HAL
open science

Analyse d'images SAR polarimétriques aéroportées pour l'estimation de paramètres bio-physiques des sols agricoles.

Sandrine Daniel

To cite this version:

Sandrine Daniel. Analyse d'images SAR polarimétriques aéroportées pour l'estimation de paramètres bio-physiques des sols agricoles.. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Rennes 1, 2009. Français. NNT : . tel-00523413

HAL Id: tel-00523413

https://theses.hal.science/tel-00523413v1

Submitted on 5 Oct 2010

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.

N^o d'ordre : 3934 ANNÉE 2009

THÈSE / UNIVERSITÉ DE RENNES 1
sous le sceau de l'Université Européenne de Bretagne

pour le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1

Mention : Traitement du Signal et Télécommunications

Ecole doctorale MATISSE

présentée par

Sandrine DANIEL

préparée à l'unité de recherche I.E.T.R - UMR6164
Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes
UFR Structure et Propriété de la Matière

Analyse d'images SAR polarimétriques aéroportées pour l'estimation de paramètres bio-physiques des sols agricoles

Thèse soutenue à Rennes le 16 Octobre 2009

devant le jury composé de :

Laurence HUBERT-MOY
Professeur, Université de Rennes 2 / présidente

Nicolas BAGHDADI
Directeur de recherche, CEMAGREF, UMR-TETIS / rapporteur

Mehrez ZRIBI
Chercheur, IRD - Tunis, Tunisie / rapporteur

Francesco MATTIA
Chercheur, CNR - ISSIA, Bari, Italie / examinateur

Sophie ALLAIN BAILHACHE
Maître de conférences, Université de Rennes 1, co-encadrante

Éric POTTIER
Professeur, Université de Rennes 1, directeur de thèse

Remerciements

Le parcours d'une thèse est non seulement un travail de recherche mais également un parcours de rencontres. Toutes les personnes que j'ai rencontrées pendant ma thèse réalisée au sein de la fameuse SAPHIR team de l'Institut d'Électronique et de Télécommunications de Rennes sont remerciées ici comme il se doit.

J'adresse mes premiers remerciements à mes deux encadrants de thèse.

Je remercie mon directeur de thèse, Éric, de m'avoir acceptée au sein de son Super TRAMP où je suis tombée sous le charme de la polar, de m'avoir expédiée en Allemagne pour apprendre l'anglais, car non seulement il y a eu un net progrès (y avait pas photo) mais en plus, cela fait sourire les gens ce qui est trop cool ! ;) Merci aussi de m'avoir permis de faire une thèse.

Avec Sophie, nous avons débuté cette aventure ensemble, même si ce ne fût pas facile tous les jours, nous ne nous en sommes pas trop mal sorties toutes les deux et je t'en remercie. Merci également d'avoir su te remettre en question, d'avoir accepté mes remarques et d'avoir été suffisamment optimiste pour nous deux à la fin. Merci.

Je remercie Madame Laurence Hubert-Moy d'avoir accepté d'être présidente de mon jury de thèse, d'avoir montré son intérêt à mes travaux concurrents aux siens au niveau technologique.

Je suis très reconnaissante et honorée que Messieurs Mehrez Zribi et Nicolas Baghdadi aient accepté d'être rapporteurs de ma thèse et soient intéressés à ce travail. Je remercie également ce dernier pour ses nombreux échanges téléphoniques très intéressants qui m'ont permis de prendre en compte son point de vue thématicien manquant à mes travaux de thèse.

Ringrazio il Dr. Francesco Mattia per aver accettato l'invito come membro della mia commissione di dottorato. Lo ringrazio inoltre per aver mostrato vivo interesse in occasione della mia discussione di tesi e durante tutte le conferenze alle quali ho avuto il piacere di incontrarlo.

Je remercie également Monsieur Thouroude de m'avoir accueillie au sein du laboratoire de l'IETR et d'avoir été à l'écoute lorsque je lui présentais les problèmes des doctorants.

Après les membres du jury, je tiens à remercier toutes les personnes que j'ai pu croiser au sein du laboratoire (dans le désordre !) :

Tout d'abord, je remercie toutes les personnes de l'équipe SAPHIR actuelle et passée : Carlos (Mon Catalan à la tête de cacahuète préféré), Ludo (Notre thésard adopté), Stefan et Shasha (Shaharyar) mes deux collègues du bureau 106, Nico (Un début commun, des discussions communes, toute une longue histoire en somme qui peut se résumer par : "La recherche n'attend pas..." :p), Franck F. (Un fou furieux des voitures et du fromage), Yue (Une Miss shopping en puissance !), Marco (Merci pour les données et le Tiramisu), Fred, Cécile, Stéphane Mic (Alias Jean-Claude. Merci pour les calendriers et bravo pour ta prestation théâtrale), Cyril (Merci pour les échanges intéressants que nous avons eus, dommage que nous n'ayons pu travailler ensemble), Cédric L. (Merci pour tes conseils et ton aide pour le SVM), Tuotuo (Sorry to have not enough time to know you better but nice to meet you !), Sang-

Eun and Eun-Young (hope to meet you somewhere to eat your wonderful Corean food, hummm delicious), My-Linh (Ravie d'être ta future voisine de bureau :p), Olivier H. (RDV sur une cascade de glace) et à tous les stagiaires et thésards qui sont passés par ici et qui repasseront peut-être par là...

Comme il n'y a pas que Saphir qui m'a éblouie, je remercie également les autres... Je remercie tous les thésards que j'ai pu rencontrer à l'IETR : Olivier R. (Merci de m'avoir conseillé les Fos do Iguazu : le plus bel endroit au monde !), Benjamin (Merci pour ton soutien, tes conseils, ton écoute, et ravie de t'avoir distrait en fin de rédaction :p), Claire, Stéphanie, Divita, Gaël, Patricia, Franck N. (Ravie d'avoir fait un sacré bout du chemin avec toi, merci pour tout : des révisions communes aux exams à ton soutien pendant cette thèse), Sébastien P., Wafa (Trop belles tes lunettes :p), Gwenn (Merci ptit chef d'avoir pris la relève au sein du conseil des doctorants), Roger, Damien, Thomas, Solène B., Thomas R. (Merci pour ton esprit d'équipe et ton don de rassemblement des troupes :p Merci de donner vie au labo), Mauro (Merci 'Mon Coeur' d'avoir été mon interprète), Émeric (Chef des doc INSA, j'ai été très heureuse de partager avec toi et le premier conseil des doc de l'IETR, l'organisation de la première journée des doctorants. Merci pour les CR ;)). Et je remercie également tous les titulaires des pauses cafés et/ou rencontrés dans les couloirs. Merci aussi à Sandrine (Pas moi, l'autre !) de ne pas avoir pris peur quand je me trompais de porte :p

Et puisqu'une sombre malédiction informatique s'est posée sur moi, je tiens à remercier tous mes assistants info qui ont eu la patience (car il en fallait) de m'aider : Gianfranco, Paul, Olivier D. même à distance vous étiez là, merci beaucoup et "Vive LINUX" :) Merci aussi à Laurent B. d'avoir sauvé mon portable qui a eu un gros coup de faiblesse à la fin... Ouf ! Il a tenu jusqu'au bout :)

Et parce qu'une vie au labo ne se fait pas sans les secrétaires, je remercie chaleureusement Joëlle (Jojo) et Noëlle (Nono) mes deux mamans du lab : Vous m'avez beaucoup aidée, plus que vous ne l'imaginez. Et merci encore Joëlle pour cette belle balade à Barcelone qui reste un très bon moment gourmand ;)

Mes années de recherche ont été menées en parallèle aux enseignements, je tiens à remercier par conséquent tous mes collègues de l'université de Rennes1 en commençant par les moniteurs : Muriel (Ravie d'avoir effectué les mini projets ensemble), Mathieu, Tanguy, Pierre, HimDeen, Roxanna (Reste motivée pour l'escalade), Clément (Au plaisir de re-grimper ensemble) et tous les moniteurs CIES.

De même, je remercie Anne-Claude (Merci de m'avoir donnée l'opportunité de faire mon premier TD), Stéphane A. (Merci de m'avoir permis de participer à la création de nouveaux cours/TD/TP, merci pour tout ce que tu m'as appris), David (Merci d'avoir sauvé le chariot filo-guidé pendant les projets :p), Hélène, Gilles, Régis, Gérard, Johanne et j'en oublie, désolée.

Pardon à tous ceux que j'ai oubliés !

Parce que ces années ont été longues et difficiles, des remontes moral m'ont été nécessaires, tels que :

Sophie D.G. merci pour les nombreuses crêpes partagées ensemble sans oublier les Haribo pendant les TPs.

Merci à Guillaume Bailhache et à son épouse (Sophie :p) de m'avoir offert quelques moments de détente qui m'ont été très bénéfiques. Merci encore une fois à Sophie mais cette fois dans le cadre personnel, merci pour ta joie de vivre, tes maladresses qui font rire. Au plaisir de se voir en dehors du boulot, pour "pétasser" comme tu aimes à dire :)

Merci également à Guillaume et Élise d'anciens voisins devenus amis. Merci pour les soirées poker même si je n'ai jamais gagné notre mascotte : Tant pis, prochain coup !

Merci aussi au club d'escalade de l'INSA pour m'avoir poussée à vaincre mes peurs de monter en tête et puis trop cool la 'marron cra-cra' ! :) Merci à Jeff, Aurélie, Laurent G., Laurent L.C. (Merci pour ton oreille attentive, tes précieux conseils, ton humour décoiffant :p) et pi les autres...

Merci aussi aux potes de longue date toujours présents : Gaillard (Olivier quoi :p), Florent et Yoann.

Merci également à tous pour les cartes postales !!!

Et parce qu'ils sont très importants pour moi, je suis très heureuse d'avoir pu compter également sur le soutien des Friends et de mes amis.

Téfou : Le plus Filou de tous, mille choses à dire, un million de sourires, un milliards de gros bisous malgré tout ça, ce ne serait pas suffisant pour te remercier pour ton amitié, ton soutien qui m'est cher. Rendez-vous, dans un pays lointain, au soleil, autour d'une table en terrasse, où que ce soit on se retrouve : O-BLI-GÉ, Chéri Chéri.

Max : Mon grand Max ! Ta générosité est incroyable, ta force de caractère est impressionnante. Je suis extrêmement fière d'avoir pu partager de nombreux moments avec toi, pas assez à mon goût mais de toute façon, comme avec Téfou, on se retrouvera pour trinquer à la vodka cornichon. Je te souhaite d'être heureux avec ta famille que j'embrasse très fort Olya, une grande amie (Merci pour l'expédition au Mont Saint Michel) et Marky un p'tit gars formidable qui sera un adorable grand frère. Petit clin d'oeil à la tequila Street !

Laurent : Trop de choses à te dire, pour te remercier ces quelques lignes ne sont pas suffisantes. Tout d'abord d'un point de vue professionnel, je te remercie infiniment d'avoir été là, quand j'étais au plus bas. Merci d'avoir donné un sens à cette thèse, sans toi je n'aurais pas tenu le coup. J'ai appris beaucoup auprès de toi au niveau scientifique comme au niveau enseignement. Merci de m'avoir permis de me dépasser entre autre dans les Comm. Num. Ensuite, d'un point de vue personnel, je te remercie pour ton amitié, de m'avoir appris plein de choses dans des domaines très variés : de l'apprentissage des légumes, au soldat Moralès en passant par Le Grand Sana. Mon compagnon de cordée le plus jobard, j'ai usé de ta patience et tu as tenu bon... Promis, j'irai un jour consulter un ORL ! :p et rendez-vous sur une 6a de 110m de haut ?!? En tout cas, Merci d'être toi !

Delphine : Merci pour ton amitié. Ravie d'avoir partagé ce voyage en Tunisie. Merci pour ton soutien quand le coeur n'allait pas.

Audrey : quelques heures partagées autour d'une tasse de thé ont suffi pour qu'une amitié naisse. Merci pour ton soutien, les séances shopping, les vacances au soleil chez toi qui sont inoubliables. Merci tout simplement.

Fifamè : Miss Fifa, la reine de la piste de danse du English Pub. Merci infiniment pour les nombreux moments partagés à Munich, à Bari, à Barcelone. Merci pour ton honnêteté, ta franchise. Merci d'être venue dans mon pays et tu as vu : il n'a même pas plu :p. Rendez-vous à Barcelone ou ailleurs.

Gwenn : Ma Couzine, merci pour tout tout tout. Tu as toujours été là, dans les bons comme dans les mauvais moments. Avec beau-couzin et mini-couzine, vous avez été là pour moi et je tiens à vous remercier tous les trois du fond du coeur.

Stef : Après seulement deux heures en licence nous ne cessions de papoter, de rigoler. J'ai beaucoup appris grâce à notre amitié. Ton goût de la vie me rend plus optimiste. Merci de m'avoir permis de saturer ta boite mail. Merci infiniment pour les discussions futiles qui donnent le sourire et les discussions plus sérieuses pour nous rappeler que le monde n'est pas que futilité ! Merci également à tes deux hommes. Merci pour tout !

Tout ceci n'aurait pu se faire sans le commencement : Mes parents et mon frère ainsi que tout les membres de ma famille que j'aime. Merci pour votre soutien.

Aux deux petits anges aux deux L. qui m'ont énormément émue par leur arrivée et m'ont offert les plus beaux sourires.

Table des matières

Introduction générale **1**

1 Généralités et campagnes de mesures **5**
1.1 L'imagerie SAR 5
1.1.1 Principe de l'imagerie SAR 6
1.1.2 Formation d'une image SAR 9
1.1.3 Particularités de l'imagerie SAR 13
1.2 Description du sol 14
1.2.1 Propriétés physiques du sol 14
1.2.2 Humidité du sol 16
1.2.3 Rugosité du sol 19
1.3 Description des données SAR 25
1.3.1 Capteur E-SAR 25
1.3.2 Données d'Alling 26
1.3.3 Données d'Agrisar 30
1.4 Conclusion 36

Bibliographie **37**

2 Étude polarimétrique et électromagnétique des sols agricoles **41**
2.1 Polarimétrie Radar 41
2.1.1 Description de la polarisation d'une onde électromagnétique . 41
2.1.2 Description de la réponse polarimétrique d'un diffuseur 44
2.1.3 Les propriétés de symétrie des cibles distribuées 46
2.1.4 Décompositions polarimétriques 49
2.2 Modèle de diffusion de sols agricoles 54
2.2.1 Modèle de diffusion de surfaces rugueuses isotropes 54
2.2.2 Modèle de diffusion de surfaces rugueuses périodiques 58
2.2.3 Modèle de diffusion de surfaces recouvertes de petites végétations 66
2.3 Conclusion 70

Bibliographie **73**

3 Estimation de l'humidité des sols nus isotropes en bande L **77**
3.1 Méthodes d'inversion classiques 78
3.1.1 Modèle de Dubois 78
3.1.2 Modèles de Oh 79

3.1.3 Méthode d'Hajnsek 80
3.2 Nouvelle méthode d'inversion d'humidité des sols 81
3.2.1 Etude théorique des paramètres polarimétriques 81
3.2.2 Analyse des paramètres polarimétriques sur les données SAR . 87
3.2.3 Méthode d'inversion α_1 semi-empirique 92
3.2.4 Estimation de l'humidité des sols en bande L 95
3.3 Conclusion 97

Bibliographie **99**

4 Estimation de l'humidité des sols rugueux à structure périodique 101
4.1 Problématique 101
4.1.1 Méthodes d'inversion classiques 102
4.1.2 Comportement électromagnétique des champs périodiques . . 105
4.2 Détection de zones non-stationnaires 112
4.2.1 Analyse Temps-Fréquence 112
4.2.2 Détection de zones non-stationnaires 116
4.3 Analyse polarimétrique 123
4.3.1 Etude sur les données d'Alling 123
4.3.2 Etude sur les données d'Agrisar 125
4.4 Estimation de l'humidité des zones non- stationnaires 127
4.5 Conclusion 128

Bibliographie **131**

5 Étude des sols recouverts de petites végétations 133
5.1 Étude des paramètres polarimétriques pour la classification 134
5.1.1 Définition des classes 134
5.1.2 Comportement des paramètres polarimétriques 135
5.1.3 Classification hiérarchique 138
5.1.4 Résultats 139
5.2 Classification SVM 142
5.2.1 Principe du SVM 142
5.2.2 Identification des classes 144
5.2.3 Cartes de classification 147
5.3 Estimation de l'humidité des sols recouverts de petites végétations . . 158
5.4 Conclusion 162

Bibliographie **165**

Conclusion générale et perspectives **167**

Annexe **173**

A Matrices de confusions **175**

B Précisions producteur et utilisateur **185**

Introduction générale

Au XXième siècle, la conquête de l'espace est devenue réalité. En effet, de l'envoi du premier satellite *Spoutnik* au premier pas sur la lune de *Neil Armstrong*, en passant par le premier vol orbital habité par *Youri Gagarine*, cette conquête s'est concrétisée. L'Homme s'est mis en quête d'explorer l'Univers mais s'est aussi inquiété de surveiller la Terre. L'imagerie satellitaire ou aéroportée est devenue un outil indispensable à l'observation de la Planète bleue.

Par ailleurs, au début de ce même siècle, les premiers RADAR (Radio Detection And Ranging, Détection et télémétrie par onde radio en français) voient le jour. Utilisée à ses débuts à des fins militaires, la technologie radar s'est rapidement améliorée afin d'obtenir par exemple des radars à balayage rotatif pour la détection et le positionnement des avions et des navires. Les militaires créent le Radar Aéroporté à Antenne Latérale (RAAL) pour la reconnaissance et la surveillance des terrains qui sera remplacé par le RAAL, le Radar à Ouverture Synthétique (ROS) (Synthetic Aperture Radar (SAR)) permettant de visualiser une grande scène et possédant une résolution proche de l'optique. Il faut attendre les années 60 pour que ces systèmes radar puissent être disponibles pour des applications civiles comme la cartographie.

La télédétection est une discipline qui permet d'acquérir à distance des informations sur une cible sans contact direct avec elle. La surveillance de certains milieux naturels comme par exemple la cryosphère, les forêts, les océans, est capitale de nos jours.

Deux techniques principales de télédétection existent :

- La télédétection optique dite passive nécessite seulement la construction d'un récepteur puisque cette technique est tributaire d'une source d'illumination annexe (généralement le soleil).
  - Avantage : cette technique a une durée de vie plus longue
  - Inconvénient : cette technique dépend des conditions d'éclairement. Elle est donc inutilisable de nuit et par temps nuageux
- La télédétection active requiert la construction d'un émetteur et d'un récepteur
  - Avantage : cette technique fonctionne quelles que soient les conditions d'éclairement. Elle est donc utilisable de jour comme de nuit.
  - Inconvénient : cette technique nécessite beaucoup de puissance. Par conséquent, le coût de fonctionnement est élevé et la durée de vie du système plus courte.

La télédétection active permet de surveiller la surface terrestre à l'aide d'images radar. Le capteur radar utilisé dans cette thèse est le Radar à Ouverture Synthétique (ROS) aussi communément appelé Synthetic Aperture Radar (SAR). Le système SAR possède une résolution proche de celle des images optiques. Les ondes électromagnétiques émises par ce système en fonction des bandes de fréquences sont sensibles aux variations des paramètres des sols naturels. Ainsi, il est possible d'extraire de nombreuses informations telles que l'humidité des sols et la présence de végétation à partir de l'imagerie SAR.

L'humidité des sols agricoles est une mesure importante pour la prédiction d'inondations. En effet, à partir de ce paramètre, il est possible de prévoir la saturation en eau des sols. A l'inverse, le contrôle de l'humidité des zones arides est primordiale dans les pays touchés par la sécheresse pour la prédiction du rendement des cultures agricoles et pour les risques d'inondation en cas de crues intenses. Différents types de sols agricoles existent : les champs nus, les champs à structure périodique, les champs recouverts de petites végétations. Tous doivent pouvoir être surveillés pour un meilleur suivi de l'humidité des sols.

Les objectifs fixés dans le cadre de cette thèse concernent la faisabilité d'estimer l'humidité des trois catégories de sols agricoles citées ci-dessus, et qui se trouvent sur la plupart des sites des différentes campagnes de mesures.

Ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre est composé de trois parties distinctes. Dans un premier temps, le capteur actif SAR utilisé dans cette étude est présenté (E-SAR). Les traitements de signaux liés à la construction d'une image SAR sont détaillés pour introduire la décomposition temps-fréquence utilisée dans le chapitre 4 et pour aider à la compréhension des réponses électromagnétiques particulières des champs périodiques. Dans un deuxième temps, les caractéristiques physiques, géométriques (rugosité) et diélectriques (humidité) des sols naturels sont décrites. Enfin, un dernier paragraphe décrit les deux campagnes de mesures SAR utilisées dans les différentes parties de ce manuscrit. La campagne d'Alling a été effectuée en 2000 afin d'étudier les sols nus. Dans cette thèse, cette campagne sert à élaborer les différents algorithmes dans le but d'estimer l'humidité des sols nus et à structure périodique et de déterminer la faisabilité d'estimer l'humidité des sols recouverts de petites végétations. La seconde campagne est celle d'AgriSAR qui s'étend d'avril à août 2006. Elle a pour objectif d'étudier l'évolution des sols agricoles à différentes étapes de la croissance des cultures.

Le deuxième chapitre introduit les différentes représentations polarimétriques possibles de l'information délivrée par un système SAR polarimétrique. Les réponses polarimétriques des ondes diffusées fournissent de nombreuses informations importantes sur les caractéristiques physiques, géométriques et diélectriques des scènes illuminées. Les différents paramètres polarimétriques présentés dans ce chapitre sont utilisés dans les différentes études des trois différents champs agricoles. La seconde

partie présente différents modèles de diffusion électromagnétique. Le premier modèle de diffusion est la méthode de l'équation intégrale IEM (Integral Equation Method). Ce modèle est adapté aux sols nus et le plus utilisé dans la littérature. Cette méthode permet de modéliser la diffusion de l'onde électromagnétique par un sol nu et de déterminer les paramètres polarimétriques utiles pour l'estimation de l'humidité des sols. Le deuxième modèle de diffusion pour les sols recouverts de petites végétations est un modèle simple basé sur le modèle du transfert radiatif et permet dans notre étude de comprendre l'influence de la végétation sur la réponse électromagnétique du sol. Afin de pouvoir aussi modéliser la diffusion par une surface rugueuse périodique, un modèle électromagnétique basé sur la méthode de Kirchhoff à approximation scalaire a été élaboré dans ce chapitre pour les sols périodiques. Le modèle étudié dans le chapitre 4, permet de mettre en avant les réponses électromagnétiques particulières des champs à structure périodique.

Les trois chapitres suivants sont consacrés aux études des trois catégories de champs agricoles : nus, à structure périodique et recouverts de petites végétations.

Le troisième chapitre est consacré à l'estimation de l'humidité des sols nus isotropes en bande L. Tout d'abord trois méthodes classiques d'inversion communément utilisées dans la littérature sont présentées. Puis, une nouvelle méthode basée sur le paramètre α_1 est élaborée dans cette partie. Le modèle IEM présenté dans le chapitre 2 permet de modéliser puis de comparer le paramètre α_1 à celui issu des données SAR afin d'estimer l'humidité des sols. Une simple comparaison modèle/données n'est pas suffisante. Une calibration des données et du modèle IEM est donc nécessaire et présentée dans ce chapitre. La méthode finale est appliquée sur les données acquises sur le site d'Alling composé essentiellement de sols nus.

Le quatrième chapitre traite des sols à structure périodique. Dans un premier temps, les paramètres polarimétriques issus des données SAR du site d'Alling et utilisés dans les modèles d'inversion classiques (chapitre 3) sont analysés. Un comportement inhabituel est noté dans ces jeux de données entraînant une erreur d'estimation de l'humidité des champs à structure périodique avec les modèles classiques existants d'inversion. Une analyse du modèle électromagnétique développé dans le chapitre 2 permet de comprendre les phénomènes électromagnétiques qui se produisent en présence d'un sol périodique. Les champs à structure périodique résonnent ce qui s'expliquent par l'analyse de la synthèse SAR (chapitre 1). Dans un deuxième temps, la décomposition temps-fréquence des images SAR est présentée. Elle permet de détecter les champs à structure périodique ayant un comportement non-stationnaire et créant des anomalies lors de l'inversion des paramètres de surfaces. Des cartes de détection de zones non-stationnaires sont produites pour le site d'Alling et pour trois dates de la campagne d'AgriSAR. L'étude de ces cartes met en avant le comportement non-stationnaire des champs périodiques et également des champs recouverts de végétation à structure périodique. Dans un troisième temps, une analyse polarimétrique est effectuée sur les sous-images SAR issues de la décomposition temps-fréquence. Cette analyse permet d'observer l'évolution des réponses électromagnétiques de champs stationnaires et non-stationnaires sous différents an-

gles d'azimut. Elle met en évidence la pertinence du paramètre α_1. Enfin, une estimation de l'humidité des sols à structure périodique est effectuée par le biais de la méthode basée sur le paramètre α_1 élaborée dans le chapitre 3.

Le cinquième et dernier chapitre est dédié aux sols recouverts de petites végétations. En effet, les zones agricoles acquises par les capteurs SAR sont très souvent recouvertes de végétation. Afin d'estimer l'humidité des sols sous le couvert végétal, une première étude basée sur la classification de l'occupation des champs agricoles est élaborée. Elle se base sur les caractéristiques physiques des plantes (forme, taille, densité). En effet, ces paramètres influencent le comportement électromagnétique de l'onde. Ce chapitre est divisé en deux parties. La première consiste à déterminer les paramètres polarimétriques pertinents qui permettront de distinguer les différentes catégories de champs agricoles. Pour cette première étude, la campagne de mesure d'Alling est exploitée. Dans la seconde partie, les paramètres polarimétriques choisis précédemment sont utilisés comme intrants à la méthode des Machines à Vecteur de Support (SVM), afin de développer la classification des sols agricoles. Les données d'AgriSAR multi-temporelles sont utilisées pour l'application de cette méthode. Les données d'Alling n'ont pu être utilisées dans cette seconde partie en raison du manque de mesure terrain à disposition sur ce site.

Ce manuscrit se termine par une conclusion générale reprennant les points forts de cette thèse et présentant les perspectives offertes dans le cadre d'une continuité de ces travaux de recherche.

Chapitre 1

Généralités et campagnes de mesures

Dans les années 60, les systèmes RADAR (Radio Detection And Ranging, Détection et télémétrie par onde radio en français) sont enfin disponibles pour des applications civiles comme la cartographie. Le radar à ouverture synthétique (ROS) (Synthetic Aperture Radar (SAR)) permet de visualiser une grande scène. L'imagerie SAR est ainsi une technique très utilisée en télédétection d'environnements naturels comme le sont les systèmes optiques. Le système SAR est un capteur actif impliquant une maitrise du signal émis contrairement aux systèmes optiques.

L'objectif de cette thèse est d'estimer l'humidité des sols agricoles à l'aide de l'image SAR. Il est important d'étudier les caractéristiques et le fonctionnement du radar afin de comprendre les approches utilisées. Ainsi ce premier chapitre se décompose en trois parties distinctes : le principe de fonctionnement du système SAR, la description du milieu étudié et la description des données SAR utilisées dans ces travaux.

Ainsi, dans un premier temps, le principe de fonctionnement de ce système d'acquisition électromagnétique est présenté et les différents paramètres associés à ce système sont définis. De même le traitement du signal émis jusqu'à la construction d'une image SAR est démontré. Dans un deuxième temps, le milieu que l'on souhaite étudier est introduit. En effet, les descriptions physique, diélectrique (humidité) et géométrique (rugosité) du sol sont présentées. Enfin, puisque tous les travaux effectués dans cette thèse utilisent des données SAR, deux campagnes de mesure sont présentées afin de tester et de valider les différentes étapes de cette recherche.

1.1 L'imagerie SAR

L'imagerie radar à ouverture synthétique est une technique basée sur l'utilisation d'un capteur actif émettant des ondes électromagnétiques. Ce système est composé d'un émetteur contrairement au capteur passif qui utilise en général le soleil comme source d'illumination. Ainsi, le capteur SAR peut être utilisé pour n'importe quelles conditions météorologiques, de jour comme de nuit, et le signal émis est maîtrisé contrairement aux capteurs passifs, permettant ainsi de former des données cohérentes.

1.1.1 Principe de l'imagerie SAR

Le processus de génération d'une image SAR peut être divisé en deux étapes : l'acquisition et la compression. L'acquisition est effectuée par le capteur actif qui émet une impulsion électromagnétique rétrodiffusée par les diffuseurs illuminés. Cette onde électromagnétique rétrodiffusée est reçue par l'antenne du système et est enregistrée pour former le signal radar appelé vidéo brute. L'image radar représentant l'information de réflectivité de l'ensemble des diffuseurs constituant la scène, est obtenue au moyen d'une focalisation de la vidéo brute appelée compression [Bamler(1998)] [Rosen(2000)].

1.1.1.1 Configuration d'une mesure SAR

Les mesures radar peuvent être acquises en configuration monostatique (les antennes émettrice et réceptive ont la même position) ou bistatique (les antennes émettrice et réceptrice ont des positions différentes).

Lors d'une acquisition SAR monostatique, l'émetteur et le récepteur sont configurés en visée latérale avec un angle d'incidence θ_o. Le radar situé à l'altitude H se déplace à la vitesse V_{sar} selon l'axe azimutal y. L'onde électromagnétique émise se réfléchit sur le sol en éclairant une zone appelée fauchée radar instantanée de taille Δx Δy (figure 1.1).

Une image SAR se construit sur le plan oblique défini suivant l'axe Ω. Il est à noter que le plan oblique est différent du plan projeté au sol. Ainsi, Δr est la fauchée radiale située sur la portée du radar R_o, et se définit par

$$\Delta r = R_{max} - R_{min} \tag{1.1}$$

où R_{min} et R_{max} sont les portées proximale et distale respectivement. La portée du radar par rapport à l'axe vertical est orientée d'un angle nommé angle d'incidence θ_o ou par rapport à l'axe horizontal d'un angle de dépression β_o.

1.1.1.2 Résolutions du radar

Une caractéristique très importante de l'image SAR est la résolution car elle correspond directement à la taille de la scène observable.

La résolution d'une image radar est caractérisée à la fois dans les directions radiale et azimutale.

La résolution radiale est la distance minimale séparant deux objets telle que les deux échos soient distincts. Elle est définie par

$$\delta_R = \frac{c\tau_P}{2} \tag{1.2}$$

avec c la célérité et τ_P la largeur de l'impulsion du signal émis. Pour une meilleure précision c'est-à-dire une résolution δ_R faible, il faudrait une largeur d'impulsion faible. Mais d'après les fonctions de Green, l'onde s'atténue en $\frac{1}{r^2}$ impliquant que le rapport signal à bruit est fonction de τ_P. Donc si τ_P diminue, le rapport signal à bruit est très faible et par conséquent, les données ne sont plus exploitables. Ainsi, une impulsion longue mais modulée en fréquence est privilégiée dans l'émission du signal.

