis.	84
5.3	Performance des estimations de la permittivité des épis pour les différents dispositifs multipôles. Les variances dans chaque cellule sont respectivement la variance sur les données d'apprentissage et la variance sur les données de généralisation.	87
5.4	Performance des estimations de la permittivité des tiges pour les différents dispositifs multipôles. Les variances dans chaque cellule sont respectivement la variance sur les données d'apprentissage et la variance sur les données de généralisation.	89
6.1	Effet du contenu en eau des épis et des tiges, du contenu en matière sèche des épis et des tiges, sur les différences de potentiel V_1 et V_2 (F_o : coefficient de Fisher ; $\Pr(F > F_o)$: probabilité d'avoir $F > F_o$; ** : significatif au niveau $\alpha=0,01$; ^{NS} : non significatif).	108
6.2	Exemple de mesures montrant l'indépendance de la différence de potentiel vis-à-vis de la teneur en eau des épis de blé.	109

- 7.1 Corrélations entre les contenus en eau estimés par la méthode gravimétrique et ceux estimés à partir des mesures de différence de potentiel (r^2 : coefficient de détermination; σ : écart-type sur l'estimation du contenu en eau; a : coefficient directeur de la droite de régression; b : ordonnée à l'origine; σ_a et σ_b : écarts-types sur a et b ; n : nombre d'observations). 114
- 7.2 Analyse de variance mettant en évidence les variables explicatives du contenu en eau des épis et du contenu en eau des tiges (F_o : coefficient de Fisher; $\Pr(F > F_o)$: probabilité d'avoir $F > F_o$; ** : significatif au niveau $\alpha=0,01$; ^{NS} : non significatif). 116
- 7.3 Corrélations entre le contenu en eau des épis estimé par la méthode gravimétrique et celui estimé à partir des mesures de différence de potentiel (r^2 : coefficient de détermination; σ : écart-type sur l'estimation du contenu en eau; a : coefficient directeur de la droite de régression; b : ordonnée à l'origine; σ_a et σ_b : écarts-types sur a et b ; n : nombre d'observations). 118
- 7.4 Corrélations entre le contenu en eau des tiges estimé par la méthode gravimétrique et celui estimé à partir des mesures de différence de potentiel (r^2 : coefficient de détermination; σ : écart-type sur l'estimation du contenu en eau; a : coefficient directeur de la droite de régression; b : ordonnée à l'origine; σ_a et σ_b : écarts-types sur a et b ; n : nombre d'observations). 118
- 7.5 Analyse de variance montrant que le contenu en eau des épis et des tiges des plantes situées hors des placettes ont une influence sur les mesures (F_o : coefficient de Fisher; $\Pr(F > F_o)$: probabilité d'avoir $F > F_o$; ** : significatif au niveau $\alpha=0,01$; * : significatif au niveau $\alpha=0,05$; ^{NS} : non significatif). 121
- 7.6 Corrélations entre les contenus en eau estimés par la méthode gravimétrique et ceux calculés à partir des mesures de différence de potentiel. Identification des résultats pour les trois classes considérées (r^2 : coefficient de détermination; σ : écart-type sur l'estimation du contenu en eau; a : coefficient directeur de la droite de régression; b : ordonnée à l'origine; σ_a et σ_b : écarts-types sur a et b ; n : nombre d'observations; ** : significatif au risque 10%; * : significatif au risque 5%; NS : non significatif). 123
- 7.7 Comparaison des précisions de la méthode électrostatique et de la méthode pondérale. 125

Bibliographie

Bibliographie

- Aase, J. K., Siddoway, F. H., 1981. Assessing winter wheat dry matter production via spectral reflectance measurements. *Remote sensing of environment*, 11(4), 267-277.
- Alonso, M., Finn, E. J., 1995. *Physique générale. Tome 1. Mécanique et thermodynamique*. InterÉditions, seconde édition, 538 pages.
- Asrar, G., 1989. *Theory and applications of optical remote sensing*. John Wiley & sons, 734 pages.
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E. T., Hatfield, J. L., 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy journal*, 76(2), 300-306.
- Asrar, G., Kanemasu, E. T., Jackson, R. D., Pinter, P. J., 1985a. Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote sensing of environment*, 17(3), 211-220.
- Asrar, G., Kanemasu, E. T., Yoshida, M., 1985b. Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. *Remote sensing of environment*, 17(1), 1-11.
- Attema, E. P. W., Ulaby, F. T., 1978. Vegetation modeled as a water cloud. *Radio science*, 13(2), 357-364.
- Backus, G., Gilbert, F., 1970. Uniqueness in the inversion of inaccurate gross Earth data. *Philosophical transactions of the royal society of London*, 266, 123-192.
- Baret, F., Guyot, G., 1986. Suivi de la maturation de couverts de blé par radiométrie dans les domaines visible et proche infra-rouge. *Agronomie*, 6(6), 509-516.
- Barnett, T. L., Thompson, D. R., 1983. Large-area relation of Landsat MSS and NOAA-6 AVHRR spectral data to wheat yields. *Remote sensing of environment*, 13(4), 277-290.
- Batra, R. K., Singh, B., Singh, K., 1992. Determination of water content of plant leaves by beta attenuation. *International journal of radiation applications and instrumentation. Part A : Applied radiation and isotopes*, 43(10), 1235-1239.

- Benedetti, R., Rossini, P., 1993. On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics : The case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna. *Remote sensing of environment*, 45(3), 311-326.
- Bérest, P., 1997. *Calcul des variations. Application à la mécanique et à la physique*. Ellipses, 256 pages.
- Blayo, F., Verleysen, M., 1996. *Les réseaux de neurones artificiels*. Presses Universitaires de France, 126 pages.
- Bloc, D., Gay, J.-P., Gouet, J.-P., 1984. Évolution de la teneur en eau et du poids de 1000 grains pendant la maturation du maïs. Dans INRA, éd., *Physiologie du maïs. Communications au colloque "Physiologie du maïs"*, Royans, France, 15-17 mars 1983.
- Boissard, P., Pointel, J.-G., Huet, Ph., 1993. Reflectance, green leaf area index and ear hydric status of wheat from anthesis until maturity. *International journal of remote sensing*, 14(14), 2713-2729.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.-H., Ruget, F., Nicoulaud, B., Gate, Ph., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.-M., Meynard, J.-M., Delécolle, R., 1998. STICS : A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. 1. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18(5-6), 311-346.
- Bruhat, G., 1963. *Électricité*. Masson, 911 pages.
- Buriol, G. A., Menoux, Y., de Parcevaux, S., 1984a. Détermination de la masse d'eau et des propriétés optiques d'une feuille à partir de modifications de son bilan énergétique. II. Applications en conditions artificielles et naturelles. *Agronomie*, 4(6), 501-506.
- Buriol, G. A., Santibañez, F., Menoux, Y., de Parcevaux, S., Bertolini, J.-M., 1984b. Détermination de la masse d'eau et des propriétés optiques d'une feuille à partir de modifications de son bilan énergétique. I. Bases théoriques de la méthode et technique de mesure. *Agronomie*, 4(6), 493-500.
- Carlson, T. N., Belles, J. E., Gillies, R. R., 1991. Transient water stress in a vegetation canopy : Simulations and measurements. *Remote sensing of environment*, 35(2-3), 175-186.
- Carnahan, B., Luther, H. A., Wilkes, J. O., 1969. *Applied numerical methods*. John Wiley & Sons, 604 pages.
- Catchpole, W. R., Wheeler, C. J., 1992. Estimating plant biomass : A review of techniques. *Australian journal of ecology*, 17, 121-131.
- Cecchi, G., Mazzinghi, P., Pantani, L., Valentini, R., Tirelli, D., de Angelis, P., 1994. Remote sensing of chlorophyll *a* fluorescence of vegetation

- canopies : 1. Near and far field measurement techniques. *Remote Sensing of Environment*, 47(1), 18–28.
- Cerovic, Z. G., Goulas, Y., Gorbunov, M., Briantais, J.-M., Camenen, L., Moya, I., 1996. Fluorosensing of water stress in plants : Diurnal changes of the mean lifetime and yield of chlorophyll fluorescence, measured simultaneously and at distance with a τ -lidar and a modified pam-fluorimeter, in maize sugar beet, and kalanchoë. *Remote sensing of environment*, 58(3), 311–321.
- Chanzy, A., Bertuzzi, P., Bruckler, L., Gaudu, J.-C., 1997. Mesure de la teneur en eau et du potentiel hydrique dans le sol. Dans INRA, éd., *L'eau dans l'espace rural*, pages 143–152.
- Charbonnière, R., 1970. La permittivité des matériaux et son application au dosage de l'humidité. Dans INRA, éd., *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, pages 339–357.
- Coelho, R., Aladenize, B., 1993. *Les diélectriques*. Hermès, 230 pages.
- Colwell, R. N., 1983. *Manual of remote sensing. Volume 1 : Theory, instruments and techniques*. American society of photogrammetry, 1232 pages.
- Das, D. K., Mishra, K. K., Kalra, N., 1993. Assessing growth and yield of wheat using remotely-sensed canopy temperature and spectral indices. *International journal of remote sensing*, 14(17), 3081–3092.
- de Parcevaux, S., Bertolini, J.-M., Katerji, N., 1995. Masse en eau des feuilles : détermination non destructive en milieu naturel. *Agronomie*, 15(9-10), 547–556.
- Delécolle, R., Baret, F., Guérif, M., Maas, S. J., 1991. L'utilisation conjointe de la télédétection et des modèles d'estimation des productions agricoles : tendances actuelles. Dans J. J. Hunt, éd., *Proceedings of the 5th International Colloquium - Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France, 14-18 January 1991*. ESA, Noordwijk, The Netherlands, tome 2, pages 529–533.
- Dhatt, G., Touzot, G., 1981. *Une présentation des éléments finis*. Maloine S.A., 543 pages.
- Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Le Toan, T., Beaudoin, A., Kasischke, E. R., Christensen, N., 1992. Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 30(2), 412–415.
- du Toit, H. F., George, P. L., Lang, P., Paté, P., Steer, D., Vidrascu, M., 1995. MODULEF. *Guide de l'utilisateur n°1 : introduction à MODULEF*. INRIA, 309 pages.
- Durand, É., 1964. *Électrostatique. Volume I. Les distributions*. Masson, 516 pages.

- Durand, É., 1966a. *Électrostatique. Volume II. Problèmes généraux. Conducteurs*. Masson, 444 pages.
- Durand, É., 1966b. *Électrostatique. Volume III. Méthodes de calcul. Diélectriques*. Masson, 390 pages.
- Dusek, D. A., Jackson, R. D., Musick, J. T., 1985. Winter wheat vegetation indices calculated from combinations of seven spectral bands. *Remote sensing of environment*, 18(3), 255–267.
- Farlow, S. J., 1982. *Partial differential equations for scientists and engineers*. John Wiley & Sons, 402 pages.
- 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 de Paris VI.
- Féchant, C., Buis, J. P., Tabbagh, A., 1999. *In situ* measurement of medium-frequency apparent permittivity using an electrostatic quadrupole. Application to the determination of the water content of wheat. *Measurement science and technology*, 10, 174–181.
- Féchant, C., Tabbagh, A., 1999. Mesure en laboratoire de la permittivité diélectrique moyenne fréquence de végétaux à 430 kHz à l'aide d'un condensateur. Relation entre permittivité apparente d'un ensemble d'épis de blé et leur contenu en eau. *Compte-rendus de l'Académie des sciences, série II, fascicule B - Mécanique, physique, astronomie*, 327(2-3), 285–298.
- Ferrazzoli, P., Paloscia, S., Pampaloni, P., Schiavon, G., Solimini, D., Coppo, P., 1992. Sensitivity of microwave measurements to vegetation biomass and soil moisture content. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 30(4), 750–756.
- Funebo, T., Ohlsson, T., 1999. Dielectric properties of fruits and vegetables as a function of temperature and moisture content. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 34(1), 42–54.
- Gabrijel, I., Dobnikar, A., 1997. Adaptive RBF neural network. Dans *Proceedings of the SOCO'97 conference, Nîmes, France*. pages 164–170.
- Gardner, B. R., Blad, B. L., Thompson, D. R., Henderson, K. E., 1985. Evaluation and interpretation of Thematic Mapper ratios in equations for estimating corn growth parameters. *Remote sensing of environment*, 18(3), 225–234.
- Gate, Ph., 1995. *Écophysiologie du blé*. Lavoisier, 429 pages.
- Gaudu, J.-C., Mathieu, J.-M., Fumanal, J.-C., Bruckler, L., Chanzy, A., Bertuzzi, P., Stengel, P., Guennelon, R., 1993. Mesure de l'humidité des sols par une méthode capacitive : analyse des facteurs influençant la mesure. *Agronomie*, 13(1), 57–73.

- George, P. L., 1996. MODULEF. *Guide de l'utilisateur n° 3 : construction et modification de maillages*. INRIA, 357 pages.
- George, P. L., Saltel, E., 1991. MODULEF. *Guide de l'utilisateur n° 6 : post-traitements et graphiques*. INRIA, 367 pages.
- Gosse, G., de Parcevaux, S., 1970. Application de l'absorption des ondes centimétriques à la mesure de l'humidité des végétaux. Dans INRA, éd., *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, pages 359–369.
- Gurnade, J.-C., Malet, Ph., 1981. Macrophysiologie de la maturation du blé d'hiver en conditions naturelles. II. Liaisons entre la sénescence du maître-brin et la maturation des grains chez la variété "talent". Intérêt pour la télédétection. *Agronomie*, 1(4), 255–260.
- Guyot, G., 1999. *Climatologie de l'environnement*. Dunod, seconde édition, 525 pages.
- Hatfield, J. L., 1983. Remote sensing estimators of potential and actual crop yield. *Remote sensing of environment*, 13(4), 301–311.
- Hatfield, J. L., Asrar, G., Kanemasu, E. T., 1984. Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance. *Remote sensing of environment*, 14(1-3), 65–75.
- Hendrickx, J. M. H., Baerends, B., Raza, Z. I., Sadig, M., Akram Chaudhry, M., 1992. Soil salinity assessment by electromagnetic induction of irrigated land. *Soil science society of America journal*, 31(10), 2401–2409.
- Hinton, G. E., van Camp, D., 1993. Keeping neural networks simple by minimizing the description length of the weights. Dans *Sixth ACM conference on computational learning theory*, Santa Cruz.
- Hristev, R. M., 1998. *The ANN Book*. Première édition, 388 pages. URL <ftp.funet.fi/pub/sci/neural/books>.
- Huet, Ph., Pons, Y., Saur, L., 1989a. Détermination de la fin du remplissage du grain de blé à partir de l'humidité de l'épi. Application à des expériences multi-sites. Dans *Colloque INRA-ITCF, Écophysiologie du blé. Versailles, France, 25 et 26 avril 1989*.
- Huet, Ph., Pons, Y., Saur, L., 1989b. Remplissage de l'épi : éléments de modélisation et comparaison entre sites. Dans *Colloque INRA-ITCF, Écophysiologie du blé. Versailles, France, 25 et 26 avril 1989*.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Reginato, R. J., 1977. Remote sensing of crop yields. *Science*, 196, 19–25.
- Imhoff, M. L., Carson, S., Johnson, P., 1998. A low frequency radar experiment for measuring vegetation biomass. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 36(6), 1988–1991.
- ITCF, 1989. *Catalogue des fiches sur les méthodes d'échantillonnage*. INRA.

- Jackson, R. D., 1982. Canopy temperature and crop water stress. Dans D. Hillel, éd., *Advances in irrigation*, Academic Press, tome 1, pages 43–85.
- Jackson, R. D., Ezra, C. E., 1985. Spectral response of cotton to suddenly induced water stress. *International journal of remote sensing*, 6(1), 177–185.
- Jackson, R. D., Reginato, R. J., Idso, S. B., 1977. Wheat canopy temperature : A practical tool for evaluating water requirements. *Water resources research*, 13(3), 651–656.
- Jackson, R. D., Slater, P. N., Pinter, P. J., 1983. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote sensing of environment*, 13(3), 187–208.
- Jackson, T. J., O'Neill, P. E., 1990. Attenuation of soil microwave emission by corn and soybeans at 1.4 and 5 GHz. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 28(5), 978–980.
- Jackson, T. J., Schmugge, T. J., 1991. Vegetation effects on the microwave emission of soils. *Remote sensing of environment*, 36(3), 203–212.
- Jackson, T. J., Schmugge, T. J., Wang, J. R., 1982. Passive microwave sensing of soil moisture under vegetation canopies. *Water resources research*, 18(4), 1137–1142.
- Jodouin, J.-F., 1994a. *Les réseaux de neurones. Principes et définitions*. Hermès, 124 pages.
- Jodouin, J.-F., 1994b. *Les réseaux neuromimétiques*. Hermès, 220 pages.
- John, G. G., 1972. The accuracy of a range of capacitance probe methods for estimating pasture yields. *Journal of agricultural science (Cambridge)*, 79, 273–280.
- John, G. G., Nicol, G. R., Watkin, B. R., 1965. A modified capacitance probe technique for estimating pasture yield. I. Construction and procedure for use in the field. *Journal of the British grassland society*, 20, 212–217.
- John, G. G., Watkin, B. R., 1965. A modified capacitance probe technique for estimating pasture yield. II. The effect of different pastures, soil types, and dew on the calibration. *Journal of the British grassland society*, 20, 217–226.
- Juditsky, A., Zhang, Q., Delyon, B., Glorennec, P.-Y., Benveniste, A., 1994. Wavelets in identification. Wavelets, splines, neurons, fuzzies : how good for identification ? Rapport technique, Institut national de la recherche en informatique et automatique.
- Katerji, N., 1997. Les indicateurs de l'état hydrique de la plante. Dans INRA, éd., *L'eau dans l'espace rural*, pages 169–177.
- Kittel, Ch., 1998. *Physique de l'état solide*. Dunod, septième édition, 624 pages.

- Kraszewski, A. W., Trabelsi, S., Nelson, S. O., 1996. Wheat permittivity measurements in free space. *Journal of microwave power energy*, 31(3), 135–141.
- Kraszewski, A. W., Trabelsi, S., Nelson, S. O., 1997. Moisture content determination in grain by measuring microwave parameters. *Measurement science and technology*, 8, 857–863.
- Kraszewski, A. W., Trabelsi, S., Nelson, S. O., 1998a. Moisture content determination in grain by measuring microwave parameters. *Measurement science and technology*, 9, 543–544.
- Kraszewski, A. W., Trabelsi, S., Nelson, S. O., 1998b. Simple grain moisture content determination from microwave measurements. *Transactions of the ASAE*, 41(1), 129–134.
- Le Toan, T., Beaudoin, A., Riom, J., Guyon, D., 1992. Relating forest biomass to SAR data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 30(2), 403–411.
- Leblon, B., Guerif, M., Baret, F., 1991. The use of remotely sensed data in estimation of PAR use efficiency and biomass production of flooded rice. *Remote sensing of environment*, 38(2), 147–158.
- Lemaire, G., Salette, J., 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Étude de l'effet du milieu. *Agronomie*, 4(5), 423–430.
- Leonardis, A., Bishorf, H., 1998. An efficient MDL-based construction of RBF networks. *Neural networks*, 11, 963–973.
- Levitt, J., 1972. *Responses of plants to environmental stresses*. Academic press, New York and London, 697 pages.
- Linville, D. E., Dale, R. F., Hodges, H. F., 1978. Solar radiation weighting for weather and corn growth models. *Agronomy journal*, 70(2), 257–263.
- Lush, W. M., Franz, P. R., 1991. Estimating turf biomass, tiller density, and species composition by coring. *Agronomy journal*, 83, 800–803.
- Meynard, J.-M., 2000. Cultiver le blé avec moins de pesticides. Dans *INRA mensuel*, numéro 107, pages 3–4.
- Mo, T., Schmugge, T. J., Jackson, T. J., 1984. Calculations of radar backscattering coefficient of vegetation-covered soils. *Remote sensing of environment*, 15(2), 119–133.
- Monteith, J. L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of applied ecology*, 9, 747–766.
- Monteith, J. L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical transactions of the royal society of London, B*, 281, 277–294.

- Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y., Vidal, A., 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote sensing of environment*, 49(3), 246–263.
- Moya, I., Guyot, G., Goulas, Y., 1992. Remotely sensed blue and red fluorescence emission for monitoring vegetation. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 47, 205–231.
- Méthy, M., Lacaze, B., Oliosio, A., 1991. Perspectives et limites de la fluorescence pour la télédétection de l'état hydrique d'un couvert végétal : cas d'une culture de soja. *International journal of remote sensing*, 12(1), 223–230.
- Neal, D. L., Neal, J. L., 1973. Use and capabilities of electronic capacitance instruments for estimating standing herbage. Part I. History and development. *Journal of the British grassland society*, 28, 81–89.
- Nelson, S. O., Trabelsi, S., Kraszewski, A. W., 1998. Advances in sensing grain moisture content by microwave measurements. *Transactions of the ASAE*, 41(2), 483–487.
- Or, D., Wraith, J. M., 1999. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry : A physical model. *Water resources research*, 35(2), 361–369.
- Orr, M. J. L., 1995. Regularisation in the selection of radial basis function centres. *Neural computation*, 7(3), 606–623.
- Orr, M. J. L., 1996. Introduction to radial basis function networks. Rapport technique, Centre for Cognitive Science, University of Edinburgh, Scotland.
- Orr, M. J. L., 1998. Optimising the widths of radial basis functions. Dans *Fifth Brazilian symposium on neural networks, Bello Horizonte, Brazil*.
- Paloscia, S., Pampaloni, P., 1984. Microwave remote sensing of plant stress. *Remote sensing of environment*, 16(3), 249–255.
- Paloscia, S., Pampaloni, P., 1992. Microwave vegetation indexes for detecting biomass and water conditions of agricultural crops. *Remote sensing of environment*, 40(1), 15–26.
- Paul, S., Alouges, A., Bonneval, H., Pontier, L., 1982. *Dictionnaire de télédétection aérospatiale*. Masson, 236 pages.
- Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., Savé, R., 1993. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *International journal of remote sensing*, 14(10), 1887–1905.
- Phillips, B. B., Nostrand, R. G. V., Knapp, D. G., Branscomb, L. M., 1963. Electric and magnetic properties of the Earth and stars. Dans *American institute of physics handbook*, Mac Graw-Hill.
- Poggio, T., Girosi, F., 1990. Networks for approximation and learning. *Proceedings of the IEEE*, 78(9), 1481–1497.

- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P., 1992. *Numerical recipes in C : The art of scientific computing*. Cambridge University Press, 994 pages.
- Prévoit, L., Champion, I., Guyot, G., 1993. Estimating surface soil moisture and leaf area index of a wheat canopy using a dual-frequency (C and X bands) scatterometer. *Remote sensing of environment*, 46(3), 331–339.
- Raviart, P. A., 1981. *Les méthodes d'éléments finis en mécanique des fluides*. Eyrolles.
- Sanon, M., 1999. *Optimisation de l'irrigation à la parcelle par radiothermométrie. Application à une culture d'oignon (Allium cepa L.) en climat sahélien (Nord-ouest du Burkina-Faso)*. Thèse de doctorat, École nationale supérieure agronomique de Rennes.
- Sarle, W. S., 1994. Neural networks and statistical models. Dans *Proceedings of the nineteenth annual SAS User Group international conference*. pages 1538–1550.
- Schätzler, H. P., Kühn, W., 1977. Growth studies on plant plots by gamma scanning. *International journal of applied radiation and isotopes*, 28, 645–652.
- Schmugge, T. J., Jackson, T. J., 1992. A dielectric model of the vegetation effects on the microwave emission from soils. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 30(4), 757–760.
- Schnyder, H., Baum, U., 1992. Growth of the grain of wheat (*Triticum aestivum* L.). The relationship between water content and dry matter accumulation. *European journal of agronomy*, 1(2), 51–57.
- Seguin, B., Itier, B., 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *International journal of remote sensing*, 4(2), 371–383.
- Seguin, B., Lagouarde, J.-P., Savane, M., 1991. The assessment of regional crop water conditions from meteorological satellite thermal infrared data. *Remote sensing of environment*, 35(2-3), 141–148.
- Serrano, L., Filella, I., Peñuelas, J., 2000. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop science*, 40, 723–731.
- Sheets, K. R., Hendrickx, J. M. H., 1995. Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction. *Water resources research*, 31(10), 2401–2409.
- Soderlund, M., Stegman, E. C., 1992. Irrigation scheduling of spring wheat using infrared thermometry. *Transactions of the ASAE*, 35(1), 143–152.
- Steinmetz, S., Guérif, M., Delécolle, R., Baret, F., 1990. Spectral estimates of the absorbed photosynthetically active radiation and light-use efficiency of a winter wheat crop subjected to nitrogen and water deficiencies. *International journal of remote sensing*, 11(10), 1797–1808.

- Stetson, L. E., Nelson, S. O., 1972. Audiofrequency dielectric properties of grain and seed. *Transactions of the ASAE*, 15(1), 180–184,188.
- Steven, M. D., Werker, R., Milnes, M., 1997. Assimilation of satellite data in crop monitoring and yield prediction. Dans G. Guyot, T. Phulpin, édés., *Proceedings of the 7th International Colloquium - Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France, 7-11 April 1997*. A. A. Bakelma, Rotterdam, The Netherlands, tome 2, pages 853–857.
- Tabbagh, A., Hesse, A., Grard, R., 1993. Determination of electrical properties of the ground at shallow depth with an electrostatic quadrupole : Field trials on archæological sites. *Geophysical prospecting*, 41, 579–597.
- Taconet, O., Benallegue, M., Vidal-Madjar, D., Prévot, L., Dechambre, M., Normand, M., 1994. Estimation of soil and crop parameters for wheat from airborne radar backscattering data in C and X bands. *Remote sensing of environment*, 50(3), 287–294.
- Tarantola, A., 1987. *Inverse problem theory. Methods for data fitting and model parameter estimation*. Elsevier, 613 pages.
- Tardieu, F., Améglio, Th., Bréda, N., Dayau, S., 1995. Régulation des transferts hydriques chez les plantes soumises à la sécheresse. Dans *Actes de l'école-chercheur INRA en bioclimatologie, Le Croisic, 3-7 avril 1995. Tome 1. De la plante au couvert végétal*. pages 61–82.
- Thom, A., Apelt, C. J., 1961. *Field computations in engineering and physics*. D. Van Nostrand Company, 165 pages.
- Topp, G. C., Davis, J. L., Annan, A. P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content : Measurements in coaxial transmission lines. *Water resources research*, 16(3), 574–582.
- Trabelsi, S., Kraszewski, A. W., Nelson, S. O., 1997. Microwave dielectric properties of shelled, yellow-dent field corn. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 32(3), 188–194.
- Tucker, C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of environment*, 8(2), 127–150.
- Tucker, C. J., 1980. A critical review of remote sensing and other methods for non-destructive estimation of standing biomass. *Grass and forage science*, 35, 177–182.
- Tucker, C. J., Holben, B. N., Elgin, J. H., McMurtrey III, J. E., 1981. Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote sensing of environment*, 11(3), 171–189.
- Valentini, R., Cecchi, G., Mazzinghi, P., Mugnozza, G. S., Agati, G., Bazzani, M., de Angelis, P., Fusi, F., Matteucci, G., Raimondi, V., 1994. Remote sensing of chlorophyll *a* fluorescence of vegetation canopies : 2.

- Physiological significance of fluorescence signal in response to environmental stresses. *Remote Sensing of Environment*, 47(1), 29–35.
- Venables, W. N., Ripley, B. D., 1994. *Modern applied statistics with S-PLUS*. Springer-Verlag, 462 pages.
- von Hippel, A. R., 1961. *Les diélectriques et leurs applications*. Dunod, 439 pages.
- Wait, R., Mitchell, A. R., 1985. *Finite element analysis and applications*. John Wiley and Sons.
- Wigneron, J.-P., Calvet, J.-C., Chanzy, A., Grosjean, O., Laguerre, L., 1995a. A composite discrete-continuous approach to model the microwave emission of vegetation. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 33(1), 201–211.
- Wigneron, J.-P., Calvet, J.-C., Kerr, Y., Chanzy, A., Lopes, A., 1993. Microwave emission of vegetation : Sensitivity to leaf characteristics. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 31(3), 716–726.
- Wigneron, J.-P., Chanzy, A., Calvet, J.-C., Bruguier, N., 1995b. A simple algorithm to retrieve soil moisture and vegetation biomass using passive microwave measurements over crop fields. *Remote sensing of environment*, 51(3), 331–341.
- Wigneron, J.-P., Ferrazzoli, P., Oliso, A., Bertuzzi, P., Chanzy, A., 1999. A simple approach to monitor crop biomass from C-band radar data. *Remote sensing of environment*, 69(2), 179–188.
- Wigneron, J.-P., Schmugge, T. J., Chanzy, A., Calvet, J.-C., Kerr, Y., 1998. Use of passive microwave remote sensing to monitor soil moisture. *Agronomie*, 18, 27–43.
- Wraith, J. M., Or, D., 1999. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry : Experimental evidence and hypothesis development. *Water resources research*, 35(2), 361–369.
- Yueh, S. H., Kong, J. A., Jao, J. K., Shin, R. T., Le Toan, T., 1992. Branching model for vegetation. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 30(2), 390–402.
- Zienkiewicz, O., 1979. *La méthode des éléments finis*. McGraw-Hill, 851 pages.
- Zwillinger, D., 1992. *Handbook of differential equations*. Academic Press, seconde édition, 787 pages.

Liste des publications

Liste des publications

Publications dans des revues internationales à comité de lecture

1. Helbert, J., Boissard, P., Buis, J.-P., 2001. A theoretical study of an electrostatic multipole to assess the horizontal and vertical distribution of the *in situ* water content of vegetation canopies. *Agronomie*, 21(2), 127-138.
2. Helbert, J., Boissard, P., Buis, J.-P. Estimation of the vertical profile of the wheat crop water content with an electrostatic multipole. An experimental study. *Soumis à Agronomie*.

Communications lors de conférences internationales

1. Helbert, J., Boissard, P., Buis, J.-P., 1999. A quadrupole to assess the spatial distribution of plant water content in crops. *Third conference on electromagnetic wave interaction with water and moist substances*, 11-13 avril, Athens, GA, USA. 5 pages.
2. Helbert, J., Boissard, P., Buis, J.-P., 2001. An electrostatic multipole to assess the spatial distribution of the *in situ* water content of vegetation canopies. *Accepté pour présentation à la Fourth conference on electromagnetic wave interaction with water and moist substances*, 13-16 mai, Weimar, Allemagne. 8 pages.

A theoretical study of an electrostatic multipole to assess the horizontal and vertical distribution of the in situ water content of vegetation canopies

Jérôme HELBERT^{a*}, Paul BOISSARD^b, Jean-Pierre BUIS^c

^a Institut National de la Recherche Agronomique, Unité Environnement et Grandes Cultures, 78850 Thiverval Grignon, France

^b Institut National de la Recherche Agronomique, Unité de Recherches Intégrées en Horticulture, Route des Colles, Sophia-Antipolis, 06410 Biot, France

^c CIMEL Électronique, 172 rue de Charonne, 75011 Paris, France

(Received 21 March 2000; revised 9 October 2000; accepted 26 October 2000)

Abstract – A theoretical study of an electrostatic multipole is presented. This instrument allows the non-destructive and in situ estimation of the water content of vegetation canopy horizontal layers from a measurement of their dielectric permittivities. The multipole is composed of four electrodes, two electrodes injecting an alternating current, while the two others measure a potential difference. A prototype instrument showed that good estimations of the wheat spike water content could be achieved. A simulation based on the finite element method is performed to study the response of the instrument for various wheat crop dielectric properties. Results show that the potential difference depends on the dielectric properties of the spikes and the stems, and that the soil influence is not significant. An improved configuration of the instrument, using two pairs of reception electrodes, is also simulated in order to be able to retrieve the spike and the stem permittivities. The inversion of the potential differences is realized by using an artificial neural network. The spikes' and the stems' permittivities can then be retrieved with a good accuracy (variances on estimated permittivities less than 0.01).

water content / dielectric permittivity / non-destructive method / vegetation canopy / biomass

Résumé – Étude théorique d'un multipôle électrostatique permettant d'accéder in situ à la distribution horizontale et verticale du contenu en eau des couverts végétaux. Cet article présente une étude théorique d'un multipôle électrostatique. Cet instrument permet une estimation in situ et non destructive du contenu en eau des strates horizontales d'un couvert végétal grâce à la mesure de leur permittivité diélectrique. Le multipôle est composé de quatre électrodes, deux électrodes injectant un courant alternatif tandis que les deux autres mesurent une différence de potentiel. Un premier prototype a montré la validité de la méthode pour estimer le contenu en eau des épis de blé. Un travail de simulation basé sur la méthode des éléments finis a permis d'étudier précisément la réponse de l'instrument en fonction des propriétés diélectriques d'une culture de blé. Les résultats montrent que la différence de potentiel dépend à la fois des propriétés des épis et des tiges, et que l'influence du sol n'est pas significative. Une version améliorée du quadripôle, comportant deux paires d'électrodes de réception, est alors simulée afin de pouvoir retrouver la permittivité des épis et celle des tiges. L'inversion des différences de potentiel est réalisée à l'aide d'un réseau de neurones artificiels. La précision obtenue est bonne, la variance des permittivités estimées étant inférieure à 0,01.

teneur en eau / permittivité diélectrique / méthode non-destructive / couvert végétal / biomasse

Communicated by Thomas Schmugge (Beltsville, USA)

* Correspondence and reprints
Jerome.Helbert@bcgn.grignon.inra.fr

1. INTRODUCTION

New fields in agriculture, such as precision agriculture, require the development of sensors and non-destructive methods to analyze the status of soil and plants. Knowing the water content of plants is very important since this information can be used to monitor plant growth and to estimate total biomass.

At early stages, the estimation of the nitrogen requirements of a growing crop is possible if we can infer the maximal potential biomass [2], using the dilution curve [23]. After flowering, it has been shown in the case of wheat crops that the spike layer water content is correlated to the total biomass and so to the final yield [31].

On the other hand, rapid variations of plant water content are related to hydric status and can reveal water stresses. So it is important to know the water content for monitoring irrigation.

The destructive estimation of the plant water content or the biomass by the classical gravimetric method is very long and tedious. The development of remote sensing techniques offers an efficient alternative [36].

Using optical radiometry, it has been shown that the Leaf Area Index of a crop is related to spectral vegetation indices like the NDVI [3, 5]. The efficiency of the light interception by plants can then be estimated from the LAI [24], or directly from spectral measurements [9, 32]. Once the efficiency of light interception has been estimated, production models such as those presented by Monteith [25, 26] can then be used to predict the total crop biomass [4, 22]. The final yield can also be predicted using spectral indices [1, 7, 8, 17]. Generally, the precision of the estimated yield can be evaluated to within about 10%.

The plant water content is often estimated from microwave measurements. This has been done in several studies but results on crops are not accurate since there is interaction between the electromagnetic waves and the plant geometry [15]. With radar, the estimation of the water content in crops is quite difficult because of the small optical depth of the vegetation [34], while estimating forest biomass is possible and quite accurate [10, 21]. With passive radiometers, measurements are better correlated with plant water content [18, 19], but the best accuracy is about 15% [37].

Previous studies aimed at the *in situ* biomass estimation and daily variations of water content do exist. For example, Gosse and de Parcevaux [16] have tried to estimate the plant water content using microwave horns, but the accuracy of the measurements are not good enough. Schätzler and Kuhn [30] and Batra et al. [6] have shown that the absorption of radiation can be related to the plant

water content and that it can be possible to assess the vertical distribution of water in vegetation canopies. This technique is accurate but the drawback is that the use of radioactive elements is now prohibited for field measurements.

Therefore, a new instrument, an electrostatic multipole, has been developed to assess the *in situ* water content of vegetation canopy. It is based on an electromagnetic method, which provides non-destructive, non-contact, and instantaneous measurements. Furthermore, the electrostatic multipole is light and portable and can be easily carried within fields. The spatial range of the instrument is about $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ so it can sample quickly the plant water content out in the field. A previous feasibility study performed on wheat crops showed that measurements obtained with a quadrupole are correlated to the spike layer water content [14].

In this paper, we perform a theoretical study of the electrostatic multipole in order to estimate the interest of using a multi-electrode configuration to make potential difference readings. We first present in detail the design and theory of the multipole and then we numerically model the response of the instrument as a function of the electromagnetic properties of crop and soil. These results are then used to develop an inversion method which can be used for estimating the spike water content as well as the stem water content.

2. THE ELECTROSTATIC MULTIPOLE

2.1. Presentation of the instrument

The instrument is an electrostatic multipole and is derived from the quadrupoles used for prospecting in geophysics [33]. Two electrodes inject an alternating current while two others allow the measurement of a voltage (Fig. 1).

The two pairs of electrodes are placed at the altitude of the studied organs in order to have the best response to their water content. The vertical distribution of the plant water content can then be assessed. Figure 2 shows the electrodes in the spike layer for the estimation of the wheat spike water content. The electrodes do not have to be in contact with the plants as the instrument is based on the propagation of an electromagnetic wave. However, as the electrodes are plunged into the vegetation volume, the multiple contacts have no consequences on the measurements as long as vegetation can be considered as a dielectric medium. The dimensions of the multipole are quite small and make the instrument easily transportable in the field: each electrode is cylindrical with a diameter of about 12 cm and a thickness of 5 cm.

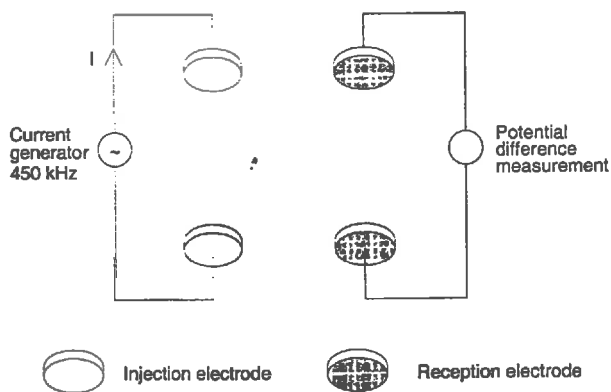


Figure 1. Electrical principle of the multipole.

The four electrodes are placed on the vertices of a $40 \times 40 \text{ cm}^2$ horizontal square. Using this geometrical configuration, it is possible to make measurements at several places in a field and then to assess the horizontal distribution of the water content.

2.2. Theoretical background

The frequency of the injected current is 447 kHz. This frequency has been chosen between two limits: an upper frequency (about 100 MHz) for which there are interactions between the electromagnetic waves and the plant geometry, and a lower frequency (about 100 kHz) under which ionic effects are predominant, especially the Maxwell-Wagner effect [20]. At 447 kHz, the Maxwell-Wagner effect does exist but Féchant [12] has shown that it is very weak in comparison with the measurements made with a multipole functioning at 44 kHz. Therefore, the electromagnetic waves are supposed to be only absorbed by the constitutive water of the canopy volume. Resulting data then represents a volumetric measurement (grams of water per m^{-3} or m^{-2}).

The injection electrodes inject a current of intensity I ($200 \mu\text{A}$); the resulting electromagnetic field then interacts with the canopy, the air and the soil, and the device measures a potential difference V between the reception electrodes. The ratio V/I is the macroscopic impedance of the medium and is a function F of the inverse of the apparent relative dielectric permittivity ϵ^* :

$$\frac{V}{I} = F\left(\frac{1}{\epsilon^*}\right) \quad (1)$$

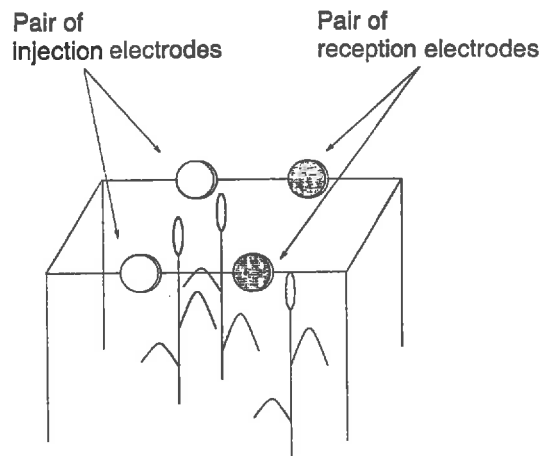


Figure 2. In situ schematic view of the multipole.

where:

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (2)$$

$$= \epsilon' - i \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0 f} \quad (3)$$

ϵ' is the real relative dielectric permittivity, ϵ_0 the permittivity of air ($\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$), σ the electric conductivity ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$) and f the frequency of the electromagnetic wave (Hz). Thus, the signal is composed of two voltages in quadrature. The component in phase with the injected current corresponds to the imaginary part of the macroscopic permittivity while the component in quadrature with the signal corresponds to the real part of the macroscopic permittivity. As the crop canopy is a non-conducting medium (in dry atmospheric conditions), the imaginary part of the macroscopic permittivity can be ignored. Furthermore, the crop is mainly composed of air and water, and the real permittivity of water is eighty times the macroscopic permittivity of air. So, the real part of the permittivity depends mainly on the crop water content. And then, the higher the measured voltage, the lower the crop water content. Moreover, in controlled conditions, Féchant and Tabbagh [13] have measured the permittivity of a set of spikes by using a capacitor ($18 \times 18 \times 2 \text{ cm}^3$) and have shown that the real dielectric permittivity at 430 kHz is linearly correlated to the water content of the spikes.