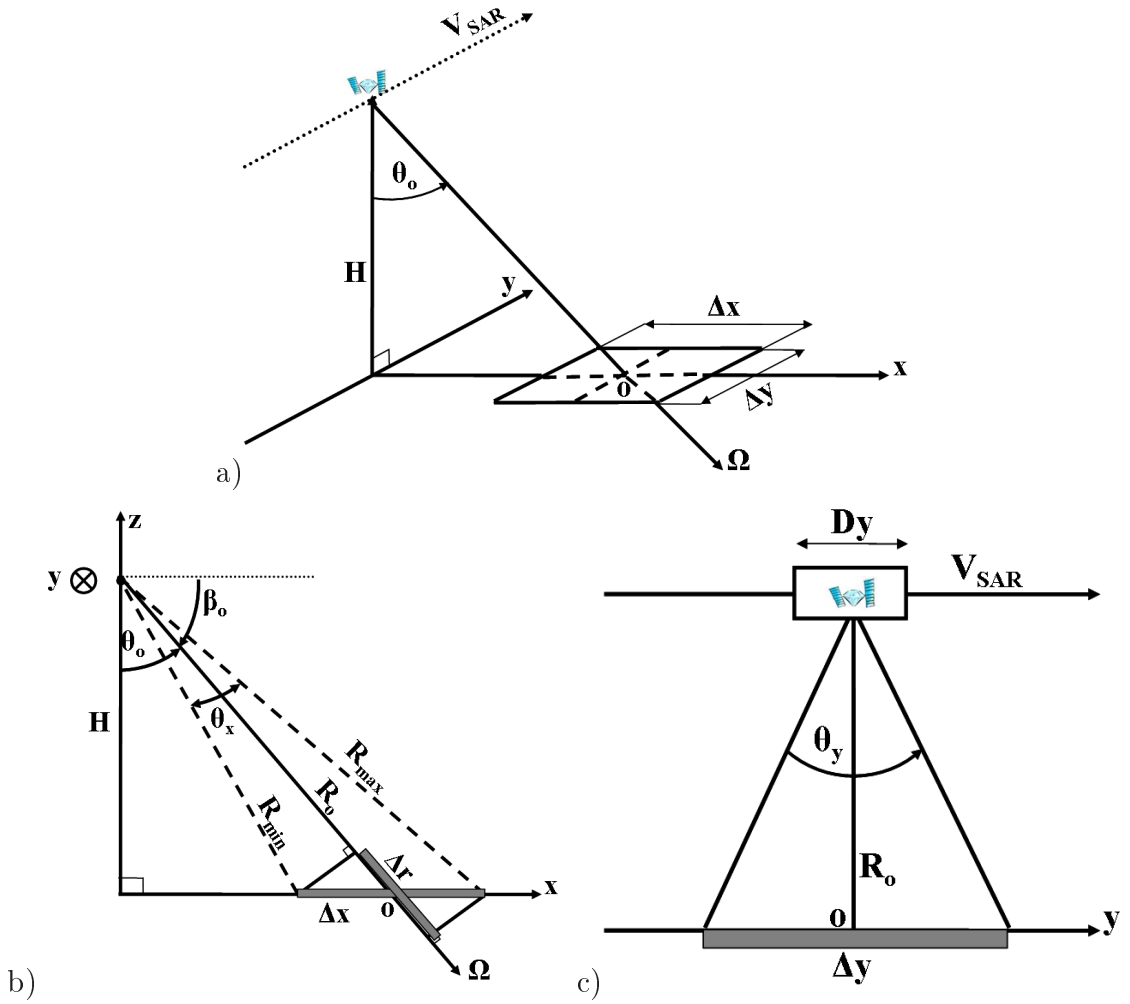


FIG. 1.1 – Configuration géométrique d'une mesure SAR. a) dans le repère (o,x,y,z). b) dans le plan oblique c) dans le plan azimutal

Ce signal de bande B, est modulé en fréquence autour d'une fréquence porteuse f_o comme représenté sur la figure 1.2.

Ce signal nommé chirp est défini par :

$$s_e(t) = \mathrm{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \mathrm{e}^{j2\pi f_o t + j\pi\beta t^2} \tag{1.3}$$

avec t représentant le temps et β le taux de modulation. Ainsi, ce signal fournit une résolution dépendante de la bande de fréquence

$$\delta_R = \frac{c}{2B}. \tag{1.4}$$

La résolution en azimut est proportionnelle à la dimension de l'antenne D_y et est égale à :

$$\delta y = \Delta y \cong \theta_y R_o = \frac{\lambda}{D_y} R_o. \tag{1.5}$$

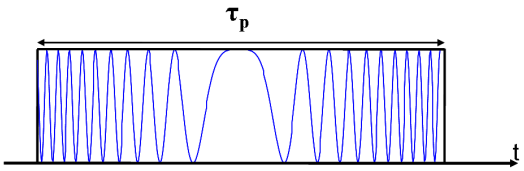


FIG. 1.2 – Chirp du signal émis

Pour distinguer deux cibles proches, la résolution doit être très faible, or un faisceau Δy très faible implique une longueur d'antenne très grande ce qui est techniquement inenvisageable.

Le principe du Radar à Ouverture Synthétique (ROS), (Synthetic Aperture Radar : SAR), consiste donc à déplacer l'antenne d'une distance Δy. La longueur de la zone illuminée est de $2\Delta y$. Ainsi, un réseau d'ouverture d'antenne peut être synthétisé par [Tomiyasu(1978)]

$$\theta_s = \frac{\lambda}{2\Delta y}. \tag{1.6}$$

L'ouverture correspondant à la nouvelle antenne est de

$$\theta_s = \frac{D_y}{2R_o}. \tag{1.7}$$

Grâce à ce déplacement d'antenne, le sol est échantillonné afin de créer une antenne 'virtuelle' de grande longueur. Après synthèse, la résolution en azimut est la distance correspondant à cette ouverture définie par

$$\delta_y = \theta_s R_o = \frac{D_y}{2}. \tag{1.8}$$

Le système SAR effectue donc un traitement des données reçues afin d'améliorer la résolution azimutale. Ce traitement consiste à intégrer plusieurs réponses pour différentes positions du radar comme le montre la figure 1.3.

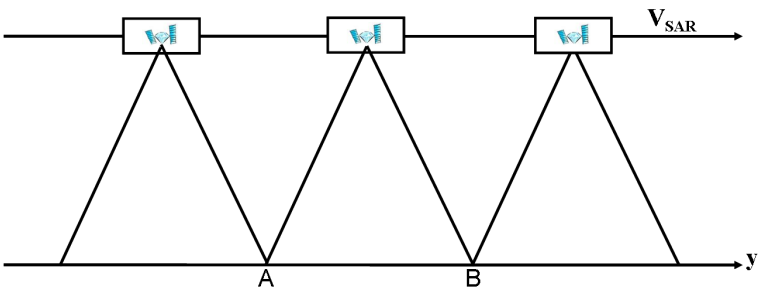


FIG. 1.3 – Différentes acquisitions SAR

L'intégration commence lorsque le radar illumine le point A et se termine lorsqu'il n'illumine plus le point B. Le temps d'intégration est défini alors par

$$T_{int} = \frac{2\Delta_y}{V_{sar}}. \tag{1.9}$$

1.1.2 Formation d'une image SAR

1.1.2.1 Synthèse d'une image SAR

Le signal émis modulé en fréquence est transmis et reçu par une antenne sur un plan bidimensionnel composé du plan azimut et du plan oblique. Ainsi, la vidéo brute regroupe les signaux reçus aux différentes positions du radar. Ces informations contenues sur cette vidéo brute sont ensuite transmises à une station au sol pour le traitement.

L'image construite est fonction de la réflectivité du sol $\sigma_o(x, y)$ aussi appelé coefficient de rétrodiffusion. Cette réflectivité de l'environnement varie selon les différentes positions du radar. Ainsi, construire une image SAR consiste à déterminer l'estimée du coefficient de rétrodiffusion, $\widehat{\sigma}_o(x, y)$, intégrée à différentes positions [Chevalier(1989)][Bamler(1998)].

– **Description du signal émis par un radar**

Le système SAR est un radar qui émet des impulsions contenant un signal modulé linéairement en fréquence. Un train d'impulsion de durée T_p est émis pour chaque position du système de mesure avec une période T_r. Le nombre total de positions du radar, N, est donné par

$$N = \mathrm{Int}\left(\frac{T_{int}}{T_r}\right) + 1 = \mathrm{Int}\left(2\frac{\Delta y}{V_{sar}T_r}\right) + 1 \tag{1.10}$$

où Int() désigne la partie entière inférieure.

Le signal contenu dans les impulsions résulte d'une modulation linéaire de fréquence avec un taux d'accroissement de f_1 autour de la fréquence porteuse f_o. Le signal émis lors du survol de la zone illuminée est donc [Allain(2000)] :

$$s(t) = \sum_{k=0} s_k(t - kT_r) \qquad \text{avec} \qquad s_{k=0}(t) = e_o(t)\mathrm{e}^{j2\pi f_o t}. \tag{1.11}$$

Le signal $e_o(t)$ possède une fréquence qui varie linéairement avec le temps et s'écrit :

$$e_o(t) = \mathrm{e}^{2j\pi\frac{f_1}{2}t^2} \tag{1.12}$$

Ainsi, pour chaque position de l'antenne, le signal émis est

$$s_k(t - kT_r) = \mathrm{e}^{j2\pi(\frac{f_1}{2})(t-kT_r)^2}\mathrm{e}^{j2\pi f_o(t-kT_r)}. \tag{1.13}$$

La durée d'une impulsion est suffisamment courte pour considérer que le radar et la cible sont stationnaires pendant cette impulsion, impliquant que la distance radar cible est alors constante. De plus, le temps t est conventionnellement décomposé en un temps long, kT_r, décrivant le mouvement du radar dans la direction azimutale et en un temps court, τ, relatif à la durée d'émission/réception, comme suit :

$$t = kT_r + \tau \qquad \text{ainsi} \qquad \tau = t - kT_r. \tag{1.14}$$

Les domaines de définition du temps de répétition d'une mesure, ainsi que de la durée d'une mesure sont définis comme

$$0 \leq kT_r \leq T_i \qquad \text{et} \qquad T_p \leq \tau \leq T_r. \tag{1.15}$$

La relation (1.13) devient

$$s_k(t - kT_r\tau) = \mathrm{e}^{j2\pi(\frac{f_1}{2})\tau^2}\mathrm{e}^{j2\pi f_o(t-kT_r)\tau}. \tag{1.16}$$

Dans le plan oblique, les coordonnées d'un point de la zone illuminée ainsi que du radar deviennent $OP = [u, y]^T$ et $OS = [-R_o, y_a = V_{sar}t]$.

L'approximation de stationnarité permet de considérer que lors de l'émission-réception d'une impulsion, le radar est à une position $y_k = kT_rV_{sar}$ constante, ce qui simplifie l'étude de la réponse d'une cible à l'impulsion émise $s_k(\tau)$ de durée T_p [Allain(2000)].

– **Signal reçu pour une cible ponctuelle**

La réponse à l'impulsion émise, notée hp, d'une cible ponctuelle idéale localisée par ses coordonnées (u, y), et de réflectivité égale à l'unité, peut être mise sous la forme bidimensionnelle suivante dans le domaine temporel, [Ferro-Famil(2000)]

$$hp(\tau, kT_r, u, y) = G(u, y_k - y)\frac{e_o\left(\tau - 2\frac{2R(u,y_k-y)}{c}\right)}{R^2(u, y_k - y)}\mathrm{e}^{j2\pi f_o\left(\tau - \frac{2R(u,y_k-y)}{c}\right)}. \tag{1.17}$$

Le signal reçu est composé du signal émis retardé d'un temps égal à $\frac{2R(u,y_k-y)}{c}$ correspondant au trajet aller-retour radar cible et atténué d'un facteur de propagation donné par $R^2(u, y_k - y)$. La variable $G(u, y_k - y)$ représente le gain d'antenne en émission-réception lorsque le réflecteur de coordonnées (u, y) est éclairé.

Au moyen d'un changement de variable, il est possible de définir la réponse à une impulsion émise dans le domaine spatial. Il est pour cela nécessaire de définir la variable u_a liée à la variable τ qui mesure le délai aller-retour

$$\tau = \frac{2(R_o + u_a)}{c} \quad \Rightarrow \quad u_a = c(t - kT_r) - R_o. \tag{1.18}$$

La valeur $\frac{2R_o}{c}$ représente la durée du trajet aller-retour entre le radar et le centre de la zone illuminée.

L'équation (1.17) peut alors être ré-écrite comme suit :

$$hp(u_a, y_k, u, y) = G(u, y_k - y)\frac{e_o\left(u_a + R_o - 2R(u, y_k - y)\right)}{R^2(u, y_k - y)}\mathrm{e}^{j\frac{4\pi}{\lambda_o}\left(u_a + R_o - 2R(u,y_k-y)\right)}. \tag{1.19}$$

La forme continue de l'équation (1.19) est donnée par [Ferro-Famil(2000)]

$$hp(u_a - u, y_a, u) = G(u, y_a - y)\frac{e_o\left(u_a + R_o - 2R(u, y_a - y)\right)}{R^2(u, y_a - y)}\mathrm{e}^{j\frac{4\pi}{\lambda_o}\left(u_a + R_o - 2R(u,y_a-y)\right)} \tag{1.20}$$

dans laquelle la position discrète de l'antenne y_k est remplacée par sa valeur continue au cours du temps, y_a.

Par le biais des relations entre les paramètres de mesure, la réponse d'une cible ponctuelle est décrite en (1.20) comme une fonction des variables spatiales en distance u et en azimut y, référencées par rapport à u_a et y_a respectivement.

– **Signal reçu pour une cible étendue**

Une cible étendue est constituée d'un grand nombre de diffuseurs élémentaires possédant chacun une réflectivité propre. L'étude de la réponse de l'ensemble de ces contributeurs est réalisée au moyen de l'analyse de leur densité de réflectivité $\sigma_o(u, y)$. La densité de réflectivité complexe $\sigma_e(u, y)$ dans le plan radial est définie à partir de la densité de réflectivité au sol, $\sigma_o(u, y)$, comme suit :

$$\sigma_e(u, y)\mathrm{d}u\mathrm{d}y = \sigma_o(u, y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y. \tag{1.21}$$

Le jacobien correspondant au changement de la variable x vers la variable u est défini par

$$J(x \to u) = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}u} = \frac{R_o + u}{\sqrt{(R_o + u)^2 - H^2}}. \tag{1.22}$$

Alors le signal reçu d'un élément différentiel $J\mathrm{d}u\mathrm{d}y$ de réflectivité $\sigma_o(u, y)J\mathrm{d}u\mathrm{d}y$ s'écrit

$$\mathrm{d}s_r(u_a, y_a) = hp(u_a - u, y_a - y, u)\sigma_e(u, y)\mathrm{d}u\mathrm{d}y. \tag{1.23}$$

Le signal total reçu par le radar s'obtient par intégration de cette quantité sur toute la surface illuminée

$$s_r(u_a, y_a) = \iint \mathrm{d}s_r(u_a, y_a) = \iint hp(u_a - u, y_a - y, u)\sigma_e(u, y)\mathrm{d}u\mathrm{d}y. \tag{1.24}$$

L'expression développée du signal est déterminée comme suit [Allain(2000)]

$$\begin{aligned} s_r(u_a, y_a) &= \iint G(u, y_a - y)\frac{e_o\Big(u_a + R_o - 2R(u, y_a - y)\Big)}{R^2(u, y_a - y)}\mathrm{e}^{j\frac{4\pi}{\lambda_o}\Big(u_a + R_o - 2R(u, y_a - y)\Big)} \\ &\quad \sigma_o(u, y)\frac{R_o + u}{\sqrt{(R_o + u)^2 - H^2}}\mathrm{d}u\mathrm{d}y. \end{aligned} \tag{1.25}$$

En condition de champ lointain, l'expression de la distance peut être simplifiée. Les changements de variables suivant permettent une formulation de l'expression du signal reçu

$$\begin{aligned} \sigma(u, y) &= \frac{\sigma_o(u, y)}{(R_o + u)\sqrt{(R_o + u)^2 - H^2}} \\ r_1(u_a) &= e_o(u_a)\mathrm{e}^{j\frac{4\pi}{\lambda_o}u_a} \\ h(u, y_a - y) &= G(u, y_a - y)\mathrm{e}^{-j\frac{2\pi(y_a - y)}{\lambda_o(R_o + u)}} \end{aligned} \tag{1.26}$$

où $\sigma(y, y)$ représente la réflectivité corrigée en distance, $e_1(u_a)$ la fonction de référence en distance et $h(u, y_a - y)$ la réponse impulsionnelle en azimut de la cible.

L'expression (1.25) s'écrit alors

$$s_r(u_a, y_a) = \int e_1(u_a - u) \int h(u, y_a - y)\sigma(u, y)\mathrm{d}y\mathrm{d}u = \int e_1(u_a - u) \int q(u, y_a). \tag{1.27}$$

Le terme $q(u, y_a)$ est identifié à un produit de convolution suivant la variable y_a, exprimé par

$$q(u, y_a) = \sigma(u, y) \otimes h(u, y_a). \tag{1.28}$$

Le signal total reçu est formé de deux produits de convolution suivant y_a et u_a

$$s_r(u_a, y_a) = \int e_1(u_a - u)q(u, y_a)\mathrm{d}u = \sigma(u, y) \otimes h(u, y_a) \otimes e_1(u_a). \tag{1.29}$$

Ce signal simplifié peut être traité afin d'extraire l'information utile à la construction d'une image SAR c'est-à-dire afin d'estimer la réflectivité $\sigma(u, y_a)$.

1.1.2.2 Construction d'une image SAR

Le but de cette partie est de présenter le principe qui permet d'extraire la réflectivité du signal reçu. Ce traitement se décompose en deux étapes : la compression en distance puis la compression en azimut. Le signal défini (1.29), résulte de deux produits de convolution successifs. Ainsi, la meilleure estimée de $\widehat{\sigma}(u, y_a)$, selon le critère du maximum de vraisemblance pour la détection d'un signal affecté d'un bruit blanc gaussien, est obtenue par une succession de produits de déconvolution au moyen de filtres adaptés [Ferro-Famil(2000)].

La compression en distance consiste à compenser la composante radiale du signal $s_r(u_a, y_a)$ c'est-à-dire $e_1(u_a)$. Cette compensation est obtenue en convoluant le signal reçu par une réplique conjuguée et temporellement inversée du signal émis qui s'écrit $e_1^*(-u_a)$. L'objectif de cette technique est d'obtenir un Dirac idéal appelé compression d'impulsion. La meilleure estimée obtenue est une fonction de compression $\Gamma_{e_1}(u_a)$ proche d'un sinus cardinal.

La compression en azimut suit le même principe que la compression en distance. Il faut compenser la fonction $h(u, y_a)$ par une fonction de compression qui tend à être également un sinus cardinal.

Le résultat de ces deux compressions radiale et azimutale, permet d'obtenir l'équation suivante

$$s_r(u_a, y_a) \otimes h^*(u, y_a) \otimes e_1^*(-u) =$$
$$\left(\frac{G(u, y_a - y)}{(R_o + u)\sqrt{(R_o + u)^2 - H^2}} \mathrm{e}^{-j4\pi f_o \frac{u_a}{c}} \sigma(u_a, y_a)\right) \otimes \Gamma_h(u, y_a) \otimes \Gamma_{e_o}(u). \tag{1.30}$$

Les termes à gauche de $\sigma(u_a, y_a)$ peuvent être corrigés contrairement aux termes de droite qui sont appelés fonction d'appareil. Ces fonctions sont des sinus cardinaux

dépendant de la résolution de l'image SAR. En effet, plus la résolution est faible, plus le sinus cardinal tend à être un Dirac et plus l'estimée de l'image est précise. Suite à ces deux traitements de compression radiale et azimutale, l'image SAR finale est obtenue et correspond à l'estimée de la réflectivité du sol.

1.1.3 Particularités de l'imagerie SAR

L'imagerie radar possède des spécificités liées à la technique de mesure. Deux types de particularités sont présentés ici, les particularités d'ordre géométrique et celles concernant la texture de l'image [D'Hondt(2006)] [Lopez-Martinez(2006)].

Déformation géométrique
Contrairement aux images optiques, les images SAR sont mesurées pour un angle de visée latérale non nul. Cette particularité implique des distorsions géométriques propres au SAR lors de présence de topographie : le rapprochement (ou foreshorting) et le déversement (ou layover). Ces deux déformations ne sont pas détaillées ici puisque les sites où sont acquis les données SAR utilisées dans cette étude, ne comportent pas de topographie.

Speckle
Un autre phénomène particulier de la technique SAR est la formation du speckle nommé chatoiement en français.

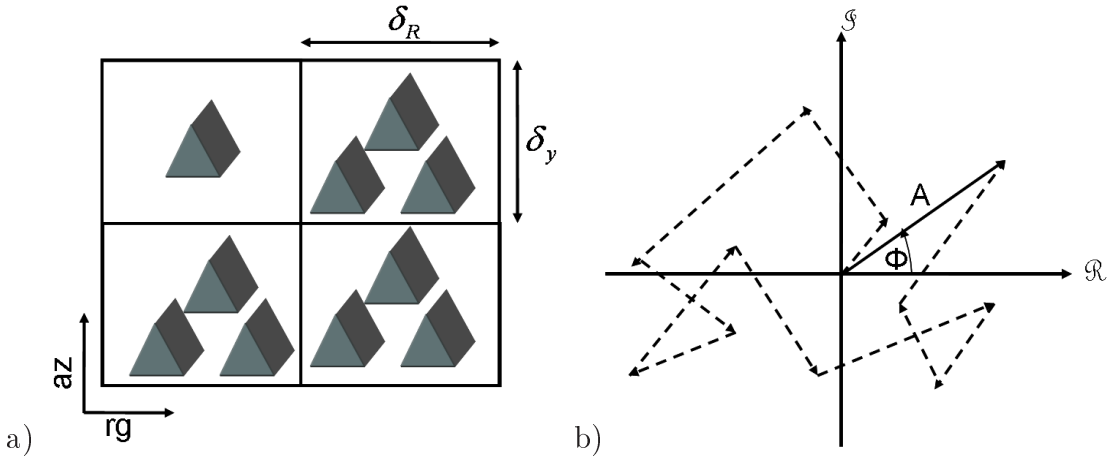


FIG. 1.4 – a- Cellules de résolution avec un ou plusieur diffuseurs, b- Somme cohérente à l'intérieur d'une cellule de résolution.

Une image radar est constituée de plusieurs cellules de résolution dont la taille dépend de la résolution du radar. A l'intérieur de chaque cellule de résolution, il peut exister plusieurs diffuseurs (figure 1.4-a). Ainsi, la réponse d'une cellule de résolution est la somme cohérente des différents réflecteurs élémentaires de la cellule auxquels sont affectés des retards dépendant de la longueur d'onde et de la géométrie de la surface. L'interférence de ces ondes déphasées représentée figure 1.4-b, engendre des granulations dans l'image connues sous le nom de speckle ou chatoiement. Cet effet se traduit sur l'image par une multitude soit de points brillants lorsque l'interférence associée est fortement constructive, soit de points obscurs lorsque l'interférence est destructive. Le speckle est un phénomène parasite qu'il convient de réduire pour

appliquer des méthodes d'inversion par exemple sur les images SAR. Ainsi, de nombreuses méthodes ont été élaborées pour filtrer les données dont celle développée par J. S. Lee qui sera utilisée pour traiter les données de ce travail [Lee(1999)].

Avant de décrire les données SAR et les campagnes de mesures terrain associée utilisées dans ce manuscrit, il est intéressant de présenter d'abord les différentes caractéristiques physiques du sol.

1.2 Description du sol

La rétrodiffusion de l'onde électromagnétique par un sol nu dépend fortement des caractéristiques géométriques et diélectriques des surfaces. En général, la géométrie (ou rugosité) affecte plutôt la forme de l'onde diffusée alors que les propriétés diélectriques contrôlent plutôt l'amplitude de la réflection. Les propriétés diélectriques du sol dépendent des caractéristiques physiques du sol telles que l'humidité et la distribution des particules. Pour cette étude, les éléments les plus importants sont l'humidité et la rugosité du sol. Dans les paragraphes suivants, ces paramètres ainsi que les propriétés physiques sont définis.

1.2.1 Propriétés physiques du sol

Les propriétés physiques principales du sol sont sa texture (sable, silt, argile), sa structure (sa forme), sa porosité et sa perméabilité.

1.2.1.1 Texture du sol

La texture d'un sol dépend de la proportion de sable, de silt et d'argile. Les différents types de texture existant sont représentés sur la figure 1.5.

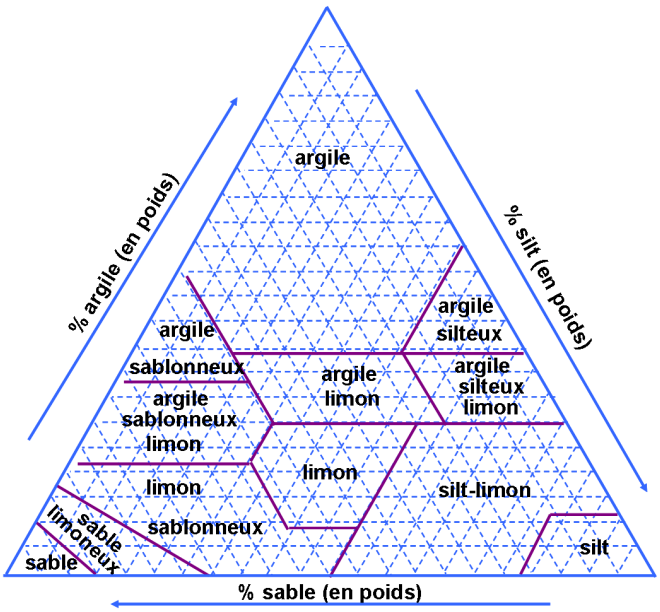


FIG. 1.5 – Textures du sol

Le sable a des particules les plus larges, le silt a des particules intermédiaires et l'argile a des particules très petites.

Cette information sur la texture est importante pour déterminer la capacité du sol à stocker l'eau ce qui peut être utile pour les cultures. Un sol à texture fine emmagasine plus d'eau qu'un sol à texture plus grossière. Par ailleurs, une texture intermédiaire (le terreau par exemple composé de 40% de sable, de 40% de silt et de 20% d'argile) est la plus appropriée pour des zones agricoles puisque favorisant les pousses végétales.

1.2.1.2 Structure du sol

La structure du sol désigne la façon dont les particules forment des mottes ou agrégats. Elle est définie selon sa forme, sa stabilité et sa résistance, et a une incidence sur le drainage, l'infiltration, l'aération, la croissance des racines et la germination. Il existe principalement quatre structures de sol (figure 1.6) : plate, prismatique ou colonnaire, bloc et granuleuse. Il existe également deux autres types de sol qui sont considérés comme non structurel, représentés également sur la figure 1.6 : à grain simple et massive.

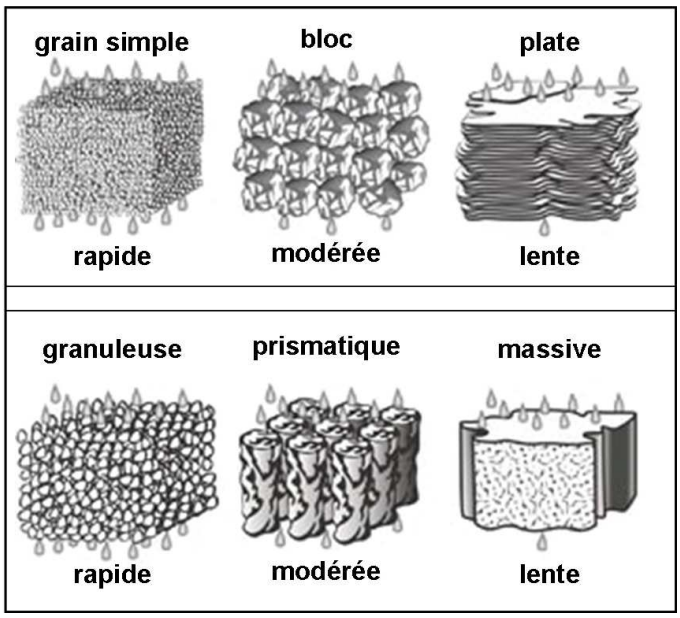


FIG. 1.6 – Différents types de structure de sol

La figure 1.6 renseigne également sur la perméabilité de chaque structure. Les sols à texture plate ou massive, retiennent davantage l'eau ce qui signifie que ces sols seront plus rapidement gorgés d'eau que les sols à textures granuleuses ou à grain simple.

1.2.1.3 Matière organique du sol

La matière organique constitue la composante la plus importante du sol et donne lieu à une bonne rétention de l'humidité permettant de diminuer les problèmes de sécheresse. La matière organique fournit des substances collantes servant à agglutiner les particules afin qu'elles forment des agrégats stables et donnent une bonne structure au sol.

La stabilité et la porosité des agrégats du sol sont directement influencées par la proportion de matière organique contribuant à une meilleure infiltration de l'eau.

En conclusion, suivant la composition du sol, les propriétés physiques sont connues comme le montre le tableau 1.1.

	Composition		
Propriété	Sable	Silt	Argile
Porosité	larges pores	petites pores	petites pores
Perméabilité	rapide	faible à modérée	lente
Rétention d'eau	limitée	moyenne	très importante

TAB. 1.1 – Propriétés physiques du sol suivant sa composition

1.2.2 Humidité du sol

Dans ce paragraphe, la permittivité diélectrique du sol est tout d'abord définie afin de mettre en avant sa dépendance avec l'humidité.

1.2.2.1 Permittivité diélectrique

La permittivité ou constante diélectrique, est une propriété physique qui décrit la réponse d'un milieu donné à un champ électrique émis dans ce milieu. En électromagnétisme, le champ d'induction électrique $\overrightarrow{\mathbf{D}}$ représente la façon dont le champ électrique $\overrightarrow{\mathbf{E}}$ influe sur l'organisation des charges électriques dans un milieu, notamment le déplacement des charges et la réorientation des dipôles électriques. Leur relation dans un milieu isotrope est donnée par

$$\overrightarrow{\mathbf{D}} = \varepsilon \overrightarrow{\mathbf{E}} \tag{1.31}$$

où ε est la permittivité sous forme scalaire.

La constante diélectrique d'un milieu est définie par

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_R \tag{1.32}$$

où ε_0 est la permittivité du vide qui vaut $8.854187.10^{-12}$ F.m^{-1} et ε_R la permittivité relative du milieu.

De plus, la constante diélectrique varie notamment suivant la fréquence du champ appliquée, l'humidité et la température. Elle peut prendre en fonction de la fréquence, des valeurs complexes et s'écrit

$$\varepsilon(f) = \varepsilon'(f) - j\varepsilon''(f). \tag{1.33}$$

La partie réelle de ε correspond à la permittivité relative du matériau et détermine les caractéristiques de propagation du milieu. La partie imaginaire est considérée comme le facteur de perte déterminant l'atténuation de l'onde électromagnétique se propageant dans le milieu.

La constante diélectrique est liée également à la polarisabilité électrique des molécules constituant le milieu. Le tableau 1.2 donne quelques valeurs de permittivité relative pour différents matériaux.