2.3. Experimental results

Figure 3 represents measurements made by Féchant [12] with an initial prototype of the multipole

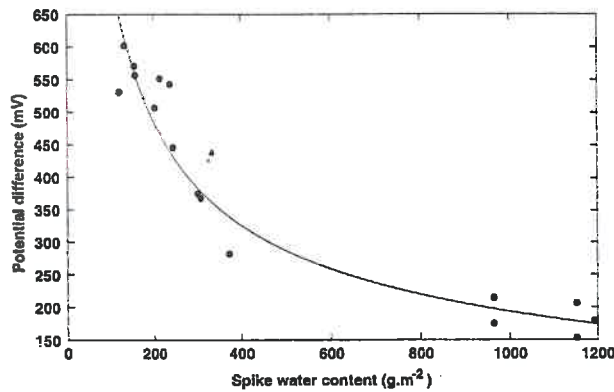


Figure 3. Correlation between measured potential differences and wheat spike water content. Adapted from Féchant [13].

instrument. These measurements are plotted against the spike water content estimated by the gravimetric technique. One can see that there is a good relationship between the potential difference and the spike water content, and that it is then possible to estimate the spike water content from the potential difference. But there is some noise that limits the accuracy of this estimation. This noise may be due to three causes: (1) the influence of the other materials like the stems and the soil, (2) the electronic noise, and (3) the uncertainty on the estimation of the spike water content by the gravimetric technique. Féchant [12] has estimated the uncertainty of the potential difference measurement due to the electronic noise to be 5%.

3. SIMULATION OF THE INSTRUMENT

A simulation study has been performed to determine the influence of the dielectric permittivities of the various media on the potential difference measured by the instrument.

3.1. Theoretical and computational aspects

The frequency of the injected current is 447 kHz. It corresponds to a wavelength of 670 m. This wavelength is very large comparatively to the dimensions of the plants. Thus, we can assume that the phase of the electromagnetic wave is constant over the scanned space. The quasi-steady state approximation can then be used and the electrostatic conditions can be applied (see appendix for details). Since we are interested in the

potential outside the injection electrodes, the purpose is then to solve the Laplace equation:

$$\Delta V = 0. \quad (4)$$

A solution of this equation is:

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint_V \frac{\rho d\tau}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|} \quad (5)$$

where \vec{r}' are the positions of the charges ρ included in the volume V .

A simplification of this equation can be achieved by considering point electrodes:

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{i=1}^2 \frac{q_i}{\|\vec{r} - \vec{r}'_i\|} \quad (6)$$

where q_i are the electric charges of the two electrodes. But the size of the electrodes is not negligible in comparison to the size of the plants. So, we have to take into account the real size of the electrodes.

Since equation (5) cannot be computed analytically we used the finite element method to numerically solve the partial differential equation [38]. The software used to compute the electrostatic potential is Modulf [11].

In the finite element method, the 3D domain of simulation has first to be meshed, and the potential is then computed on every knot of the mesh. To prevent boundary effects the domain of simulation must be much larger than the area of interest. In this case, we used a cube of 10 m side. The crop is modeled as four horizontal layers: the air, the spikes, the stems, and the soil. The instrument is modeled by four cylinders placed in the spike layer. Figure 4 presents a vertical section of the mesh (on this figure electrodes appear as discs). On this figure, we can see that the mesh is very fine close to the electrodes and that it becomes larger as the distance from the electrodes increases.

Since each medium is assumed to be homogeneous, a fixed real dielectric permittivity is attributed to each layer. The potential is fixed on the injection electrodes (in accordance with the injected current), and, since we assume that the electrodes are perfect conductors, we force the reception electrodes to be equipotential. We also fix the potential to zero on the limits of the simulation domain. The electrostatic potential is then calculated in the 3D space on every knot of the mesh.

Simulations are computed for one hundred couples of spike and stem permittivities; the spike permittivity

varies within the range [1:20] while the stem permittivity varies within [1:5]. A first set of simulations (S1) has been realized with a soil permittivity fixed to 20. A second set of simulations (S2) has been done with soil permittivities randomly chosen in the range [5:35] in order to estimate the soil contribution. Values of permittivities have been chosen in a large range to include previous measurements of permittivity made at 430 kHz by Féchant and Tabbagh [13]. Notice that the highest values of permittivity are those of materials having the highest water contents.

3.2. Results

First, Table I reports the results of an analysis of variance performed on the S2 data. This analysis shows that the potential difference between the reception electrodes is mainly explained by the spike and the stem permittivities, and that the soil influence is very low, even when the electrodes are close to the ground (40 cm above the soil). The Fisher's coefficients F_0 are indeed very high for the spike and the stem permittivity ($32 < F_0 < 390$) while F_0 is low for the soil permittivity ($F_0 < 0.05$). So, we can conclude that the soil contribution can be considered as a noise in this geometrical configuration.

Secondly, Figure 5 represents the potential difference between the reception electrodes as a function of the permittivities of the spikes and the stems (S1 data). As predicted by equation (5), the potential difference decreases as the spike and/or the stem permittivity increases. The potential difference depends both on the spike permittivity and the stem permittivity, but the stem contribution increases when the spike permittivity increases.

Third, as a consequence of the influence of the stems, it is impossible to estimate precisely the lower values of spike water content (corresponding to the lower permittivities) from the potential differences. We have indeed two independent variables (the spike and the stem permittivities), and only one potential difference. This could

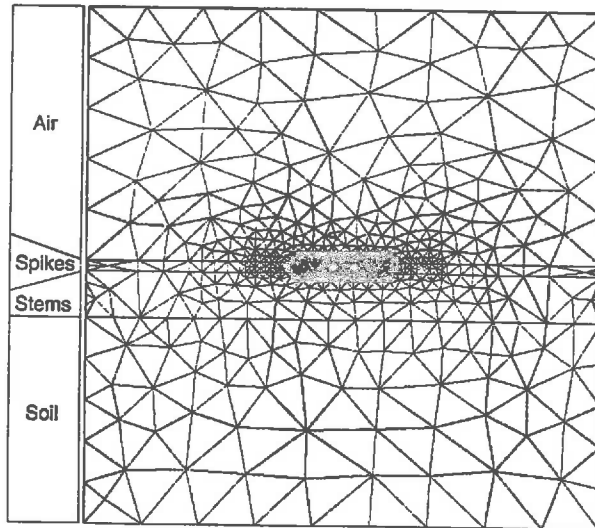


Figure 4. Vertical section of the mesh. The pairs of injection electrodes and reception electrodes are placed in the spike layer. The mesh is finest in the vicinity of the two pairs of electrodes.

explain the origin of the noise observed on the spike water content as estimated by Féchant (see Fig. 3).

The idea was thus to add a second pair of reception electrodes in order to have two simultaneous potential differences and then to be able to retrieve the spike and the stem permittivities from these two potential differences. We have tested five geometrical configurations (configurations #1, #2, and #4 are reported in Fig. 6):

- (1) all the electrodes in the spike layer,
- (2) the new pair in the stem layer under the pair of injection electrodes,
- (3) the new pair in the stem layer under the first pair of reception electrodes,

Table I. Analysis of variance showing that the potential differences V_1 and V_2 are determined by the spike and stem permittivities (ϵ_{spikes} and ϵ_{stems}) and not by the soil permittivity ϵ_{soil} . V_1 and V_2 are the potential differences when the multipole is 80 cm and 40 cm above the ground respectively. F_0 is Fisher's coefficient and $Pr(F > F_0)$ is the probability of having $F > F_0$. The inter-electrode distance is equal to 40 cm.

	F_0	ϵ_{spikes}	$Pr(F > F_0)$	F_0	ϵ_{stems}	$Pr(F > F_0)$	F_0	ϵ_{soil}	$Pr(F > F_0)$
1	390		0.000000	85		0.000000	0.03		0.8605228
2	307		0.000000	32		0.000002	0.05		0.8203480

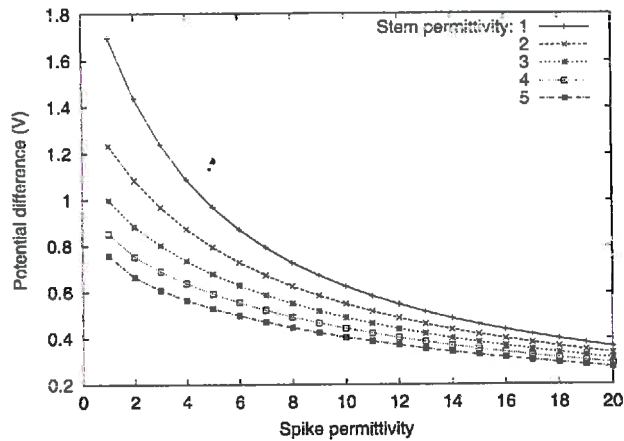


Figure 5. Potential difference between the reception electrodes as a function of the spike permittivity and the stem permittivity.

- (4) the new pair in the air layer above the pair of injection electrodes,
- (5) the new pair in the air layer above the first pair of reception electrodes.

In this paper, we focus on results concerning the configuration #1 presented in Figure 6, which is a compromise between the sensitivities to the spike permittivity and the stem permittivity. As previously, we performed two sets of simulations: a first set with a soil permittivity fixed to 20 (S3 data), and a second set with random soil

permittivities (S4 data). S3 data is reported in Figure 7 (the other configurations give results close to those presented in this figure).

4. INVERSION OF THE SIMULATION DATA

The purpose of this section is to retrieve the spike permittivity ϵ from the potential difference data. This is theoretically possible with the instrument composed of two pairs of reception electrodes because each couple of potential differences corresponds to a unique couple of permittivities (spike and stem permittivities) (see Fig. 7).

4.1. Results with parametric and non-linear regressions

Among the numerous existing inversion techniques [35], we first tried to invert the simulated data (S3 and S4 data) with a classical parametric and non-linear regression method. We chose to test several models of regression curve (parabolic, hyperbolic, power laws...). Figure 8 reports the best accordance between the estimated and the exact spike permittivities. This regression was obtained with a power law model:

$$\epsilon_{estimated} = kV_1^\alpha V_2^\beta \tag{7}$$

where $k = 1310$, $\alpha = -5.58$, and $\beta = 4.60$. Notice that these parameters, obtained by a statistical adjustment, have no particular physical significance. The correlation is good for this model ($r^2 = 0.9983$, $\sigma^2 = 0.062$), but we

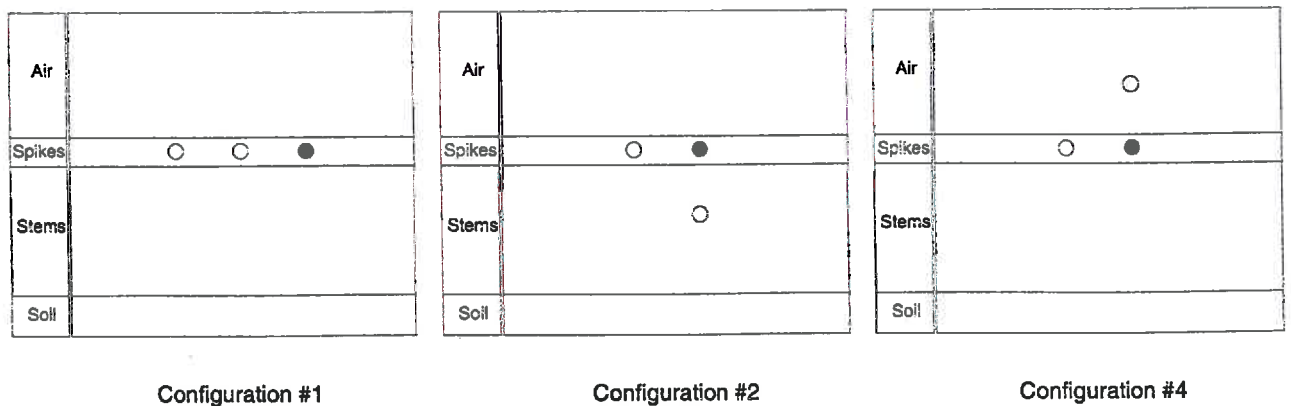


Figure 6. Presentation of three tested configurations. Configurations #2 and #4 improve respectively either the sensitivity to the stem permittivity or the sensitivity to the spike permittivity. Configuration #1 is a compromise. (Injection electrode in black, reception electrodes in white.)

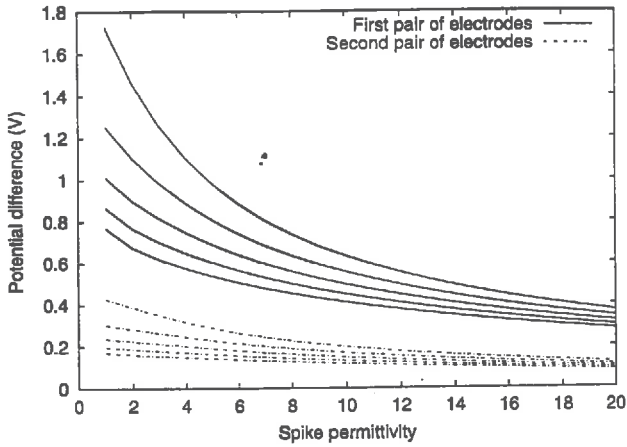


Figure 7. Potential difference between the electrodes of the first pair of reception electrodes (solid lines), and between the electrodes of the second pair of reception electrodes (dashed lines), as a function of the spike permittivity. Potential differences are plotted for five stem permittivities (stem permittivities from 1 to 5 downward).

can observe in Figure 9 the existence of a relationship between the residuals of the fitted data and the spike permittivities: they are over-estimated for the lowest and the highest values, while they are under-estimated for the mean values.

4.2. Radial basis function neural network architecture

In order to get better results, we have chosen to invert the data set by using an artificial neural network (ANN), which can be considered as a non-parametric regression tool [29]. More precisely, we have considered a radial basis function neural network (RBF-NN). RBF-NNs are composed of three layers: the input layer, the hidden layer, and the output layer [28, 29]. The input layer is the vector of the known potential differences and the output layer is the estimated spike permittivity (Fig. 10). Mathematically, we have:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N w_i \varphi_i(V_1, V_2) = \sum_{i=1}^N w_i \varphi_i(V). \quad (8)$$

The purpose is to compute the values of the weight w_i of each neuron, knowing the radial functions φ_i . The radial

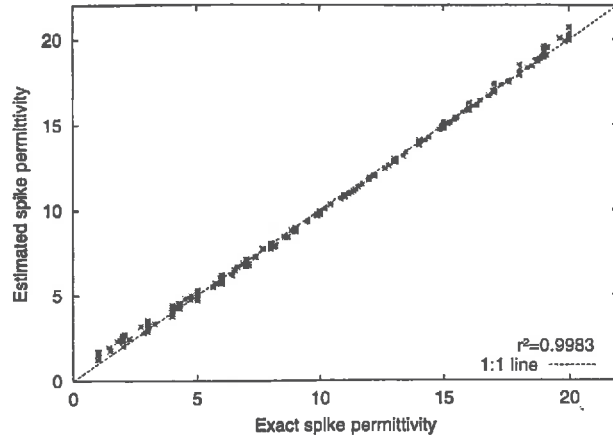


Figure 8. Comparison between the estimated spike permittivities and the exact spike permittivities. Results obtained for a non-linear regression with a power law model.

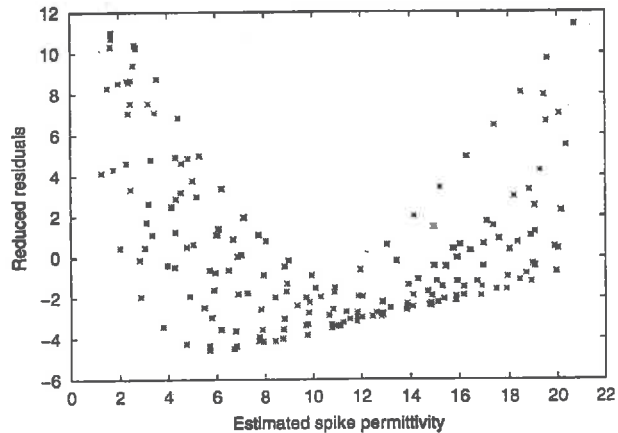


Figure 9. Plot of the reduced residuals of the estimated spike permittivities against the estimated spike permittivities showing the correlation of the residuals.

functions are chosen as Gaussian centers:

$$\varphi_i(V) = \exp\left(-\frac{1}{2} \left\| \frac{V - c_i}{\sigma_i} \right\|^2\right) \quad (9)$$

where c_i is the center of the i th basis and σ_i the bandwidth.

In order to compute the weights w_i (i.e. to train the network), we implemented a forward selection algorithm

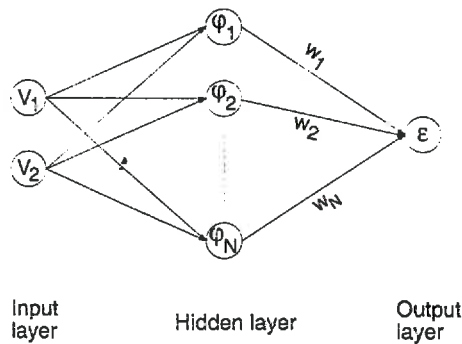


Figure 10. Architecture of the RBF neural network. The network estimates ϵ from V_1 and V_2 . Functions ϕ_i are known, weights w_i are adjusted.

[27]. This method first selects the best centers and the best bandwidths with regard to the training data and then calculates the weights of the RBF-NN by the least squares technique. The training data used by the algorithm is the results of the 100 simulations made with a fixed soil permittivity (S3 data).

4.3. Results with the neural network

The accuracy of the ANN is then estimated with the test set composed of noisy data (S4 data). Results are reported in Figure 11. One can see that the accuracy of the RBF-NN is very good since the estimated values of the spike permittivity are very close to the exact permittivities introduced in the simulations ($r^2 = 0.99996$ for the test data). The variances of the estimated spike permittivities are $\sigma^2 = 0.00029$ for the training set and $\sigma^2 = 0.0054$ for the test set.

The RBF-NN can also be used to estimate the stem permittivities (Fig. 12). Results are good too: $\sigma^2 = 0.00$ on the training set, and $\sigma^2 = 0.01$ on the test set ($r^2 = 0.99319$ for the test data). But the accuracy of the stem permittivity estimation is less than the estimation of the spike permittivity because there are only five different values of stem permittivities in the training set, whereas there are 20 different values in the spike training set. So, the stem permittivity estimation could be better with a larger training set composed of more different values of the stem permittivities.

In conclusion, the ANN is well adapted to the estimation of the permittivity of the organs of the plants. From two potential differences, it is possible to estimate inde-

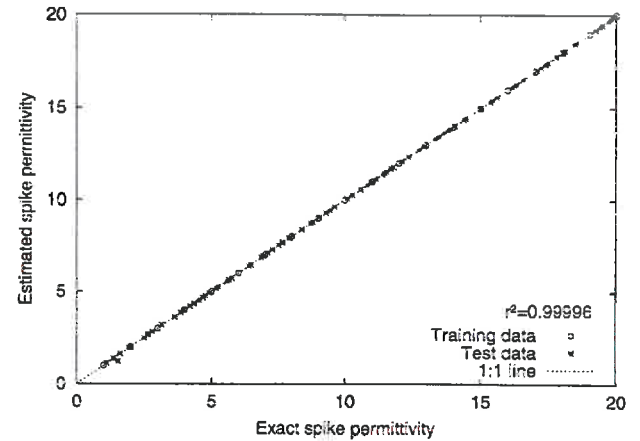


Figure 11. Comparison of the spike permittivities estimated with the RBF-NN with exact spike permittivities.

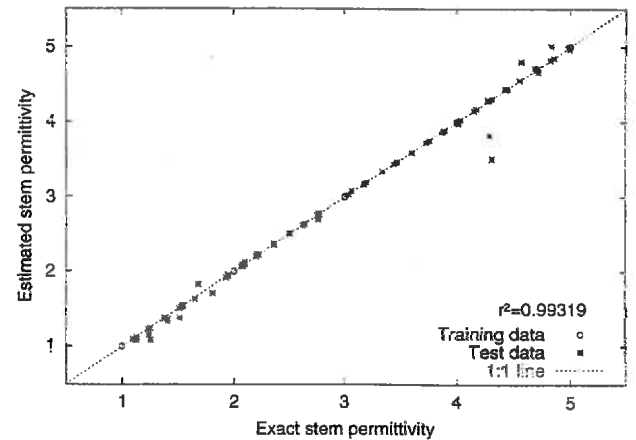


Figure 12. Comparison of the stem permittivities estimated with the RBF-NN with exact stem permittivities.

pendently and accurately the spike and the stem permittivities.

5. DISCUSSION

Several points have to be discussed.

5.1 Estimation of the spike water content

It follows the scheme:

$$V \rightarrow \epsilon \rightarrow w \quad (9)$$

where w is the spike water content ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$). One could remark that it would be possible – and less tedious – to estimate directly the water content from the potential difference ($V \rightarrow w$). We would have to compare the multipole measurements with the spike water content estimated by the gravimetric technique. But this would have to be done for every configuration of the electrodes of the instrument.

From an operational point of view, we propose to measure V , to estimate ϵ by using the inversion procedure, and finally to retrieve w .

On the first hand, roughly two parameters define the amount of water by layer: the water content of individual organs and the density of plants. This amount of water by layer, or the water profile, is then related to ϵ . Thus, we can consider that the relation $\epsilon \rightarrow w$ is an intrinsic property of the crop, and we can assume that this relation can be inverted.

On the other hand, the second part of the model ($V \rightarrow \epsilon$) depends only on the geometrical configuration of the instrument.

Thus, if we want to change the configuration of the instrument to estimate more precisely the plant water content, we only need to simulate the response of the instrument in this new configuration, and then to retrieve ϵ from the RBF-NN.

5.2 Accuracy of the method

We saw previously that the variance of the ANN, calculated for the test data, is $\sigma^2 = 0.0054$.

This is quite a good result but it is limited by the accuracy of the measurement of the potential difference. The uncertainty ΔV of the instrument, estimated from the measurements made by Féchant [12], is about 5%. If we add a noise of level 5% on the test data (S4), the accuracy of the ANN reaches 10%; this can be seen in Figure 13 where most of the estimated spike permittivities lie within the $\pm 10\%$ error interval. Thus, the absolute error on the spike permittivity estimation varies between 0.1 and 2.

We then have to consider the second part of the model: $\epsilon \rightarrow w$. We can assume a linear relation between the spike water content and the permittivity:

$$w = a\epsilon + b. \quad (11)$$

To build this relation, the water content is estimated by the gravimetric technique, and the coefficients a and b are computed by regression. Once a and b are calculated, the linear relation can be used to estimate the water con-

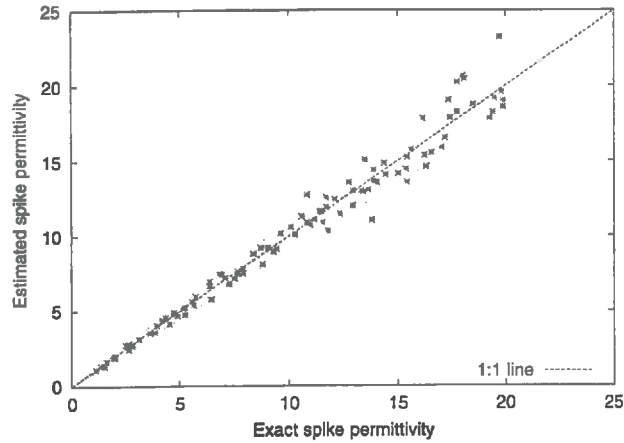


Figure 13. Spike permittivities estimated with the RBF-NN from noisy potential differences. Comparison with exact spike permittivities and $\pm 10\%$ error intervals.

tent from the permittivity. The uncertainty Δw on the water content is then:

$$\Delta w = \frac{\partial w}{\partial \epsilon} \Delta \epsilon + \frac{\partial w}{\partial a} \Delta a + \Delta b \quad (12)$$

$$= a\Delta \epsilon + \underbrace{\frac{\partial w}{\partial a} \Delta a + \Delta b}_{\Delta w_{reg}}. \quad (13)$$

Δw_{reg} is the error on the estimation of the water content by the gravimetric technique. Δw_{reg} is generally about 10%, corresponding to $\pm 10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ for the lower spike water contents, and $\pm 150 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ for the highest spike water contents.

We then have to compare $a\Delta \epsilon$ to Δw_{reg} . If we assume that a difference of permittivity of 20 represents a variation of water content of $1000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (compare Figs. 3 and 7), we have $a = \frac{1000}{20} = 50$, and finally:

$$10 < \Delta w_{reg} < 150 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$$

$$5 < a\Delta \epsilon < 100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}.$$

The main source of error is then included in the relation between the water content and the permittivity because of the relative uncertainty on the gravimetric technique. The proposed multipole method can therefore be considered to be more precise than the gravimetric method which is the classical destructive method.

5.3 Effect of the soil conductivity

We have shown that the soil permittivity has no influence on the potential differences. But we have not taken the soil conductivity σ into account (see Eq. (3)). Including a conductivity in the soil permittivity leads us to create a phase component (V_p) and can alter the quadrature component (V_Q) of the potential difference. We have then simulated the response of the instrument for a two layer medium composed of air and soil. Soil permittivities varied from 5 to 30 and soil conductivities were chosen between 10^{-4} and 10^{-1} S·m $^{-1}$, including most of the observed values. Simulations were performed for several electrode altitudes: 0.4, 0.6, 0.8, and 1 m above the ground (S5 data). Simulations without introducing soil conductivity (with only real soil permittivities) were also performed (S6 data).

Concerning the phase component, the values of V_p lie between 0 and 30 mV, which are low values in comparison with the quadrature component (about 1 V).

Concerning the quadrature component, the values V_Q of S5 data are close to the values V_Q of S6 data and relative variations are comparable: we can see in Table II that taking the soil conductivity into account increases the range of variation of the quadrature component but the effect is very weak even when the electrodes are 40 cm above the ground. For the other altitudes the effect is negligible.

Thus, in these electrode geometrical configurations, it is possible to neglect the soil conductivity as we are not interested in the phase component of the potential differences.

5.4 Variation of the injected current

The injected current could be changed to adjust the signal to the volume we want to scan. Theoretically,

multiplying the injection current by a factor increases the range of the instrument by the same factor. But in practice, there are two limitations to the modification of the current: too much intensity would reduce the life of the batteries, while a current chosen too low would reduce the signal to noise ratio.

5.5 Presence of liquid water on vegetation

As a last remark, we can note that any variation of the water present in the volume may influence the electrostatic measurement. Especially, variations of measurement conditions must be taken into account, such as the presence of dew or rainwater on the plant organs and the ground.

6. CONCLUSION

As the plant water content can be directly related to the standing fresh biomass, its measurement is one of the ways for monitoring and mapping the crop status and development. The reference technique is the classical gravimetric method which is destructive, time consuming and can only be applied to a limited number of samples.

The electrostatic multipole developed offers a new way to assess the crop water content in field conditions. The theoretical analysis as well as the preliminary experimental results show the potential of this instrument. The simulation performed on a wheat crop shows the possibility of a simultaneous assessment of the water content of spike and stem layers with an accuracy comparable or even better than that given by the gravimetric technique.

The multipole coupled with a geographic positioning system (GPS) could then be used for mapping the crop water content at the field scale for monitoring the crop

Table II. Absolute and relative variations of the quadrature component of the potential differences (V_Q) calculated on S5 data (simulation including soil conductivities), and S6 data (simulations with real soil permittivities only). Values computed for several electrode altitudes.

		40 cm	60 cm	80 cm	1 m
Absolute variation of V_Q (mV)	with soil conductivity (S5 data)	50.3	17.9	7.17	3.37
	without soil conductivity (S6 data)	20.3	13.0	5.98	3.05
Relative variation of V_Q (%)	with soil conductivity (S5 data)	3.9	1.3	0.49	0.23
	without soil conductivity (S6 data)	2.0	1.0	0.46	0.22

growth and its heterogeneity and assessing the final yield. This technique then offers a good potential in precision farming and also in providing ground truth information for calibrating remote sensing data. However, it is now necessary, after this feasibility study, to test the multipole on several crops in order to evaluate the effective accuracy of this new measurement technique in field conditions.

Appendix: Some fundamentals of electromagnetism

The two first equations of Maxwell with no temporal dependance are:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (14)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad (15)$$

where \vec{D} is the electric induction, \vec{E} the electric field ($\vec{D} = \epsilon \vec{E}$), and ρ the electric charges. From equation (14), a function V exists, such as $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$, because the equality $\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla}V) = 0$ is always true whatever V . In electromagnetics, V is the electrostatic potential. Equation (13) then becomes:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \vec{\nabla} \cdot (\epsilon \vec{E}) \\ &= -\vec{\nabla} \cdot (\epsilon \vec{\nabla}V) \\ &= -\vec{\nabla} \epsilon \cdot \vec{\nabla}V - \epsilon \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla}V) \\ &= -\vec{\nabla} \epsilon \cdot \vec{\nabla}V - \epsilon \Delta V = \rho. \end{aligned} \quad (16)$$

But $\vec{\nabla} \epsilon = 0$ since we assume an homogeneous medium. We then obtain Poisson's equation:

$$\Delta V = -\frac{\rho}{\epsilon}. \quad (17)$$

Furthermore, $\rho \neq 0$ on the electrodes and $\rho = 0$ everywhere else.

Acknowledgments: The authors would like to thank Dr. M. Vidrascu (INRIA, Institut National de la Recherche en Informatique et Automatique, Rocquencourt, France), Prof. O. Picon (University of Marne-la-Vallée, France), Prof. A. Tabbagh (University of Paris VI, France), Prof. Ph. Huet (INA P-G, Institut National Agronomique Paris-Grignon, France), and Dr. J.-P. Wigner (INRA, Institut National de la Recherche Agronomique, Montfavet, France) for their help with this work.

Financial support for this work was partly provided by the INRA Precision Agriculture Project 1999–2000.

REFERENCES

- [1] Aase J.K., Siddoway F.H., Assessing winter wheat dry matter production via spectral reflectance measurements, *Remote Sens. Environ.* 11 (1981) 267–277.
- [2] Akkal N., Jeuffroy M.H., Meynard J.M., Boissard P., Helbert J., Valéry P., Lewis P., Assessment of a method for estimating the nitrogen requirements of a wheat crop based on an early estimate of cover fraction, in: Stafford J.V. (Ed.), *Precision Agriculture '97. Vol. I: Spatial variability in soil and crop*, 1st European Conference, Fertiliser Society, Warwick, UK, 07–10/09/1997, Bios Scientific Publ., Oxford, pp. 405–412.
- [3] Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E.T., Hatfield J.L., Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat, *Agron. J.* 76 (1984) 300–306.
- [4] Asrar G., Kanemasu E.T., Jackson R.D., Pinter P.J., Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data, *Remote Sens. Environ.* 17 (1985) 211–220.
- [5] Asrar G., Kanemasu E.T., Yoshida M., Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle, *Remote Sens. Environ.* 17 (1985) 1–11.
- [6] Batra R.K., Singh B., Singh K., Determination of water content of plant leaves by beta attenuation, *Int. J. Rad. Appl. Instr., Part A: Appl. Rad. Isotopes* 43 (1992) 1235–1239.
- [7] Benedetti R., Rossini P., On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics: The case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna, *Remote Sens. Environ.* 45 (1993) 311–326.
- [8] Das D.K., Mishra K.K., Kalra N., Assessing growth and yield of wheat using remotely-sensed canopy temperature and spectral indices, *Int. J. Remote Sens.* 14 (1993) 3081–3092.
- [9] Daughtry C.S.T., Gallo K.P., Bauer M.E., Spectral estimates of solar radiation intercepted by corn canopies, *Agron. J.* 75 (1983) 527–531.
- [10] Dobson M.C., Ulaby F.T., Le Toan T., Beaudoin A., Kasischke E.R., Christensen N., Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30 (1992) 412–415.
- [11] du Toit H.F., George P.L., Lang P., Paté P., Steer D., Vidrascu M., An introduction to Modulef. Modulef user guide #1, INRIA, 1991, 309 p. (available at <http://www-rocq.inria.fr/modulef/Doc/GB/welcome.html>.)
- [12] Féchant C., 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, Ph.D. thesis, Université de Paris VI, 1996, 190 p.
- [13] Féchant C., Tabbagh A., 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 (Laboratory measurement of the dielectric permittivity of vegetables at 430 kHz. Correlation between apparent permittivity of a

set of wheat ears and their water content), C. R. Acad. Sci., Sér. II, fasc. B: Méc., Phys., Astron. 327 (1999) 285–298.

[14] Féchant C., Buis J.-P., Tabbagh A., In situ measurement of medium-frequency apparent permittivity using an electrostatic quadrupole. Application to the determination of the water content of wheat, Meas. Sci. Technol. 10 (1999) 174–181.

[15] Ferrazzoli P., Paloscia S., Pampaloni P., Schiavon G., Solimini D., Ceppo P., Sensitivity of microwave measurements to vegetation biomass and soil moisture content, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 30 (1992) 750–756.

[16] Gosse G., de Parcevaux S., Application de l'absorption des ondes centimétriques à la mesure de l'humidité des végétaux, in: Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère, INRA (Eds.), 1970, pp. 359–369.

[17] Hatfield J.L., Remote sensing estimators of potential and actual crop yield, Remote Sens. Environ. 13 (1983) 301–311.

[18] Jackson T.J., O'Neill P.E., Attenuation of soil microwave emission by corn and soybeans at 1.4 and 5 GHz, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 28 (1990) 978–980.

[19] Jackson T.J., Schmugge T.J., Vegetation effects on the microwave emission of soils, Remote Sens. Environ. 36 (1991) 203–212.

[20] Kittel Ch., Introduction to solid state physics, John Wiley & Sons, 7th ed., 1996, 673 p.

[21] Le Toan T., Beaudoin A., Riou J., Guyon D., Relating forest biomass to SAR data, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 30 (1992) 403–411.

[22] Leblon B., Guerif M., Baret F., The use of remotely sensed data in estimation of PAR use efficiency and biomass production of flooded rice, Remote Sens. Environ. 38 (1991) 147–158.

[23] Lemaire G., Salette J., Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Étude de l'effet du milieu (Relationship between growth and nitrogen uptake in a pure grass stand. I. Environmental effects), Agronomie 4 (1984) 423–430.

[24] Linvill D.E., Dale R.F., Hodges H.F., Solar radiation weighting for weather and corn growth models, Agron. J. 70 (1978) 257–263.

[25] Monteith J.L., Solar radiation and productivity in tropical ecosystems, J. Appl. Ecol. 9 (1972) 747–766.

[26] Monteith J.L., Climate and the efficiency of crop production in Britain, Philos. Trans. Roy. Soc. London B 281 (1977) 277–294.

[27] Orr M.J.L., Introduction to radial basis function networks, Tech. report, Centre for Cognitive Science, University of Edinburgh, Scotland, 1996, 67 p. (available at <http://www.anc.ed.ac.uk/~mjo/papers/intro.ps.gz>.)

[28] Poggio T., Girosi F., Networks for approximation and learning, Proc. IEEE 78 (1990) 1481–1497.

[29] Sarle W.S., Neural networks and statistical models, in: Proceedings of the nineteenth annual SAS User Group international conference, 1994, pp. 1538–1550. (available at <ftp://ftp.sas.com/pub/sugi19/neural/neural1.ps>.)

[30] Schätzler H.P., Kühn W., Growth studies on plant plots by gamma scanning, Int. J. Appl. Rad. Isotopes 28 (1977) 645–652.

[31] Schnyder H., Baum U., Growth of the grain of wheat (*Triticum aestivum* L.). The relationship between water content and dry matter accumulation, Eur. J. Agron. 1 (1992) 51–57.

[32] Steinmetz S., Guéris M., Delécolle R., Baret F., Spectral estimates of the absorbed photosynthetically active radiation and light-use efficiency of a winter wheat crop subjected to nitrogen and water deficiencies, Int. J. Remote Sens. 11 (1990) 1797–1808.

[33] Tabbagh A., Hesse A., Grard R., Determination of electrical properties of the ground at shallow depth with an electrostatic quadrupole: Field trials on archaeological sites, Geophys. Prospect. 41 (1993) 579–597.

[34] Taconet O., Benallegue M., Vidal-Madjar D., Prévot L., Dechambre M., Normand M., Estimation of soil and crop parameters for wheat from airborne radar backscattering data in C and X bands, Remote Sens. Environ. 50 (1994) 287–294.

[35] Tarantola A., Inverse problem theory. Methods for data fitting and model parameter estimation, Elsevier, 1987, 613 p.

[36] Tucker C.J., A critical review of remote sensing and other methods for non-destructive estimation of standing biomass, Grass Forage Sci. 35 (1980) 177–182.

[37] Wigneron J.-P., Chanzy A., Calvet J.-C., Bruguier N., A simple algorithm to retrieve soil moisture and vegetation biomass using passive microwave measurements over crop fields, Remote Sens. Environ. 51 (1995) 331–341.

[38] Zienkiewicz O., The finite element method, McGraw-Hill, Maidenhead, England, 1977, 787 p.

ESTIMATION OF THE VERTICAL PROFILE OF THE WHEAT CROP WATER CONTENT WITH AN ELECTROSTATIC MULTIPOLE. AN EXPERIMENTAL STUDY.

J. Helbert ^{a*}, P. Boissard ^b, and J.-P. Buis ^c.

^a Institut National de la Recherche Agronomique, Unité Environnement et Grandes Cultures, 78850 Thiverval Grignon, France.

^b Institut National de la Recherche Agronomique, Unité de Recherches Intégrées en Horticulture, Route des Colles, Sophia-Antipolis, 06410 Biot, France.

^c CIMEL Électronique, 172 rue de Charonne, 75011 Paris, France.

Abstract

A new instrument, an electrostatic multipole, has been developed to assess *in situ* and non-destructive estimations of water content horizontal layers of crops by dielectric measurements. A winter wheat crop has been measured by using the multipole during the last month before harvesting. Results show that it is possible to detect the plant development stages typically the end of the water plateau revealing the grain maturity. The electrostatic multipole has also been used to estimate the total water content of the canopy aerial part. The average error on the water content is about 320 g·m⁻². Simultaneous estimations of spike and stem water contents can also be achieved; the root mean square errors (RMSE) are about 120 g·m⁻² and 230 g·m⁻² respectively. However the accuracy of these estimations is all the more limited as the plant water content becomes spatially heterogeneous. Avoiding measuring on too inhomogeneous plots leads to better results and the RMSE of the spike and stem water contents are respectively 100 g·m⁻² and 195 g·m⁻². These values correspond to a relative error of about 15% which is very close to the accuracy of the gravimetric technique considered as the reference method.

water content / dielectric permittivity / non-destructive method / vegetation canopy / biomass

Résumé - Estimation *in situ* du profil vertical du contenu en eau d'une culture de blé à l'aide d'un multipôle électrostatique. Etude

*J. Helbert, INRA, Unité Environnement et Grandes Cultures, 78850 Thiverval Grignon, France.
Phone: +33 (0)1.30.81.55.01. Fax: +33 (0)1.30.81.55.63. E-mail: Jerome.Helbert@grignon.inra.fr

expérimentale.