Matériaux	Permittivité relative
Air	1
Argile saturé	10
Bois sec	1.4 à 2.9
Calcaire	4
Eau	81
Granite sain	6.5
Marne (glaise)	8
Sable saturé	30
Sable sec	4
Sol sec	2 à 4

TAB. 1.2 – Permittivité diélectrique de quelques matériaux

Par ailleurs, la longueur d'atténuation du champ électrique dans un milieu est caractérisée par la partie imaginaire de la constante diélectrique du sol. En supposant que la propagation de l'onde possède une atténuation exponentielle avec la profondeur [Ulaby(1986)] [Schanda(1986)], la longueur de pénétration δ_p de l'onde électromagnétique dans un milieu est définie par :

$$\delta_p = \frac{\lambda\sqrt{\varepsilon'}}{2\pi\varepsilon''} \tag{1.34}$$

avec $\lambda = \frac{c}{F}$ la longueur d'onde (en mètre).

1.2.2.2 Permittivité du sol

Le sol est constitué de matière solide mais également d'eau et d'air comme le montre la figure 1.7. Cette eau peut être distinguée en deux catégories :

- l'eau liée : celle qui est fixée aux particules solides du sol
- l'eau libre : celle qui n'est pas rattachée aux particules.

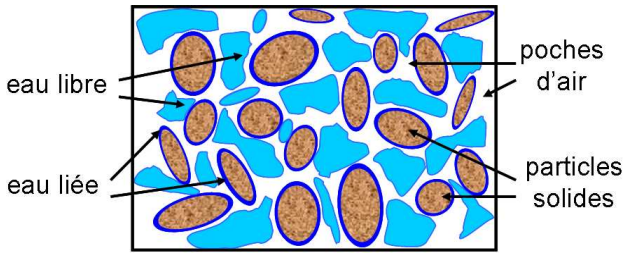


FIG. 1.7 – Composition du sol

Les propriétés diélectriques du sol sont par conséquent liées aux propriétés diélectriques de chaque composante.

Pour un sol sec, la partie réelle de la constante diélectrique du sol ε'_{sol} varie entre 2 et 4 et est quasi indépendante de la température et de la fréquence. La partie imaginaire, ε''_{sol}, est typiquement inférieure à 0.05. Un sol sec est un mélange d'air et de particules solides (de permittivité ε'_{ss} et de densité ρ_{ss}), sa permittivité est définie par :

$$\varepsilon'_{sol} = \left[1 + v_s\left(\sqrt{\varepsilon_{ss}} - 1\right)\right]^2 \tag{1.35}$$

où $v_s = \frac{\rho_b}{\rho_{ss}}$ caractérise la fraction volumique du sol et ρ_b la densité du mélange sol-air. D'après de nombreuses mesures expérimentales [Dobson(1985)], $\varepsilon'_{ss} = 4.7$ et $\rho_{ss} = 2.65$ g.cm^{-3} ce qui permet de dire que

$$\varepsilon'_{sol} = \left(1 + 0.44\rho_b\right)^2. \tag{1.36}$$

Pour un sol humide, la présence d'eau est à prendre en compte. Certaines études ont mis en évidence la relation qui lie l'humidité à la constante diélectrique d'un sol puisque la permittivité de l'eau est beaucoup plus importante que celles des particules du sol et de l'air [Schmugge(1980)][Dobson(1985)] [Ulaby(1986)]. En effet, quand l'humidité augmente, la constante diélectrique du sol (particules du sol avec l'eau et l'air) augmente. Par ailleurs, ce changement est détectable par des capteurs radar [Njoku(1977)].

De plus, comme il a été expliqué précédemment, le sol est classé selon différentes textures caractérisées par différentes tailles et formes de particules. Toutes ces informations ont un impact sur le taux d'humidité d'un sol. Ainsi, ce taux est déterminé par m_v le taux d'humidité volumétrique du sol et par m_g le taux d'humidité gravimétrique du sol comme suit :

$$m_v = \frac{V_e}{V_t} = \frac{W_e\rho_b}{W_{sec}\rho_e} = \frac{W_e\rho_b}{W_{sec}} \qquad \text{cm}^3.\text{cm}^{-3} \qquad \text{ou} \qquad \text{g.cm}^{-3} \tag{1.37}$$

et

$$m_g = \frac{W_e}{W_{sec}} \times 100 = 100\frac{m_v}{\rho_b} \tag{1.38}$$

avec W_e le poids de l'eau dans les échantillons, W_{sec} le poids des échantillons secs, V_e le volume d'eau, V_t le volume total de l'échantillon qui inclus le volume d'air, d'eau, de sol, ρ_b est la densité du mélange sol-air et $\rho_e = 1\text{g.cm}^{-3}$ la densité d'eau.

1.2.2.3 Modèles reliant le taux d'humidité à la constante diélectrique

De nombreuses études ont été menées pour déterminer le comportement diélectrique d'un sol [Wiebe(1971)] [Davis(1976)] [Wang(1980)] [Dobson(1985)]. Elles ont mis en évidence la dépendance de la constante diélectrique à l'humidité, la fréquence, la composition et la température du sol. Des modèles sont nécessaires pour relier l'information électromagnétique obtenue par l'image radar et les paramètres physiques du sol.

Hallikainen décrit la permittivité du sol sous une forme polynomiale dépendant de la composition du sol [Hallikainen(1985)]

$$\varepsilon = (a_0 + a_1 S + a_2 C) + (b_0 + b_1 S + b_2 C) m_v + (c_0 + c_1 S + c_2 C) m_v^2 \tag{1.39}$$

avec S le taux de sable et C le taux d'argile contenu dans le sol. Les coefficients empiriques a_i, b_i et c_i dépendent de la fréquence et diffèrent suivant le calcul de la partie réelle ou imaginaire de la permittivité [Hallikainen(1985)]. Ce modèle est l'un des plus utilisés puisqu'il est valide sur un grand domaine spectral $[1.4 - 18\text{GHz}]$. De plus, il dépend de nombreuses caractéristiques du sol comme le taux d'humidité volumétrique, la taille des particules, les différentes composantes du sol et la fréquence.

Topp propose un modèle plus simple, valide dans la bande de fréquence [20Mhz−1GHz] [Topp(1980)]. Ce modèle relie directement la constante diélectrique et le taux d'humidité au moyen d'une régression d'ordre 3.

La partie réelle de la permittivité est définie par

$$\varepsilon' = 3.03 + 9.3 m_v + 146 m_v^2 - 76.7 m_v^3. \tag{1.40}$$

Réciproquement, le taux d'humidité volumique du sol se détermine par

$$m_v = -5.3.10^{-2} + 2.92.10^{-2}\varepsilon' - 5.5.10^{-4}\varepsilon'^2 + 4.3.10^{-6}\varepsilon'^3. \tag{1.41}$$

Ce modèle ne tient pas compte de la partie imaginaire de la constante diélectrique.

Dans ce manuscrit, la constante diélectrique ε est considérée dépendante uniquement de sa partie réelle.

Le tableau 1.3 donne les taux d'humidité correspondant aux constantes diélectriques déterminés par le modèle de Topp.

1.2.3 Rugosité du sol

Dans ce paragraphe, les propriétés géométriques du sol sont présentées comme étant liées à la rugosité. Cette notion est importante sur son effet sur la réflectivité de l'onde électromagnétique du sol.

Constante diélectrique ε	Taux d'humidité m_v
3	3%
6	11%
9	17 %
12	23%
15	28%
18	32%
21	36%
24	39%
27	42%
30	45%
33	47%

TAB. 1.3 – Correspondance entre la constante diélectrique et le taux d'humidité

1.2.3.1 Critère de rugosité

La diffusion d'une onde électromagnétique sur une surface rugueuse a été étudiée en premier par Rayleigh en 1877. Le critère de Rayleigh détermine le degré de rugosité d'une surface en permettant une interprétation physique.

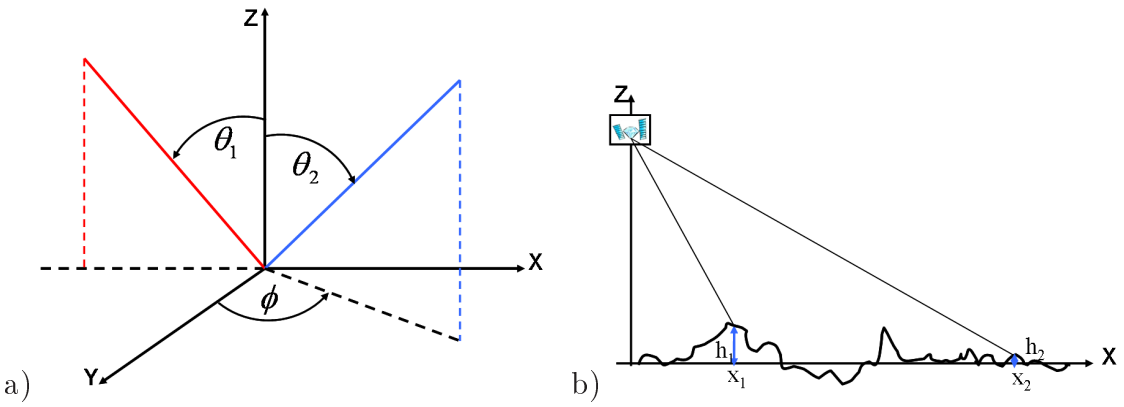


FIG. 1.8 – Diffusion électromagnétique par une surface

En considérant une onde incidente plane monochromatique réfléchie par une surface rugueuse, le calcul de la différence de phase entre deux réponses de deux diffuseurs situés aux positions x_1 et x_2 et aux hauteurs h_1 et h_2, est défini par

$$\Delta\phi = k\Big[\big(h_1 - h_2\big)\big(\cos\theta_1 + \cos\theta_2\big) + \big(x_2 - x_1\big)(\sin\theta_1 - \sin\theta_2)\Big] \tag{1.42}$$

où k est le vecteur d'onde incident ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$). Pour une diffusion spéculaire ($\theta_1 = \theta_2$) la différence de phase s'exprime comme suit [Ogilvy(1992)] :

$$\Delta\phi = 2k\Delta h\cos\theta_1 \tag{1.43}$$

où $\Delta h = h_1 - h_2$. L'interférence entre les deux ondes diffusées dépend de l'amplitude de la différence de phase. Les deux ondes peuvent tendre à être en phase si $\Delta\phi \ll \pi$ et dans ce cas les contributions sont constructives. Cependant, lorsque $\Delta\phi \sim \pi$, les ondes ont des contributions destructives, ce qui signifie que la réponse électromagnétique dans la direction spéculaire est sans énergie. Le critère de Rayleigh statue que si $\Delta\phi < \frac{\pi}{2}$ alors la surface tend à être lisse, sinon elle tend à être rugueuse. Pour tenir compte de l'ensemble de la surface, ses paramètres caractéristiques sont utilisés et Δh est alors remplacé par l'écart type des hauteurs (Root mean square) (RMS height) définit par σ ou s (dans ce manuscrit, afin de ne pas confondre avec les coefficients de rétrodiffusion définis par σ dans le chapitre 2-2.2, l'écart type des hauteurs est défini par s).
Le paramètre de Rayleigh décrivant le degré de rugosité, est alors

$$R_a = ks\cos\theta_1. \tag{1.44}$$

1.2.3.2 Propriété non intrinsèque d'une surface rugueuse

Le critère de Rayleigh vu précédemment est un critère très arbitraire pour définir la rugosité d'un sol. Cependant, il met en lumière la propriété non intrinsèque de la rugosité. En effet, la rugosité dépend des caractéristiques de l'onde électromagnétique diffusée telles que la fréquence et l'angle d'incidence. Par exemple, une surface apparaît plus rugueuse pour une longueur d'onde faible ou pour un angle d'incidence proche de la normale à la surface.

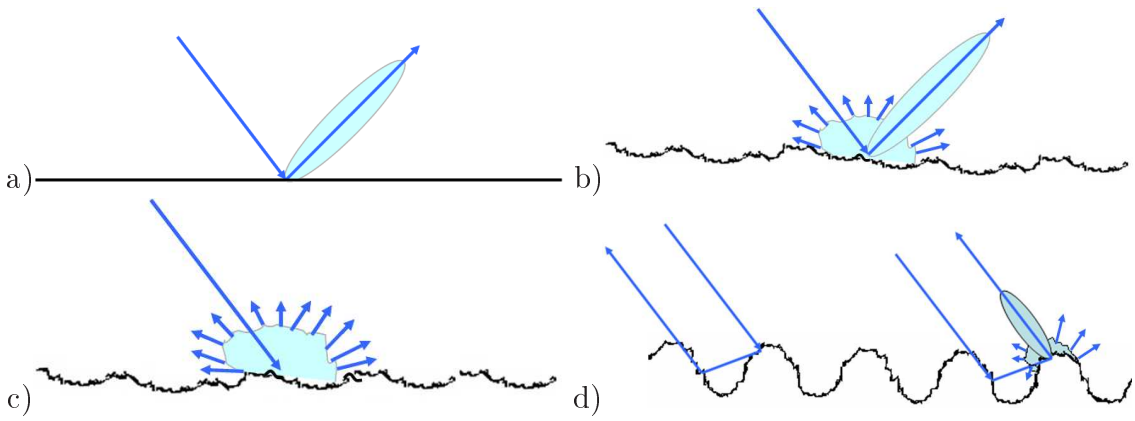


FIG. 1.9 – Diffusion électromagnétique d'une surface : a- lisse, b- rugueuse, c- très rugueuse, d- périodique

Par ailleurs, l'énergie de l'onde diffusée est différente suivant la rugosité de la surface. Pour une surface lisse comme représentée sur la figure 1.9-a, l'onde diffusée réfléchie sur le sol se propage dans la direction spéculaire et la réponse en bistatique est cohérente. Or dans le cadre de ces travaux, les mesures SAR utilisées ont été acquises en configuration monostatique ce qui signifie que pour ce type de surface, l'énergie reçue sera très faible voire inexistante. Toutefois, dans le cas d'un sol périodique, l'onde électromagnétique peut rebondir sur une face du sillon et peut par conséquent renvoyer une composante cohérente comme le montre la figure 1.9-d.

Par ailleurs, dès lors que la surface devient plus rugueuse, figures 1.9-b et -c, une diffusion incohérente apparaît.

De plus, comme vu dans la partie 1.1.3, la réponse électromagnétique mesurée par le radar est la somme des différents contributeurs à l'intérieur d'une cellule de résolution. Ainsi pour une surface possédant des contributions essentiellement cohérentes, les signaux reçus sont tous en phase et la puissance reçue est élevée contrairement aux contributions incohérentes comme le montre la figure 1.10.

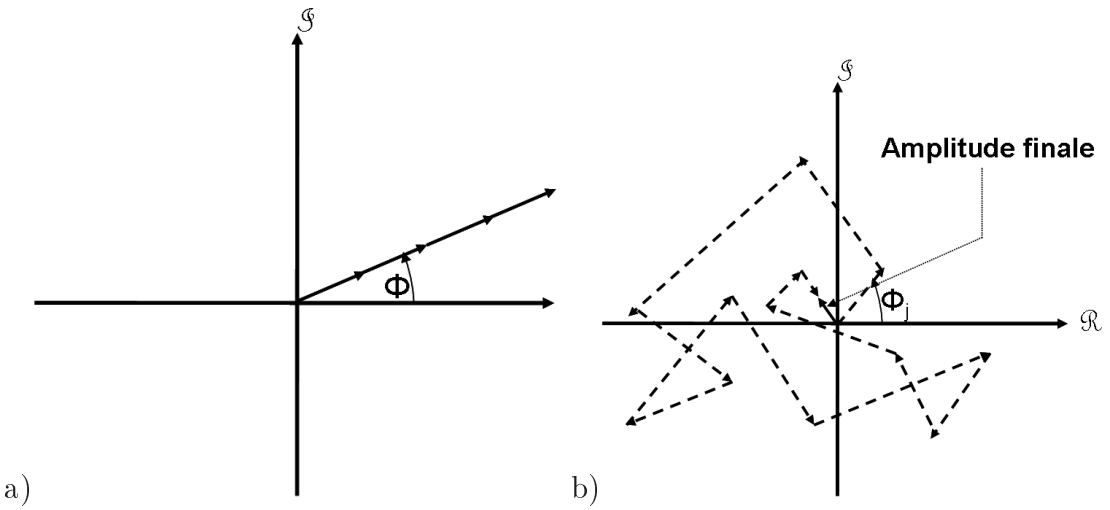


FIG. 1.10 – Somme des contributeurs dans une cellule de résolution a- cas cohérent, b- cas incohérent

Dans cette partie, le lien entre la géométrie de la surface et les caractéristiques électromagnétiques de l'onde a été présenté. Il est également aussi important de définir la géométrie intrinsèque de la surface.

1.2.3.3 Caractérisation géométrique d'une surface rugueuse

Une surface est caractérisée par sa hauteur au-dessus d'un plan de référence en

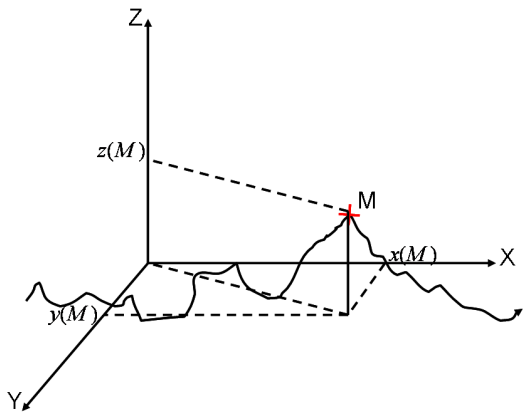


FIG. 1.11 – Caractérisation du sol

fonction des deux autres coordonnées cartésiennes x et y du même plan (figure 1.11).

La hauteur $Z = f(x, y)$ de chaque point $M(x, y)$ de la surface est associée à une variable aléatoire. La surface est alors caractérisée par les lois statistiques de cette variable aléatoire. Habituellement, la surface est décrite statistiquement par ses moments d'ordre 1 et 2 [Ogilvy(1992)].

Une surface rugueuse aléatoire a les propriétés statistiques suivantes :

- Stationnarité : les caractéristiques statistiques de la surface sont indépendantes de la position (x, y).
- Ergodicité : les fonctions statistiques observées sur un ensemble de points de la surface ou sur plusieurs réalisations d'un même point sont identiques.

La distribution des hauteurs $p(Z)$ caractérise la variation de la hauteur vis-à-vis du plan de référence. $p(Z)$ est la probabilité que le point considéré soit à une hauteur comprise entre z et $z + \mathrm{d}z$ vis-à-vis du plan de référence. Ainsi, la hauteur moyenne de la surface correspond au plan de référence, $z = 0$ et est définie par l'espérance mathématique de Z

$$\langle Z \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} Z p(Z) \mathrm{d}Z = 0. \tag{1.45}$$

La variance des hauteurs est la dispersion des hauteurs par rapport à la valeur moyenne et est définie par le moment d'ordre 2 centré de la surface

$$s^2 = \langle Z^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} Z^2 p(Z) \mathrm{d}Z. \tag{1.46}$$

L'écart type s est l'un des principaux paramètres définissant la rugosité.

La distribution des hauteurs est considérée gaussienne, dans ce cas, elle est définie par

$$p(Z) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \mathrm{e}^{-\frac{Z^2}{2s^2}}. \tag{1.47}$$

Cette distribution est symétrique par rapport au plan de référence donc il y a autant d'éléments de la surface au dessus et en dessous du plan moyen.

La distribution des hauteurs seule ne permet pas de caractériser une surface. Plusieurs profils peuvent avoir la même distribution des hauteurs et pourtant être différents.

Seule leur fonction d'autocorrélation permet de les différencier. La fonction d'autocorrélation est définie par :

$$\rho(R_x, R_y) = \langle Z(x, y) Z(x + R_x, y + R_y) \rangle. \tag{1.48}$$

Pour une surface stationnaire isotrope, $\rho(R_x, R_y)$ dépend seulement des distances R_x et R_y entre deux points situés aux positions (x, y) et $(x + R_x, y + R_y)$

$$\rho(R_x, R_y) = \rho(R) \qquad R^2 = R_x^2 + R_y^2. \tag{1.49}$$

Les propriétés de la fonction d'autocorrélation sont

- $\rho(0) = s^2$ pour $R = 0 \Rightarrow$ les deux points sont confondus cela implique que $\rho(R)$ est à son maximum en 0.
- $\rho(R) = \rho(-R)$

– $\lim_{\Delta x \to \infty} \rho(R) = 0 \Rightarrow$ les points sont alors décorrélés.

La fonction d'autocorrélation normalisée $\rho_n(R)$ est très souvent utilisée

$$\rho_n(R) = \frac{\rho(R)}{s^2}. \tag{1.50}$$

Les fonctions d'autocorrélation des surfaces naturelles sont généralement modélisées au moyen de fonctions de $|x|$ et $|y|$, monotones et décroissantes autour de $(x, y) = (0, 0)$. Dans ce cas, la longueur de corrélation, l_c, est assimilée à un paramètre caractéristique de la fonction d'autocorrélation et est définie comme

$$\frac{\rho(l_c)}{\rho(0)} = \rho_n(l_c) = \frac{1}{e} = 0.3679 \tag{1.51}$$

avec e la constante d'Euler. La longueur de corrélation est la distance maximale pour laquelle les signaux sont encore corrélés. La longueur de corrélation est un paramètre difficile à mesurer et à estimer. En effet, pour une même surface, la mesure de ce paramètre sera différente suivant la longueur de la cellule de mesure [Mattia(1997)], [Davidson(2000)], [Mattia(2001)],[Davidson(2003)], [Mattia(2003)]. Des études ont montré que l'écart type des hauteurs et la longueur de corrélation augmentent avec la longueur du profil [Baghdadi(2000)]. Par ailleurs, par simulation, il a été démontré que les mesures de la longueur de corrélation sont peu fiables en utilisant des profilomètres conventionnels de 1 ou 2 m de long [Oh(1998)].

La fonction d'autocorrélation est en général définie soit

– Gaussienne

$$\rho_{n_G}(R) = s^2 \mathrm{e}^{-\frac{R^2}{l_c^2}} = s^2 \rho_G(R) \tag{1.52}$$

soit

– Exponentielle

$$\rho_{n_E}(R) = s^2 \mathrm{e}^{-\frac{|R|}{l_c}} = s^2 \rho_E(R). \tag{1.53}$$

Dans les modèles électromagnétiques de surface, la représentation spectrale de la surface définie comme la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation est utilisée. Elle est fonction des vecteurs d'ondes k_x et k_y.

$$\begin{aligned} W(k_x, k_y) &= \int\int_{-\infty}^{+\infty} \rho(R_x, R_y) f \, \mathrm{d}R_x \mathrm{d}R_y \\ \text{avec} \qquad f &= \mathrm{e}^{-jR_x k_x - jR_y k_y} \end{aligned} \tag{1.54}$$

et k_x et k_y les vecteurs d'onde en x et y.

Une surface stationnaire est entièrement décrite par la densité de probabilité de ses hauteurs et par sa fonction d'autocorrélation.

Il est toutefois à noter que certaines études considèrent ses notions insuffisantes dans la description de la structure géométrique de la surface du sol [Rouvier(1996)] [Rouvier(1997)] [Casarano(1997)] [Zribi(2000)]. Ainsi, ces dernières introduisent dans

un modèle de sol une complexité de la structure locale en utilisant une approche fractale. La fonction d'autocorrélation associée est la fonction brownienne donnée par

$$\rho_{n_B}(R) = s^2\left(1 - \frac{\left(\frac{R}{\tau}\right)^{2H}}{2}\right) \tag{1.55}$$

où τ correspond à la valeur de la fonction d'autocorrélation égale à la moitié de sa valeur à l'origine et H à l'exposant de Hust [Zribi(1998)]. Cette caractérisation complexe de surface n'est pas prise en compte dans ce manuscrit.

1.3 Description des données SAR

Dans les différents chapitres de ce manuscrit, les méthodes d'inversion et de classification proposées sont appliquées sur les données SAR décrites dans cette partie. Deux campagnes de mesures acquises sur deux sites différents par le capteur E-SAR aéroporté de l'agence aérospatiale allemande sont présentées. La première campagne de mesure a été acquise sur le site d'Alling en 2000 et la seconde nommée AgriSAR a été acquise sur le site de Görmin en 2006.

1.3.1 Capteur E-SAR

Le capteur aéroporté expérimental SAR, E-SAR (Experimental Synthetic Aperture Radar) est un système développé par le centre aérospatial allemand au sein de l'institut des technologies fréquence radio et systèmes radars à Oberpfaffenhofen (DLR-OP-IHR/SAR) dont les caractéristiques sont détaillées dans le tableau 1.4.

Bande de Fréquence	P	**L**	S	C	X
Fréquence porteuse	450 MHz	**1.3 GHz**	3.3 GHz	5.3 GHz	9.6 GHz
Puissance transmise	200 W	**400 W**	2 kW	750 W	2500 W
Bruit au récepteur	4 dB	**8.5 dB**	5 dB	4 dB	4 dB
Gain d'antenne	12 dB	**15 dB**	16 dB	17 dB	17.5 dB
θ_y	17 °	**19** °	27 °	18 °	30 °
θ_x	30 °	**33** °	32 °	35 °	$\sim$ 60 °
Polarisation	HH - HV VV - VH	**HH - HV** **VV - VH**	HH VV	HH - HV VV - VH	HH - HV VV - VH
Largeur de bande	25 ou 60 MHz	**100 MHz**	120 MHz	120 MHz	120 MHz

TAB. 1.4 – Caractéristiques techniques du capteur E-SAR

Ce capteur opère sous cinq bandes de fréquence (X, C, S, L et P) et avec différents modes de polarisations possibles :

- Polarisation simple (Single polarization) pour la bande S,
- Polarisation double (Dual polarization) pour les bandes X et C,
- Polarisation complète (Full polarization) pour les bandes L et P.

Les données acquises en bande L sont traitées dans ce manuscrit car elles sont sensibles à l'humidité des sols agricoles. En bande L, les résolutions radiale et azimutale sont respectivement de l'ordre de 1.4 m et de 0.9 m [Hajnsek(2001)].

1.3.2 Données d'Alling

1.3.2.1 Description du site

Les données ont été acquises sur le site d'Alling situé à 25 km de Munich en Allemagne et proche du DLR comme le montre la figure 1.12 [Herold(2000)] [Herold(2001)] [Hajnsek(2001)]. Cette zone constituée de plaines de sédiments pré-

FIG. 1.12 – Carte de l'Allemagne

sente de faibles variations de la topographie allant de 543 m à 604 m à l'endroit de la formation de moraines (zone Unit III de la figure 1.13).

La figure 1.13 est une photographie optique du site. On peut apercevoir les différentes caractéristiques des champs agricoles de cette zone, la ville de Gilching (en bas à droite de l'image) et la ville d'Alling (en haut à droite). Ce site d'étude, situé entre deux villes, peut être divisée en trois zones :

- Unit I : représente une plaine sédimentaire avec des champs agricoles de petites cultures. Le sol de cette zone est essentiellement constitué de sable grossier.
- Unit II : est une zone humide incluant de petits lacs. Les cultures de cette zone sont des pâturages et des prairies.
- Unit III : est la zone la plus élevée. Elle est constituée de champs agricoles et de forêts.

1.3.2.2 Données radar

La campagne de mesure a eu lieu en 2000 durant deux périodes d'acquisition :

- mars 2000 : l'humidité du sol est importante (pluie et neige fondue),
- juillet 2000 : l'humidité du sol est inférieure à celle de mars.

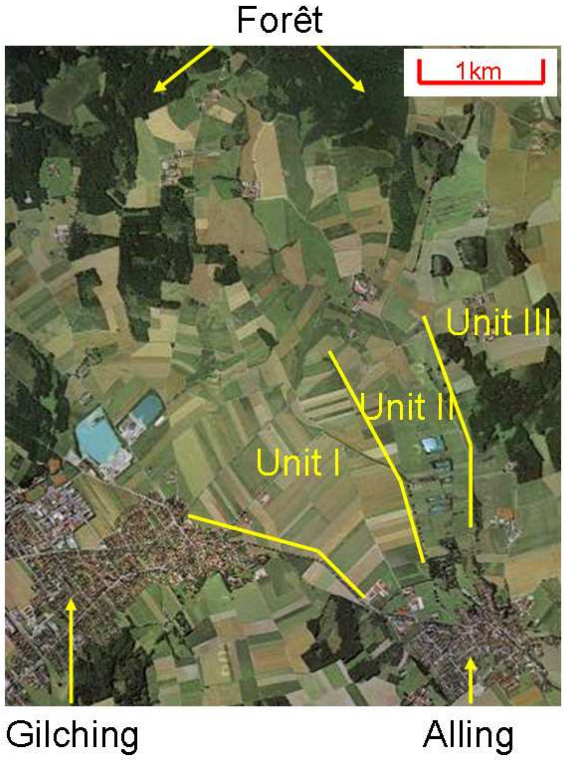


FIG. 1.13 – Image optique d'Alling

Trois bandes de fréquence ont été utilisées lors de cette campagne de mesures : P, L et C. Seule la bande L est étudiée car les données sont en polarisation complète et cette bande de fréquence est sensible à l'humidité des sols agricoles.

1.3.2.3 Données terrain

Humidité du sol

Les mesures d'humidité correspondent à la quantité d'eau dans le sol qui peut être évaporée à 105 °C.

L'humidité volumétrique, m_v, est mesurée par Réflectrométrie dans le Domaine Temporel (TDR). La TDR est basée sur le temps de réponse de l'onde électromagnétique après propagation dans le sol. Elle dépend des propriétés diélectriques du sol dans une bande de fréquence [600Mhz – 1Ghz] et de la mesure moyenne du taux d'humidité à 5-7 cm de profondeur. La partie imaginaire de la constante diélectrique n'est pas mesurée.

L'humidité gravimétrique, m_g, est déterminée en prélevant des échantillons cylindriques de 5 cm de haut pesés sous conditions humides puis après séchage à 105 °C. La différence de poids détermine la masse gravimétrique.

Chaque point est mesuré trois fois par la TDR dans un périmètre de 1.2 m. Des échantillons gravimétriques sont prélevés en certains points de mesure pour une seconde vérification des mesures du taux d'humidité.

Rugosité du sol

La variation de la rugosité est déterminée par la culture agricole des champs. Deux méthodes ont été utilisées afin de mesurer la rugosité des sols (figure 1.14).

- **Le tableau gradué** consiste à mesurer le profil en posant une grille graduée perpendiculaire au sol. La grille utilisée lors de cette campagne est longue d'un mètre avec un quadrillage de 5 cm. De nombreuses mesures ont été effectuées (2-17) pour chaque champ agricole parallèlement et perpendiculairement à l'axe de visée du radar.
- **Le profilomètre laser** de l'ESA-CESBIO [Davidson(2000)], consiste à utiliser un laser qui mesure la distance du sol à l'émetteur laser afin de déterminer les profils du sol. La surface est ainsi scannée parallèlement et perpendiculairement à l'axe de visée du radar avec une longueur de profil de 5 m et une densité d'échantillonnage horizontal de 5 mm.

FIG. 1.14 – Deux méthodes de mesure de rugosité : le tableau gradué et le profilomètre laser [Davidson(2000)].