Un nouvel instrument de mesure, un multipôle électrostatique, a été développé pour permettre l'estimation *in situ* et non destructive du contenu en eau des strates horizontales d'un couvert végétal grâce à la mesure de leur permittivité diélectrique. Une culture de blé d'hiver a été suivie à l'aide de ce multipôle électrostatique pendant un mois jusqu'à la récolte. Les résultats montrent qu'il est possible de détecter les stades de développement des plantes, notamment la fin du palier hydrique révélatrice de la maturité des grains. Le multipôle électrostatique a également été utilisé pour estimer le contenu en eau des plantes. L'erreur moyenne commise sur le contenu en eau est de l'ordre de $320 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Les contenus en eau des épis et des tiges de blé peuvent par ailleurs être estimés simultanément avec une précision d'environ $120 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ pour les épis et $230 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ pour les tiges. Cependant, cette précision est limitée en présence de fortes hétérogénéités de contenu en eau. En évitant ces fortes hétérogénéités, les contenus en eau des épis et des tiges peuvent être estimés avec une meilleure précision, respectivement de l'ordre de $100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ et de $195 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Ces valeurs correspondent respectivement à des précisions relatives de l'ordre de 15%, précisions comparables à celle de la méthode pondérale de référence.

contenu en eau / permittivité diélectrique / méthode non-destructive / couvert végétal / biomasse

1. Introduction

Estimating plant water content is a recurrent topic in agronomy and agriculture. Plant-water relations are very complex and hydric status, and therefore plant water content, determines widely plant growth and development. Moreover, plant water content is related to plant biomass. Estimation of plant water content is therefore very important for crop monitoring.

At early stages, the estimation of the nitrogen requirements of a growing crop is possible if we can infer the maximum potential biomass [1], using the dilution curve [13]. After flowering, it has been shown in the case of wheat crops that the spike water content is correlated to the total biomass and so to the final yield [17]. On the other hand, studies have shown that the efficiency of light conversion (ϵ), which is a key variable for estimating dry matter production from solar radiation [14,15], is influenced by the plant hydric status [19,2].

For many years, plant water content estimations have been performed by using the gravimetric technique, which has become the reference method. However, this method presents several drawbacks despite its accuracy. It is first a destructive

method based on sampling, which is tedious when it has to be often repeated. This means also that it gives only very local information on plant water content. Secondly, the gravimetric method is long since the plants have to be dried during one or two days in order to evaporate their water content. This method is therefore not adapted to recurring estimations of plant water content.

On one hand, new techniques have then been developed to assess indirectly but more quickly the plant water content or the crop biomass. The emergence of airborne and satellite sensors has led to promising applications in agriculture. Vegetation indices derived from reflectance measurements can either be directly related to biomass by empirical relations [21, 5], or they can give LAI or intercepted radiation estimations which are afterwards integrated in crop simulation models such as the Monteith model [3]. But in both cases, the accuracy of the estimations is affected by numerous factors like atmospheric or agronomic factors [18]. On the other hand, the direct remote estimation of plant water content also encounters some difficulties. Indeed, since the instruments used are radars, measurements are sensitive to the plant geometry [8] and lead to inaccurate water content predictions. With passive radiometers, measurements are better correlated with plant water content [11,12], but the best accuracy is about 15% [22].

An alternative solution, consisting of using *in situ* sensors, meets great success with the rise of precision farming applications. But despite few attempts made some years ago [9, 4, 16], the non-destructive estimation of plant water content still remains an issue. This article presents therefore a new instrument, an electrostatic multipole, to assess non-destructive and instantaneous estimations of plant water content. This instrument was first designed for geophysical prospecting, especially for archaeology [20]. It has recently been adapted for agronomic research and a first feasibility study has shown that this instrument is sensitive to plant water content [7]. Moreover, a theoretical work has proven that the electrostatic multipole can give very accurate estimations of water content of crop horizontal layers [10]. This paper deals with an experimental validation of the instrument intended to estimate the spike and the stem water contents of a wheat crop.

2. Material and methods

2.1. The electrostatic multipole

2.1.1. Theoretical background

The electrostatic multipole is composed of four electrodes, two electrodes injecting an alternating current I ($I=200 \mu\text{A}$), two others measuring a potential difference (see

figure 1). Other pairs of reception electrodes can be added to make simultaneous potential difference measurements.

The potential difference between the reception electrodes depends on the electrical properties of the medium to be measured, which are the relative dielectric permittivity ϵ (no unit) and the conductivity σ ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$). These two properties can be arranged to form the complex permittivity ϵ^* :

$$\epsilon^* = \epsilon - i \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} \quad (1)$$

where f is the frequency of the electromagnetic wave ($f=450$ kHz) and ϵ_0 the permittivity of air ($8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$). As shown in a previous paper [10], the component in phase with the current corresponds to the conductivity while the component in quadrature with the current corresponds to the dielectric permittivity. Moreover, as crops are non-conducting media, the phase component can be ignored. On the other hand, Féchant and Tabbagh have shown that in controlled conditions the spike dielectric permittivity at 430 kHz is linearly correlated to the spike water content [6]. The potential difference is thus an inverse function of the moisture content.

2.1.2. Electrode configuration and portable device

A simulation study of the instrument has shown that two pairs of reception electrodes are necessary to assess simultaneously the spike and the stem water contents [10]. The multipole is therefore composed of three pairs of electrodes. The pair of injection electrodes is placed at the altitude of the wheat spikes, the first pair of reception electrodes is placed at the same altitude (see figure 2). These four electrodes form a horizontal square of typically 50-cm side. The second pair of reception electrodes is 50 cm above the first pair of reception electrodes. So, the four reception electrodes form a vertical square of 50-cm side. The injection electrodes are parallelepipeds of dimensions $12 \times 12 \times 8 \text{ cm}^3$. The reception electrodes are square aluminum plates of 12-cm side and 1-mm thick. The electrodes are fixed on a light and non-conductive structure made of PVC. The demodulator and the multimeter used to make potential difference readings are put onto a tray made of aluminum. This tray is electrically connected to the ground reference with a conducting stake. Two low-pressure wheels allow the frame to be easily moved within fields. Moreover, the altitude of the electrodes can be adjusted thanks to telescopic tubes.

2.2. Experimentation

2.2.1. Experimental protocol

A winter wheat crop (variety Isengrain) has been studied during the grain filling and drying period up to harvest, from the 6th of July to the 3rd of August 2000 (one month). Plots of surface $50 \times 50 \text{ cm}^2$ have been delimited in the field to make measurements. (Notice that the dimensions of the plots are the same as the inter-electrode distances.) The measurement protocol was the following:

- 1) A first measurement is made in a plot at the normal plant density (about $700 \text{ plants}\cdot\text{m}^{-2}$).
- 2) Several plants of the plot are cut off to reduce the plant density at approximately 75% of the normal plant density, and a second measurement is performed.
- 3) The plant density is reduced again to obtain about half the normal density, and a third measurement is made.
- 4) Finally, all the remaining plants of the plot are cut off, and the three plant samples are brought to the laboratory to estimate their water weight.

Water weights of the spikes and the stems have been estimated by the classical gravimetric technique consisting in a weighting before and after an oven drying (80°C during 48 hours). Water contents per surface unit have been deduced by dividing the water weights by the plot surfaces.

2.2.2. Potential difference measurements

Potential differences have been measured between the electrodes of each pair of reception electrodes, each potential difference being composed of two components in quadrature.

Potential differences between the electrodes of the first pair of reception electrodes (V_1) vary between 10 mV and 125 mV for the quadrature component and between 40 mV and 100 mV for the phase component. Concerning the electrodes of the second pair of reception electrodes (V_2), quadrature potential differences vary between 25 mV and 95 mV, and phase potential differences vary between 25 mV and 50 mV.

In theory, the quadrature and the phase components are very different and the phase component can be neglected [10]. Here, we can see that the potential difference components are of the same order of magnitude, maybe due to some technical difficulties to realize an accurate synchronous demodulator. The phase and quadrature components are then both considered to form potential difference vectors.

As predicted by theory, the range of the potential differences measured on the

second pair of reception electrodes is smaller than the range of the potential differences measured on the first pair of reception electrodes. This is because the distance between the second pair of reception electrodes and the injection electrodes is greater than the distance between the first pair of reception electrodes and the injection electrodes.

3. Results

3.1. Correlation of potential differences with plant water contents

We have firstly checked that the potential differences are correlated to the plant water contents. Table I reports the results of an analysis of variance. Potential differences are expressed as a function of the water content and the dry matter content.

Concerning the first potential difference (V_1), we can see that only the spike and the stem water contents have an influence. The corresponding probabilities are both inferior to 0.01, whereas the probabilities affected to the spike and the stem dry matter contents are both very superior to 0.05 (0.4162 and 0.7437 respectively).

Concerning the second potential difference (V_2), it can be seen from table I that V_2 depends only on the spike water content (probability less than 0.01). The spike dry matter content, the stem water content, and the stem dry matter content are not significant (probabilities superior to 0.05). This can be explained by the configuration of the multipole: As the second pair of reception electrodes is above the crop, the main contribution comes from the spikes and not from the stems.

The instrument is therefore clearly sensitive to the plant water content. The following paragraphs present two applications of the multipole: the detection of the plant development stages and the estimation of the water contents.

3.2. Detection of plant development stages

The measurements provided by the electrostatic multipole have been applied to the following of plant development stages. Figure 3 depicts the evolutions of the spike water content and the potential difference measurements along time. It can be clearly seen that the spike water content is constant from day 188 to day 203, corresponding to the grain filling. However, we can observe variations of spike water content during this period because, as classical water content estimation is destructive, it was each day performed on a different plot and, so, was affected by plant growth heterogeneity. After day 203 the spike water content drops fast, revealing the spike maturity [17]. Concerning the potential differences, we can see that measurements are constant from

day 188 to day 203 and increase after day 203. The inverse correlation between water content and potential difference is then well marked. Especially, the increase of the potential difference measurements is clearly related to the rapid water loss.

The electrostatic multipole can therefore reveal variations of plant water content and can be used to detect spike maturity. Heterogeneity of maturity, and especially maturity backwardness, can then be studied at the crop scale by coupling the multipole with a GPS in order to produce maps. The electrostatic multipole could then be used to predict the best time for harvesting.

3.3. Estimation of the plant water content

The main purpose of the instrument is the estimation of the plant water content from potential difference measurements. Water content estimations can be achieved for the whole plants as well as for the spikes and the stems. We can either use the phase component of the potential differences, the quadrature component, or the modulus of the potential difference vector.

3.3.1. Estimation of wheat water content

The general model for estimation of total plant water content (WC) from potential difference measurements has been chosen as:

$$WC_{Plants} = \alpha \exp\left(-\frac{V}{\beta}\right) \quad [2]$$

where V can be:

- 1) the phase component, the quadrature component, or the modulus of the potential difference vector.
- 2) the first potential difference V_1 , or the potential difference V_2 .

The two potential differences can also be used simultaneously:

$$WC_{Plants} = \alpha \exp\left(-\frac{V_1}{\beta}\right) + \gamma \exp\left(-\frac{V_2}{\delta}\right) \quad [3]$$

Correlations between the observed wheat water content and the estimations of the wheat water content from the potential measurements are shown in table II. First, we can see that the models are good since the line slopes and intercepts are close to 1 and 0 respectively. Second, if we compare the coefficients of determination r^2 we can

see that V_2 is the weakest estimator of the plant water content ($r^2 < 0.8023$). This is caused by the fact that the second pair of reception electrodes is placed outside the canopy 50 cm above the spike layer and is therefore too far from the plants. Better results are obtained with the potential differences V_1 ($0.7672 < r^2 < 0.8468$). But the best correlations are obtained by combining V_1 and V_2 . In this case the coefficient of determination reaches 0.8592. Third, concerning the potential difference components, one can see that the phase component is quite correlated to the plant water content but the quadrature component gives much better water content estimations. However, the best estimations are obtained with the modulus of the potential differences.

Figure 4 presents the comparison between the water contents estimated by the gravimetric technique and the water contents predicted from the moduli of the two potential differences. We can see on this figure that the accordance is rather good (from table II, $r^2 = 0.8592$). The root mean square error is about $320 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$.

Thus we can conclude that accurate plant water content estimations can be achieved by using the two components of the two potential difference measurements.

3.3.2. Estimation of the spike and the stem water contents

As the instrument is composed of two pairs of reception electrodes, it is theoretically possible to estimate both the spike water content and the stem water content [10]. An analysis of variance reported in table III shows that it is experimentally possible. The spike water content can be estimated from the two potential differences (probabilities inferior to 0.01) whereas only the first potential difference can be used to estimate the stem water content (the probability associated to V_2 is 0.6765 and therefore superior to 0.01). The explanation comes from the electrode configuration which has been chosen to encourage spike WC estimations.

The best spike WC estimations have been obtained with the following model:

$$WC_{Spikes} = \alpha \exp\left(-\frac{V_1}{\beta} - \frac{V_2}{\gamma}\right) \quad [4]$$

Concerning the stem WC estimation, we have used a simpler model since V_2 is not sensitive to stem WC:

$$WC_{Stems} = \alpha \exp\left(-\frac{V_1}{\beta}\right) \quad [5]$$

Comparisons between predicted WCs and WCs estimated with the classical

method are reported in table IV. As for the estimation of the whole plant WC, it can be seen that the models are correct (slopes close to 1 and intercepts close to 0).

Results show that the use of only the phase component leads to poor results ($r^2=0.7461$ for stem WC and $r^2=0.7858$ for spike WC). Better results are obtained with the quadrature component ($r^2=0.7991$ for stem WC and $r^2=0.8405$ for spike WC) but the best results are obtained by considering the modulus of the potential differences ($r^2=0.8166$ for stem WC and $r^2=0.8607$ for spike WC). Figures 5 and 6 report the results obtained with the moduli of the potential differences.

As predicted, it is also possible to see from table IV that the spike WC estimation is better than the stem WC estimation. The coefficients of determination are 0.8607 and 0.8166 respectively, the root mean square error is $123 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ for the spike WC and $233 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ for the stem WC.

The accuracy of the instrument is then quite good when both components are used. It is therefore possible to estimate the vertical profile of the plant water content from potential difference measurements. Besides the estimation of the water content of particular organs (stems or spikes), an other application could be the study of water redistribution between plant organs during development stages like grain filling.

4. Discussion

4.1. Effect of the horizontal plant water content heterogeneity

Electromagnetic waves created by the injection electrodes are not limited in the space defined by the electrodes. As a consequence the plants situated outside the volume limited by the electrodes can influence the potential difference measurements. In order to study the effect of the plant WC heterogeneity, we can assume here that the plant density outside the studied plot is equal to the plant density of the plot when no plant has been cut off. Therefore, the potential differences can be expressed as a function of i) the water content of the plants belonging to the plot, and ii) the water content of the plants situated outside the plot.

An analysis of variance, which results are reported in table V, shows that the water content of the plants situated outside the electrodes has an influence on V_1 and V_2 . V_1 depends on the spike and the stem water contents of all the plants (all probabilities inferior to 0.05), whereas V_2 is only sensitive to the spike water content of all the plants.

In order to qualify more precisely the influence of plant WC heterogeneity,

the data set of the potential difference measurements has been split into three classes. The first class represents measurements made on plots where plant WC was greater than 80% of the normal plant WC. This class represents 50% of the data. The second class, gathering 30% of the data, represents measurements made on plots where plant WC was between 55% and 80% of the normal plant WC. The last class merges measurements made on plant WC less than 55% of the normal WC, representing 20% of all the data.

Linear regressions have been computed on each data set to check out the accordance of the data with the model described by equation [3]. Figure 7 reports plant water contents estimated by the classical method vs. plant water content predicted by potential difference measurements. The regression line of each data class has also been plotted. We can see on this figure that the regression lines of the two first data sets are close and almost parallel to the dashed line representing the first bisectrix (1:1 line), whereas the third line is not parallel to the first bisectrix at all. Statistical computations reported in table VI also prove that the first two lines can be considered as unique and equal to the 1:1 line. Contrarily, the third line slope is 0.584 and cannot be statistically equal to 1. Concerning the spike WC and the stem WC estimations, slopes are also close to 0.6 and can not be significantly equal to 1 at risk 5%. Therefore, the model parameters are not adapted to the potential difference measurements made on the plots where there are great variations of the plant water content between inside and outside the inter-electrode space. Moreover, since slope values are inferior to 1, plant WCs of the 3rd class data are overestimated. In this case, this means that the multipole becomes sensitive to the water content of the plants present outside the plots. Furthermore, it can be seen on figure 7 that this effect is not linear and that plant WC overestimation increases with real plant WC. The multipole is then especially sensitive to the difference of plant WCs between outside and inside the plots. Notice that this is clearly revealed in our experiment because we created great plant water contrasts between inside and outside the plots.

Thus, better results could be obtained by limiting the contrast of plant WCs. For example, the coefficient of determination reaches 0.9181 (instead of 0.8592) if the two points corresponding to the two worst estimations are removed. The same improvements can be obtained for the spike WC and the stem WC estimations. The coefficients of determination become respectively 0.9072 and 0.8771 (instead of 0.8607 and 0.8166), and root mean square errors become $103 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ and $195 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (instead of $123 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ and $233 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$).

Therefore, care must be taken when measurements are made on plots where high plant WC spatial heterogeneity is present. But as shown above, measurements can be achieved with good accuracies in fields of small heterogeneities or when the characteristic variation distance is about at least two or three times the inter-electrode distance.

4.2. Effect of the uncertainty on destructive estimations of plant water content

The gravimetric estimation of plant water content is also affected by uncertainty. The plant water content per square meter (WC) can be written as the ratio between the mass of water present into the plot (m_w) and the surface of the plot (S):

$$WC = \frac{m_w}{S} \quad [6]$$

So:

$$\ln WC = \ln m_w - \ln S \quad [7]$$

By differentiating this equation, we obtain the expression of the uncertainty on the water content. It is first composed of the uncertainty on the estimation of the mass of water, and second of the uncertainty on the determination of the plot surface:

$$\frac{\Delta WC}{WC} = \frac{\Delta m_w}{m_w} + \frac{\Delta S}{S} \quad [8]$$

The plot is a square of side L. Its surface S can then be written as $S=L^2$. So:

$$\frac{\Delta S}{S} = 2 \frac{\Delta L}{L} \quad [9]$$

$L=50$ cm and $2\Delta L$ can be estimated to 5 cm. The uncertainty on the plot surface is then 10%. The uncertainty on the mass of water is generally about 5%. The uncertainty on the plant water content reaches therefore 15%. This uncertainty cannot be neglected and it is partly responsible of the inaccuracy of the model used to estimate the plant water content from the potential differences.

On the other hand, we have seen that the uncertainty on spike water content is $103 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. As the mean spike water content is $550 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, an uncertainty of 15% leads to an error estimation of about $83 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. So, comparatively to the multipole method, the accuracy of the classical method is a little better but of the same magnitude. Then the electrostatic multipole can be considered as an accurate instrument.

5. Conclusion

Gravimetric water content estimation has been a reference method for years. But the need for rapid, non destructive, and accurate estimations of water content has led to the development of new techniques like remote sensing techniques. However, satellite and airborne sensors give no entire satisfaction as many factors affect measurements. At the field level, many instruments are now available for precision farming. But they are based, in the great majority, on radiometric measurements in order to assess the plant foliar index. Estimating plant water content remains therefore an actual topic.

An electrostatic multipole has then been developed to estimate the plant water content, and more precisely to assess the horizontal and vertical distributions of water content in canopy vegetation. Thus, a purpose of the multipole is clearly to estimate the water content of horizontal canopy layers (stems and spikes) related to biomass. An experimentation performed on a wheat crop has shown that this instrument is very promising: Detection of plant development stages can be performed by following the temporal evolution of the measurements and estimations of plant water content can be achieved instantaneously. Furthermore, we have shown that simultaneous and accurate estimations of spike and stem water contents are feasible. This instrument can therefore assess the vertical distribution of water content. On the other hand, since measurements are made on small surfaces, it is also possible to point out heterogeneities in the horizontal distribution of plant water content. The accuracy of the instrument is a little smaller, but comparable in magnitude, than the accuracy of the classical gravimetric method. However, the accuracy of the instrument tends to decrease in presence of very strong spatial heterogeneities, i.e. when the characteristic distance of variation is close to the inter-electrode distance.

Many agricultural and agronomic applications can therefore be performed with such an instrument: Yield forecastings, pasture or fodder biomass estimations, detection of maturity backwardnesses, study of water redistribution between organs. Coupled with a positioning system and mounted on a tractor, the multipole should become a real instrument for precision farming. It could therefore be possible to produce maps of water content distribution in crops and to use them in aid-decision making.

A new electronic board, giving more accurate measurements, is being finished off. It will be tested on several crops during 2001 and the documentation will be completed before a commercial version of the electrostatic multipole may be available.

Acknowledgments

The authors would like to thank Prof. O. Picon (University of Marne-la-Vallée, France), Prof. Ph. Huet (INA P-G, Institut National Agronomique Paris-Grignon, France), and Dr. J.-P. Wigneron (INRA, Institut National de la Recherche Agronomique, Montfavet, France) for their help to this work.

Financial support to this work was partly provided by the INRA Precision Agriculture Project 1999-2000.