Mesures terrain

Les figures 1.15 représentent les différentes cartes de mesure terrain disponibles. Les figures 1.15-a et -b illustrent l'écart type des hauteurs s en cm et la longueur de corrélation l_c en cm avec les points noirs correspondant aux points de mesure sur le site d'Alling en mars. Les figures 1.15-c et -d sont des cartes d'occupation des sols en mars et en juillet respectivement. La végétation observée en mars est quasi inexistante. La plupart des champs sont nus, labourés, des semis ont été faits sur quelques champs et d'autres sont recouverts, par exemple, d'orge d'hiver. La végétation de juillet est beaucoup plus riche comme le montre la figure 1.15-d. En effet, les principaux types de culture sont des céréales : de l'orge d'été, du blé et du maïs. Il existe aussi d'autres cultures comme du trèfle, des pommes de terre, des pâturages. La figure 1.15-c renseigne également sur les différents points de mesure du taux d'humidité en mars. Il est à noter que les points de mesure correspondent à une partie du champ et peuvent varier entre eux. Les mesures terrain utiles pour tester l'inversion correspondront à la valeur moyenne de ces points de mesure par

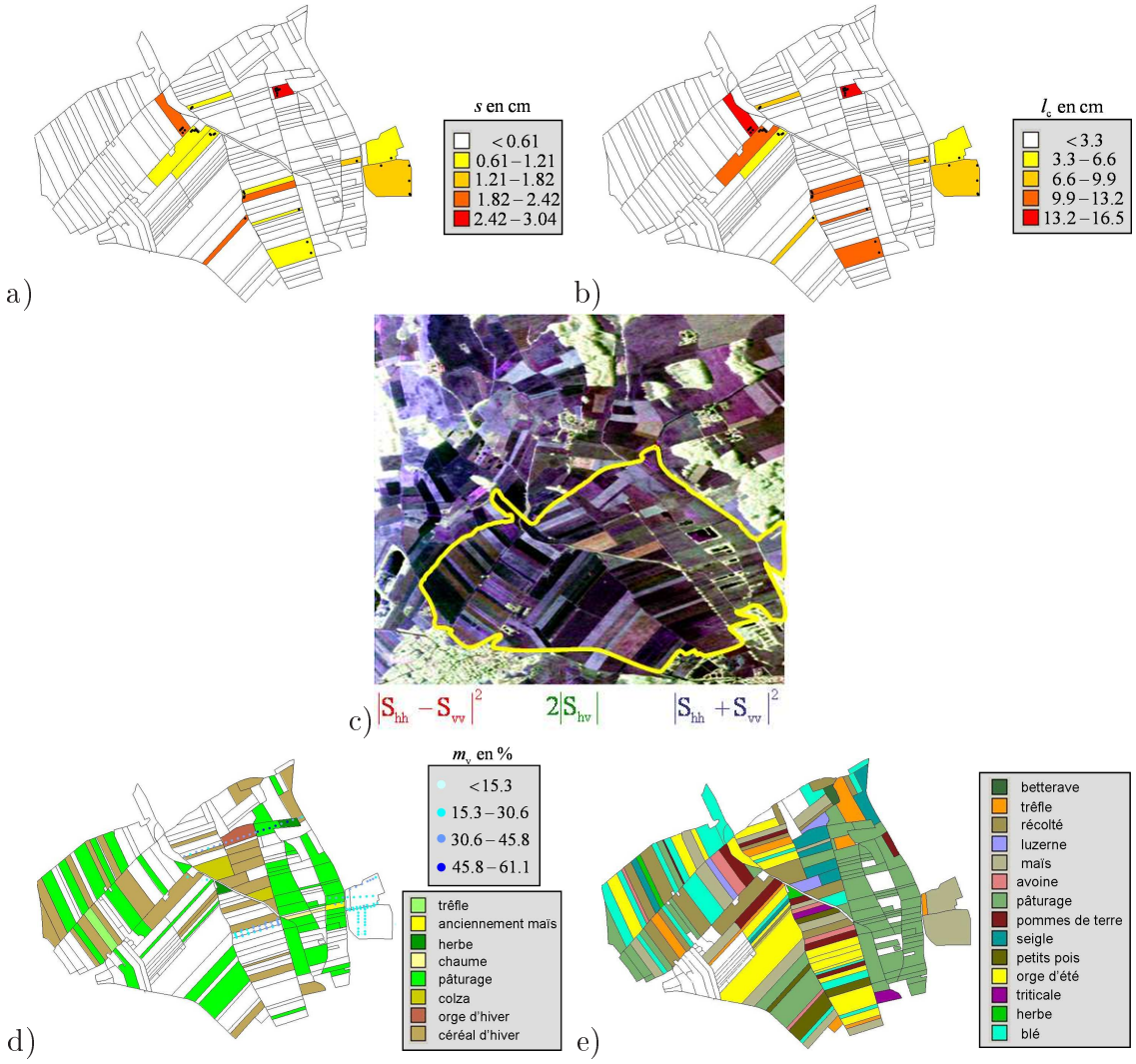


FIG. 1.15 – a-Carte de l'écart type des hauteurs s (en cm), b- Carte de la longueur de corrélation l_c (en cm), c- Image RGB du vecteur de Pauli, d- Carte de l'occupation des sols et les points de mesure de m_v du terrain d'Alling en mars, e- Carte de l'occupation des sols du terrain d'Alling en juillet

champ et sont données dans le tableau 1.5. La figure 1.16 représente la constante diélectrique moyenne des champs mesurés.

Champs	Angle d'incidence (°)	ε	m_v (%)	nb de point	s (cm)	l (cm)	nb de profil
260	43.4	11.66	21.9	2	⊘	⊘	⊘
263	44.4	11.05	20.8	7	1.6	10.6	17
265	44.8	17.85	31.7	3	⊘	⊘	⊘
256	45.1	11.03	20.7	15	0.94	9.65	17
513	46.5	15.3	28	26	0.762	8.3	6
255	46.8	8.44	15.6	1	0.97	6	12
668	48.7	19	33.2	6	⊘	⊘	⊘
797	49.9	⊘	⊘	⊘	1.8	8.3	6
681	50.5	32.08	45.9	4	⊘	⊘	⊘
682	50.7	15.42	28.2	3	2.3	13	17
651	51	11.1	20.9	12	1.95	10	6
653	51.2	17	30.5	1	⊘	⊘	⊘
652	51.6	15	27.5	23	0.99	10.25	4
670	51.6	22.8	37.7	3	⊘	⊘	⊘
671	52.1	16.4	29.6	2	⊘	⊘	⊘
648	53	18.1	32	1	0.8	11.2	2
644	53.6	27	41.9	1	1.1	11.2	6
730	54.6	28.3	43	1	⊘	⊘	⊘
698	55.1	26.3	41.27	6	⊘	⊘	⊘
705	55.1	24.9	39.9	3	1.38	9	2
772	56.1	14.47	26.7	38	1	5.5	12
752	56.3	9.2	17.24	11	1.79	8	12

TAB. 1.5 – Mesures terrain du site d'Alling en mars 2000

Les mesures d'humidité du champ 265 sont hétérogènes comme indiquées dans le tableau 1.6.

Sur la figure 1.17, le taux de matière organique mesuré est représenté en fonction de la constante diélectrique mesurée et il peut être observé que la corrélation entre ces deux valeurs est très forte. Ainsi, la zone sélectionnée sur la figure 1.17 a un fort taux de matière organique soit une forte humidité.

Les mesures terrain d'humidité d'Alling à disposition n'ont pas été faites sur les champs à structures périodiques et aux champs recouverts de végétation.

1.3.3 Données d'Agrisar

1.3.3.1 Description du site

La campagne de mesure AgriSAR a été réalisée sur le site de Görmin en Allemagne. Elle a été organisée par l'ESA en association avec différents laboratoires européens [AgriSAR(2006)].

Le site de Görmin fait partie du site d'étude de DEMMIN (Durable Environmental Multidisciplinary Monitoring Information Network). Ce site d'étude situé

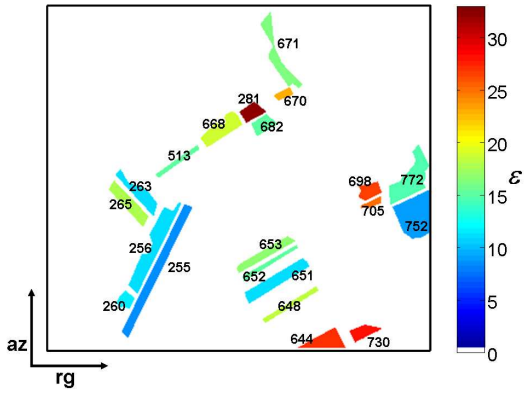


FIG. 1.16 – Carte des mesures terrain de la constante diélectrique

Mesures	Constante diélectrique	taux d'humidité
1	12.6	21.2%
2	21.2	35.98%
3	19.8	34.29%
Moyenne	17.8	31.67%

TAB. 1.6 – Mesures d'humidité du champ 265

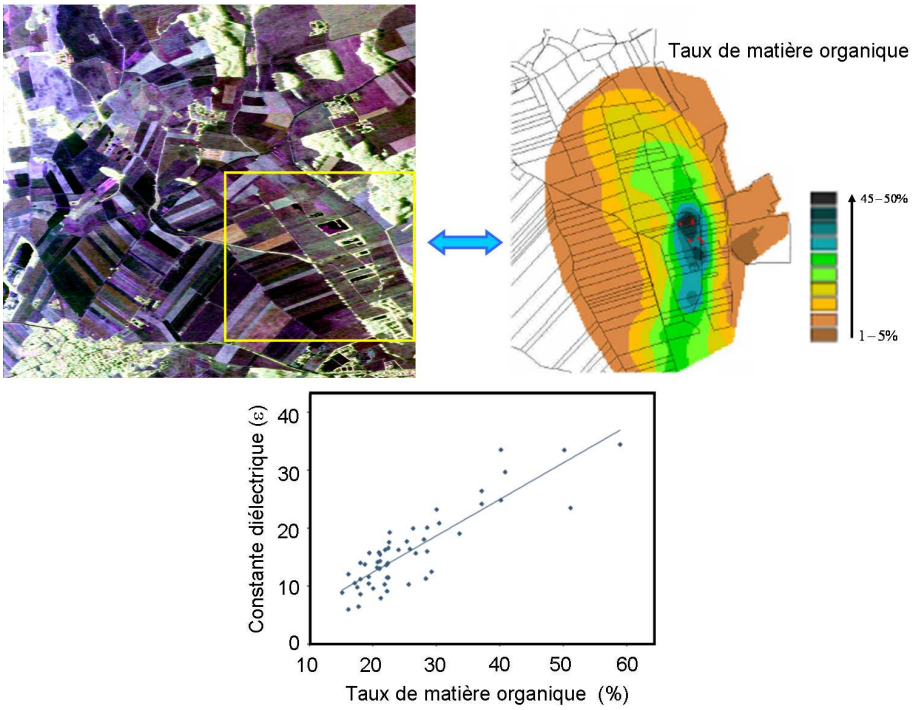


FIG. 1.17 – Taux de matière organique du site d'Alling

dans le nord-est de l'Allemagne à environ 60 km au nord de Neustrelitz et à 150 km au nord de Berlin (figure 1.12), se compose de quatre grandes zones agricoles dont Görmin une zone agricole quasi plate. Il est à noter qu'un dénivelé topographique traverse toutefois le champ de maïs 222 en sa moitié.

Le but de cette campagne est de mesurer l'évolution de la végétation entre la période des semis et celle des récoltes à l'aide de différentes acquisitions.

1.3.3.2 Données radar

La campagne de mesure de Görmin a été menée à différentes dates entre le 18 avril et le 2 août 2006. Trois campagnes intensives ont eu lieu en avril, en juin et en juillet. Pour ces dates, le radar a mesuré la même scène sous deux angles de visée différents (figure 1.18). Par ailleurs, une campagne d'acquisition a eu lieu tous les quinze jours avec une acquisition SAR et des mesures terrain succintes de quelques champs agricoles. Les données acquises en bande L pour toutes les polarisations sont utilisées dans cette étude dont la résolution dans le plan oblique est de 2 m et en azimut de 1m.

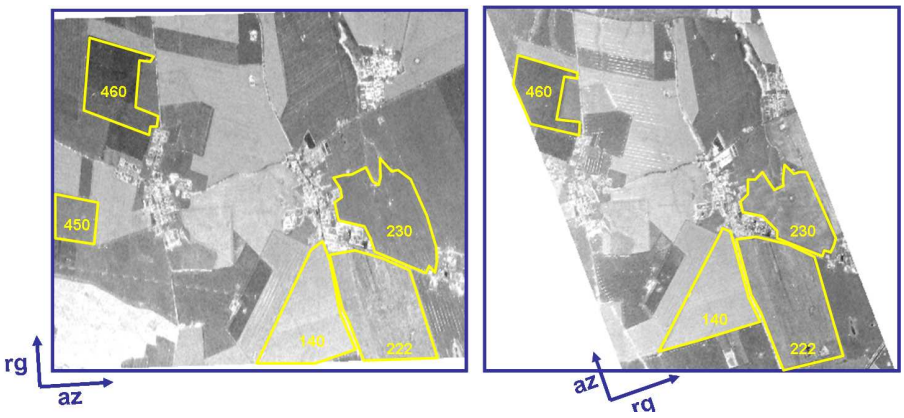


FIG. 1.18 – Span pour deux orientations différentes

Les données ont été traitées par le DLR et deux types d'image différents issus de ces traitements sont utilisés dans ces travaux

- *RGI* (radar geometric image) sont des images radar synthétisées dans le plan oblique
- *GTC* (Geocoded and Terrain Corrected) sont des images géoréférencées par un modèle d'élévation DEM (Digital Elevation Model), ces données ont la particularité de pouvoir être superposables et sont utiles dans le chapitre 5 pour le suivi de l'évolution des plantes.

1.3.3.3 Données terrain

Les champs de cette zone présentent une texture composée de sol sableux avec du silt voire fortement sableux. Quatre textures ont été identifiées et sont données dans le tableau 1.7.

Texture	% d'Argile	% de Silt	% de Sable
1	4	15	81
2	7	25	68
3	9	75	16
4	12	25	63

TAB. 1.7 – Textures identifiées sur le site de Görmin

Les différentes cultures présentes sur ce site sont principalement du blé, du maïs, de l'orge, des betteraves sucrières et du colza. Une carte de culture de la période d'avril à août 2006 est représentée sur la figure 1.19. Sur cette carte apparaît aussi les deux fauchées des images radar acquises pendant les campagnes intensives. Lors des autres campagnes, seule la fauchée Görmin 1 a été acquise.

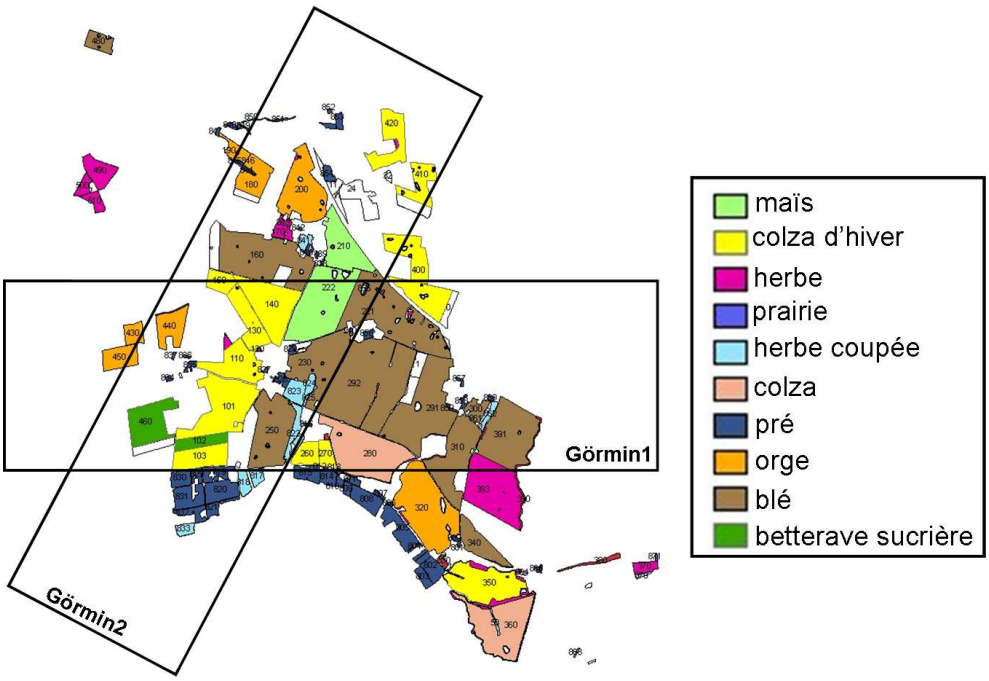


FIG. 1.19 – Cartes de l'occupation des sols du site de Görmin

De plus, cinq champs représentant les cinq cultures principales de la zone, ont été analysés intensivement pendant toute la période de la campagne de mesure. Les différentes caractéristiques du champ mesurées sont :

- le taux d'humidité m_v,
- l'indice de surface foliaire LAI (Leaf Area Index) : rapport entre la surface des feuilles et la surface au sol,
- la biomasse sèche : mesure gravimétrique d'un mètre carré de végétation coupée sur un champ agricole après séchage à 70 °,
- la masse sèche de végétation : rapport entre la biomasse sèche et humide.

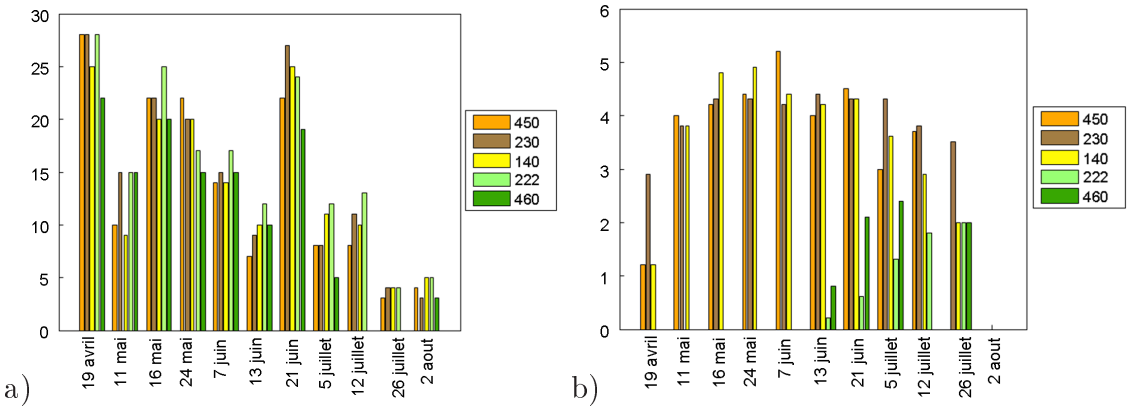


FIG. 1.20 – a- Taux d'humidité b-Indice LAI

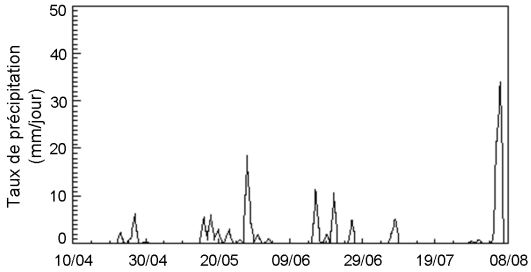


FIG. 1.21 – Précipitations relevées sur le champ 230 [Mattia(2007)]

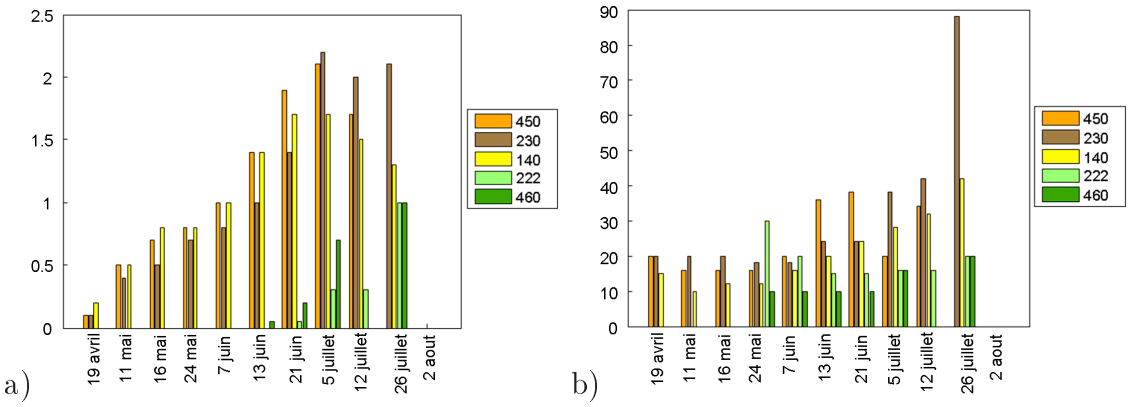


FIG. 1.22 – a- Biomasse sèche b- Masse sèche de végétation (en pourcentage)

Les mesures terrain de l'humidité des sols, du LAI, de la biomasse sèche et de la masse sèche de la végétation des cinq champs de référence (champs sélectionnés sur la figure 1.18 et identifiés dans le tableau 1.8) sont représentés par les histogrammes des figures 1.20 et 1.22 pour les onze dates d'acquisition.

Champs	Cultures
450	Orge
460	Betterave sucrière
230	blé
222	maïs
140	colza

TAB. 1.8 – Champs de référence

Le taux d'humidité varie tout au long de cette période d'acquisition. Pour quatre dates particulières (19 avril, 16 et 24 mai et 21 juin) des pics des précipitations ont été relevés sur le champ de blé 230 impliquant un sol très humide (figure 1.21). En été, les sols sont plus secs. L'indice de surface foliaire LAI, indique la présence de végétation. Ainsi, les champs de betterave sucrière (460) et de maïs (222) ne sont recouverts de végétation qu'à partir du 13 juin tandis que les trois autres types de cultures apparaissent dès le début de la campagne de mesure.

La biomasse et la masse sèche de la végétation informent sur la végétation. La biomasse augmente avec la croissance des différentes cultures alors que le masse sèche de la végétation est relativement constante avec une petite augmentation en été.

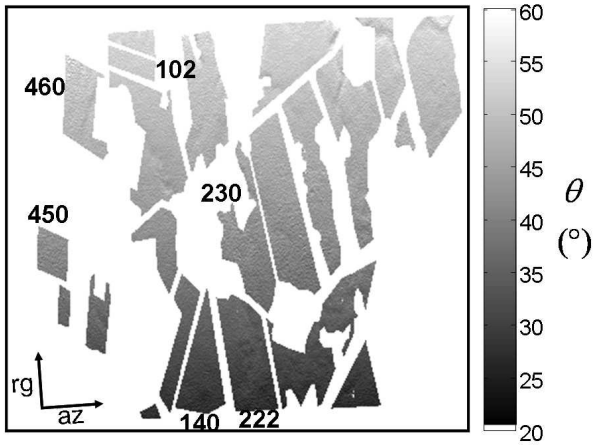


FIG. 1.23 – Angle d'incidence des champs de référence pour l'angle de visée de Görmin1

L'angle d'incidence varie de 25 à 55 ° pour les deux angles de visée. La figure 1.23 représente cet angle sur les champs de référence pour l'angle de visée de Görmin1 utilisé dans l'étude des sols recouverts de végétation (chapitre 5). Le champs 102 étudié dans le chapitre 3 est également représenté sur la figure 1.23.

1.4 Conclusion

Les principes de la mesure et les caractéristiques SAR ont été introduits dans ce chapitre. Ces notions sont très importantes particulièrement pour l'étude faite dans le chapitre 4 consacrée aux études des sols périodiques. Par ailleurs, la description du sol est nécessaire pour développer une méthode d'estimation de l'humidité des sols agricoles. Toutes les méthodes d'inversion et de classification sont testées et validées par la suite sur les données SAR des deux campagnes de mesure présentées dans ce chapitre. Des informations complémentaires sur les données terrain seront apportées dans les chapitres suivants pour faciliter à la compréhension.

Bibliographie

[AgriSAR(2006)] "AGRISAR 2006, Agricultural Bio-/Geophysical retrievals from frequent repeat SAR and optical imaging", http ://earth.esa.int/campaigns/DOC/AGRISAR_Final_Report.pdf

[Allain(2000)] S. Allain, "Spécifications et développement du module d'imagerie SAR hybride : MIXSAR", rapport de DEA, Université de Rennes 1, France, 2001.

[Baghdadi(2000)] N. Baghdadi, P. Paillou, M. Davidson, G. Grandjean, P. Dubois, "Relationship between profile length and roughness parameters for natural surfaces", International Journal of Remote Sensing, vol. 21, no. 17, pp. 3375-3381, 2000.

[Bamler(1998)] R. Bamler, P.Hart, "Synthetic aperture radar interferometry", Inverse Problem, vol. 14, no. 4, pages 1-54, August 1998.

[Beckmann(1963)] P. Beckmann, A. Spizzichino, "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces", MacMillan, New York, International Series of Monographs on Electromagnetic Waves, vol.4, Oxford :Pergamon, 1963.

[Casarano(1997)] D. Casanaro, F. Posa, F. Mattia, G. De Carolis, J.C. Souyris, T. Le Toan, G. Pasquariello, "Monte Carlo simulation of backscattering from natural soil surfaces", Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Singapore , 1997.

[Chevalier(1989)] F. Le Chevalier, "Principes de traitement des signaux radar et sonar", Elsier-Masson, Masson et CNET-ENST, 1989

[Davidson(2000)] M. W. J. Davidson, T. Le Toan, F. Mattia, G. Satalino, T. Manninen, M. Borgeaud, "On the characterization of agricultural soil roughness for radar remote sensing", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, no. 2, pp. 630-640, 2000.

[Davidson(2003)] M. W. J. Davidson, F. Mattia, G. Satalino, N. Verhoest, T. Le Toan, M. Borgeaud, J. Lois, E. Attema "Joint statistical properties of rms height and correlation length derived from multisite 1-m roughness measurement", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 7, pp. 1651 - 1658, 2003.

[Davis(1976)] J. L. Davis, G. C. Topp, A. D. Annan, "Electromagnetic detection of soil water content", Progress Rep. II, in Workshop Proc. Remote Sensing of soil moisture and groundwater, Toronto, Canada, 1976.

[D'Hondt(2006)] O. D'Hondt, "Analyse spatiale de texture non stationnaire dans les images SAR", Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes 1, France, Février 2006.

[Dobson(1985)] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, M.A. El-Rayes, "Microwave dielectric behavior of wet soil - Part II : Empirical models and experimental observations", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 23, no. 1, pp. 35-46, 1985.

[Ferro-Famil(2000)] L. Ferro-Famil, "Télédétection multi-fréquentielle et multi-temporelle d'environnements naturels à partir de données SAR polarimétriques", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France, Décembre 2000.

[Hajnsek(2001)] I. Hajnsek, "Inversion of surface parameters using polarimetric SAR", PH. D. Dissertation, Universitat Jena, DLR Science Report, ISSN 1434-8454,2001.

[Hajnsek(2001)] I. Hajnsek, K. P. Papathanassiou, S.R. Cloude, "L- and P-Band for surface parameter estimation", Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Sydney, Australia , 2001.

[Herold(2000)] M. Herold, H. Zwenzener, I. Hajnsek, M. Davidson, C. C. Schmullius, "Acquisition and evaluation of field measurements from the Alling-SAR 2000 campaigns",Proceedings of the Retrieval of bio- and geo-physical parameters from SAR Data for Land Applications, University of Sheffield, UK, 2000.

[Herold(2001)] M. Herold, J. Shi, C. C. Schmullius, "Multi-parameter airborn SAR remote sensing of soil moisture in agricultural area", Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Sydney, Australia , 2001.

[Hallikainen(1985)] M. T. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. C. Dobson, M. A. El-Rayes, L. K. Wu, "Microwave dielectric behavior of wet soil - Part I : Empirical models and experimental observations", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 23, no. 1, pp. 25-34, 1985.

[Leducq(2006)] P. Leducq, "Traitements temps-fréquence pour l'analyse de scènes complexes dans les images SAR polarimétriques", Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes, France, Juin 2006.

[Lee(1999)] J. S. Lee, M. R. Grunes, G. De Grandi, "Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, no. 5, pp. 2363-2373, 1999.

[Lopez-Martinez(2006)] C. Lopez-Martinez, I. Hajnsek, J. S. Lee, E. Pottier, X. Fabregas, "Polarimetric speckle noise effects in quantitative physical parameters retrieval", IEE proceedings. Radar, sonar and navigation, vol. 153, no. 3, 2006.

[Mattia(1997)] F. Mattia, T. Le Toan, J. C. Souyris, C. De Carolis, N. Floury, F. Posa, N. G. Pasquariello, " The effect on surface roughness multifrequency polarimetric SAR data", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, no. 4, pp. 954-966, 1997.

[Mattia(2001)] F. Mattia, T. Le Toan, M. Davidson, "An analytical, numerical and experimental study of backscattering from multi-scale soil surfaces", Radio Sci. vol. 36, no. 1, p. 119, 2001.

[Mattia(2003)] F. Mattia, M. Davidson, T. Le Toan, C. D'Haesse, N. Verhoest, A. M. Gratti, M. Borgeaud, "A comparison between soil roughness statistics used in surface scattering models derived from mechanical and laser profilers", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 7, pp. 1659-1671, 2003.

[Mattia(2007)] F. Mattia, G. Satalino, A. Balenzano, V. Pauwels, N. Verhoest, H. Skriver, M. Davidson, "Exploiting L-band SAR for the improvement of surface process modelling", Proceedings of 5th Retrieval of Bio and Geophysical parameters from SAR dat for Land applications, Bari, Italy, 2007.

[Njoku(1977)] E. G. Njoku, J. A. Kong, "Theory for passive microwave remote sensing of near-surface soil moisture", J. Geophys. Res., vol. 82, no. 20, pp. 3109-3118, 1977.

[Ogilvy(1992)] J. A. Olgilvy, "Theory of wave scattering from random rough surfaces", Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1992.

[Oh(1998)] Y. Oh, Y. Kay, "Condition for precise measurement of soil surface roughness", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, no. 2, pp. 691-695, 1998.

[Rosen(2000)] P. Rosen, S. Hensley, I. Joughin, F. Li, S. Madsen, E. Rodriguez, R. Goldstein, "Synthetic aperture radar inerferometry", Proceedings of the IEEE, vol. 88, no. 3, March 2000.

[Rouvier(1996)] S. Rouvier, P. Borderies, I. Chenerie, J. C. Souyris, T. Le Toan, N. Floury, "Fractal analysis of bidimensional profiles and application to electromagnetic scattering from soils", Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Lincoln, USA , 1996.

[Rouvier(1997)] S. Rouvier, E. Bachelier, P. Borderies, I. Chenerie, J. C. Souyris, T. Le Toan, M. Borgeaud, "Electromagnetic scattering and fractal analysis of bare soil surface", Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Singapore , 1997.

[Schanda(1986)] E. Schanda, "Physical fundamentals of remote sensing", Berlin, 1986.