References

- [1] Akkal N., Jeuffroy M.H., Meynard J.M., Boissard P., Helbert J., Valéry P., Lewis P., Assessment of a method for estimating the nitrogen requirements of a wheat crop based on an early estimate of cover fraction, in: "Precision Agriculture '97. Vol. I: Spatial variability in soil and crop", Stafford J.V. (ed.), 1st European Conference, Fertiliser Society, Warwick (UK), 07-10/09/1997, Bios Scientific Publ., Oxford, 405-412.
- [2] Asrar G., Hipps L.E., Kanemasu E.T., Assessing solar energy and water use efficiencies in winter wheat: A case study, *Agric. For. Meteo.*, 31 (1984), 47-58.
- [3] Asrar G., Kanemasu E.T., Jackson R.D., Pinter P.J., Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data, *Remote Sens. Environ.*, 17, 3 (1985), 211-220.
- [4] Batra R.K., Singh B., Singh K., Determination of water content of plant leaves by beta attenuation, *Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part A: Appl. Radiat. Isot.*, 43, 10 (1992), 1235-1239.
- [5] Das D.K., Mishra K.K., Kalra N., Assessing growth and yield of wheat using remotely-sensed canopy temperature and spectral indices, *Int. J. Remote Sensing*, 14, 17 (1993), 3081-3092.
- [6] Féchant C., Tabbagh A., 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 (Laboratory measurement of the dielectric permittivity of vegetals at 430 kHz. Correlation between apparent permittivity of a set of wheat ears and their water content), *C. r. Acad. Sci., Sér. II, fasc. B: Méc., Phys., Astron.*, 327, 2-3 (1999), 285-298.
- [7] Féchant C., Buis J.-P., Tabbagh A., *In situ* measurement of medium-frequency apparent permittivity using an electrostatic quadrupole. Application to the

determination of the water content of wheat, *Meas. Sci. Technol.*, 10 (1999), 174-181.

[8] Ferrazzoli P., Paloscia S., Pampaloni P., Schiavon G., Solimini D., Coppo P., Sensitivity of microwave measurements to vegetation biomass and soil moisture content, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30, 4 (1992), 750-756.

[9] Gosse G., de Parcevaux S., Application de l'absorption des ondes centimétriques à la mesure de l'humidité des végétaux, in: *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, INRA (Eds), 1970, 359-369.

[10] Helbert J., Boissard P., Buis J.-P., A theoretical study of an electrostatic multipole to assess the horizontal and vertical distribution of the *in situ* water content of vegetation canopies, *Agronomie, under press.*

[11] Jackson T.J., O'Neill P.E., Attenuation of soil microwave emission by corn and soybeans at 1.4 and 5 GHz, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 28, 5 (1990), 978-980.

[12] Jackson T.J., Schmugge T.J., Vegetation effects on the microwave emission of soils, *Remote Sensing Environ.*, 36, 3 (1991), 203-212.

[13] Lemaire G., Salette J., Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Étude de l'effet du milieu (Relationship between growth and nitrogen uptake in a pure grass stand. I. Environmental effects), *Agronomie*, 4, 5 (1984), 423-430.

[14] Monteith J.L., Solar radiation and productivity in tropical ecosystems, *J. appl. Ecol.*, 9 (1972), 747-766.

[15] Monteith J.L., Climate and the efficiency of crop production in Britain, *Philos. Trans. Roy. Soc. London, B*, 281 (1977), 277-294.

[16] Schätzler H.P., Kühn W., Growth studies on plant plots by gamma scanning, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 28 (1977), 645-652.

[17] Schnyder H., Baum U., Growth of the grain of wheat (*Triticum aestivum L.*). The relationship between water content and dry matter accumulation, *Eur. J. Agron.*, 1, 2 (1992), 51-57.

[18] Serrano L., Filella I., Peñuelas J., Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies, *Crop Sci.*, 40 (2000), 723-731.

[19] Steinmetz S., Guéris M., Delécolle R., Baret F., Spectral estimates of the absorbed photosynthetically active radiation and light-use efficiency of a winter wheat crop subjected to nitrogen and water deficiencies, *Int. J. Remote Sensing*, 11, 10 (1990), 1797-1808.

[20] Tabbagh A., Hesse A., Grard R., Determination of electrical properties of the ground at shallow depth with an electrostatic quadrupole: Field trials on archaeological sites, *Geophys. Prospect.*, 41 (1993), 579-597.

[21] Tucker C.J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sens. Environ.*, 8, 2 (1979), 127-150.

[22] Wigneron J.-P., Chanzy A., Calvet J.-C., Bruguier N., A simple algorithm to retrieve soil moisture and vegetation biomass using passive microwave measurements over crop fields, *Remote Sens. Environ.*, 51, 3 (1995), 331-341.

	V ₁		V ₂	
	F _o	P	F _o	P
Spike water content	77.4	0.00**	152	0.00**
Spike dry matter content	0.670	0.416 ^{NS}	3.60	0.0658 ^{NS}
Stem water content	32.6	0.00**	0.157	0.694 ^{NS}
Stem dry matter content	0.108	0.744 ^{NS}	0.0389	0.845 ^{NS}

Table I: Effect of spike water content, spike dry matter content, stem water content, and stem dry matter content on potential differences V₁ and V₂. (F_o: observed Fisher's coefficient; P: probability to have F>F_o; ** significant at $\alpha=0.01$; ^{NS} not significant.)

Potential differences	Potential difference component	r ²	σ (g·m ⁻²)	slope	intercept	σ_{slope}	$\sigma_{\text{intercept}}$	n
V ₁	Phase	0.7672	411	1.01	-14.1	0.0888	178	41
	Quadrature	0.8344	347	0.992	16.9	0.0708	143	41
	Modulus	0.8468	333	0.998	5.40	0.0679	137	41
V ₂	Phase	0.7781	401	1.04	-82.8	0.0888	178	41
	Quadrature	0.7671	411	1.00	-9.11	0.0886	178	41
	Modulus	0.8023	379	0.997	7.58	0.0792	159	41
V ₁ and V ₂	Phase	0.8252	356	1.01	-30.1	0.0747	151	41
	Quadrature	0.8424	338	1.00	-8.06	0.0695	140	41
	Modulus	0.8592	320	1.00	-0.150	0.0648	131	41

Table II: Correlations between the wheat water content predicted from the potential differences (V₁, V₂, or both) and the wheat water content estimated by the classical gravimetric method.

	Spike water content		Stem water content	
	F _o	P	F _o	P
V ₁	132	0.000**	113	0.000**
V ₂	16.5	0.000**	0.177	0.677 ^{NS}

Table III: Sensitivity of potential differences V₁ and V₂ to spike and stem water contents. (F_o: observed Fisher's coefficient; P: probability to have F>F_o; ** significant at $\alpha=0.01$; ^{NS} not significant.)

Estimated water content	Potential difference component	r^2	σ (g·m ⁻³)	slope	intercept	σ_{slope}	$\sigma_{\text{intercept}}$	n
Spike water content	Phase	0.7858	153	1.03	-18.51	0.0858	53.2	41
	Quadrature	0.8405	132	1.02	-13.9	0.0711	44.4	41
	Modulus	0.8607	123	1.01	-8.64	0.0652	40.8	41
Stem water content	Phase	0.7461	274	1.01	-7.38	0.0939	131	41
	Quadrature	0.7994	244	0.988	17.4	0.0793	111	41
	Modulus	0.8166	233	0.994	8.71	0.0755	106	41

Table IV: Correlations between the spike water content (respectively the stem water content) predicted from the potential differences and the spike water content (respectively the stem water content) estimated by the classical gravimetric method.

	V ₁		V ₂	
	F _o	P	F _o	P
Spike water content of the plots	135	0.000 ^{**}	189	0.000 ^{**}
Stem water content of the plots	14.1	0.000 ^{**}	0.374	0.545 ^{NS}
Spike water content outside the plots	7.60	0.009 ^{**}	17.3	0.000 ^{**}
Stem water content outside the plots	5.24	0.028 [*]	0.975	0.330 ^{NS}

Table V: Analysis of variance showing the influence of the spike and the stem water contents of the plants situated outside the plots on the potential difference measurements. (F_o: observed Fisher's coefficient; P: probability to have F>F_o; ^{**} significant at $\alpha=0.01$; ^{*} significant at $\alpha=0.05$; ^{NS} not significant.)

Estimated water content	Class	r^2	σ (g·m ⁻²)	slope	intercept	σ_{slope}	$\sigma_{\text{intercept}}$	Test	Test	n
								slope = 1	intercept=0	
Plant water content	1	0.845	286	0.966	190	0.100	240	**	**	19
	2	0.922	197	0.951	148	0.0832	143	**	**	13
	3	0.891	151	0.584	236	0.0774	118	NS	**	9
Spike water content	1	0.863	118	0.999	36.2	0.0967	72.1	**	**	19
	2	0.880	103	1.034	-5.03	0.115	59.9	**	**	13
	3	0.817	85.0	0.657	31.2	0.117	54.7	*	**	9
Stem water content	1	0.770	94.0	0.967	131	0.128	212	**	**	19
	2	0.863	157	0.886	183	0.106	128	**	**	13
	3	0.878	213	0.538	219	0.0757	80.9	NS	**	9

Table VI: Correlation between water contents predicted from potential difference measurements and water contents estimated by the classical gravimetric method. Measurements have been separated in three classes according the range of plant WC: plant WC between 80% and 100% of normal plant WC (class 1), plant WC between 55% and 80% of normal plant WC (class 2), and plant WC inferior 55% of normal plant WC (class 3). (** significant at risk 10%, * significant at risk 5%, NS not significant.)

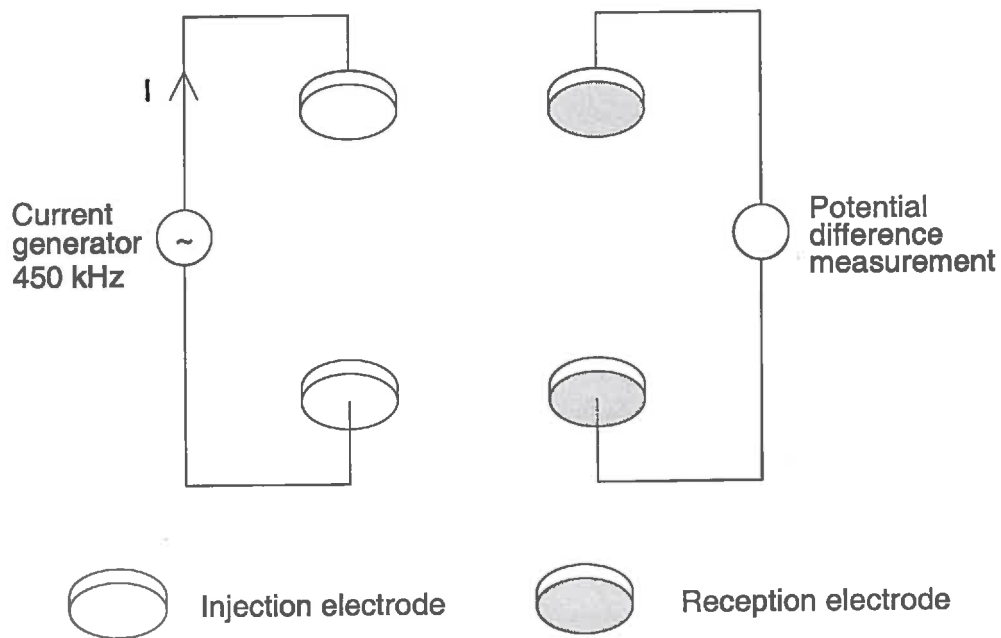


Figure 1: Electrical principle of the multipole.

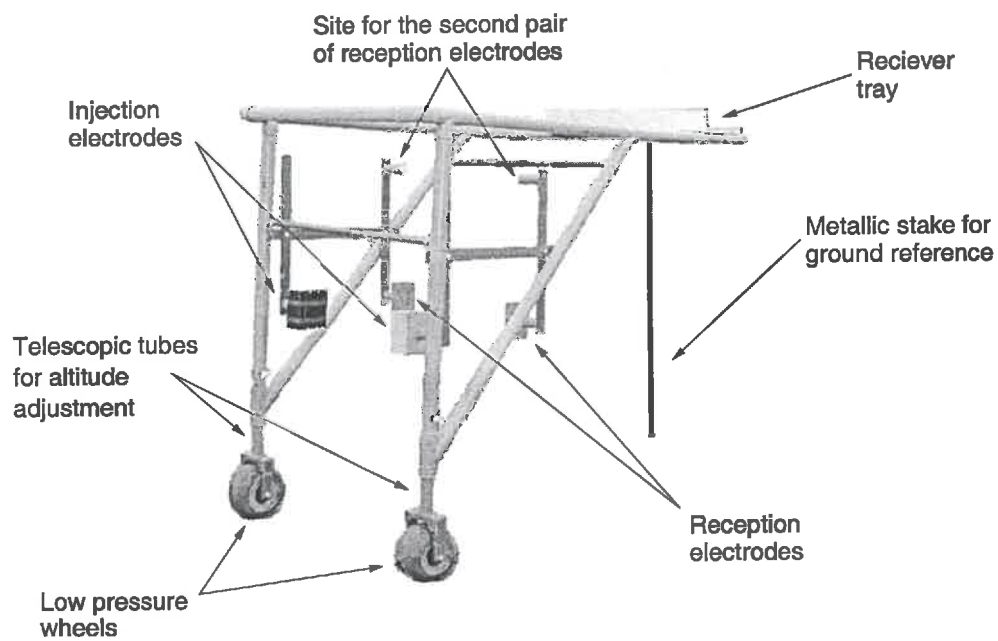


Figure 2: View of the frame supporting the electrodes of the multipole.

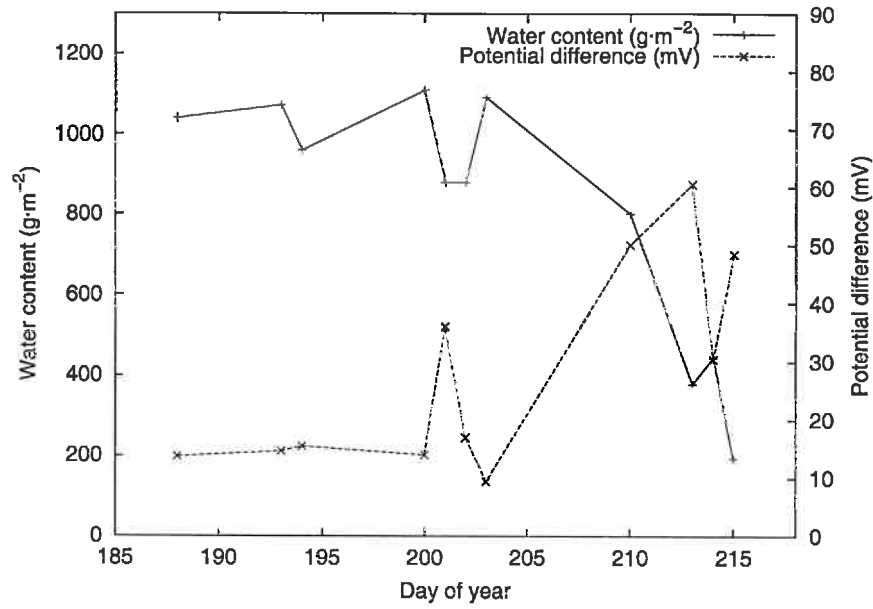


Figure 3: Inverse correlation between wheat spike water content and potential difference readings.

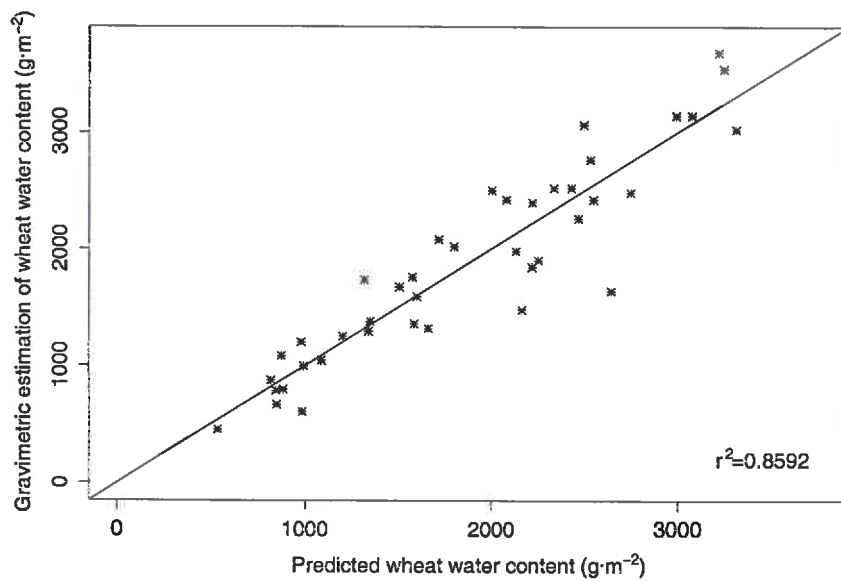


Figure 4: Comparison between gravimetric estimations of wheat water content and predictions of wheat water content from potential difference measurements.

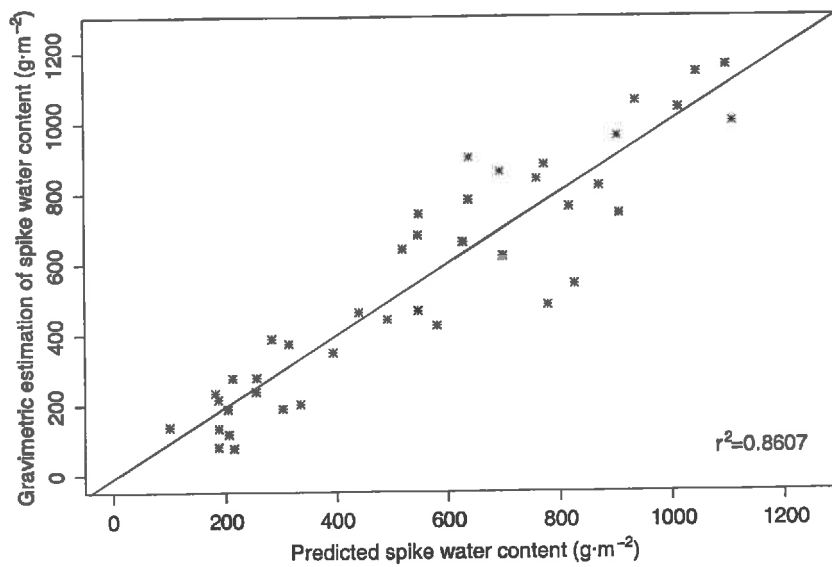


Figure 5: Comparison between gravimetric estimations of spike water content and predictions of spike water content from potential difference measurements.

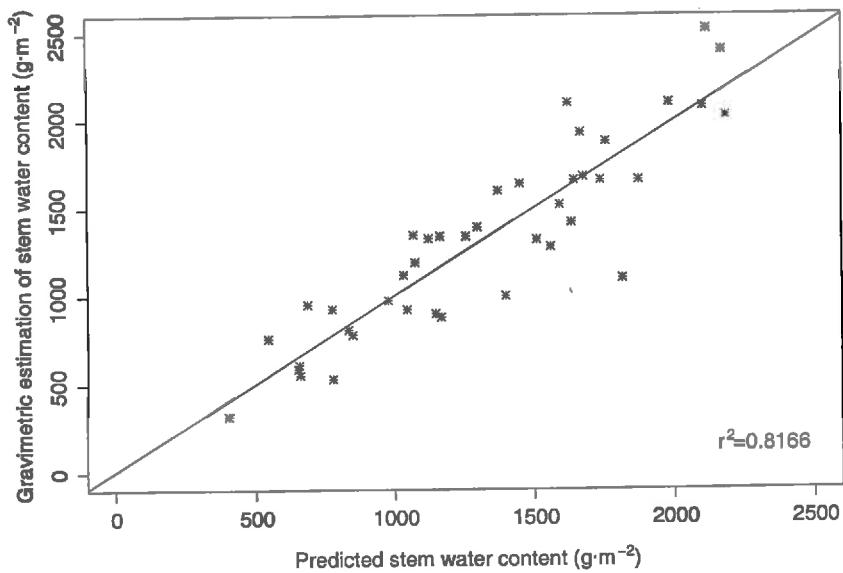


Figure 6: Comparison between gravimetric estimations of stem water content and predictions of stem water content from potential difference measurements.

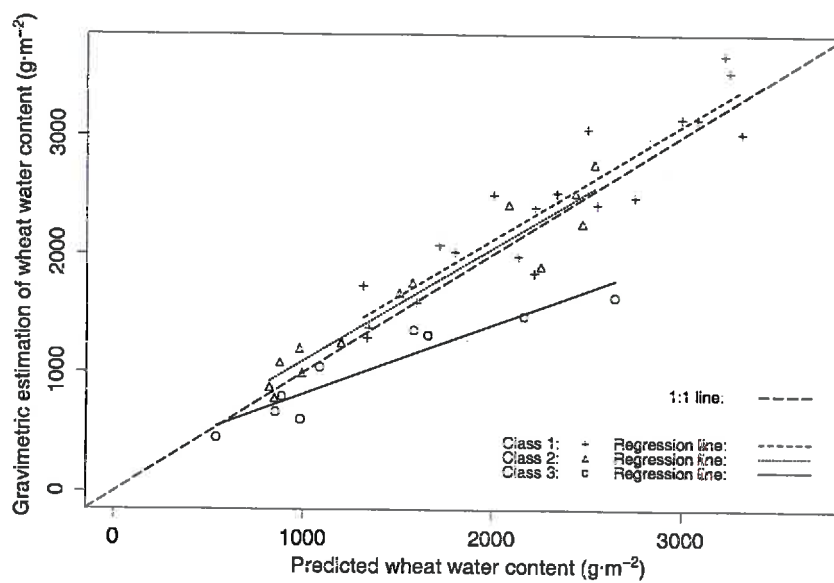


Figure 7: Effect of the plant water content heterogeneity on plant water content predictions. (Class 1: plant water content between 80% and 100% of mean plant water content. Class 2: plant water content between 55% and 80% of mean plant water content. Class 3: plant water content less than 55% of mean plant water content.)

A QUADRUPOLE TO ASSESS THE SPATIAL DISTRIBUTION OF PLANT WATER CONTENT IN CROPS

J. Helbert

INRA, Unité de Bioclimatologie, 78850 Thiverval Grignon, France.
helbert@bcgn.grignon.inra.fr

P. Boissard

INRA, Unité de Bioclimatologie, 78850 Thiverval Grignon, France.
boissard@bcgn.grignon.inra.fr

J.-P. Buis.

CIMEL Électronique, 5 cité de Phalsbourg, 75011 Paris, France.
cimel@worldnet.fr

Abstract

An electromagnetic quadrupole allowing the estimation of wheat spike water content by a non destructive *in situ* method is presented. Experimental results show a high correlation between measurement and wheat spike water content. A simulation study is also presented. It computes the measured signal from the dielectric characteristics of the crop, particularly the permittivity of the spikes and the stems.

Keywords: quadrupole, dielectric permittivity, wheat, water content.

1. INTRODUCTION

Estimating the water content of plants, and particularly the wheat spike water content, is a very important point since it can inform on the total biomass of the crop and the potential yield [1,2,3]. The biomass amount is also a basic datum if one wants to control nitrogen supply. With existing models, such as the dilution curve model [4], one can infer the nitrogen need from the biomass amount. Knowing the grain water content is also important to decide the best time for harvesting.

A new device allowing the estimation of water content of vegetation has then been developed by CIMEL Électronique (Paris, France) in collaboration with INRA (*Institut National de la Recherche Agronomique*, France) and the *Département de Géophysique Appliquée* (University of Paris VI, France) [5]. It can assess both the horizontal and the vertical distributions of water in crops by a non destructive *in situ* method. Until now, it had been used to follow stages of development and vegetative growth, particularly the filling of wheat spikes. Using such a device, it is thus possible to estimate under unstressed conditions the biomass of a crop, and by extension, the yield. In the future, the purpose is also to detect rapid variations of crop water content related to water stress and to decide irrigation with the aim of adjusting water supply to the real needs of plants.

2. THE INSTRUMENT

2.1. Presentation

The instrument is an electromagnetic quadrupole, two electrodes injecting an alternating current and two others allowing the measurement of a voltage. It is derived from the quadrupoles used for prospecting in geophysics [6].

The two pairs of electrodes are placed horizontally at the height of the spikes (figure 1). The dimensions of the quadrupole are quite small and make the instrument easily transportable in the field: each electrode is cylindrical with a diameter of about 10 cm and placed on the vertices of a 40 cm x 40 cm square.

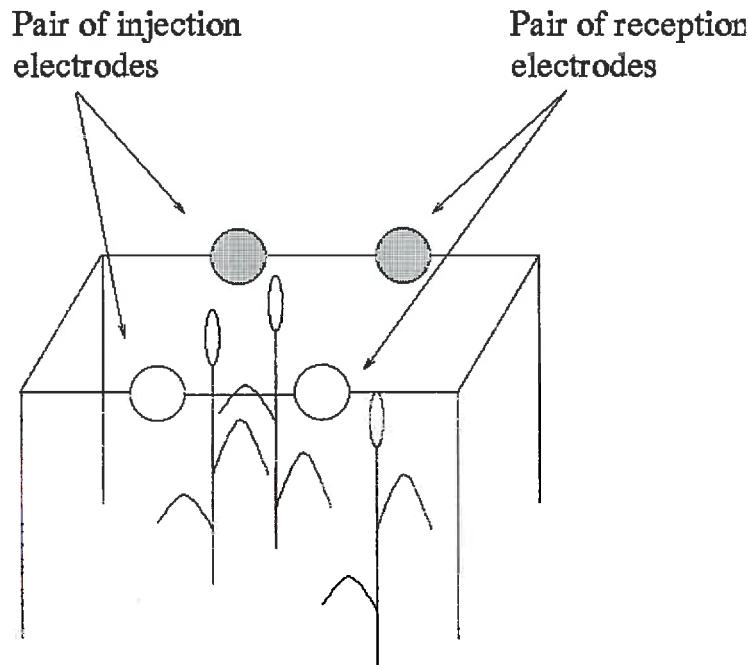


Figure 1. View of the quadrupole *in situ*.

The frequency of the injected current has been chosen so as to make the measurement independent of the plant geometry. Therefore, the electromagnetic waves are supposed to be only absorbed by the constitutive water content of the canopy volume. Resulting data represent therefore a volumetric measurement.

2.2. Theoretical aspects

The instrument injects a current of intensity I , the resulting electromagnetic wave then interacts with the plants, the air and the soil, and the device measures a voltage V between the reception electrodes. The ratio V/I is the impedance of the medium and is an inverse function of the apparent dielectric permittivity ϵ^* , which can be written in the following complex form:

$$\epsilon^* = \epsilon - i \frac{\sigma}{2\pi f} \quad (1)$$

where ϵ is the real dielectric permittivity, σ the electric conductivity and f the frequency of the electromagnetic wave. Thus, the signal is composed of two voltages in quadrature. The component in phase with the injected current corresponds to the imaginary part of the permittivity while the component in quadrature with the signal corresponds to the real part of the permittivity.

Furthermore, the crop is mainly composed of air and water, and the real permittivity of water is eighty times the permittivity of air. Thus, concerning the real part of the permittivity, measurement is sensitive to the crop water content. And then, the higher measurement, the lower crop water content.

3. FIRST MEASUREMENTS

First measurements using the quadrupole were made by Féchant on wheat crops [5]. These experiments concerned the decrease of spike water content before maturity to point out the evolution of the grain filling. The quadrupole was placed in a wheat crop and a measurement of the component in quadrature was made. After the measurement, a sample of plants located between the electrodes were taken from the crop to estimate by drying and weighting the spike water content.

Figure 2 presents the measurements as a function of the spike water content and figure 3 reports the evolution along time of the measurements and the spike water content. It can be seen on the two figures that there is a high correlation between water content and measurements and that the quadrupole clearly detects the rapid water loss, corresponding to the end of the grain filling [3].

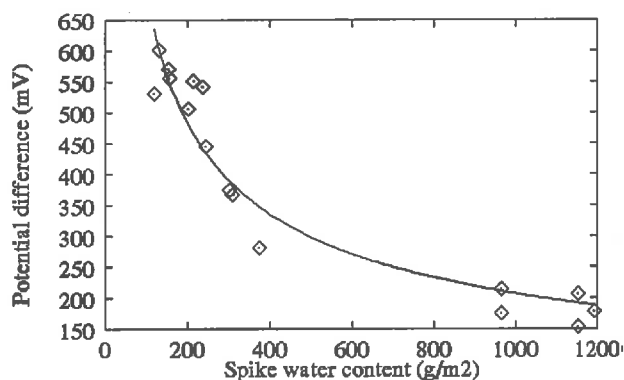


Figure 2. Measurements made with the quadrupole (after Féchant [5]).

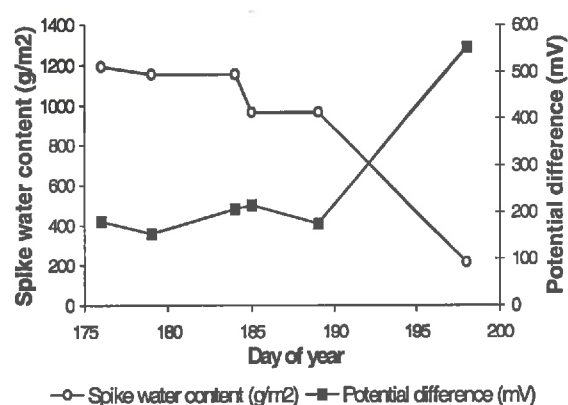


Figure 3. Detection of water loss with the quadrupole (after Féchant [5]).

4. SIMULATION

A simulation study has also been performed in order to determine the influence of the dielectric permittivities of the various media to the measured signal. Since the wavelength of the injected

current is very large in comparison to the dimensions of the spikes, the quasi-steady state approximation can be used and the purpose is thus to solve the Laplace's equation: $\Delta V = 0$, where V is the electrostatic potential.

The software used to compute the electrostatic potential is Modulef (INRIA, France), edited by Simulog (France), and is based on the finite element method [7,8]. The domain of simulation was meshed and splitted up into four layers representing the different media: the air, the spikes, the stems, and the soil (figure 4). In a first step, we assume that the soil conductivity did not contribute to the output signal, and therefore a real dielectric permittivity was attributed to each layer. Then, the potential, fixed on the injection electrodes, was computed in the 3D space on every knot of the mesh, and was forced to be constant on each reception electrode.

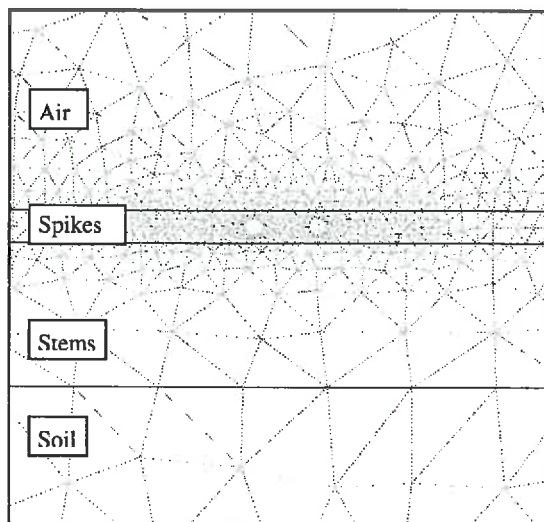


Figure 4. Vertical section of the mesh. Detail showing the four layers and the two electrodes (one used for injection and the other for reception).

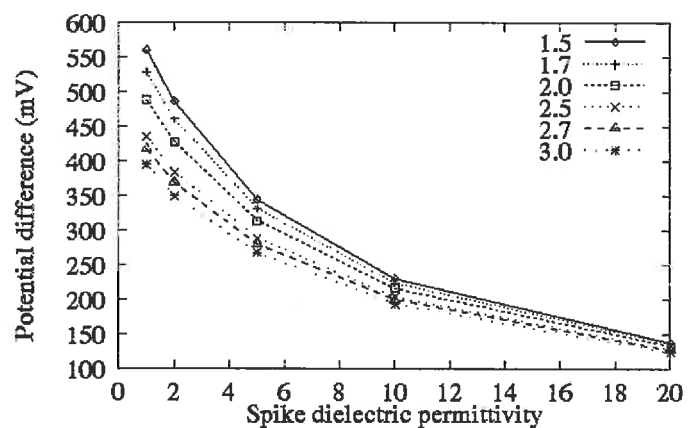


Figure 5. Potential difference in function of spike dielectric permittivity for several stem permittivities.

Figure 5 represents the potential difference between the reception electrodes as a function of the permittivities of the spikes and the stems (the real dielectric permittivity of the soil did not appear to influence the potential). It can be seen that the stem layer influences the potential, but its contribution decreases when the spike permittivity becomes more important. So, to estimate precisely the lower values of spike water content, it could be interesting to simultaneously know the stem water content. This could be achieved by making multiple measurements at two heights at least inside the canopy.

5. CONCLUSION

First, experiments made with the quadrupole showed that the potential difference between the reception electrodes is highly correlated to the spike water content, and that the instrument can be used to follow the evolution of spike water content during the grain filling period.

Secondly, the results of the simulation study confirm that measurements are correlated with the spike permittivity. However, an uncertainty remains on the estimation of the lower values of the spike permittivity due to the contribution of the stems.

In order to conclude on the feasibility of the *in situ* water content estimation by using the quadrupole, we can see that the uncertainty on the measurement is about 15%, which corresponds to an uncertainty of about 20% on the spike water content. The remaining problem to be solved is then to reduce the measurement noise by improving the electronic device and also by controlling the *in situ* conditions such as the water deposits on plant organs and the soil moisture.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors want to thank Prof. O. Picon (University of Marne-la-Vallée, France) for her contribution to this work.

REFERENCES

- [1] Huet, Ph., Pons, Y., Saur, L. Détermination de la fin du remplissage du grain de blé à partir de l'humidité de l'épi. Application à des expériences multi-sites. Colloque INRA-ITCF Eco-physiologie du blé, Versailles, France, 25th and 26th April, 1989. 9p.
- [2] Huet, Ph., Pons, Y., Saur, L. Remplissage de l'épi: éléments de modélisation et comparaison entre sites. Colloque INRA-ITCF Eco-physiologie du blé, Versailles, France. 25th and 26th April, 1989. 8p.
- [3] Schnyder, H., Baum, U. Growth of the grain of wheat (*Triticum aestivum* L.). The relationship between water content and dry matter accumulation. Eur. J. Agron., 1992, 1(2), 51-57.
- [4] Lemaire, G., Salette, J. Relationship between growth and nitrogen uptake in a pure grass land. I. Environmental effects. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Etude de l'effet du milieu. Agronomie, 1984, 4(5), 423-430.
- [5] Féchant, C. 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. PhD Thesis, Université de Paris VI. 1996. 190p.
- [6] Tabbagh, A., Hesse, A., Grard, R. Determination of electrical properties of the ground at shallow depth with an electrostatic quadrupole: Field trials on archeological sites. Geophys. Prospect., 1993, 41(5), 579-597.
- [7] Du Toit, H. F., George, P. L., Lang, P., Paté, P., Steer, D., Vidrascu, M. An introduction to Modulef. Modulef user guide #1. INRIA. 1995. 309p.
- [8] Zienkiewicz, O. C. *The finite element method*, McGraw-Hill, Maidenhead, England, 1977, 787p.

Contact point: J. Helbert, INRA, Unité de Bioclimatologie, 78850 Thiverval Grignon. Phone: +33 (0)1 30 81 55 01. Fax: +33 (0)1 30 81 55 63. E-mail: helbert@bcgn.grignon.inra.fr

AN ELECTROSTATIC MULTIPOLE TO ASSES THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE *IN SITU* WATER CONTENT OF VEGETATION CANOPIES

J. Helbert

Institut National de la Recherche Agronomique, Unité Environnement et Grandes Cultures,
78850 Thiverval Grignon, France.

P. Boissard

Institut National de la Recherche Agronomique, Unité de Recherches Intégrées en Horticulture,
Route des Colles, Sophia-Antipolis, 06410 Biot, France.

J.-P. Buis

CIMEL Électronique, 172 rue de Charonne, 75011 Paris, France.

ABSTRACT. An electrostatic multipole devoted to the *in situ* and non-destructive estimation of plant water content is presented. A theoretical study has shown that the instrument can assess the water content vertical profile of horizontally stratified canopies and an experimental validation has been performed on a wheat crop. Results show that the multipole can detect variations of plant water content and that plant water content estimations can be achieved with good accuracies. Furthermore, simultaneous estimations of spike and stem water contents can be performed.

Keywords: *water content, non-destructive method, vegetation canopy, biomass.*

1. INTRODUCTION

Estimating plant water content is a recurrent topic in agronomy and agriculture. Plant-water relations are very complex and hydric status, and therefore plant water content, determines widely plant growth and development. Moreover, plant water content is related to plant biomass and maximal water accumulated in spikes can give good estimations of final yield [6].

For many years, water content estimations have been performed using the gravimetric method but this technique, despite its accuracy, is very long and tedious. New fields in agriculture such as precision agriculture require the development of sensors and non-destructive methods to analyse the status of plants. The development of remote sensing techniques aimed at quick and accurate estimations of biophysical parameters but many environmental factors affect measurements and, as a consequence, accurate plant water content estimations remain an issue.

An electrostatic multipole has then been developed to estimate the plant water content, and more precisely to assess the horizontal and vertical distributions of water content in canopy vegetation. This instrument was first designed for geophysical prospecting, especially for archaeology [7]. A prototype instrument has recently been adapted for agronomic research and a first feasibility

study has shown that this instrument is sensitive to plant water content [1]. This paper deals with a theoretical study of the instrument and an experimental validation made on a wheat crop.

2. THE ELECTROSTATIC MULTIPOLE

The instrument is composed of four electrodes (figure 1): Two electrodes inject an alternating current while two others allow the measurement of a potential difference. The two pairs of electrodes are placed at the altitude of the wheat spikes in order to have the best response to their water content. Other pairs of reception electrodes can be added in order to make simultaneous measurements at different altitudes. Especially, one can see on figure 1 that an other pair of reception electrodes can be placed 50 cm above the first pair of reception electrodes. The vertical distribution of the plant water content can then be assessed. Figure 1 shows the electrodes and the frame built for the estimation of the wheat water content. The dimensions of the multipole are quite small and make the instrument easily transportable in the field: Each electrode is a $12 \times 12 \times 7 \text{ cm}^3$ parallelepiped. The four electrodes are placed on the vertices of a $50 \times 50 \text{ cm}^2$ horizontal square. Using this geometrical configuration, it is possible to make measurements at several places in a field and then to assess the horizontal distribution of the water content.

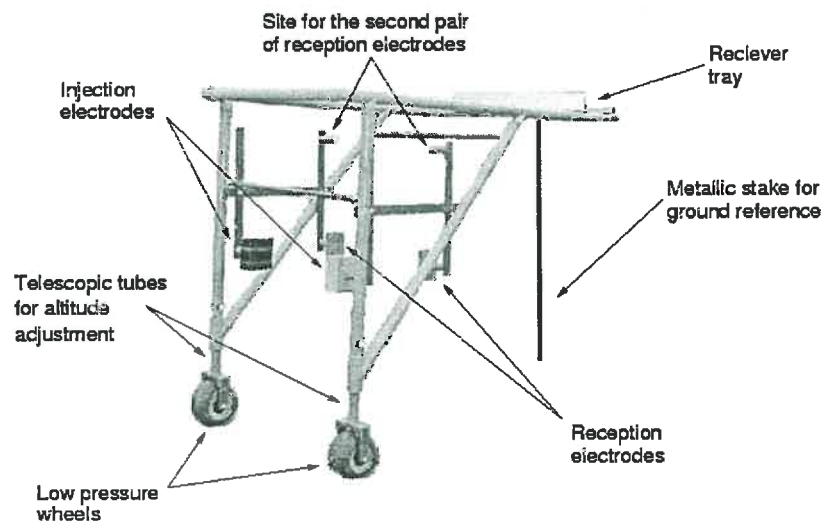


Figure 1: The electrodes and the portable frame.

The frequency of the injected current is 450 kHz. This frequency has been chosen between two limits: An upper frequency (about 100 MHz) for which there are interactions between the electromagnetic waves and the plant geometry, and a lower frequency (about 100 kHz) under which ionic effects are predominant, especially the Maxwell-Wagner effect [3]. Therefore, the electromagnetic waves are supposed to be only absorbed by the constitutive water of the canopy volume. Resulting data then represent a volumetric measurement (grams of water per m^{-3} or m^{-2}).