[Schmugge(1980)] T. Schmugge, "Effect on soil texture on the microwave emission from soils", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 18, pp. 353-361, 1980.

[Tomiyasu(1978)] K. Tomiyasu, "Tutorial review of synthetic-aperture radar (sar) with applications to imaging of the ocean surface", Proceeding IEEE, vol. 66, no. 5, pp. 563-583, 1978.

[Topp(1980)] G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan, "Electromagnetic determination of soil water content : Measurements in coaxial transmission lines", Water Resour. Res., vol. 16, no. 3, pp. 574-582, 1980.

[Ulaby(1986)] F. T. Ulaby, R. Moore, A. Fung, "Microwave remote sensing : Active and passive I - III", Addison-Wesley Publication, pp. 2162, 1981-1986.

[Wang(1980)] J. R. Wang, "The dielectric properties of soil-water mixtures at microwave frequencies", Radio Sci., vol. 15, pp. 977-985, 1980.

[Wiebe(1971)] M. L. Wiebe, "Laboratory measurements of the complex dielectric constant of soils", Texas A&M Univ. College Station, TX, Tech. Rep. RSC-23, Oct. 1971.

[Zribi(1998)] M. Zribi, "Développement de nouvelles méthodes de modélisation de la rugosité pour la rétrodiffusion hyperfréquence de la surface du sol", Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier - Toulouse III, France, 1998.

[Zribi(2000)] M. Zribi, V. Ciarletti, O. Taconet, P. Boissard, M. Chapron, J. Paillé, B. Rabin, "Backscattering on soil structure described by plane facets", International Journal of Remote Sensing, vol. 21, pp. 137-153, 2000.

Chapitre 2

Étude polarimétrique et électromagnétique des sols agricoles

Les différentes polarisations des ondes rétrodiffusées permettent de caractériser plus précisément le comportement électromagnétique d'un objet illuminé. Ce comportement est lié à certaines caractéristiques physiques de l'objet, telles que sa forme, sa constante diélectrique et sa conductivité électrique. La première partie de ce chapitre introduit ainsi la théorie de la polarimétrie radar. Les paramètres polarimétriques présentés permettent de mieux caractériser la cible et sont utilisés par la suite lors de l'estimation de l'humidité des sols. La seconde partie présente trois modèles de diffusion électromagnétique associés à trois types de champs différents : nus, à structure périodique et recouverts de petites végétations. Ainsi, ces modèles permettent d'identifier les différents comportements des réponses électromagnétiques associés aux trois types de champs agricoles en vue d'estimer l'humidité des sols.

2.1 Polarimétrie Radar

La polarimétrie radar est l'analyse de l'état de polarisation d'une onde électromagnétique. Le principe de la polarimétrie est d'étudier les modifications de la polarisation d'une onde électromagnétique lors de son interaction avec une cible ou un milieu naturel. Ces modifications sont fortement liées aux caractéristiques géométriques et à la structure physique intrinsèque de la cible observée. L'information polarimétrique, couplée à la connaissance des comportements électromagnétiques, offre donc une dimension supplémentaire à la caractérisation des objets à l'aide de données SAR.

2.1.1 Description de la polarisation d'une onde électromagnétique

2.1.1.1 Représentation cohérente du vecteur de Jones

L'onde radar est une onde électromagnétique, dont la propagation est régie par les équations de Maxwell. Les ondes radar se propagent dans des milieux pouvant être assimilés au vide et ne contenant ni charge libre, ni courant. Les équations de

Maxwell dans le cas d'ondes planes conduisent aux expressions complexes suivantes :

$$\overrightarrow{E}(z,t) = \Re\{\underline{\overrightarrow{E}}\mathrm{e}^{j(\omega t - kz)}\} \tag{2.1}$$
$$\overrightarrow{H}(z,t) = \Re\{\underline{\overrightarrow{H}}\mathrm{e}^{j(\omega t - kz)}\} \tag{2.2}$$

où $\Re$ représente la partie réelle, k le nombre d'onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ et ω la pulsation en rad.s^{-1}.

Les champs électrique et magnétique et le vecteur de propagation $\overrightarrow{k}$ forment un trièdre orthogonal. La relation qui les lie est la suivante

$$\overrightarrow{H} = \frac{\overrightarrow{k} \wedge \overrightarrow{E}}{\omega} \tag{2.3}$$

où $\wedge$ représente le produit vectoriel. Ainsi, l'étude de seulement une des deux composantes du champ électromagnétique est suffisante. Par convention, on choisit d'étudier le champ électrique.

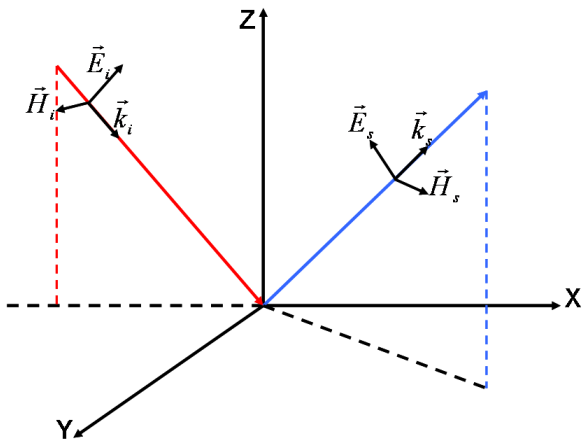


FIG. 2.1 – Diffusion des champs électromagnétiques

Dans un système de coordonnées cartésiennes, le champ électrique d'une onde plane se propageant dans un milieu linéaire, isotrope et homogène, selon la direction $\widehat{z}$ se définit par :

$$\overrightarrow{E}(z,t) = \left\{ \begin{array}{ll} E_x = & E_{0x}\cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ E_y = & E_{0y}\cos(\omega t - kz + \delta_y) \\ E_z = & 0 \end{array} \right\} \tag{2.4}$$

où δ_x et δ_y représentent les phases absolues des deux composantes.

La polarisation de l'onde est parfaitement déterminée par le vecteur de Jones $\underline{\overrightarrow{E}}$, qui est défini à partir de l'enveloppe complexe du champ comme :

$$\overrightarrow{E}(z,t) = \Re\left(\underline{\overrightarrow{E}}\mathrm{e}^{j(\omega t - kz)}\right) \Rightarrow \underline{\overrightarrow{E}} = \left[\begin{array}{ll} \underline{E}_x = & E_{0x}\mathrm{e}^{j\delta_x} \\ \underline{E}_y = & E_{0y}\mathrm{e}^{j\delta_y} \end{array} \right]. \tag{2.5}$$

Le vecteur de Jones est une représentation complexe du champ électrique qui ne dépend pas des coordonnées spatio-temporelles. Ainsi, pour une abscisse z donnée, ce vecteur décrit une ellipsoïde qui dépend des paramètres E_{0x} et E_{0y} et de la différence $\delta_y - \delta_x$ (figure 2.2). Cette ellipse peut devenir un cercle si $E_{0x} = E_{0y}$ et si $\delta_y - \delta_x = \pm\frac{\pi}{2}$, ou un segment si $\delta_y = \delta_x$ modulo π.

Le vecteur de Jones est une représentation dite cohérente de la cible puisque résultant directement du champs électrique.

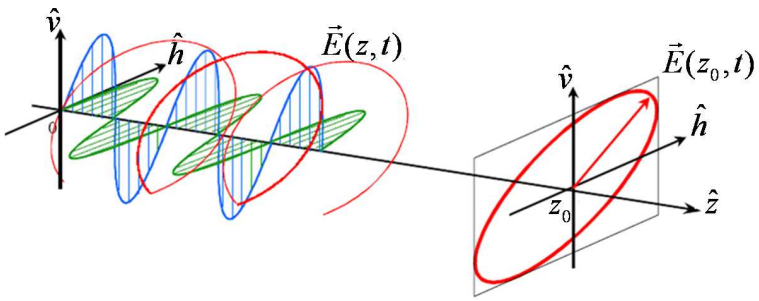


FIG. 2.2 – Propagation d'une onde électromagnétique polarisée

2.1.1.2 Représentation incohérente du vecteur de Stokes

Lors de l'observation d'environnements naturels, l'onde rétrodiffusée résulte de la somme cohérente des réponses des diffuseurs. Afin de réduire le speckle (chapitre 1), il est nécessaire de moyenner l'information reçue. On utilise alors les représentations incohérentes faisant intervenir les statistiques d'ordre deux du vecteur de Jones comme sa matrice de covariance $\mathbf{J}$:

$$\mathbf{J} = \langle \underline{\vec{E}}\,\underline{\vec{E}}^{\dagger} \rangle = \begin{bmatrix} \langle \underline{E}_x \underline{E}_x^* \rangle & \langle \underline{E}_x \underline{E}_y^* \rangle \\ \langle \underline{E}_y \underline{E}_x^* \rangle & \langle \underline{E}_y \underline{E}_y^* \rangle \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

avec $\dagger$ pour conjugué transpose. Cette matrice (2×2) complexe hermitienne peut être paramétrée à l'aide de quatre coefficients réels formant le vecteur de Stokes $\mathbf{g}$ qui est une représentation polarimétrique incohérente :

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_0 = \langle |\underline{E}_x|^2 \rangle + \langle |\underline{E}_y|^2 \rangle \\ g_1 = \langle |\underline{E}_x|^2 \rangle - \langle |\underline{E}_y|^2 \rangle \\ g_2 = 2\Re\langle \underline{E}_x \underline{E}_y^* \rangle \\ g_3 = -2\Im\langle \underline{E}_x \underline{E}_y^* \rangle \end{bmatrix} \qquad \mathbf{J} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} g_0 + g_1 & g_2 - jg_3 \\ g_2 + jg_3 & g_0 - jg_1 \end{bmatrix}. \tag{2.7}$$

Par construction, les composantes du vecteur de Stokes vérifient l'inégalité suivante :

$$0 \leq d_p \leq 1 \Rightarrow g_0^2 \geq g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 \qquad d_p = \frac{|\lambda_1 - \lambda_2|}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{\sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2}}{g_0} \tag{2.8}$$

où d_p est le degré de polarisation de l'onde et λ_i est une valeur propre de $\mathbf{J}$ positive ou nulle. Lorsque $d_p < 1$, l'onde est dite partiellement polarisée.

Les vecteurs de Jones et de Stokes ont été définis dans la base géométrique $(\widehat{x}, \widehat{y})$. L'espace formé par ces vecteurs étant un espace vectoriel complexe, il peut être muni d'une norme et d'un produit scalaire. D'autres bases, formées de ces vecteurs orthogonaux sont envisageables comme la base circulaire, composée de ces vecteurs de Jones et de Stokes correspondant aux polarisations circulaires gauche et droite. Par la suite, la base des polarisations linéaires sera utilisée. Ainsi, la base polarimétrique sera définie par $(\widehat{h}, \widehat{v})$ correspondant à la polarisation horizontale et verticale.

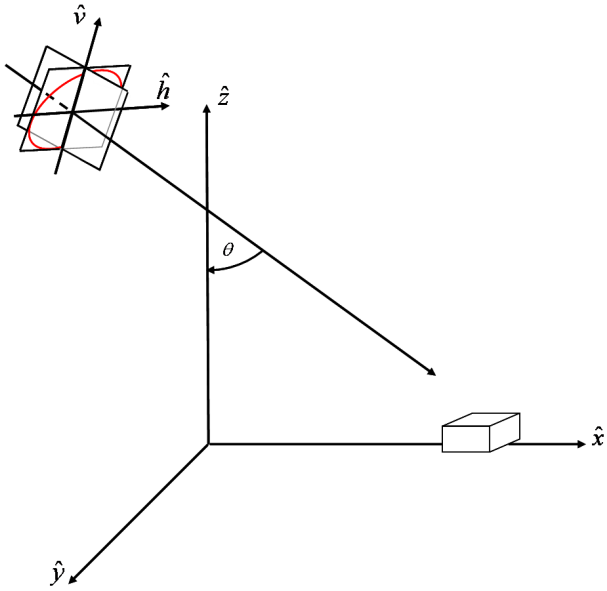


FIG. 2.3 – Bases géométrique $(\widehat{x}, \widehat{y})$ et des polarisations $(\widehat{h}, \widehat{v})$

2.1.2 Description de la réponse polarimétrique d'un diffuseur

L'interaction de l'onde électromagnétique avec un milieu ou une cible entraîne une modification de son état de polarisation.

2.1.2.1 Représentation cohérente

La matrice de diffusion cohérente, **S**, relie les vecteurs de Jones incident et réfléchi par un diffuseur :

$$\underline{\overrightarrow{E}}^s = \mathbf{S}\underline{\overrightarrow{E}}^i \qquad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}. \tag{2.9}$$

Les éléments de la matrice **S** sont différenciés par leurs indices. L'indice de droite représente la polarisation incidente et celui de gauche la polarisation diffusée. Les éléments diagonaux de la matrice **S** sont appelés éléments co-polarisés car ils représentent le coefficient multiplicatif complexe reliant les projections des vecteurs de Jones incident et réfléchi sur le même axe de la base de polarisation. Les autres coefficients de **S** sont appelés éléments en polarisation croisée. Pour une configuration de mesure

donnée, la matrice de diffusion **S** définit totalement la modification de la polarisation d'une onde incidente monochromatique, lors de l'interaction avec une cible radar. La matrice **S** est l'information reçue après synthèse SAR (chapitre 1).

La puissance associée à une cible radar, ou *Span*, est définie comme :

$$Span = |S_{hh}|^2 + |S_{hv}|^2 + |S_{vh}|^2 + |S_{vv}|^2. \tag{2.10}$$

La matrice de diffusion **S** symétrique peut être représentée sous la forme d'un vecteur cible complexe à quatre éléments

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 & k_4 \end{bmatrix}^T \qquad \mathbf{k_i} = \frac{1}{\sqrt{2}}\mathrm{tr}(\mathbf{S}\mathbf{\Phi_i}) \tag{2.11}$$

où $\mathbf{\Phi_i}$ représente un ensemble de matrices qui définissent une base de projection. Les deux bases les plus utilisées sont la base $\{\mathbf{\Phi_L}\}$ Lexicographique et la base $\{\mathbf{\Phi_P}\}$ de Pauli.

$$\{\mathbf{\Phi_L}\} = \left\{ 2\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 2\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 2\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, 2\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\} \tag{2.12}$$

$$\{\mathbf{\Phi_P}\} = \left\{ \sqrt{2}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \sqrt{2}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \sqrt{2}\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \sqrt{2}\begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix} \right\}. \tag{2.13}$$

Les vecteurs cible correspondants sont :

$$\mathbf{k_L} = \begin{bmatrix} S_{hh} \\ S_{hv} \\ S_{vh} \\ S_{vv} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{k_P} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{hh} + S_{vv} \\ S_{hh} - S_{vv} \\ S_{hv} + S_{vh} \\ j(S_{hv} - S_{vh}) \end{bmatrix}. \tag{2.14}$$

En configuration monostatique, c'est-à-dire lorsque l'émetteur et le récepteur sont localisés au même endroit, le théorème de réciprocité impose $S_{hv} = S_{vh}$ et par conséquent une symétrie de la matrice **S**. Les vecteurs cible ne contiennent donc plus que trois éléments :

$$\mathbf{k_L} = \begin{bmatrix} S_{hh} \\ \sqrt{2}S_{hv} \\ S_{vv} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{k_P} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{hh} + S_{vv} \\ S_{hh} - S_{vv} \\ 2S_{hv} \end{bmatrix}. \tag{2.15}$$

Ces vecteurs sont des représentations cohérentes de la matrice de diffusion. Leurs normes sont égales au *Span* de la cible. Les deux représentations sont équivalentes, ainsi une matrice de passage spéciale unitaire permet de faire la correspondance entre les deux vecteurs cibles comme suit :

$$\mathbf{k_L} = \mathbf{A}\mathbf{k_P} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{k_P}. \tag{2.16}$$

2.1.2.2 Représentations incohérentes

Les éléments de la matrice de diffusion cohérente sont mesurés par le système radar à un terme de phase près. Ce terme de phase est dû au trajet aller-retour de l'onde entre l'antenne et la cible et n'est pas compensable. La représentation incohérente est utilisée en faisant intervenir des notions de statistique polarimétrique d'ordre deux, c'est-à-dire la variance des signaux dans les différents canaux de polarisation et leur corrélation mutuelle.

A partir des vecteurs cible, les matrices de covariance $\mathbf{C}$ et de cohérence $\mathbf{T}$ sont définies en monostatique comme suit :

$$\begin{aligned}
\mathbf{C} &= \langle \mathbf{k_L} \mathbf{k_L}^{\dagger} \rangle \\
&= \begin{bmatrix} \langle S_{hh} S_{hh}^* \rangle & \sqrt{2}\langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle \\ \sqrt{2}\langle S_{hv} S_{hh}^* \rangle & 2\langle S_{hv} S_{hv}^* \rangle & \sqrt{2}\langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle & \sqrt{2}\langle S_{vv} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{vv} S_{vv}^* \rangle \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \sigma_{hhhh} & \sigma_{hhhv} & \sigma_{hhvv} \\ \sigma_{hhhv}^* & 2\sigma_{hvhv} & \sigma_{hvvv} \\ \sigma_{hhvv}^* & \sigma_{hvvv}^* & \sigma_{vvvv} \end{bmatrix} \qquad (2.17) \\
&\equiv \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12}^* & C_{22} & C_{23} \\ C_{13}^* & C_{23}^* & C_{33} \end{bmatrix} \qquad (2.18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{T} &= \langle \mathbf{k_P} \mathbf{k_P}^{\dagger} \rangle \\
&= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle (S_{hh}+S_{vv})(S_{hh}+S_{vv})^* \rangle & \langle (S_{hh}+S_{vv})(S_{hh}-S_{vv})^* \rangle & 2\langle (S_{hh}+S_{vv}) S_{hv}^* \rangle \\ \langle (S_{hh}-S_{vv})(S_{hh}+S_{vv})^* \rangle & \langle (S_{hh}-S_{vv})(S_{hh}-S_{vv})^* \rangle & 2\langle (S_{hh}-S_{vv}) S_{hv}^* \rangle \\ 2\langle S_{hv}(S_{hh}+S_{vv})^* \rangle & 2\langle S_{hv}(S_{hh}-S_{vv})^* \rangle & 4\langle S_{hv} S_{hv}^* \rangle \end{bmatrix} \\
&\equiv \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{12}^* & T_{22} & T_{23} \\ T_{13}^* & T_{23}^* & T_{33} \end{bmatrix}. \qquad (2.19)
\end{aligned}$$

La même matrice de passage $\mathbf{A}$ que celle utilisée pour les vecteurs cible permet de faire correspondre ces deux matrices hermitiennes équivalentes comme le montre l'équation suivante :

$$\mathbf{C} = \mathbf{A}\mathbf{T}\mathbf{A}^{\dagger}. \qquad (2.20)$$

Cette relation spéciale unitaire ($\det\mathbf{A} = 1$) implique que la matrice de covariance et la matrice de cohérence possèdent des valeurs propres identiques. Celles-ci sont de plus réelles et non négatives car $\mathbf{C}$ et $\mathbf{T}$ sont hermitiennes semi-définies positives.

2.1.3 Les propriétés de symétrie des cibles distribuées

La diffusion d'une onde électromagnétique par un milieu composé de diffuseurs est complètement décrite par les matrices $\mathbf{T}$ et $\mathbf{C}$. Dans la plupart des cas, la matrice est construite par trois éléments réels dans la diagonale et trois éléments complexes à l'extérieur de la diagonale. Ainsi, la matrice est définie par neuf éléments réels. Les

hypothèses de symétrie de la distribution des diffuseurs élémentaires permettent de simplifier les matrices incohérentes dans certains cas et d'étudier le comportement de rétrodiffusion des cibles [Nghiem(1988)] [Cloude(1998)]. Si la matrice de diffusion d'une cible dans une position ou une direction particulière est connue, la matrice de diffusion avec une rotation ou avec un effet miroir sera aussi connue. Van De Hulst a été le premier à exprimer les propriétés de symétrie des diffuseurs et à les intégrer dans l'expression de la matrice de Müller [Van De Hulst(1985)]. Trois différentes symétries (réflexion, rotation et azimutale) rencontrées sur les milieux naturels sont présentées dans les paragraphes suivants.

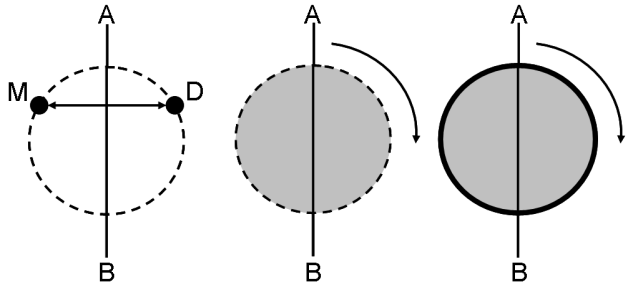


FIG. 2.4 – Symétries d'une cible distribuée : réflexion (à gauche), rotation (au centre) et azimutale (à droite)

2.1.3.1 Symétrie de réflexion

La symétrie de réflexion d'un milieu est caractérisée par un plan de symétrie qui est traversé par l'axe de visée du radar indiqué par la ligne AB de la figure 2.4. Cela implique que pour tous les diffuseurs D localisés sur l'un des cotés de ce plan sont caractérisés par la matrice de diffusion et le vecteur cible suivants :

$$\mathbf{S_D} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{k_D} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{hh} + S_{vv} \\ S_{hh} - S_{vv} \\ 2S_{hv} \end{bmatrix}. \tag{2.21}$$

Le diffuseur miroir M est symétrique à D par rapport à l'axe de visée du radar. Sa matrice de diffusion et son vecteur cible sont définis [Van De Hulst(1985)] comme suit :

$$\mathbf{S_M} = \begin{bmatrix} S_{hh} & -S_{hv} \\ -S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{k_M} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{hh} + S_{vv} \\ S_{hh} - S_{vv} \\ -2S_{hv} \end{bmatrix}. \tag{2.22}$$

La différence entre les deux matrices est le signe négatif des éléments extérieurs à la diagonale. Ainsi, la matrice de cohérence de ces cibles s'écrit comme une superposition des matrices de cohérence des deux composantes symétriques

$$\mathbf{T} = \mathbf{T_D} + \mathbf{T_M} = \langle \mathbf{k_D}\mathbf{k_D}^{\dagger} \rangle + \langle \mathbf{k_M}\mathbf{k_M}^{\dagger} \rangle \tag{2.23}$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & -T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & -T_{23} \\ -T_{31} & -T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & 0 \\ T_{21} & T_{22} & 0 \\ 0 & 0 & T_{33} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

où $\mathbf{T_D}$ et $\mathbf{T_M}$ sont les matrices de cohérence correspondant aux diffuseurs localisés d'un coté de l'angle de visée et aux diffuseurs symétriques.

Comme le montre l'équation (2.24), la matrice de cohérence est décrite par cinq éléments réels non nuls. En effet, la corrélation entre les éléments co-polarisés et en polarisation croisée s'annule

$$\langle (S_{hh} + S_{vv}) S_{hv}^{\dagger} \rangle = \langle (S_{hh} - S_{vv}) S_{hv}^{\dagger} \rangle = 0. \quad (2.25)$$

Les surfaces rugueuses et les scènes naturelles isotropes sans topographie ont typiquement ce comportement polarimétrique.

La matrice de covariance s'écrit alors :

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & -C_{12} & C_{13} \\ -C_{21} & C_{22} & -C_{23} \\ C_{31} & -C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & C_{13} \\ 0 & C_{22} & 0 \\ C_{31} & 0 & C_{33} \end{bmatrix}. \quad (2.26)$$

2.1.3.2 Symétrie de rotation

La symétrie de rotation existe quand la distribution des contributeurs de la cible ne varie pas quand elle pivote autour de l'axe de visée de l'antenne. La matrice de cohérence après rotation est déterminée comme suit :

$$\mathbf{T}(\phi) = \mathbf{U_3}(2\phi)\mathbf{T}\mathbf{U_3}(2\phi)^{\top} \quad (2.27)$$

où $\mathbf{U_3}(2\phi)$ est une matrice (3×3) spéciale unitaire

$$\mathbf{U_3}(2\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\phi) & \sin(2\phi) \\ 0 & -\sin(2\phi) & \cos(2\phi) \end{bmatrix}. \quad (2.28)$$

La matrice de cohérence invariante par rotation est composée de cinq éléments non nuls mais est complètement décrite par trois éléments réels et un élément complexe et s'écrit dans le cas monostatique $T_{23} = T_{32}^{*}$:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{11} & 0 & 0 \\ 0 & T_{22} & T_{23} \\ 0 & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

2.1.3.3 Symétrie azimutale

Un milieu présentant à la fois la propriété de symétrie de réflexion et de rotation, vérifie la propriété de symétrie azimutale.

Dans ce cas, la matrice de cohérence doit satisfaire les conditions de la symétrie de réflexion et de la symétrie de rotation en même temps, comme décrit dans l'équation suivante :

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & 0 \\ T_{21} & T_{22} & 0 \\ 0 & 0 & T_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{11} & 0 & 0 \\ 0 & T_{22} & T_{23} \\ 0 & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & 0 & 0 \\ 0 & T_{22} & 0 \\ 0 & 0 & T_{33} \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

La matrice de cohérence résultante est diagonale, définie seulement par trois paramètres réels. Les volumes aléatoires sont typiquement des milieux à symétrie azimutale.

2.1.4 Décompositions polarimétriques

La polarimétrie fournit une information physique supplémentaire sur la scène. Pour relier plus facilement l'information polarimétrique et géophysique, différents paramètres polarimétriques issus de la matrice de cohérence sont décrits dans cette section et utilisés par la suite.

2.1.4.1 Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation permet de définir la corrélation polarimétrique entre deux canaux c'est-à-dire entre deux éléments de la matrice de diffusion **S** et s'écrit de la manière suivante

$$\rho_{ABCD} = \frac{\langle S_{AB} S_{CD}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{AB}|^2 \rangle \langle |S_{CD}|^2 \rangle}}. \tag{2.31}$$

Le coefficient de corrélation polarimétrique en polarisation circulaire, ρ_{LLRR}, est très souvent utilisé pour l'estimation de la rugosité [Mattia(1997)]. Il est également défini par les éléments de sa matrice **S** dans la base $(\hat{h}, \hat{v})$ [Papathanassiou(1999)]

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{LL} & S_{LR} \\ S_{RL} & S_{RR} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} S_{hh} - S_{vv} + 2jS_{hv} & j(S_{hh} + S_{vv}) \\ j(S_{hh} + S_{vv}) & S_{vv} - S_{hh} + 2jS_{hv} \end{bmatrix}. \tag{2.32}$$

Le coefficient de corrélation ρ_{LLRR} peut s'écrire en fonction des éléments de la base horizontale-verticale, sous l'hypothèse d'une symétrie de réflexion,

$$\rho_{LLRR} = -\frac{\langle |S_{hh}|^2 \rangle + \langle |S_{vv}|^2 \rangle - 2\Re\langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle - 4\langle |S_{hv}|^2 \rangle}{\langle |S_{hh}|^2 \rangle + \langle |S_{vv}|^2 \rangle - 2\Re\langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle + 4\langle |S_{hv}|^2 \rangle}. \tag{2.33}$$

2.1.4.2 Décomposition cohérente

L'analyse de la matrice de diffusion ou des vecteurs cible associés est particulièrement efficace pour la caractérisation des cibles déterministes. En particulier, la base de Pauli définie par (2.13), permet d'obtenir une modélisation physique simplifiée de la cible. Dans le cas où la cellule de résolution contient une contribution dominante, le vecteur cible mesuré peut être modélisé par un comportement canonique. Par exemple, une contribution dominante dans le canal $hh + vv$ indique une réflexion simple rebond possible sur un objet de type surface ou dièdre. Une contribution dominante dans le canal $hh - vv$ peut être associée à une réflexion double rebond possible sur une structure de type dièdre orienté horizontalement ou verticalement, une forte composante hv est reliée à une réflexion multiple possible en présence d'un dipôle ou d'un dièdre orienté à 45 $^\circ$ selon la puissance du canal $hh + vv$.

2.1.4.3 Décomposition incohérente

Différentes décompositions ont été développées pour obtenir une interprétation physique des matrices polarimétriques incohérentes. On peut notamment citer les approches de Huynen [Huynen(1970)] et de Freeman [Freeman(1998)]. Une autre méthode basée sur les valeurs et vecteurs propres des matrices **T** et **C**, n'utilisant pas d'à priori sur la nature de l'interaction est présentée dans cette partie [Cloude(1996)].

– **Valeurs et vecteurs propres de la matrice de cohérence**

La projection d'une représentation polarimétrique incohérente (3×3) sur la base de ses vecteurs propres permet de décomposer de façon unique une cible distribuée en une somme de trois cibles pures dont les vecteurs cibles sont mathématiquement orthogonaux. Les vecteurs propres sont alors paramétrés et associés à des caractéristiques physiques correspondantes aux mécanismes de diffusion. La matrice de cohérence **T** se décompose dans la base de ses vecteurs propres de la façon suivante :

$$\mathbf{T} = \vee \wedge \vee^{\dagger} = \sum_{i=1}^{3} \lambda_i v_i v_i^{\dagger} \tag{2.34}$$

où $\vee$ et $\wedge$ représentent respectivement les matrices (3×3) des vecteurs et des valeurs propres de **T**. La matrice de cohérence étant hermitienne semi-définie positive, ses valeurs propres λ_i sont réelles, positives ou nulles. Les vecteurs propres complexes v_i associés sont orthogonaux. L'idée de la décomposition en valeurs/vecteurs propres est d'utiliser la diagonalisation de la matrice **T**, qui est en général de rang 3, en une somme non cohérente de trois matrices de cohérence, $\mathbf{T_i}$, chacune étant pondérée par sa valeur propre associée

$$\mathbf{T} = \sum_{i=1}^{3} \lambda_i \mathbf{T_i}. \tag{2.35}$$

Les matrices $\mathbf{T_i}$ étant de traces unitaires, les valeurs propres représentent la puissance associée à chacune des composantes et sont ordonnées telles que $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$.

– **Analyse des valeurs propres**

L'ensemble des valeurs propres indique la répartition de la puissance totale sur différentes composantes de la décomposition. Cette répartition est définie par une variable p_i représentant la part de puissance associée au mécanisme. L'ensemble des p_i correspond à une normalisation des valeurs propres λ_i

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^{3} \lambda_i}. \tag{2.36}$$

Ces valeurs propres normalisées sont associées à des pseudo-probabilités liées aux propriétés statistiques des phénomènes de rétrodiffusion en milieu naturel. Il est possible de décrire le spectre des valeurs propres au moyen de deux paramètres réels :

l'entropie et l'anisotropie.

L'entropie H de la cible est définie comme l'indicateur du caractère aléatoire du phénomène de rétrodiffusion global. Elle est obtenue suivant :

$$H = -\sum_{i=1}^{3} p_i log_3(p_i) \qquad 0 \leq H \leq 1. \tag{2.37}$$

Une entropie nulle indique que la cible observée est pure et la rétrodiffusion est déterministe. A l'inverse, une entropie égale à 1 correspond à une scène totalement aléatoire.