The injection electrodes inject a current of intensity I ($200 \mu\text{A}$), the resulting electromagnetic field then interacts with the canopy, the air and the soil, and the device measures a potential

difference V between the reception electrodes. The ratio V/I is the impedance of the medium and is a function of the inverse of the apparent relative dielectric permittivity ϵ^* :

$$\begin{aligned}\epsilon^* &= \epsilon' - i\epsilon'' \\ &= \epsilon' - i\frac{\sigma}{2\pi f\epsilon_0}\end{aligned}\quad (1)$$

ϵ' is the real relative dielectric permittivity, ϵ_0 the permittivity of air ($\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$), σ the electric conductivity ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$) and f the frequency of the electromagnetic wave (Hz). Thus, the signal is composed of two voltages in quadrature. The component in phase with the injected current corresponds to the imaginary part of the permittivity while the component in quadrature with the signal corresponds to the real part of the permittivity. As the crop canopy is a non-conducting medium (in dry atmospheric conditions), the imaginary part of the permittivity can be ignored. Furthermore, the crop is mainly composed of air and water, and the real permittivity of water is eighty times the permittivity of air. So, the real part of the permittivity depends mainly on the crop water content. And then, the higher potential difference, the lower crop water content.

3. THEORETICAL STUDY OF THE INSTRUMENT

3.1. Simulation

A simulation has been performed to study the response of the instrument in function of the permittivities of the various media: soil, vegetation, and air [2]. Each media is assumed to be a horizontal layer of homogeneous permittivity, and the vegetation layer is divided in two layers: the spike layer, and the stem-and-leaf layer. A 3D description of the electrodes has been considered in order to take into account their geometrical shape. The injection electrodes and the first pair of reception electrodes are placed in the spike layer while the second pair of reception electrodes is in the air 50 cm above the first pair of reception electrodes. The computation of the potential difference has been made using the finite element method [8].

As the electromagnetic wavelength (about 700 m) is much larger than the plant dimensions, we have considered the quasi-steady state approximation. The purpose is thus to solve the Laplace equation knowing the distribution of charges (*i.e.* the current) on the injection electrodes:

$$\Delta V = 0 \quad (2)$$

First, results have shown that the soil permittivity does not influence the potential differences when the electrodes are placed at least 40 cm above the soil. Second, we can see on figure 2 that the potential difference between the reception electrodes depends both on the spike and the stem permittivities. The use of two pairs of reception electrodes is therefore compulsory if one wants to retrieve separately the spike permittivity and the stem permittivity.

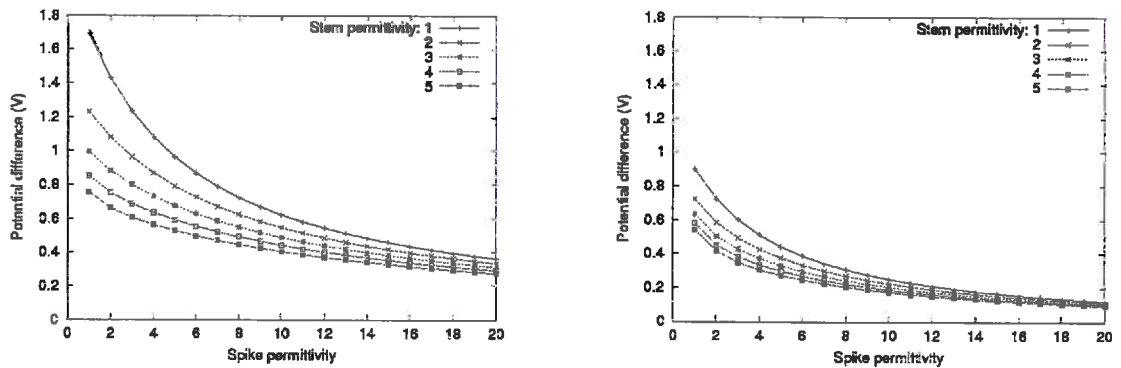


Figure 2: Simulated potential differences between the electrodes of the first pair of reception electrodes (left) and between the electrodes of the second pair of reception electrodes (right).

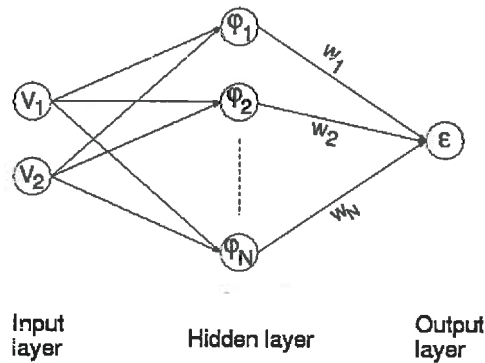


Figure 3: Architecture of the RBF neural network.

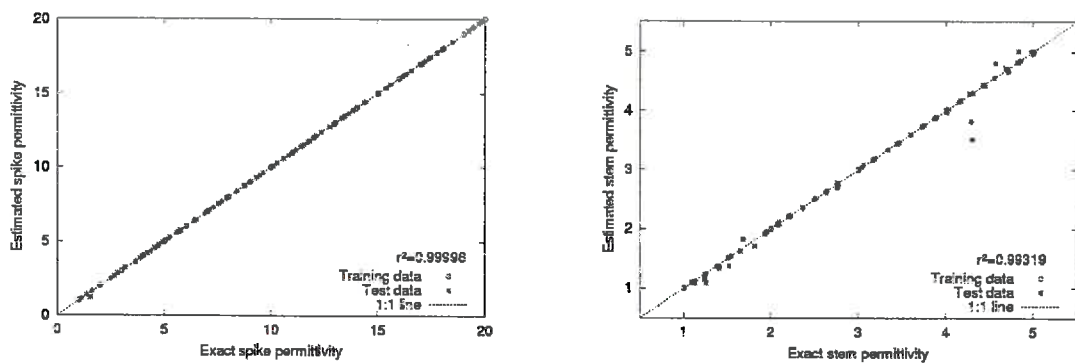


Figure 4: Retrieval of the spike permittivity (left) and the stem permittivity (right).

3.2. Inversion of the simulation data

The purpose of the inversion is to show that dielectric permittivities can be retrieved from

potential difference measurements.

A radial basis function neural network has been used to invert the simulation data [5]. The network input is the potential differences V_1 and V_2 , the hidden layer is composed of radial basis functions (gaussian kernels), and the output is the spike and the stem dielectric permittivities to be estimated (figure 3). Every kernel is of the following form:

$$\varphi_i(V) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left\|\frac{V - c_i}{\sigma_i}\right\|^2\right) \quad (3)$$

where V is the vector of co-ordinates V_1 and V_2 , c_i the kernel centre, and σ_i the width kernel.

An optimisation algorithm [4] chooses first the centres and the widths which minimise the quadratic error of the network. Then the synaptic weights w_i are determined by a classical matrix computation.

Results show that the neural network is very accurate to retrieve the spike and the stem permittivities (figure 4). So, the electrostatic multipole is theoretically able to estimate the water content of vegetation horizontal layers.

4. EXPERIMENTAL VALIDATION

A winter wheat crop have been studied during grain filling, from the 6th of July to the 3rd of August 2000. The plant water content has been controlled by weighting the plants before and after an oven drying (48 hours at 80 °C). The injection electrodes and the first pair of reception electrodes were in the spike layer. The second pair of reception electrodes was outside the crop 50 cm above the first pair of reception electrodes.

4.1. Following of the plant development stage

The multipole has first been used to detect the end of the grain filling and especially the decrease of spike water content revealing the grain maturity. Figure 5 reports the potential difference between the electrodes of the first pair of reception electrodes as well as the spike water content. We can see clearly the inverse correlation between measurements and water contents and that the loss of water can be detected by the rapid increase of potential differences.

4.2. Estimation of the plant water content

4.2.1. Estimation of the total plant water content

Plant water content (WC) have been estimated from the two potential differences V_1 and V_2 measured in and above the spike layer. We have considered an exponential model:

$$WC = \alpha \exp\left(-\frac{V_1}{\beta}\right) + \beta \exp\left(-\frac{V_2}{\delta}\right) \quad (4)$$

The coefficient of determination between the water content calculated with this model and the water content controlled by the gravimetric technique is $r^2 = 0.918$. The root mean square error is $249 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Results are shown on figure 6.

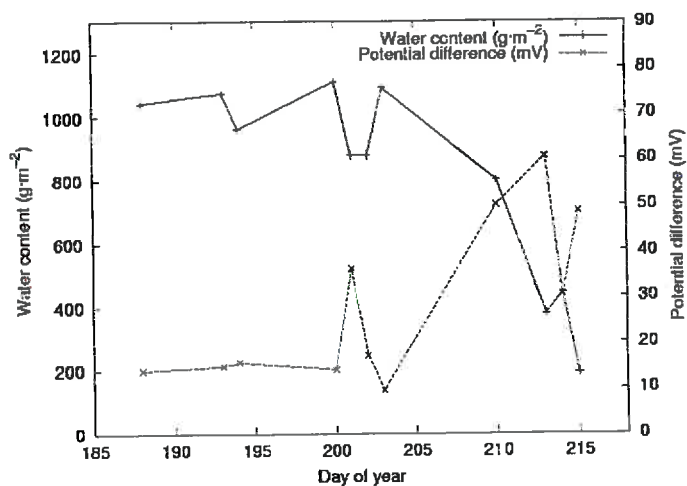


Figure 5: Correlation between measurements and spike water contents.

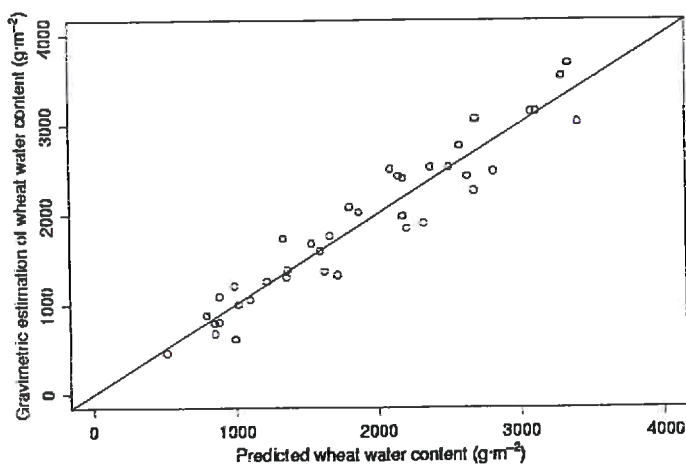


Figure 6: Predicted total wheat water contents compared to gravimetric estimations.

4.2.2. Estimation of the spike and the stem water contents

Theoretically, the multiple is able to give simultaneous estimations of the spike and the stem water contents. The spike water content has then been estimated using the two potential differences V_1 and V_2 and an exponential model. The coefficient of determination is therefore $r^2 = 0.907$ and the root mean square error is $103 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (see figure 7).

Concerning the stem water content estimation, we have found that the measurements made on the upper pair of reception electrode are not significant. Using only the measurements made on the first pair of reception electrodes, the coefficient of determination is $r^2 = 0.877$ and the root mean square error is $195 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (see figure 8).

The relative uncertainties on plant, spike, and stem water content estimations are respectively 13.4%, 18.7%, and 14.7%. As a comparison, the uncertainty on water content estimated with the gravimetric method is about 15% because of the uncertainty on the sampling method. So, we can see that uncertainties between the electrostatic and the gravimetric methods are of the same order of magnitude.

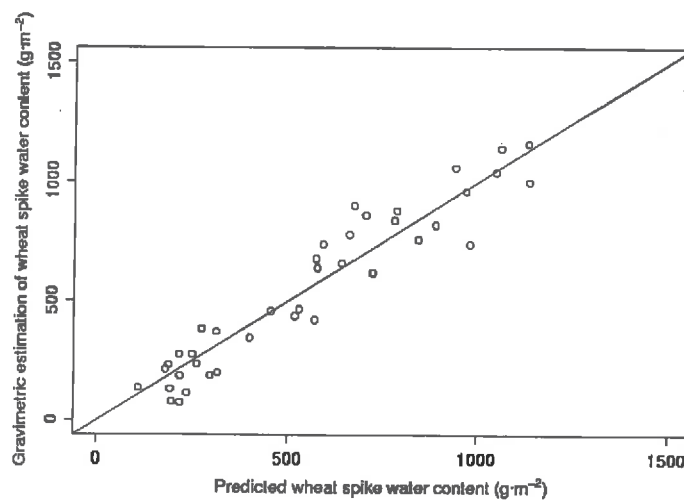


Figure 7: Predicted spike water contents compared to gravimetric estimations.

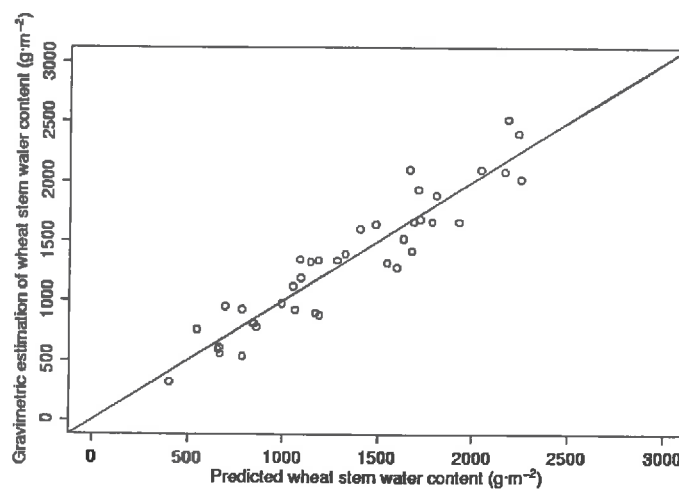


Figure 8: Predicted stem water contents compared to gravimetric estimations.

5. CONCLUSION

An electrostatic multipole has been developed to estimate the water content of horizontal canopy layers related to biomass.

We have shown that detection of plant development stages can be performed by following the temporal evolution of the measurements and that estimations of plant water content can be achieved instantaneously. Furthermore, simultaneous and accurate estimations of spike and stem water contents are feasible. This instrument can therefore assess the vertical distribution of water content. On the other hand, since measurements are made on small surfaces, it is also possible to point out heterogeneities in the horizontal distribution of plant water content.

This instrument is therefore very promising for precision farming applications such as yield forecastings, pasture or fodder biomass estimations, detection of maturity backwardnesses. It could be also used in agronomic research to study for example water redistribution between plant organs.

A new version of the multipole, using an improved electronic board, will be tested during summer 2001 before commercialisation.

REFERENCES

- [1] Féchant C., Buis J.-P., Tabbagh A., *In situ* measurement of medium-frequency apparent permittivity using an electrostatic quadrupole. Application to the determination of the water content of wheat, *Meas. Sci. Technol.*, 10 (1999), 174-181.
- [2] Helbert J., Boissard P., Buis J.-P., A theoretical study of an electrostatic multipole to assess the horizontal and vertical distribution of the *in situ* water content of vegetation canopies, *Agronomie*, (2001).
- [3] Kittel Ch., *Introduction to solid state physics*, John Wiley & Sons, 7th Edition, 1996, 673 pages.
- [4] Orr M.J.L., *Introduction to radial basis function networks*, Tech. report, Centre for Cognitive Science, University of Edinburgh, Scotland, 67 pages, 1996. (available at <http://www.anc.ed.ac.uk/~mjo/papers/intro.ps.gz>).
- [5] Poggio T., Girosi F., *Networks for approximation and learning*, *Proc. IEEE*, 78, 9 (1990), 1481-1497.
- [6] Schnyder H., Baum U., Growth of the grain of wheat (*Triticum aestivum* L.). The relationship between water content and dry matter accumulation, *Eur. J. Agron.*, 1, 2 (1992), 51-57.
- [7] Tabbagh A., Hesse A., Grard R., Determination of electrical properties of the ground at shallow depth with an electrostatic quadrupole: Field trials on archaeological sites, *Geophys. Prospect.*, 41 (1993), 579-597.
- [8] Zienkiewicz O., *The finite element method*, McGraw-Hill, Maidenhead, England, 787 pages, 1977.

Abstract

This document presents a prototype instrument of a quasistatic multipole to assess the spatial distribution of the crop water content. The principle consists in estimating the water content of crops from a measurement of their dielectric permittivity. The measurement is performed *in situ*, without contact with the plants, is non destructive and instantaneous.

The multipole instrument is composed of several electrodes. An alternating current of frequency 450 kHz is injected between two electrodes in the medium to be studied while two other electrodes measure a potential difference. Other pairs of reception electrodes can be added to make several simultaneous potential difference measurements.

This study is divided in two parts. First, a theoretical work is achieved to study the response of the instrument in function of the electrical properties of the media. Second, an experimental validation of the multipole instrument is performed in a wheat crop.

A software based on the finite element method is used to simulate the functioning of the multipole instrument in a wheat crop considered as a horizontally stratified medium (air, spikes, stems, and soil). Results show that the potential difference between the reception electrodes depends on the spike and the stem permittivities, whereas the soil has no influence on measurements.

A neural network is then implemented to invert the simulated data and shows that retrieval of the vegetation organ permittivities from the potential differences is accurate.

An experimental validation has also been performed in a wheat crop during grain filling.

As predicted by theory, potential difference measurements are inversely correlated to plant water content. Temporal variations of potential differences measurements can then reveal plant water content variations. It is therefore possible to follow the plant development stages particularly the decrease of the spike water content following the water plateau.

Moreover, we can bear a relation between the potential difference measurements and the plant water contents. Therefore, water content estimations can be achieved, for the whole plants as well as for the plant organs (spikes and stems). Results show that the uncertainty on the estimated water contents are of the same magnitude than the uncertainty of the water contents estimated by the classical destructive technique.

So, this study proves that the multipole instrument is a promising and an accurate device to assess the spatial distribution of plant water content in crops.

Key words: Water content / dielectric permittivity / non destructive method / vegetation canopy / biomass.

Résumé

Ce document présente l'étude d'un prototype de dispositif multipôle fonctionnant en régime quasi-statique et permettant d'accéder à la distribution spatiale du contenu en eau de la végétation. Le principe consiste à estimer le contenu en eau des couverts végétaux à partir d'une mesure de leur permittivité diélectrique. La mesure s'effectue *in situ*, sans contact avec les plantes et est de plus non destructive et instantanée.

Le dispositif multipôle est un instrument composé de plusieurs électrodes. Un courant alternatif à 450 kHz est injecté dans le milieu sondé grâce à deux électrodes, tandis que deux autres électrodes mesurent une différence de potentiel. D'autres paires d'électrodes de réception peuvent être ajoutées afin de réaliser plusieurs mesures simultanées de différences de potentiel.

L'étude se divise en deux parties distinctes : un travail théorique afin de caractériser la réponse de l'instrument en fonction des propriétés électriques des milieux sondés ; une application expérimentale réalisée sur un couvert de blé pour valider le principe de mesure.

L'utilisation de la méthode des éléments finis permet de simuler le fonctionnement du dispositif multipôle dans un couvert de blé considéré comme un milieu stratifié horizontalement (air, épis, tiges et sol). Les résultats montrent que la différence de potentiel entre les électrodes de réception dépend à la fois de la permittivité des épis de blé et de celle des tiges, mais que le sol n'a pratiquement pas d'influence sur les mesures.

Un réseau de neurones permet ensuite d'inverser les données de la simulation et montre que la permittivité des organes végétaux peut être estimée précisément à partir des différences de potentiel.

La validation expérimentale de l'instrument a été menée sur un couvert de blé pendant le remplissage des grains.

Comme prévu par l'étude théorique, les mesures effectuées avec le dispositif multipôle sont inversement corrélées au contenu en eau des plantes ; des variations temporelles des différences de potentiel permettent ainsi de révéler des variations de contenu en eau. Il est alors possible de suivre les stades de développement des plantes, particulièrement la décroissance du contenu en eau des épis de blé après la fin du palier hydrique.

Par ailleurs, nous montrons également qu'il est possible d'estimer le contenu en eau des plantes de blé, pour les plantes entières mais aussi pour des organes précis comme les tiges ou les épis. Les incertitudes sur l'estimation du contenu en eau sont du même ordre de grandeur que les incertitudes dues à la méthode destructive de référence.

Cette étude montre donc que le dispositif multipôle est un instrument performant et prometteur pour l'estimation de la distribution spatiale de l'eau dans les couverts végétaux.

Mots clés : contenu en eau / permittivité diélectrique / méthode non destructive / couvert végétal / biomasse.