L'anisotropie est définie comme :

$$A = \frac{p_2 - p_3}{p_2 + p_3} \qquad 0 \leq A \leq 1. \tag{2.38}$$

Elle permet de caractériser l'importance relative des mécanismes de diffusion secondaires.

Lüneburg a également utilisé les valeurs propres pour déterminer le paramètre p_r [Lüneburg(2001)] :

$$p_r = \sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{\frac{\lambda_2^2 + \lambda_3^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2}} \qquad 0 \leq p_r \leq 1. \tag{2.39}$$

Le comportement physique de ce paramètre est proche de celui de l'entropie. Dans la suite, il sera montré que ce paramètre est plus sensible aux variations de végétation que l'entropie (Chapitre 5).

– **Analyse des vecteurs propres**

Un vecteur propre unitaire à trois dimensions possède cinq degrés de liberté et peut être paramétré au moyen de cinq angles : ϕ, α, β, δ et γ

$$\mathbf{v} = \mathrm{e}^{j\phi} \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha\cos\beta \mathrm{e}^{j\delta} \\ \sin\alpha\sin\beta \mathrm{e}^{j\gamma} \end{bmatrix}. \tag{2.40}$$

Le terme de phase ϕ n'étant pas observable dans la structure de la matrice de cohérence associée, il est supposé nul. Une interprétation des quatre paramètres restants est proposé par [Cloude(1996)] [Cloude(1998)].

Le paramètre β est défini comme un indicateur de l'orientation de l'axe de symétrie principale d'une cible par rapport à l'axe de visée du radar. δ et γ sont également liés à l'orientation de l'axe de symétrie principal de la cible observée.

Le paramètre α est associé à la nature du mécanisme de diffusion. Si α est nul alors le mécanisme est celui d'une diffusion de surface canonique. Dans l'autre cas extrême, c'est-à-dire $\alpha = \frac{\pi}{2}$, le mécanisme de rétrodiffusion est celui d'un dièdre ou d'une cible entraînant une diffusion ellipsoïde. Toute autre valeur intermédiaire représente un mécanisme de diffusion anisotrope. Une valeur $\alpha = \frac{\pi}{4}$ peut par exemple être associée à une cible de type dipôle canonique comme une branche.

A partir des paramètres $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ calculés sur les trois composantes des vecteurs propres de la matrice $\mathbf{T}$, l'angle moyen α est défini par

$$\alpha = \sum_{i=1}^{3} p_i \alpha_i. \tag{2.41}$$

Les paramètres α_1 et δ_1 utilisés dans ces travaux de thèse, correspondent respectivement aux angles α et δ associés au premier vecteur propre $\mathbf{v_1}$ c'est-à-dire caractérisant la contribution principale de la scène :

$$\mathbf{v_1} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 \\ \sin\alpha_1 \cos\beta_1 \mathrm{e}^{j\delta_1} \\ \sin\alpha_1 \sin\beta_1 \mathrm{e}^{j\gamma_1} \end{bmatrix} \tag{2.42}$$

avec

$$\alpha_1 = \mathrm{acos}\left(|v_1(1)|\right) \qquad \text{ou} \qquad \alpha_1 = \mathrm{atan}\left(\frac{\sqrt{|v_1(2)|^2 + |v_1(3)|^2}}{|v_1(1)|}\right). \tag{2.43}$$

Dans le cas de la symétrie de réflexion, ce qui est le cas pour les sols nus, β_1 est considéré nul, par conséquent, δ_1 caractérise le déphasage entre les deux premiers éléments du premier vecteur propre.

2.1.4.4 Décomposition adaptée à la symétrie de réflexion

Dans la plupart des zones agricoles sans topographie, l'hypothèse de symétrie de réflexion est valable. Elle permet d'obtenir les expressions simplifiées des paramètres polarimétriques et de les relier plus facilement aux paramètres physiques des zones naturelles.

Valeurs et vecteurs propres dans le cas d'une symétrie de réflexion

Dans le cas d'une symétrie de réflexion, la matrice de cohérence est définie par

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle (S_{hh}+S_{vv})(S_{hh}+S_{vv})^* \rangle & \langle (S_{hh}+S_{vv})(S_{hh}-S_{vv})^* \rangle & 0 \\ \langle (S_{hh}-S_{vv})(S_{hh}+S_{vv})^* \rangle & \langle (S_{hh}-S_{vv})(S_{hh}-S_{vv})^* \rangle & 0 \\ 0 & 0 & 4\langle S_{hv} S_{hv}^* \rangle \end{bmatrix} \tag{2.44}$$

Les valeurs propres de la matrice de cohérence (identiques à celles de la matrice de covariance) s'écrivent [Van-Zyl(1992)] :

$$
\begin{aligned}
\lambda_{1_{nos}} &= \frac{1}{2}\left(\langle|S_{hh}|^2\rangle + \langle|S_{vv}|^2\rangle + \sqrt{\left(\langle|S_{hh}|^2\rangle - \langle|S_{vv}|^2\rangle\right)^2 + \langle 4|S_{hh}S_{vv}^*|\rangle}\right) \\
\lambda_{2_{nos}} &= \frac{1}{2}\left(\langle|S_{hh}|^2\rangle + \langle|S_{vv}|^2\rangle - \sqrt{\left(\langle|S_{hh}|^2\rangle - \langle|S_{vv}|^2\rangle\right)^2 + \langle 4|S_{hh}S_{vv}^*|\rangle}\right) \\
\lambda_{3_{nos}} &= \langle|S_{hv}|^2\rangle
\end{aligned} \tag{2.45}
$$

où *nos* signifie non ordonnées (not ordered in size).
Les expressions analytiques des vecteurs propres de la matrice de cohérence en symétrie de réflexion sont

$$
\begin{aligned}
\mathbf{v_1} &= \frac{1}{\sqrt{2\left[\left(|S_{hh}|^2 - |S_{vv}|^2 + \sqrt{\Delta}\right)^2 + 4|\rho|^2\right]}} \begin{bmatrix} 2S_{hh}S_{vv}^* + \left(|S_{hh}|^2 - |S_{vv}|^2 + \sqrt{\Delta}\right) \\ 2S_{hh}S_{vv}^* - \left(|S_{hh}|^2 - |S_{vv}|^2 + \sqrt{\Delta}\right) \\ 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{v_2} &= \frac{1}{\sqrt{2\left[\left(|S_{hh}|^2 - |S_{vv}|^2 - \sqrt{\Delta}\right)^2 + 4|\rho|^2\right]}} \begin{bmatrix} 2S_{hh}S_{vv}^* + \left(|S_{hh}|^2 - |S_{vv}|^2 - \sqrt{\Delta}\right) \\ 2S_{hh}S_{vv}^* - \left(|S_{hh}|^2 - |S_{vv}|^2 - \sqrt{\Delta}\right) \\ 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{v_3} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.46}
$$

avec $\Delta = \left(|S_{hh}|^2 - |S_{vv}|^2\right)^2 + 4|\rho|^2$ et $\rho = S_{hh}S_{vv}^*$.

Ces expressions littérales sont beaucoup plus simples que les expressions littérales des valeurs/vecteurs propres de la matrice de cohérence générale [Cloude(2001)].

Les paramètres ERD

Les paramètres ERD (Eigenvalue Relative Difference) sont obtenus par l'analyse des valeurs propres de la matrice de cohérence dans le cas d'une symétrie de réflexion (2.45). Ces valeurs sont non seulement non ordonnées mais sont définies comme décrivant la réflexion de la cible : simple, double ou multiple, selon les valeurs de α_1 et α_2

$$
\begin{aligned}
\alpha_1 < \alpha_2 \quad &\Rightarrow \quad \lambda_S = \lambda_{1_{nos}} \quad \text{et} \quad \lambda_D = \lambda_{2_{nos}} \\
\alpha_1 > \alpha_2 \quad &\Rightarrow \quad \lambda_S = \lambda_{2_{nos}} \quad \text{et} \quad \lambda_D = \lambda_{1_{nos}} \\
\forall \alpha_i \quad &\Rightarrow \quad \lambda_M = \lambda_3 \\
& \qquad \alpha_1 + \alpha_2 = 90\ ^\circ
\end{aligned} \tag{2.47}
$$

Les paramètres ERD sont définis comme la différence relative des valeurs propres non ordonnées (Eigenvalue Relative Difference)[Allain(2003)] [Allain(2006)].

– SERD : Différence relative entre la diffusion simple et multiple

$$SERD = \frac{\lambda_S - \lambda_M}{\lambda_S + \lambda_M} \tag{2.48}$$

– DERD : Différence relative entre la diffusion double et multiple

$$DERD = \frac{\lambda_D - \lambda_M}{\lambda_D + \lambda_M}. \tag{2.49}$$

Le paramètre $SERD$ est plutôt utilisé pour l'analyse de la végétation alors que $DERD$ est plus sensible à la rugosité.

Un troisième paramètre basé sur la différence relative entre la diffusion simple et double a été développé durant cette thèse

– SDERD : Différence relative entre la diffusion simple et double [Daniel(2007)]

$$SDERD = \frac{\lambda_S - \lambda_D}{\lambda_S + \lambda_D} \tag{2.50}$$

avec

$$-1 \leq ERD \leq 1. \tag{2.51}$$

2.2 Modèle de diffusion de sols agricoles

La modélisation électromagnétique est une étape importante qui permet de mieux comprendre le comportement des réponses électromagnétiques reçues par le capteur. Dans cette partie, trois types de surface agricole différents sont étudiés : les sols nus non périodiques, les sols recouverts de petites végétations et les sols nus périodiques. Pour les deux premiers cas, un modèle électromagnétique existant a été utilisé. Par contre, pour les sols périodique, un modèle original et novateur a été développé dans le cadre de ces travaux. Ce modèle se base sur l'approximation scalaire de Kirchhoff qui est adapté aux sols périodiques [Daniel(2008)].

2.2.1 Modèle de diffusion de surfaces rugueuses isotropes

Les modèles de diffusion de surface les plus couramment utilisés sont les méthodes de Kirchhoff [Beckmann(1963)] [Ogilvy(1992)], la méthode des petites perturbations (SPM : Small Perturbation Method) [Rice(1951)] [Valenzuela (1967)] [Peake(1959)] , et la méthode de l'équation intégrale (IEM : Integral Equation Method) [Fung(1992)] [Ulaby(1986)] [Fung(2004)]. L'IEM est le modèle de diffusion le plus utilisé pour la télédétection de surface. Il est cependant difficile à utiliser directement pour l'inversion des paramètres de surface [Rakotoarivony(1996)] [Zribi(1997)] [Baghdadi(2002)]. Ses valeurs des puissances mesurées par le système

diffèrent souvent des puissances obtenues par ce modèle. De plus, les canaux horizontaux et verticaux sont beaucoup plus corrélés avec le modèle que sur les données. Toutefois, ce modèle présente l'avantage de suivre le comportement électromagnétique des données et permet ainsi une meilleur compréhension des réponses électromagnétiques des surfaces rugueuses isotropes.

L'IEM est basé sur l'approximation de Kirchhoff corrigée par l'ajout d'un terme complémentaire tenant compte des interactions multiples de l'onde avec la surface. L'une des versions simplifiées de ce modèle IEM adaptée aux surfaces peu à moyennement rugueuses est décrite dans ce paragraphe.

2.2.1.1 Les champs diffusés

L'équation du champ diffusé s'exprime suivant [Stratton(1941)]

$$E_{pq}^{s} = K \iint \left[\widehat{k}_i \times \widehat{q} \cdot \left(\widehat{n} \times \overrightarrow{E}_p \right) + \eta \widehat{q} \cdot \left(\widehat{n} \times \overrightarrow{H}_p \right) \right] \mathrm{e}^{-jk\widehat{k}_i \overrightarrow{r}} \mathrm{d}S \tag{2.52}$$

où $K = -\frac{jk}{4\pi R_0} \mathrm{e}^{-jkR_0}$, R_0 est la distance entre le point d'observation et le centre de la surface illuminée, η l'impédance intrinsèque du milieu, $\widehat{n}$ la normale à la surface et $\overrightarrow{r}$ le vecteur de position. Les canaux de polarisation en émission et en réception de l'onde sont identifiés par les indices p et q. Le vecteur $\widehat{k}_i$ indique la direction de propagation de l'onde incidente. En l'absence de charge, les champs tangentiels de surface peuvent s'exprimer comme la somme du champ incident et du champ diffusé [Poggio(1973)].

Le champ lointain diffusé est décomposé en un terme calculé à partir de l'approximation de Kirchhoff et en un terme de correction, appelé champ complémentaire, suite à l'interaction de l'onde incidente avec une surface rugueuse. Ce champ complémentaire permet de tenir compte des interactions de l'onde avec les rugosités environnantes et prend en compte les diffusions multiples qui sont absentes du terme de Kirchhoff [Fung(1992)] [Alvarez-Perez(2001)]

$$E_{pq}^{s} = E_{pq}^{k} + E_{pq}^{c}. \tag{2.53}$$

Le champ de Kirchhoff E_{pq}^{k} et le champ complémentaire E_{pq}^{c} sont définis par :

$$E_{pq}^{k} = KE_0 \int f_{pq} \mathrm{e}^{-2jk\widehat{k}_i \overrightarrow{r}} \mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{2.54}$$

$$E_{pq}^{c} = \frac{KE_0}{8\pi^2} \int F_{pq} \mathrm{e}^{ju(x-x')+jv(y-y')-j\widehat{k}_i(\overrightarrow{r}+\overrightarrow{r}')} \mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'\mathrm{d}u\mathrm{d}v. \tag{2.55}$$

Les coefficients de Kirchhoff f_{pq} sont calculés à l'aide d'une intégration par partie sur les pentes de la surface. Les valeurs simplifiées de ces coefficients en rétrodiffusion sont déterminées par

$$f_{vv} = \frac{2\Gamma_v}{\cos\theta} \qquad f_{hh} = -\frac{2\Gamma_h}{\cos\theta} \qquad f_{hv} = 0 \tag{2.56}$$

avec Γ_h et Γ_v les coefficients de Fresnel (2.57) et θ l'angle d'incidence. Les coefficients f_{hh} et f_{vv} dépendent ainsi de la permittivité diélectrique de la surface et de l'angle d'incidence.

Les coefficients complémentaires F_{pq} sont plus complexes à calculer [Fung(1992)] [Fung(2004)].

Les **coefficients de Fresnel** en polarisations horizontale Γ_h et verticale Γ_v se déterminent par les expressions suivantes

$$\begin{aligned}\Gamma_h(\theta) &= \frac{\mu\cos\theta - \sqrt{\mu\varepsilon - \sin\theta^2}}{\mu\cos\theta + \sqrt{\mu\varepsilon - \sin\theta^2}} \\ \Gamma_v(\theta) &= \frac{\varepsilon\cos\theta - \sqrt{\mu\varepsilon - \sin\theta^2}}{\varepsilon\cos\theta + \sqrt{\mu\varepsilon - \sin\theta^2}}\end{aligned} \tag{2.57}$$

avec $\mu = 1$ la perméabilité d'un sol naturel et ε sa constante diélectrique.

2.2.1.2 Puissance moyenne

La puissance moyenne totale diffusée est proportionnelle à

$$\langle E^s_{pq} E^{s*}_{rs}\rangle = \langle E^k_{pq} E^{k*}_{rs}\rangle + 2\Re\langle E^c_{pq} E^{k*}_{rs}\rangle + \langle E^c_{pq} E^{c*}_{rs}\rangle \tag{2.58}$$

où les indices r et s représentent respectivement les canaux de réception et d'émission. La composante cohérente de la puissance est donnée par la puissance quadratique moyenne. La part de puissance incohérente, obtenue par soustraction de la puissance cohérente à la puissance totale , est donnée par

$$\begin{aligned}P_{pqrs} \propto \langle E^s_{pq} E^{s*}_{rs}\rangle - \langle E^s_{pq}\rangle\langle E^s_{rs}\rangle^* = \langle E^k_{pq} E^{k*}_{rs}\rangle - \langle E^k_{pq}\rangle\langle E^k_{rs}\rangle^* + 2\Re\Big[\langle E^c_{pq} E^{k*}_{rs}\rangle - \langle E^c_{pq}\rangle\langle E^k_{rs}\rangle^*\Big] \\ + \langle E^c_{pq} E^{c*}_{rs}\rangle - \langle E^c_{pq}\rangle\langle E^c_{rs}\rangle^*.\end{aligned} \tag{2.59}$$

Le coefficient de rétrodiffusion s'exprime comme suit

$$\sigma_{pqrs} = \frac{4\pi R_0^2 P_{pqrs}}{E_0^2 A_0} = \sigma^k_{pqrs} + \sigma^{kc}_{pqrs} + \sigma^c_{pqrs} \tag{2.60}$$

avec A_0 l'aire illuminée.

Dans le cas de l'approximation des petites et moyennes pentes, les coefficients de diffusion se décomposent en un terme purement surfacique et en un terme de diffusion multiple comme le montre l'équation suivante

$$\sigma_{pqrs} = \sigma^s_{pqrs} + \sigma^m_{pqrs}. \tag{2.61}$$

Le coefficient de rétrodiffusion en co-polarisation est largement dominé par le terme de diffusion simple, le terme de diffusion multiple ayant une amplitude négligeable. Les coefficients de rétrodiffusion co-polarisés, σ_{pqrs}, sont alors définis par

$$\sigma_{pqrs} \approx \sigma^s_{pqrs} = \frac{k^2}{4\pi}\mathrm{e}^{-2k_z^2 s^2}\sum_{n=1}^{\infty} s^{2n} I^n_{pp} I^{n*}_{qq}\frac{W^n\big(-2k_x, 0\big)}{n!} \tag{2.62}$$

avec

$$I_{pp}^{n} = \left(2k_z\right)^2 f_{pp} \mathrm{e}^{-s^2 k_z^2} + \frac{k_z^n \Big(F_{pp}\big(-k_x, 0\big) + F_{pp}\big(k_x, 0\big) \Big)}{2} \tag{2.63}$$

et

$$\begin{aligned} F_{vv}\big(-k_x, 0\big) + F_{vv}\big(k_x, 0\big) &= \frac{2\sin^2\theta\big(1+\Gamma_v\big)^2}{\cos\theta}\left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon} + \frac{\varepsilon - \sin^2\theta - \varepsilon\cos^2\theta}{\varepsilon\cos^2\theta}\right) \\ F_{hh}\big(-k_x, 0\big) + F_{hh}\big(k_x, 0\big) &= -\frac{2\sin^2\theta\big(1+\Gamma_h\big)^2}{\cos^3\theta}(\varepsilon - 1) \end{aligned} \tag{2.64}$$

avec $W(k_x, k_y)$ le spectre de rugosité défini dans le chapitre 1 (1.55). La composante de diffusion simple en polarisation croisée, σ_{hvhv}^{s}, est nulle en rétrodiffusion. De ce fait, en polarisation croisée, le coefficient de rétrodiffusion est essentiellement dû aux diffusions multiples et son expression est donnée par

$$\sigma_{hvhv} = \sigma_{hvhv}^{m} = \frac{k^2}{16\pi}\mathrm{e}^{-2k_z^2 s^2} \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(k_z^2 s^2\right)^{n+m}}{m!n!} \tag{2.65}$$

$$\iint \left[\left|F_{hv}(u,v)\right|^2 + F_{hv}(u,v)F_{hv}^{*}(-u,-v)\right] W^m\big(u-k_x, v\big) W^n\big(u+k_x, v\big)\mathrm{d}u\mathrm{d}v$$

avec

$$F_{hv}(u,v) = \frac{uv}{k\cos\theta}\left[\frac{8R^2}{\sqrt{k^2-u^2-v^2}} + \frac{-2+6R^2+\frac{(1+R)^2}{\varepsilon}+\varepsilon\big(1-R\big)^2}{\sqrt{\varepsilon k^2-u^2-v^2}}\right] \tag{2.66}$$

avec $R = \frac{\Gamma_v - \Gamma_h}{2}$.

L'interaction des différentes composantes de rugosité de la surface intervient à travers les intégrales sur u et v de (2.65).

Le domaine de validité est défini par

$$ks < 3$$

$$\cos^2\theta \frac{ks^2}{\sqrt{kc}} \mathrm{e}^{-\sqrt{2kc\left(l_c - \sin\theta\right)}} \ll 1 \qquad avec \qquad kc = 0.455kl_c \tag{2.67}$$

La puissance rétrodiffusée diminue avec la permittivité diélectrique. Des limitations de ce modèle apparaissent pour de forts angles d'incidence de plus de 70 °.

2.2.2 Modèle de diffusion de surfaces rugueuses périodiques

Après avoir traité le cas des sols rugueux isotropes, la rétrodiffusion des sols périodiques est présentée dans cette partie. La diffusion de ces sols est généralement modélisée de deux manières différentes : l'une étant basée sur le modèle des petites perturbations, l'autre basée sur le modèle de Kirchoff avec l'approximation de la phase stationnaire [Yueh(1988)].

– **SPM/EBC**

Ce modèle consiste à adapter les conditions limites du modèle SPM (EBC : Extended Boundary Condition) aux sols périodiques. L'avantage de ce modèle est de modéliser tous les coefficients de rétrodiffusion dans le cas d'une symétrie de réflexion de la réponse du sol. L'inconvénient majeur de cette méthode vient de la complexité de ses expressions numériques. De plus, dans le cas d'une modification de la forme du sol, la résolution de ce modèle se complique davantage.

– **Kirchoff à phase stationnaire**

Les formulations de ce modèle sont beaucoup plus simple que le précédent. L'inconvénient principal de cette méthode vient du fait que les coefficients en co-polarisation sont identiques et en désaccord avec les informations récupérées par le SAR.

Afin d'obtenir un compromis entre ces deux approches, un nouveau modèle adapté aux sols périodiques a été formulé et développé durant cette thèse. Ce modèle se base sur l'approximation scalaire de Kirchhoff adaptée aux sols périodiques. Ainsi, les solutions de ce modèle sont simples et les coefficients en co-polarisation sont différents ($\sigma_{hhhh} \neq \sigma_{vvvv}$). Par ailleurs, malgré l'absence des termes croisés, certains paramètres polarimétriques comme l'angle α_1 peuvent quand même être déterminés.

La théorie de Kirchhoff fournit l'expression du champ sur la surface du diffuseur en utilisant l'approximation du plan tangent. Pour cela, chaque point du diffuseur est traité comme s'il appartenait à un plan infini parallèle à la tangente locale de la surface. Cette méthode reste valable si chaque point de la surface possède un rayon de courbure supérieur à la longueur d'onde [Beckmann(1963)] [Ogilvy(1992)].

2.2.2.1 Les champs diffusés

Pour calculer le champ diffusé [Stratton(1941)] [Silver(1947)], il faut commencer par exprimer les composantes tangentielles $\widehat{n} \times \overrightarrow{E}$ et $\widehat{n} \times \overrightarrow{H}$ des champs électrique et magnétique, pour chacune des réalisations de la surface. Or généralement ces quantités sont difficiles à évaluer et il est nécessaire de faire des hypothèses simplificatrices. L'approximation de Kirchhoff permet de calculer ces composantes. Elle consiste à supposer qu'en chaque point de la surface, le profil peut être remplacé par un plan infini tangent en ce point (de même permittivité de surface). Les composantes tangentielles des champs s'expriment alors en fonction des coefficients de Fresnel de la surface.

Soit le **champ incident** E^i

$$\overrightarrow{E}^i = E_0 \widehat{p} \mathrm{e}^{-jk(\widehat{k}_i \cdot \widehat{r})} \tag{2.68}$$

avec $\widehat{p}$ le vecteur unitaire de polarisation du champ incident et $\widehat{k}_i$ le vecteur unitaire dans la direction du champ incident.

En ce plaçant dans un repère local $(\widehat{k}_i, \widehat{t}, \widehat{d})$, le calcul des composantes des champs à la surface devient possible en utilisant l'approximation du plan tangent. Le repère local s'exprime en fonction de l'orientation du faisceau incident $\widehat{k}_i$ et de la normale locale $\widehat{n}_1$ de la surface

$$\widehat{t} = \frac{\widehat{k}_i \times \widehat{n}_1}{||\widehat{k}_i \times \widehat{n}_1||} \qquad \widehat{d} = \widehat{k}_i \times \widehat{t}. \tag{2.69}$$

Le champ diffusé par la surface est la somme du champ incident et du champ réfléchi par un plan de dimension infinie de même nature que le milieu considéré. Ainsi, les composantes tangentielles du champ s'expriment comme suit :

$$\begin{aligned} \widehat{n}_1 \times \overrightarrow{E} &= E_0 \Big[\big(1+\Gamma_h\big)\big(\widehat{p}\cdot\widehat{t}\big)\big(\widehat{n}_1 \times \widehat{t}\big) - \big(1-\Gamma_v\big)\big(\widehat{n}_1 \cdot \widehat{k}_i\big)\big(\widehat{p}\cdot\widehat{d}\big)\widehat{t} \Big] e^{-jk(\widehat{k}_i \cdot \overrightarrow{r})} \\ \eta\big(\widehat{n}_1 \times \overrightarrow{H}\big) &= -E_0 \Big[\big(1-\Gamma_h\big)\big(\widehat{p}\cdot\widehat{t}\big)\big(\widehat{n}_1 \cdot \widehat{k}_i\big)\widehat{t} + \big(1+\Gamma_v\big)\big(\widehat{p}\cdot\widehat{d}\big)\big(\widehat{n}_1 \times \widehat{t}\big) \Big] e^{-jk(\widehat{k}_i \cdot \overrightarrow{r})}. \end{aligned} \tag{2.70}$$

(2.52) et (2.70) impliquent le champ diffusé suivant :

$$\overrightarrow{E}^s = K\widehat{k}_s \times \iint_S \Big[\widehat{n}_1 \times \overrightarrow{E} - \eta \widehat{k}_s \times \big(\widehat{n}_1 \times \overrightarrow{H}\big) \Big] \mathrm{e}^{jk\left(\overrightarrow{r}\cdot(\widehat{k}_s - \widehat{k}_i)\right)} \mathrm{d}S. \tag{2.71}$$

Sous l'approximation du plan tangent, le champ diffusé s'exprime en fonction d'une intégrale de surface difficile à résoudre analytiquement. Il s'avère nécessaire de simplifier cette expression. Pour ce faire, deux approximations sont possibles suivant le type de surface étudié :

- approximation à phase stationnaire : pour les surfaces à large écart type des hauteurs [Sancer(1969)] [Wu(1972)] [Ogilvy(1992)]
- approximation scalaire : pour les surfaces avec des petites pentes ou avec de faible valeur d'écart type des hauteurs [Ulaby(1986)].

2.2.2.2 L'approximation scalaire

Le modèle basé sur la phase stationnaire [Yueh(1988)], suppose une surface avec un écart type large des hauteurs et donne une diffusion purement incohérente. Ce genre de résultat ne peut être appliqué sur des surfaces peu rugueuses puisque l'interaction de l'onde électromagnétique avec ces surfaces génèrent une diffusion cohérente et incohérente.

L'approche scalaire consiste à décomposer les termes de l'intégrale (2.71) autour des termes de pentes nulles [Ulaby(1990)]. Pour être valable, la surface doit posséder un rayon de courbure important et un écart type des pentes faible par rapport à la

longueur d'onde. Il faut également que les coefficients de Fresnel varient lentement par rapport à la surface. L'hypothèse d'un écart type des pentes faibles simplifie l'expression de la normale locale de la surface

$$\widehat{n}_1 \simeq -\widehat{x}Z_x - \widehat{y}Z_y + \widehat{z} \tag{2.72}$$

où Z_x et Z_y représentent les pentes de la surface dans les directions x et y. La deuxième hypothèse permet un développement en série des coefficients de Fresnel au voisinage du plan de référence. Ces deux hypothèses permettent ainsi de simplifier la formulation du modèle de Kirchhoff en approximation scalaire [Beckmann(1963)].

L'expression du champ diffusé se définit alors sous la forme suivante :

$$E^s_{pp} = -jk_z \frac{\mathrm{e}^{-jk_z R_0}}{4\pi R_0} E_0 \iint_S \overline{U}_{pp} \mathrm{e}^{jk_d(\widehat{k}_s - \widehat{k}_i)r'} \mathrm{d}S' \tag{2.73}$$

où les amplitudes $\overline{U}_{pp}$ sont des facteurs de polarisations déterminés dans le paragraphe suivant.

Pour déterminer les coefficients de rétrodiffusion, il est nécessaire de déterminer la moyenne du champ électrique $< E^s E^{s*} >$, ce qui signifie déterminer la moyenne des intégrales

$$I = \iint_S \iint_{S'} \left\langle \overline{U}_{pp} \overline{U}'_{pp} \mathrm{e}^{j\overline{k_d}(\overline{r} - \overline{r}')} \right\rangle \mathrm{d}S \mathrm{d}S' \tag{2.74}$$

– **Facteurs de polarisation**

Les amplitudes en polarisation horizontale et verticale sont déterminées par :

$$\overline{U}_{hh} = \frac{\widehat{v}_s.(\widehat{n}_1 \times E_s) + \widehat{h}_s.(\eta_1 \widehat{n}_1 \times H_s)}{E_0} \tag{2.75}$$

$$\overline{U}_{vv} = \frac{\widehat{v}_s.(\eta_1 \widehat{n}_1 \times H_s) - \widehat{h}_s.(\widehat{n}_1 \times E_s)}{E_0} \tag{2.76}$$

où les termes $\widehat{v}_s$, $\widehat{h}_s$ et $\widehat{k}_i$ dépendent des angles d'incidence locaux

$$\begin{aligned}
\widehat{v}_s &= \widehat{\theta} = \widehat{h}_s \times \widehat{k}_s = \widehat{x}\cos\theta_s\cos\phi_s + \widehat{y}\cos\theta_s\sin\phi_s - \widehat{z}\sin\theta_s \\
\widehat{h}_s &= \widehat{\phi} = -\widehat{x}\sin\phi_s + \widehat{y}\cos\phi_s \\
\widehat{k}_i &\simeq \widehat{x}\sin\theta\cos\phi + \widehat{y}\sin\theta\sin\phi - \widehat{z}\cos\theta
\end{aligned} \tag{2.77}$$

En introduisant (2.77), (2.72) et (2.70) dans les expressions des amplitudes horizontale (2.75) et verticale (2.76), on obtient

$$\overline{U}_{pp} = a_0 + a_1 Z_x + a_2 Z_y \tag{2.78}$$

avec

$$\begin{aligned}
a_{0_{pp}} &= -(1+\Gamma_p)\cos\theta_s\cos(\phi_s - \phi) + (1-\Gamma_p)\cos\theta\cos(\phi_s - \phi) \\
a_{1_{pp}} &= (1+\Gamma_p)\sin\theta_s\cos\phi + (1-\Gamma_p)\sin\theta\cos\phi\cos(\phi_s - \phi) \\
a_{2_{pp}} &= (1+\Gamma_p)\sin\theta_s\sin\phi + (1-\Gamma_p)\sin\theta\sin\phi\cos(\phi_s - \phi)
\end{aligned} \tag{2.79}$$

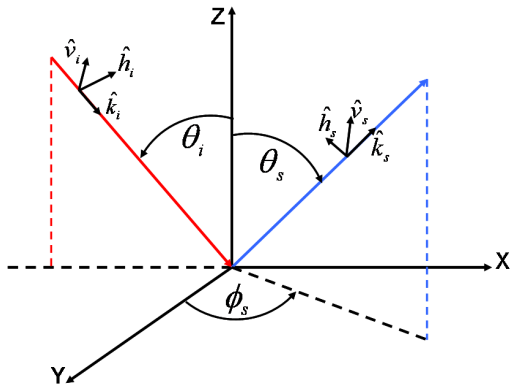


FIG. 2.5 – Diffusion des champs

p désignant la polarisation horizontale ou verticale.

$\overline{U}_{pq}\overline{U}'_{pq}$ peut être caractérisé au premier ordre des pentes comme décrit ci-dessous

$$\overline{U}_{pq}\overline{U}'_{pq} \simeq a_0 a'_0 + a'_0 a_1 Z_x + a_0 a'_1 Z_x + a'_0 a_2 Z_y + a_0 a'_2 Z_y \tag{2.80}$$

Z_x et Z_y sont les pentes

$$\begin{aligned} Z_x &= \frac{\partial f}{\partial x} \\ Z_y &= \frac{\partial f}{\partial y}. \end{aligned} \tag{2.81}$$

2.2.2.3 Caractérisation d'une surface rugueuse périodique

Les champs agricoles labourés ou la surface des océans peuvent être définis comme des surfaces périodiques aléatoires [Beckmann(1963)]. Ces surfaces possèdent une partie aléatoire représentant la rugosité et une partie périodique correspondant aux sillons. Cette surface rugueuse périodique est caractérisée par ses hauteurs

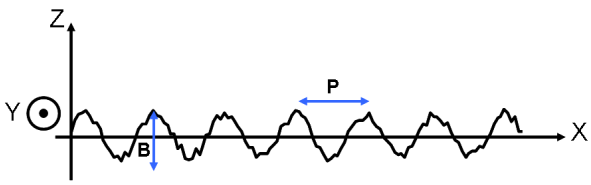


FIG. 2.6 – Caractéristique d'une surface rugueuse périodique

$Z(x, y)$

$$Z(x, y) = f(x, y) = \xi(x, y) + B\cos\left(\frac{2\pi}{P}x\right) \tag{2.82}$$

avec B et P respectivement l'amplitude et la période des sillons. Sa fonction caractéristique est $N(0, {s_f}^2)$ avec s_f^2 la variance de $Z(x, y)$. Cette surface est composée

d'une partie aléatoire $\xi(x,y)$ qui a une fonction caractéristique jointe Gaussienne $N(0,s^2)$, et d'une partie déterministe.

2.2.2.4 Moyenne des intégrales

Dans notre étude, les contributions des pentes définies par les termes des pentes de l'expression (2.80) sont négligeables. Les contributions cohérente et incohérente de la diffusion électromagnétique de la surface périodique sont définies à l'ordre 0 des facteurs d'amplitudes c'est-à-dire pour $\overline{U}_{pq}\overline{U}'_{pq} = a_0 a'_0 = |a_0|^2$. Ainsi, la moyenne des intégrales est déterminée par

$$\langle II^* \rangle = \int_{A_0} \mathrm{d}\overline{r} \int_{A_0} \mathrm{e}^{jk_{d_\perp}(r_\perp - r'_\perp)} \langle \mathrm{e}^{jk_{d_z}[f(x,y)-f(x',y')]} \rangle \mathrm{d}\overline{r}' \tag{2.83}$$

– **Calcul de** $\langle \mathbf{e}^{\mathbf{jk_{d_z}[f(x,y)-f(x',y')]}} \rangle$

La soustraction $f(x,y) - f(x',y')$ présente dans (2.83) vaut :

$$\begin{aligned} f(x,y) - f(x'-y') &= \left(\xi(x,y) - \xi(x'-y') + B\cos\left(\frac{2\pi}{P}(x)\right) - B\cos\left(\frac{2\pi}{P}x'\right) \right) \\ &= \Delta\xi + \Delta B \end{aligned} \tag{2.84}$$

Le terme $\langle \mathrm{e}^{jk_{d_z}(f(x,y)-f(x',y')} \rangle$ peut être défini en fonction de la variance de $\big(f(x,y) - f(x',y')\big)$ [Papoulis(1991)]

$$\left\langle \mathrm{e}^{jk_{d_z}(f(x,y)-f(x',y'))} \right\rangle = \mathrm{e}^{-\frac{1}{2}k_{d_z}^2 s_f^2} \tag{2.85}$$

avec

$$\begin{aligned} s_f^2 &= \left\langle \left(f(x,y) - f(x',y') \right)^2 \right\rangle = \left\langle \Delta\xi^2 + 2\Delta\xi\Delta B + \Delta B^2 \right\rangle \\ s_f^2 &= \left\langle \Delta\xi^2 + \Delta B^2 \right\rangle = \left\langle \Delta\xi^2 \right\rangle + \Delta B^2 \end{aligned} \tag{2.86}$$

La composante aléatoire et la composante périodique ne sont pas corrélées donc s_f^2 se simplifie comme la somme d'une composante déterministe ΔB avec la variance aléatoire $\langle \Delta\xi^2 \rangle$ définie par

$$\begin{aligned} \left\langle \Delta\xi^2 \right\rangle &= \left\langle \left(\xi(x,y) - \xi(x'-y') \right)^2 \right\rangle \\ &= \left\langle \xi^2(x,y) + \xi^2(x',y') - 2\xi(x,y)\xi(x',y') \right\rangle \\ &= s^2 + s^2 - 2\left\langle \xi(x,y) - \xi(x',y') \right\rangle \\ &= s^2 + s^2 - 2s^2\rho(r_\perp - r'_\perp) \\ &= 2\left(s^2\big(1 - \rho(r_\perp - r'_\perp)\big) \right) \end{aligned} \tag{2.87}$$

$\rho(r_\perp - r'_\perp)$ est déterminé à partir de $\xi(x', y') = \xi(x-\tau, y-\tau)$ et la variance $\langle \xi(x,y) - \xi(x-\tau, y-\tau) \rangle = s^2\rho(r_\perp - r'_\perp)$.

La variance de $(f(x,y) - f(x',y'))$ sans la composante périodique peut s'exprimer par

$$\left\langle \mathrm{e}^{jk_{d_z}(\xi(x,y)-\xi(x',y'))} \right\rangle = \mathrm{e}^{-k_{d_z}^2 s^2(1-\rho(r_\perp - r'_\perp))}. \tag{2.88}$$

Ainsi, son expression globale est caractérisée par l'équation suivante

$$\left\langle \mathrm{e}^{jk_{d_z}(f(x,y)-f(x',y'))} \right\rangle = \mathrm{e}^{-k_{d_z}^2 s^2(1-\rho(r_\perp - r'_\perp))} \mathrm{e}^{jk_{d_z}(B\cos(\frac{2\pi}{P}x) - B\cos(\frac{2\pi}{P}x'))}. \tag{2.89}$$

La composante périodique est développée comme suit

$$\mathrm{e}^{jk_{d_z}B(\cos(\frac{2\pi}{P}x)-\cos(\frac{2\pi}{P}x'))} = \mathrm{e}^{-2jk_{d_z}B\sin(\frac{\pi}{P}(x+x'))\sin(\frac{\pi}{P}(x-x'))}. \tag{2.90}$$

Après changement de variables $X = x - x'$, $X' = x + x'$, $Y = y - y'$ et $Y' = y + y'$, l'expression devient,

$$\left\langle \mathrm{e}^{jk_{d_z}(f(x,y)-f(x',y'))} \right\rangle = \mathrm{e}^{-k_{d_z}^2 s^2(1-\rho(X,Y))} \mathrm{e}^{-2jk_{d_z}B\sin(\frac{\pi}{P}(X'))\sin(\frac{\pi}{P}(X))}. \tag{2.91}$$

D'après la formule de Jacobi Anger,

$$\mathrm{e}^{jx\sin\theta} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(x)\mathrm{e}^{jm\theta} \tag{2.92}$$

ce qui implique que

$$\mathrm{e}^{-2jk_{d_z}B\sin(\frac{\pi}{P}(X'))\sin(\frac{\pi}{P}(X))} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m\left(-2k_{d_z}B\sin\left(\frac{\pi}{P}(X)\right)\right)\mathrm{e}^{jm\frac{\pi}{P}(X')}. \tag{2.93}$$

– **Calcul de la moyenne des intégrales**

La moyenne des intégrales est déterminée par

$$\begin{aligned}\langle II^* \rangle = & \tfrac{1}{4}\int_{-2L_x+|x|}^{2L_x-|x|} \mathrm{d}x' \int_{-2L_y+|y|}^{2L_y-|y|} \mathrm{d}y' \int_{-2L_x}^{2L_x} \mathrm{d}x \int_{-2L_y}^{2L_y} \mathrm{d}y \\ & \mathrm{e}^{j\overline{k}_{d_\perp}\overline{r}_\perp} \textstyle\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(-2k_{d_z}B\sin(\frac{\pi}{P}(x)))\mathrm{e}^{jm\frac{\pi}{P}(x')}\mathrm{e}^{-k_{d_z}^2 s^2(1-\rho(x,y))}.\end{aligned} \tag{2.94}$$

Pour simplifier le calcul de l'intégrale, une simplification de la fonction de Bessel est nécessaire [Tsang(2000)]. L'argument de la fonction de Bessel peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned} -2k_{d_z}B\sin\left(\frac{\pi}{P}(x)\right) &= \frac{2k_{d_z}B}{2j}\left(\mathrm{e}^{j\frac{\pi}{P}x} - \mathrm{e}^{-j\frac{\pi}{P}x}\right) \\ &= -jk_{d_z}B\mathrm{e}^{j\frac{\pi}{P}x} + jk_{d_z}B\mathrm{e}^{-j\frac{\pi}{P}x}. \end{aligned} \tag{2.95}$$

Par ailleurs, en utilisant les relations des fonctions de Bessel [Abramowitz(1964)],

$$J_p(y+z) = \sum_{m=\infty}^{\infty} J_m(y) J_{p-m}(z) = \sum_{\mu=\infty}^{\infty} J_{n-\mu}(y) J_{n+\mu}(z) \tag{2.96}$$

$$J_m(y\mathrm{e}^{ja}) = \mathrm{e}^{jma} J_m(y) \qquad \text{et} \qquad J_m(x) = J_m(-x), \tag{2.97}$$

la fonction de Bessel peut s'écrire sous la forme d'une somme

$$\begin{aligned} J_p\left(2k_{d_z} B \sin\left(\frac{\pi}{P}(x)\right)\right) &= \sum_{m=\infty}^{\infty} J_m(k_{d_z} B \mathrm{e}^{j\frac{\pi}{P}x} \mathrm{e}^{-j\frac{\pi}{2}}) J_{p-m}(k_{d_z} \mathrm{e}^{-j\frac{\pi}{P}x} \mathrm{e}^{j\frac{\pi}{2}}) \\ &= \sum_{m=\infty}^{\infty} \mathrm{e}^{jm\frac{\pi}{P}x} \mathrm{e}^{-jm\frac{\pi}{2}} J_m(k_{d_z} B) \mathrm{e}^{-j(p-m)\frac{\pi}{P}x} \mathrm{e}^{j(p-m)\frac{\pi}{2}} J_{p-m}(k_{d_z} B) \\ &= \sum_{m=\infty}^{\infty} \mathrm{e}^{j\frac{\pi}{P}x(2m-p)} \mathrm{e}^{j\frac{\pi}{2}(p-2m)} J_m(k_{d_z} B) J_{p-m}(k_{d_z} B). \end{aligned} \tag{2.98}$$

Après un second changement de variables : $\mu = m - \frac{p}{2}$, $n = \frac{p}{2}$ et $\mathrm{e}^{j\frac{\pi}{2}t} = (-1)^{\mu}$

$$\begin{aligned} J_n\left(2k_{d_z} B \sin\left(\frac{\pi}{P}(x)\right)\right) &= \sum_{m=\infty}^{\infty} \mathrm{e}^{j\frac{\pi}{P}x(2m-p)} \mathrm{e}^{j\frac{\pi}{2}(p-2m)} J_m(k_{d_z} B) J_{p-m}(k_{d_z} B) \\ &= \sum_{\mu=\infty}^{\infty} \mathrm{e}^{j\frac{\pi}{P}x.2\mu} \mathrm{e}^{-j\pi\mu} J_{n+\mu}(k_{d_z} B) J_{n-\mu}(k_{d_z} B) \\ &= \sum_{\mu=\infty}^{\infty} \mathrm{e}^{j\widehat{x}\mu\frac{2\pi}{P}\overline{r}_{\perp}} (-1)^{\mu} J_{n+\mu}(k_{d_z} B) J_{n-\mu}(k_{d_z} B) \\ &= \sum_{\mu=\infty}^{\infty} \mathrm{e}^{j\widehat{x}\mu\frac{2\pi}{P}\overline{r}_{\perp}} \beta_{n\mu} \end{aligned} \tag{2.99}$$

avec $\beta_{n\mu} = (-1) J_{n-\mu}(k_{d_z} B) J_{n+\mu}(k_{d_z} B)$. Ainsi, en remplaçant la fonction de Bessel par l'expression (2.99) et en résolvant les intégrales en x' et en y', $\langle II^* \rangle$ devient égale à :

$$\begin{aligned} \langle II^* \rangle = \quad & \tfrac{1}{2} \int_{-2L_x}^{2L_x} \mathrm{d}x \int_{-2L_y}^{2L_y} \mathrm{d}y \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\mu=\infty}^{\infty} \beta_{n\mu} \mathrm{e}^{j(\overline{k}_{d_\perp} + \widehat{x}\mu\frac{2\pi}{P})\overline{r}_{\perp}} \\ & (2L_y - |y|) \tfrac{1}{jn\frac{\pi}{P}} \left\{ \mathrm{e}^{jn\frac{\pi}{P}(2L_x - |x|)} - \mathrm{e}^{-jn\frac{\pi}{P}(2L_x - |x|)} \right\} \mathrm{e}^{-k_{d_z}^2 s^2 (1-\rho(x,y))} \end{aligned} \tag{2.100}$$

Le facteur $\mathrm{e}^{k_{d_z}^2 s^2 \rho}$ peut être formulé comme une série de termes :

$$\mathrm{e}^{k_{d_z}^2 s^2 \rho} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(k_{d_z}^2 \sigma^2 \rho)^m}{m!}. \tag{2.101}$$

Ainsi,

$$\begin{aligned}\langle II^*\rangle = & \tfrac{1}{2}\mathrm{e}^{-k_{d_z}^2 s^2}\textstyle\sum_{m=0}^{\infty}\frac{(k_{d_z}^2 s^2)^m}{m!}\int_{-2L_x}^{2L_x}\mathrm{d}x\int_{-2L_y}^{2L_y}\mathrm{d}y\rho(x,y)^m \\ & \textstyle\sum_{n=-\infty}^{\infty}\sum_{\mu=\infty}^{\infty}\beta_{n\mu}\mathrm{e}^{j(\overline{k}_{d_\perp}+\widehat{x}\mu\frac{2\pi}{P})\overline{r}_\perp} \\ & (2L_y-|y|)\tfrac{1}{jn\frac{\pi}{P}}\left\{\mathrm{e}^{jn\frac{\pi}{P}(2L_x-|x|)}-\mathrm{e}^{-jn\frac{\pi}{P}(2L_x-|x|)}\right\}\end{aligned} \tag{2.102}$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{jn\frac{\pi}{P}}\left\{\mathrm{e}^{jn\frac{\pi}{P}(2L_x-|x|)}-\mathrm{e}^{-jn\frac{\pi}{P}(2L_x-|x|)}\right\} = & \quad 2\tfrac{\sin(n\frac{\pi}{P}(2L_x-|x|))}{\frac{n\pi}{P}(2L_x-|x|)}(2L_x-|x|) \\ = & \quad 2\mathrm{sinc}(n\tfrac{\pi}{P}(2L_x-|x|))(2L_x-|x|)\end{aligned} \tag{2.103}$$

$$\begin{aligned}\langle II^*\rangle = & \mathrm{e}^{-k_{d_z}^2 s^2}\textstyle\sum_{m=0}^{\infty}\frac{(k_{d_z}^2 s^2)^m}{m!}\int_{-2L_x}^{2L_x}\mathrm{d}x\int_{-2L_y}^{2L_y}\mathrm{d}y\rho(x,y)^m \\ & \textstyle\sum_{n=-\infty}^{\infty}\sum_{\mu=\infty}^{\infty}\beta_{n\mu}\mathrm{e}^{j(\overline{k}_{d_\perp}+\widehat{x}\mu\frac{2\pi}{P})\overline{r}_\perp} \\ & (2L_y-|y|)(2L_x-|x|)\sin c(n\tfrac{\pi}{P}(2L_x-|x|)).\end{aligned} \tag{2.104}$$

D'après (2.104), le terme en $n=0$ est proportionnel à L_x alors que les termes en $n\neq 0$ sont proportionnels à P. L'argument de la fonction de Bessel $k_{d_z}B$ fixe le nombre de terme nécessaire à la sommation. Cependant, si $L_x \gg P$ (la limite $L_x \to \infty$ sera prise), alors le terme $n=0$ donnera les contributions dominantes et les autres termes seront négligés. Par conséquent, il reste uniquement le terme $n=0$ et l'expression de la moyenne des intégrales obtenue est alors

$$\begin{aligned}\langle II^*\rangle = & \mathrm{e}^{-k_{d_z}^2 s^2}\textstyle\sum_{m=0}^{\infty}\frac{(k_{d_z}^2 s^2)^m}{m!}\int_{-2L_x}^{2L_x}\mathrm{d}x\int_{-2L_y}^{2L_y}\mathrm{d}y\rho(x,y)^m \\ & \textstyle\sum_{\mu=\infty}^{\infty}\beta_{\mu}\mathrm{e}^{j(\overline{k}_{d_\perp}+\widehat{x}\mu\frac{2\pi}{P})\overline{r}_\perp}(2L_y-|y|)(2L_x-|x|).\end{aligned} \tag{2.105}$$

2.2.2.5 Coefficient de rétrodiffusion

Diffusion cohérente

D'après les modes de Floquet [Chuang(1981)] [Beckmann(1963)] (chapitre 4), la diffusion cohérente se détermine au mode de Floquet $m=0$ correspondant à la direction spéculaire (figure 4.9). De plus, $\langle II^*\rangle$ se transforme en une série à cause du facteur $\mathrm{e}^{k_{d_z}^2 s^2\rho}$ (2.101) et se simplifie comme suit

$$\begin{aligned}\langle II^*\rangle_{coh} = & \mathrm{e}^{-k_{d_z}^2 s^2}\textstyle\int_{-2L_x}^{2L_x}\mathrm{d}x\int_{-2L_y}^{2L_y}\mathrm{d}y(2L_y-|y|)(2L_x-|x|) \\ & \textstyle\sum_{\mu=\infty}^{\infty}\beta_{\mu}\mathrm{e}^{j(\overline{k}_{d_\perp}+\widehat{x}\mu\frac{2\pi}{P})\overline{r}_\perp}\end{aligned} \tag{2.106}$$

Ainsi, le coefficient de diffusion cohérent peut s'exprimer par

$$\begin{aligned}\sigma_{coh_{pp}} = & \frac{|a_{0_{pp}}|^2 k^2}{4\pi A_0\cos^2\theta}\mathrm{e}^{-k_{d_z}^2 s^2}\sum_{\mu}J_\mu^2(k_{d_z}B) \\ & \int_{-2L_x}^{2L_x}\mathrm{d}x\int_{-2L_y}^{2L_y}\mathrm{d}y(2L_y-|y|)(2L_x-|x|)\mathrm{e}^{j(\overline{k}_{d_\perp}+\widehat{x}\mu\frac{2\pi}{P})r_\perp}.\end{aligned} \tag{2.107}$$

Le reste de la somme de $\langle II^* \rangle$ représente la composante incohérente correspondant aux autres modes de Floquet.

Diffusion non-cohérente

La diffusion incohérente est définie pour $m \geq 1$, ainsi $\langle II^* \rangle_{incoh}$ s'exprime par

$$\langle II^* \rangle_{incoh} = \mathrm{e}^{-k_{d_z}^2 s^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(k_{d_z}^2 s^2)^m}{m!} \int_{-2L_x}^{2L_x} \mathrm{d}x \int_{-2L_y}^{2L_y} \mathrm{d}y (2L_y - |y|)(2L_x - |x|)\rho(x,y)^m \sum_{\mu} J_{\mu}^2(k_{d_z} B) \mathrm{e}^{j(\overline{k}_{d_\perp} + \widehat{x}\mu \frac{2\pi}{P})\overline{r}_\perp}. \tag{2.108}$$

Le coefficient de diffusion incohérent s'exprime alors par

$$\sigma_{incoh_{pp}} = \frac{|a_{0_{pp}}|^2 k^2}{4\pi A_0 \cos^2\theta} \mathrm{e}^{-k_{d_z}^2 s^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(k_{d_z}^2 s^2)^m}{m!} \sum_{\mu} J_{\mu}^2(k_{d_z} B) \int_{-2L_x}^{2L_x} \mathrm{d}x \int_{-2L_y}^{2L_y} \mathrm{d}y (2L_y - |y|)(2L_x - |x|)\rho(x,y)^m \mathrm{e}^{j(\overline{k}_{d_\perp} + \widehat{x}\mu \frac{2\pi}{P})r_\perp}. \tag{2.109}$$

La fonction de corrélation $\rho(x,y)$ choisie dans cette étude est de forme gaussienne

$$\rho(x,y) = \mathrm{e}^{-\frac{x^2+y^2}{l_c^2}} \tag{2.110}$$

où l_c est la longueur de corrélation de la variable aléatoire $\xi(x,y)$ dans le plan transversal.

Pour une surface lisse, $ks \to 0$ seule la partie cohérente existe. Lorsque la rugosité augmente, la composante cohérente diminue au profit de la partie incohérente.

Domaine de validité

Les conditions de validité de l'approximation scalaire sont

$$kl_c > 6 \qquad R_c > \lambda \qquad et \qquad m < 0.25 \tag{2.111}$$

où R_c est le rayon de courbure s'exprimant sous la forme

$$R_c = \frac{l_c^2}{2.764s}. \tag{2.112}$$

Il est important de noter que la méthode de Kirchhoff pour les deux approximations, ne tient absolument pas compte ni des diffusions multiples, ni des effets d'ombres.

2.2.3 Modèle de diffusion de surfaces recouvertes de petites végétations

Les deux modèles présentés précédemment sont applicables sur les sols nus. Or, lors de l'observation des champs agricoles, il apparaît que de nombreuses parcelles sont recouvertes de végétations. De nombreuses études ont été menées sur le

comportement électromagnétique des sols recouverts de végétation [Karam(1988)] [Mattia(2007)]. Afin de pouvoir étudier ces zones agricoles, différents modèles de la réponse électromagnétique des sols atténués par la végétation existent [Yueh(1992)] [Schmugge(1992)] [Bracaglia(1995)] [Stiles(2000)a] [Stiles(2000)b] [Matthaeis(2005)] [Chiu(2000)]. Ces modèles prennent souvent en compte des caractéristiques physiques et de l'architecture de la plante pour la modélisation et sont donc très complexes. Dans le cadre de cette thèse, un modèle semi-empirique simple permettant de mettre en avant les difficultés existant pour estimer en bande L l'humidité des sols recouverts de végétation, est présenté dans cette partie [Ulaby(1986)].

2.2.3.1 Modèle semi-empirique de végétation

La diffusion de petits volumes sur le sol est modélisée par une approche du transfert radiatif comme pour les forêts [Dahon(2004)]. La canopée de la végétation peut être définie par une simple formulation incluant trois termes [Eom(1984)] :

- contribution du volume (végétation) (σ_v)
- contribution surface-volume (σ_{sv})
- contribution de surface (sol) (σ_s)

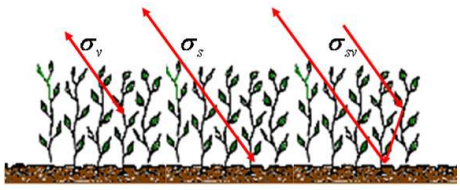


FIG. 2.7 – Contributions électromagnétiques d'une zone recouverte de petites végétations

Ainsi, la rétrodiffusion de la canopée peut être modélisée par

$$\sigma_{can} = \sigma_v + \Upsilon^2 \sigma_s + \sigma_{sv} \tag{2.113}$$

avec Υ^2 l'atténuation de l'onde aller-retour due à la végétation, et σ_s, σ_{sv} et σ_v les contributions respectives de la surface, de la surface avec le volume et du volume.

La moyenne de la permittivité de la canopée étant proche de 1, le volume est supposé ne pas avoir d'effet aux limites de la couche air-volume.
Afin d'analyser la diffusion de la végétation simplement, un modèle approximatif dont les différentes contributions sont décrites ci-dessous, est utilisé [Allen(1984)].

Contribution surfacique

Afin de caractériser au mieux la surface naturelle, les coefficients de rétrodiffusion σ_s, sont caractérisés par le modèle IEM (section 2.2.1). L'atténuation aller-retour est définie par

$$\Upsilon^2(\theta) = \mathrm{e}^{-2\tau \sec\theta} \tag{2.114}$$

où θ est l'angle d'incidence et τ est l'épaisseur optique [Ulaby(1986)] dépendant du coefficient d'extinction et de la hauteur des plantes [Ulaby(1990)].

Contribution volumique

La contribution du volume σ_v est basée sur l'analyse du transfert radiatif et est déterminée par [Ulaby(1986)] :

$$\sigma_{hhhh} = \sigma_{vvvv} = 0.74a\big(1 + 0.54a\tau - 0.24(a\tau)^2\big)\left[1 - \mathrm{e}^{-2.12\tau \sec\theta}\right]\cos\theta \quad (2.115)$$

et

$$\sigma_{hvhv} = a\big(0.044a\tau - 0.018(a\tau)^2 + 0.006(a\tau)^3\big)\left[1 - \mathrm{e}^{-11.7\tau \sec\theta}\right]\cos\theta \quad (2.116)$$

avec a l'albédo simple diffusion dépendant des coefficients d'extinction et de diffusion. Il est à noter que les coefficients de co-polarisation sont égaux.

Contribution surface-volume

La contribution sol-volume est définie par

$$\sigma_{sv_{pp}} \cong 1.9a\big(1 + 0.9a\tau + 0.4(a\tau)^2\big)\left[1 - \mathrm{e}^{-1.93\tau \sec\theta}\right]\mathrm{e}^{-1.37\tau^{1.12}\sec\theta} \mathrm{e}^{-0.84(ks)^2\cos\theta}|R_{pp}|^2\cos\theta \quad (2.117)$$

où p désigne la polarisation horizontale ou verticale et Γ_{pp} les coefficients de Fresnel. En polarisation croisée, le coefficient de rétrodiffusion surface-volume est caractérisé par

$$\sigma_{sv_{hv}} \cong 0.013a(1 + 7.85a\tau + 7.9(a\tau)^2)\left[1 - \mathrm{e}^{-6.92\tau \sec\theta}\right]\mathrm{e}^{-1.02\tau^{1.38}\sec\theta}\mathrm{e}^{2.9(ks)^2\cos\theta} \left[\frac{|R_{vv}|^2 + |R_{hh}|^2}{2}\right]\cos\theta. \quad (2.118)$$

2.2.3.2 Analyse des différentes contributions

Dans cette analyse, quatre sols recouverts de végétation sont modélisés en bande L : petites végétations ($a = 0.1$ et $\tau = 0.1$) sur un sol sec ($\varepsilon = 5$ soit $m_v \approx 10\%$) et humide ($\varepsilon = 18$ soit $m_v \approx 50\%$) et hautes végétations ($a = 0.36$ et $\tau = 0.98$) sur un sol sec et humide. Ces valeurs sont celles fixées par [Ulaby(1986)]. Les figures 2.8 et 2.9 représentent les réponses électromagnétiques de la canopée et de ses différentes contributions en fonction de l'angle d'incidence pour les polarisations horizontale et croisée : volume (σ_{veg}), surface-volume (σ_{sv}), surface (σ_{sol}).

La figure 2.8 représente également la contribution surface-volume en polarisation verticale (σ_{sv-vv}). Cette contribution est pour les quatre sols inférieure à la

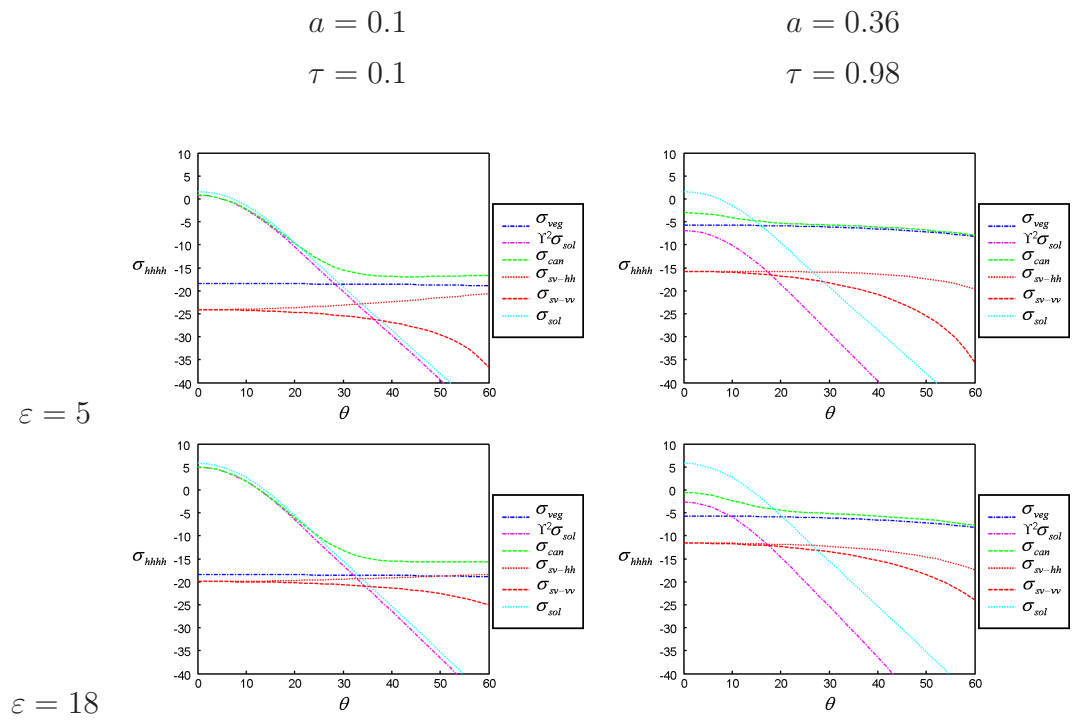


FIG. 2.8 – Contributions du coefficient de rétrodiffusion en polarisation horizontale

contribution surface-volume en polarisation horizontale (σ_{sv-hh}). Cette information confirme le critère de surface considérant qu'une réponse électromagnétique d'un sol est caractérisée par $\sigma_{vvvv} > \sigma_{hhhh}$. Par ailleurs, plus la végétation augmente plus la contribution du sol est atténuée par le paramètre Υ^2 dépendant de l'angle d'incidence. Ainsi, la réponse électromagnétique de la canopée suit la contribution volumique étant donnée que la contribution de surface est atténuée. Pour un sol recouvert de petites végétations, la contribution surface-volume en polarisation horizontale tend vers la contribution volumique alors qu'en présence de végétation plus importante elle reste quasi constante avec un décalage constant par rapport à la contribution de volume. La contribution surface-volume dépend des paramètres de surface puisque définit par les coefficient de Fresnel. Ainsi, lorsque le sol devient plus humide, la réponse électromagnétique de la canopée augmente. Les contributions de surface et de surface-volume sont influencées par les caractéristiques du sol.

En polarisation croisée représentée sur la figure 2.9, l'influence de la végétation est très importante. Lorsque la végétation augmente la réponse électromagnétique de la canopée augmente fortement. En présence de petites végétations, la contribution surface-volume est proche de la contribution de la canopée et la contribution de volume est beaucoup plus faible. A l'inverse, en présence de végétation, la contribution de volume a une très forte augmentation. La réponse électromagnétique est alors constituée essentiellement des contributions de surface-volume et de volume, la contribution de surface étant fortement atténuée même pour un sol humide.

Ce modèle de diffusion permet de mettre en avant l'influence de la végétation sur la réponse électromagnétique de la surface. Les comportements des différentes

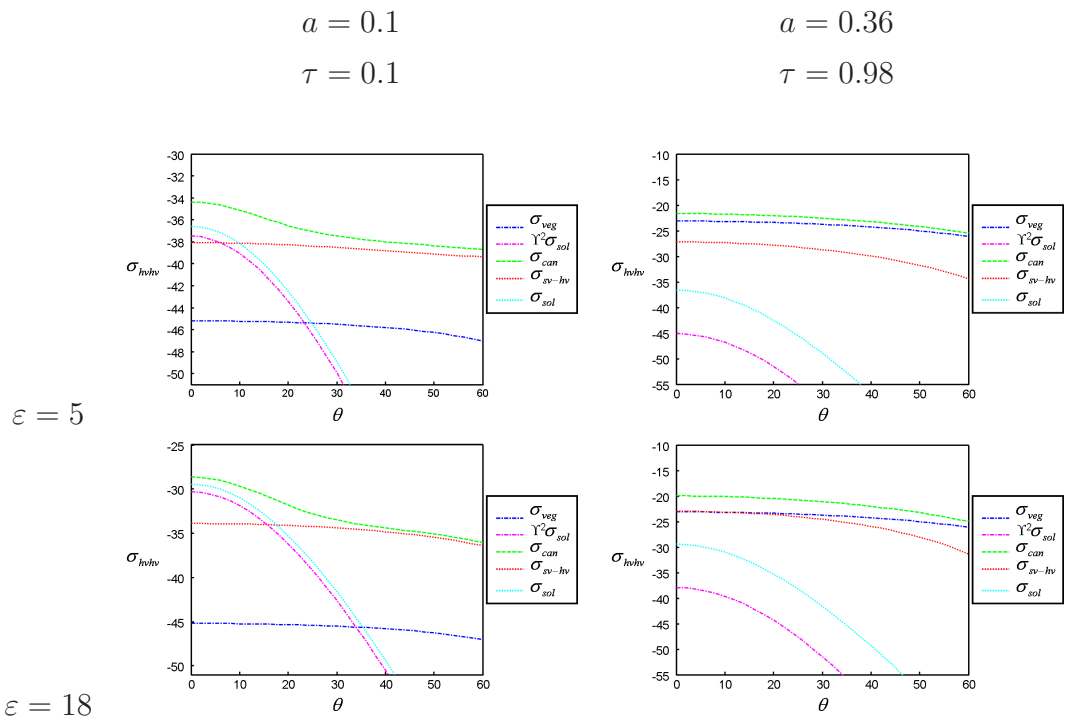


FIG. 2.9 – Contributions du coefficient de rétrodiffusion en polarisation croisée

contributions observés avec ce modèle sont utiles à l'analyse des champs agricoles recouverts de végétation développée dans le chapitre 5. Cette analyse montre également qu'en présence d'une contribution volumique négligeable, l'estimation du sol est possible alors qu'en présence d'une contribution volumique trop importante, la contribution de surface est tellement atténuée qu'elle ne permet pas l'estimation des paramètres du sol.

Domaine de validité

Les limites de validité de ce modèle semi-empirique sont

$$8° \leq \theta \leq 85° \qquad 0.1Np \leq \tau \leq 2.2Np \qquad 0.01 \leq a \leq 0.5.$$

Np : Néper.

2.3 Conclusion

Ce chapitre présente un rappel sur les notions de polarimétrie. La polarimétrie radar permet de caractériser physiquement une cible. Les différents paramètres polarimétriques présentés dont le paramètre $SDERD$ développé pendant cette thèse, sont utilisés au cours de ces travaux. La seconde partie de ce chapitre présente trois modèles de diffusion électromagnétique correspondant aux trois types de sols agricoles étudiés dans cette thèse : les sols nus, périodiques et recouverts de petites végétations. Le modèle IEM modélise la réponse électromagnétique d'un sol nu et

sert entre autre pour la nouvelle méthode d'inversion élaborée dans la chapitre 3. Le modèle de Kirchhoff à approximation scalaire adapté au sol périodique élaborée dans cette partie sera étudié dans le chapitre 4 afin de comprendre les différents phénomènes liés à ce type de sols. Le dernier modèle présenté a permis de mettre en avant l'influence de la végétation sur la réponse électromagnétique d'un sol recouvert de végétation. Plus la contribution de végétation est importante plus la contribution du sol est atténuée par un paramètre Υ^2 dépendant des caractéristiques physiques de la végétation. Cette information est utile pour l'étude des champs agricoles recouverts de petites végétations (chapitre 5).

Bibliographie

[Abramowitz(1964)] M. Abramowitz, I. A. Stegun, "Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables", Dover, New-York, 1964.

[Allain(2003)] S. Allain, "Caractérisation d'un sol nu à partir de données SAR polarimétriques. Etude multi-fréquentielle et multi-résolutions", Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes 1, France, Décembre 2003.

[Allain(2006)] S. Allain, L. Ferro-Famil, E. Pottier, "A polarimetric classification from polsar data using SERD/DERD parameters". Proceedings EUSAR, Dresden, Germany, 2006.

[Allen(1984)] C.T. Allen, F.T. Ulaby, "Modeling the Polarization Dependence of the Attenuation in Vegetation Canopies". IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'84), pp.119-124, 1984.

[Alvarez-Perez(2001)] J. L. Alvarez-Perez, "An extension of the IEM/IEMM surface scattering model", Waves Random Media 11, pp. 307-329, 2001.

[Baghdadi(2002)] N. Baghdadi, C. King, A. Bonnifait, "An empirical calibration of the integral equation model based on SAR data and soil parameters measurements", Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 2002.

[Beckmann(1963)] P. Beckmann, A. Spizzichino, "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces", MacMillan, New York, International Series of Monographs on Electromagnetic Waves, vol.4, Oxford :Pergamon, 1963.

[Bracaglia(1995)] M. Bracaglia, P. Ferrazzoli, L. Guerriero, " A fully polarimetric multiple scattering model for crops", Remote sensing environment, vol. 54, pp. 170-179, 1995.

[Chiu(2000)] T. Chiu, K. Sarabandi, " Electromagnetic scattering from short branching vegetation", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, no. 2, pp. 911-925, 2000.

[Chuang(1981)] S. L. Chuang, J. A. Kong, "Scattering of waves from periodic surfaces". IEEE Proc., vol.69,pp. 1132-1144, 1981.

[Cloude(1996)] S. R. Cloude, E. Pottier, "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, no. 2, pp. 498-518, 1996.

[Cloude(1998)] S. R. Cloude, "Symmetry, zero correlations and target decomposition theorems", Proceedings 4th Int. Workshop on Radar Polarimetry, PIERS, pp. 58-66, 1998.

[Cloude(2001)] S. R. Cloude, K. P. Papathanassiou, E. Pottier, "Radar polarimetry and polarimetric interferometry", IEICE Transaction on Electronics, vol. E84-C, no. 12, 2001.

[Daniel(2007)] S. Daniel, S. Allain, E. Pottier, "Agricultural Mapping using Polarimetric SAR Data", Proceedings of the Retrieval of bio- and geo-physical parameters from SAR Data for Land Applications, Bari, Italy, 2007.

[Daniel(2008)] S. Daniel, S. Allain, L. Ferro-Famil, E. Pottier, "Surface parameter estimation over quasi periodic surfaces using a time-frequency approach and PolSAR data", Proceedings of IGARSS, Boston, USA, 2008.

[Dahon(2004)] C. Dahon, "Contribution à l'analyse de la réponse polarimétrique d'un couvert forestier", Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes, France, Décembre 2004.

[Eom(1984)] H. J. Eom, A. K. Fung, "A Scatter Model for Vegetation up to Ku-Band", Remote Sensing Environ.,vol. 15, pp. 185-200, 1984.

[Freeman(1998)] A. Freeman, S. L. Durden, "A trhee-component model for polarimetric SAR imagery", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, no. 3, pp. 963-973, 1998.

[Fung(1992)] A. K. Fung, Z. Li, K. S. Chen, "Backscattering from a randomly rough dielectric surface", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, no. 2, pp. 356-369, 1992.

[Fung(2004)] A. K. Fung, K. S. Chen, " An update on the IEM surface backscattering model", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 1, no. 2, pp. 75-77, 2004.

[Huynen(1970)] J. R. Huynen, "Phenomenological theory of radar targets", Ph. D. Dissertation, Drukkerij Bronder-Offset N. V., Rotterdam, 1970.

[Lüneburg(2001)] E. Lüneburg, "Final Report Phase I : Foundations of the Mathematical Theory of Polarimetry", Internal Report, DLR, 2001.

[Matthaeis(2005)] P. de Matthaeis, R. H. Lang, "Microwave scattering models for cylindrical vegetation components", Progress In Electromagnetics Research, PIER, vol. 55, pp. 307-333, 2005.

[Mattia(1997)] F. Mattia, T. Le Toan, J. C. Souyris, C. De Carolis, N. Floury, F. Posa, N. G. Pasquariello, " The effect on surface roughness multifrequency polarimetric SAR data", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, no. 4, pp. 954-966, 1997.

[Mattia(2007)] F. Mattia, G. Satalino, A. Balenzano, V. Pauwels, N. Verhoest, H. Skriver, M. Davidson, "Exploiting L-band SAR for the improvement of surface process modelling", Proceedings of 5th Retrieval of Bio and Geophysical parameters from SAR dat for Land applications, Bari, Italy, 2007.

[Karam(1988)] M. A. Karam, A. K. Fung, Y. M. Antar, " Electomagnetic wave scattering from vegetation samples", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 26, no. 6, pp. 799-808, 1988.

[Nghiem(1988)] S. V. Nghiem, S. H. Yueh, R. Kwok, F. K. Li, "Symmetry properties in polarimetric remote sensing", Radio Science, vol. 23, no. 4, pp. 713-720, 1988.

[Ogilvy(1992)] J.A. Olgilvy, "Theory of wave scattering from random rough surfaces", Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1992.

[Papathanassiou(1999)] K. P. Papathanassiou, "Polarimetric SAR Interferometry", PH. D. Dissertation, Technische Universität Graz, DLR Science Report, ISSN 1434-8454, 1999.

[Papoulis(1991)] A. Papoulis, " Probability, random variables and stochastic processes", McGraw-Hill Book Company, Third Edition, 1991.

[Peake(1959)] W. H. Peake, "Theory of radar return from terrain". IRE Nat'l Conv. Rec., Vol. 7, pt. I, pp. 27-41, 1959.

[Poggio(1973)] A. J. Poggio, E. K. Miller, "Integral equation solution of three dimensional scattering problems", Computer Techniques for Electromagnetics, ch. 4, New York, Pergamon, 1973.

[Rakotoarivony(1996)] L. Rakotoarivony, O. Taconet, D. Vidal-Madjar, P. Bellemain, M. Benallègue, "Radar backscattering over agricultural bare soils", Journal of Electromagnetic waves and applications, vol. 10, no. 2, pp. 187-209, 1996.

[Rice(1951)] S. O. Rice, "Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces". Commun. Pure Appl. Math., Vol.4, pp. 351-378, 1951.

[Sancer(1969)] M. I. Sancer, "Shadow-corrected electromagnetic scattering from a randomly rough surface", IEEE Transaction Antennas Propagations, vol. 17, no. 5, pp. 577-585, 1969.

[Schmugge(1992)] T. J. Schmugge, T. J. Jackson, " A dielectric model of the vegetation effects on the microwave emission from soils", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, no. 4, pp. 757-760, 1992.

[Silver(1947)] S. Silver,, "Microwave antenna theory and design", M.I.T. Radiation lab. Series 12, McGraw-Hill, New York, p. 161, 1947.

[Stiles(2000)a] J. M. Styles, K. Sarabandi, " Electromagnetic scattering from grassland : Part I : a fully phase-coherent scattering model", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, no. 1, pp. 339-348, 2000.

[Stiles(2000)b] J. M. Styles, K. Sarabandi, F. T. Ulaby, " Electromagnetic scattering from grassland : Part II : measurement and modeling results", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, no. 1, pp. 349-356, 2000.

[Stratton(1941)] J. A. Stratton, "Electromagnetic theory", McGraw-Hill, New York, 1941.

[Tsang(2000)] L.Tsang, J. A. Kong , "Scattering of electromagnetic waves : Advanced Topics", Wiley series in remote sensing, 2000.

[Ulaby(1986)] F.T. Ulaby, R. Moore, A. Fung, "Microwave remote sensing : Active and passive I - III", Addison-Wesley Publication, pp. 2162, 1981-1986.

[Ulaby(1990)] F. T. Ulaby, C. Elachi, "Radar polarimetry for geoscience application", Artech House,1990.

[Valenzuela (1967)] G. R. Valenzuela, "Depolarization of E.M. Waves by Slightly Rough Surfaces". IEEE Trans. AP, Vol. AP-15, N°4, pp 552-557, 1967.

[Van De Hulst(1985)] H. Van De Hulst, "Light scattering by small particles", Sixth Edition, Dover Press, New York, 1985.

[Van-Zyl(1992)] J. J. Van-Zyl, "Application of Cloude's target decomposition theorem to polarimetric imaging radar", SPIE, vol. 1748, pp. 184-212, 1992.

[Wu(1972)] S. T. Wu, A. K. Fung, "A noncoherent model for microwave emission and backscattering from the sea surface", J. Geophys. Res., vol. 77, no. 30, pp. 5917-5929, 1972.

[Yueh(1988)] H. A. Yueh, R. T. Shin, J. A. Kong, "Scattering from randomly perturbed periodic and quasi-periodic surfaces", In Progress in electromagnetic research. Edited by J.A. Kong, Elsier, New York, vol. 1, pp. 297-358, 1988.

[Yueh(1992)] S. H. Yueh, J. A. Kong, J. King Jao, R. T. Shin, T. Le Toan, " Branching model for vegetation", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, no. 2, pp. 390-402, 1992.

[Zribi(1997)] M. Zribi, O. Taconet, S. Le Hegarat-Mascle, D. Vidar-Madjar, C. Emblanch, C. Loumagne, M. Normand, "Backscattering behavior and simulation : Comparison over bare soils using SIR-C/X-SAR and ERASME 1994 data over Orgeval", Remote Sensing of Envoronment, vol. 59, pp. 256-266, 1997.

Chapitre 3

Estimation de l'humidité des sols nus isotropes en bande L

Ces dernières décennies, de nombreuses études ont permis de mettre en évidence l'intérêt des données SAR polarimétriques pour l'estimation des paramètres de surface [Oh(1992)] [Dubois(1995-a)] [Shi(1997)] [Baghdadi(2002)] [Hajnsek(2003)] [Oh(2004)]. Comme il a été vu dans le chapitre précédent, les ondes électromagnétiques diffusées par une surface rugueuse dépendent des paramètres physiques du sol. Cette interaction est assez complexe à modéliser et il est alors très difficile d'inverser directement un modèle électromagnétique [Zribi(2002)] [Baghdadi(2003)] [Satalino(2003)].

Ce chapitre traite spécifiquement de l'inversion des paramètres de surface. Le principe des modèles d'inversion consiste à partir de données SAR, à estimer les paramètres de surface (figure 3.1). La plupart des méthodes d'inversion modélise le sol de façon empirique ou semi-empirique afin de simplifier le calcul inverse permettant l'estimation des paramètres de surfaces.

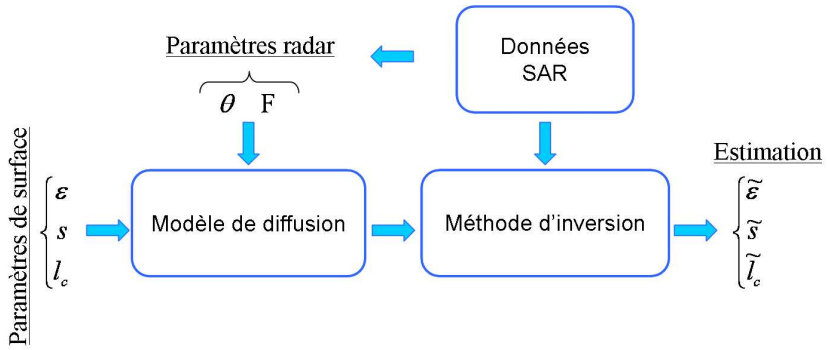


FIG. 3.1 – Schéma du modèle d'inversion

Dans ce chapitre, trois modèles d'inversion classiques, les plus simples et les plus utilisés dans la littérature, sont d'abord présentés. Ensuite, une nouvelle méthode d'inversion d'humidité basée principalement sur le paramètre polarimétrique α_1 est présentée. Elle se base sur l'utilisation conjointe de l'IEM et des données SAR

polarimétriques mesurées. Cette nouvelle méthode est ensuite appliquée sur le jeu de données d'Alling.

3.1 Méthodes d'inversion classiques

Différents modèles d'inversion de paramètres de surface ont été élaborés dans de nombreuses études. Certains modèles complexes proposent d'utiliser directement le modèle de diffusion IEM associé à une méthode numérique pour l'inverser comme les réseaux de neurone [Satalino(2003)]. A cause de cette complexité de calcul, les méthodes d'inversion les plus utilisées dans la littérature sont les plus simples, celles qui sont basées sur des modèles empirique ou semi-empirique. Trois de ces méthodes sont présentées dans cette partie.

3.1.1 Modèle de Dubois

Le modèle empirique de Dubois décrit uniquement les coefficients co-polarisés comme dépendant du paramètre de rugosité ks (k le vecteur d'onde et s l'écart type des hauteurs), de la constante diélectrique ε et des paramètres radar [Dubois(1995-a)] [Dubois(1995-b)]. L'observation de deux jeux de données collectées par deux diffusiomètres, a permis de déterminer des expressions simples pour les coefficients de rétrodiffusion à partir desquels sont estimés les paramètres de surface selon (3.1) :

$$\varepsilon = \frac{1}{0.0218 \tan\theta} \log\gamma \tag{3.1}$$

où

$$\gamma = \frac{\sigma^b_{vvvv}.10^{2.35b} \sin^{3b}\theta. \cos^{1.5a}\theta\lambda^{0.7a}}{\sigma^a_{hhhh}.10^{2.75a} \sin^{5a}\theta. \cos^{3b}\theta\lambda^{0.7b}}$$

$$\text{avec} \qquad a = \frac{1}{1.4} \qquad \text{et} \qquad b = \frac{1}{1.1}$$

et (3.2)

$$ks = \frac{1}{\sin\theta}\left(\frac{\sigma_{hhhh}.10^{2.75}\sin^5\theta}{\lambda^{0.7}.10^{0.028\varepsilon\tan\theta}\cos^{1.5}\theta}\right)^{1.4} \tag{3.2}$$

où λ est en cm et ε est un réel.

Domaine de validité

Ce modèle est valide pour

$$\begin{array}{rr} \text{les bandes : L, C, P} & 30\,^\circ < \theta < 65\,^\circ \\ 0.08 < ks < 0.8 & 2.5 < kl_c < 20 \\ & 0\% < m_v < 35\% \end{array} \tag{3.3}$$

Ce modèle est très simple d'utilisation mais dépend du niveau des puissances radar et de la calibration qui peuvent changer d'un système à l'autre. De plus, il ne se base que sur des données acquises par un diffusiomètre et non par un SAR.

3.1.2 Modèles de Oh

Les modèles semi-empiriques de Oh [Oh(1992)] [Oh(2004)] s'intéressent aux rapports entre les différents coefficients de rétrodiffusion dont les expressions non linéaires s'écrivent comme une combinaison des paramètres de surface et des paramètres du radar.

3.1.2.1 Oh 1992

Les expressions de la première version du modèle de Oh [Oh(1992)], s'exprime suivant :

$$q = \frac{\sigma_{hvhv}}{\sigma_{vvvv}} = 0.23\sqrt{\Gamma_0}\left[1 - e^{-ks}\right] \tag{3.4}$$

et

$$\sqrt{p} = \sqrt{\frac{\sigma_{hhhh}}{\sigma_{vvvv}}} = 1 - \left[\left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^{\frac{1}{3\Gamma_0}}.e^{-ks}\right] \tag{3.5}$$

avec

$$\Gamma_0 = \left|\frac{1-\sqrt{\varepsilon}}{1+\sqrt{\varepsilon}}\right|^2. \tag{3.6}$$

L'estimation de la constante diélectrique est obtenue à partir des équations précédentes.

Domaine de validité

Ce modèle est valide pour

$$\begin{aligned} \text{les bandes : L, C, X} \qquad & 10\,^\circ < \theta < 70\,^\circ \\ 0.1 < ks < 6 \qquad & 2.5 < kl_c < 20 \\ & 9\% < m_v < 31\% \end{aligned} \tag{3.7}$$

3.1.2.2 Oh 2004

Une seconde version de ce modèle [Oh(2004)] a été développée afin de tenir compte de nouvelles données de différents capteurs. Contrairement, à la première version, le rapport en polarisation croisée est indépendant du taux d'humidité.

ks peut s'exprimer comme suit

$$ks\big(\theta, m_v, \sigma_{hvhv_m}\big) = \left[-3.125 \cdot \ln\left(1 - \frac{\sigma_{hvhv_m}}{0.11 m_v^{0.7}(\cos\theta)^{2.2}}\right)\right]^{0.556} \tag{3.8}$$

où σ_{hvhv_m} est le coefficient de rétrodiffusion mesuré et m_v est l'estimée de l'humidité du sol. Elle peut être déterminée suivant l'équation non linéaire suivante

$$1 - \left(\frac{\theta}{90\,^\circ}\right)^{0.35 m_v^{-0.65}}.e^{-0.4(ks(\theta, m_v, \sigma_{hvhv_m}))^{1.4}} - p_m = 0 \tag{3.9}$$

avec $p_m = \frac{\sigma_{hhhh_m}}{\sigma_{vvvv_m}}$ le rapport co-polarisé mesuré.

Domaine de validité

Ce modèle est valide pour

$$\begin{array}{ll} \text{les bandes : L, C, X} & 10\,^\circ < \theta < 70\,^\circ \\ 0.15 < ks < 4 & 4\% < m_v < 30\% \end{array} \tag{3.10}$$

L'avantage du modèle de Oh est qu'il est construit sur une très grande base de données et il dépend des rapports de puissance ce qui le rend plus fiable pour s'adapter à tous les jeux de données.

3.1.3 Méthode d'Hajnsek

Une autre méthode permet d'estimer l'humidité et la rugosité du sol par la décomposition $H/A/\alpha$ [Cloude(1999)] [Hajnsek(2001)] [Hajnsek(2003)].

Le modèle de X-Bragg est une extension du modèle de Bragg qui est basé sur le modèle de SPM au premier ordre. L'originalité de l'extension de ce modèle nommé X-Bragg pour Extended Bragg, consiste à intégrer une dépolarisation croisée en insérant une rétrodiffusion en polarisation croisée non nulle. Ce coefficient est obtenu par rotation de la matrice de cohérence $\mathbf{T}$ par un angle β dans le plan perpendiculaire du plan de diffusion et en associant des propriétés statistiques de cet angle faisant de β une variable aléatoire.

Dans ce cas, β et les propriétés statistiques venant de la symétrie de réflexion, sont liés à la rugosité du sol. Avec $P(\beta)$ la fonction de distribution de β, la matrice de cohérence peut être exprimée comme suit

$$\mathbf{T} = \int_0^{2\pi} \mathbf{T}(\beta) \cdot P(\beta) d\beta \tag{3.11}$$

La fonction de distribution $P(\beta)$ est supposée uniforme de largeur $2\beta_1$ (β_1 représentant la quantité de rugosité de la surface) et se définit par

$$P(\beta) = \frac{1}{2\beta_1} \cdot |\beta| \leq \beta_1 \qquad 0 \leq \beta_1 \leq \frac{\pi}{2} \tag{3.12}$$

Avec cette distribution uniforme en β, la nouvelle forme de la matrice de cohérence $\mathbf{T}$ devient

$$T(\beta) = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \operatorname{sinc}(2\beta_1) & 0 \\ C_2 \operatorname{sinc}(2\beta_1) & C_3(1 + \operatorname{sinc}(4\beta_1) & 0 \\ 0 & 0 & C_3(1 - \operatorname{sinc}(4\beta_1) \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

avec C_1, C_2 et C_3 dépendant des coefficients du modèle SPM.

Pour l'inversion, Hajnsek utilise la matrice **T** issue du modèle de X-Bragg décrit ci-dessus et détermine $H/A/\alpha$. L'utilisation d'une lookup table de l'angle α en fonction de l'entropie permet d'obtenir ε et β_1 (figure 4.5 du chapitre 4).

Domaine de validité

Ce modèle est valide pour

$$\begin{array}{rl} \text{la bande : L} & 10\,^\circ < \theta < 70\,^\circ \\ ks < 1 & 4\% < m_v < 35\% \end{array} \tag{3.14}$$

Ce modèle est novateur car il est le premier à utiliser les paramètres polarimétriques mais la rotation de la matrice **T** permettant d'insérer une dépolarisation croisée n'a pas d'explication physique.

Dans l'étude effectuée dans le chapitre 4, les modèles précédents sont démontrés inadaptés aux sols périodiques. Le comportement de α_1 est moins affecté par les propriétés électromagnétiques de ce genre de sol. Dans le paragraphe suivant, un nouveau modèle d'inversion basé sur ce paramètre est élaboré [Allain(2004)] [Daniel(2008)].

3.2 Nouvelle méthode d'inversion d'humidité des sols

3.2.1 Etude théorique des paramètres polarimétriques

3.2.1.1 Définition de α_1

L'angle α_1 indique le type de mécanisme de rétrodiffusion associé au premier vecteur propre donc au mécanisme prépondérant. Une valeur de α_1 inférieure à 45 ° correspond à la réponse électromagnétique d'une surface. Dans le cas d'une symétrie de réflexion, l'expression analytique du premier vecteur propre de la matrice de covariance est définie par [Van-Zyl(1992)] :

$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{2\left(\left(\sigma_{hhhh} - \sigma_{vvvv} + \sqrt{\Delta}\right)^2 + 4|\rho|^2\right)}} \begin{bmatrix} 2\sigma_{hhvv} + \left(\sigma_{hhhh} - \sigma_{vvvv} + \sqrt{\Delta}\right) \\ 2\sigma_{hhvv} - \left(\sigma_{hhhh} - \sigma_{vvvv} + \sqrt{\Delta}\right) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

avec $\Delta = \left(\sigma_{hhhh} - \sigma_{vvvv}\right)^2 + 4|\rho|^2$ et $\rho = \sigma_{hhvv}$.

L'angle α_1 est alors caractérisé par [Allain(2003)]

$$\alpha_1 = \operatorname{atan}\left(\frac{2\sigma_{hhvv} - \left(\sigma_{hhhh} - \sigma_{vvvv} + \sqrt{\Delta}\right)}{2\sigma_{hhvv} + \left(\sigma_{hhhh} - \sigma_{vvvv} + \sqrt{\Delta}\right)}\right). \tag{3.16}$$

Sachant que la condition d'orthogonalité est supposée entre les différents vecteurs propres, nous obtenons [Allain(2004)]

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 90\ ^\circ. \tag{3.17}$$

Ce paramètre α_1 est mieux que le paramètre α qui peut être affecté par les mécanismes liés aux valeurs propres λ_2 et λ_3.

3.2.1.2 Comportement des paramètres polarimétriques

Dans cette étude comportementale, le modèle IEM défini dans le chapitre 2, est utilisé pour déterminer théoriquement la matrice de covariance $\mathbf{C}$ et certains paramètres polarimétriques définis dans la partie 2-2.1.

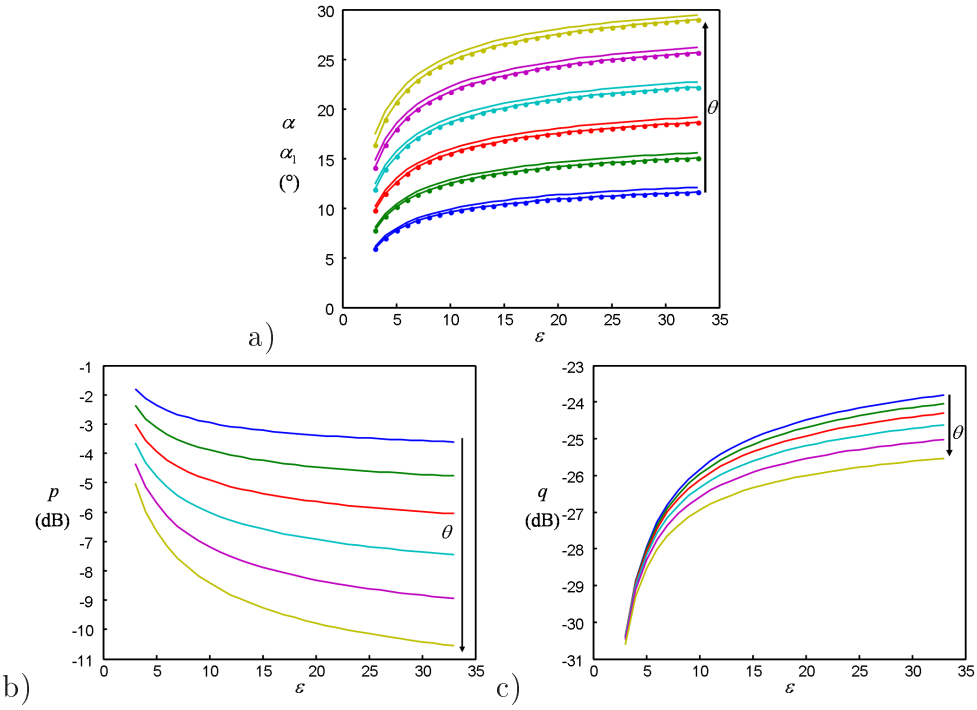


FIG. 3.2 – a- α et α_1, b- $p = \frac{\sigma_{hhhh}}{\sigma_{vvvv}}$, c- $q = \frac{\sigma_{hvhv}}{\sigma_{vvvv}}$: en fonction de la constante diélectrique ($\varepsilon = [3 : 33] \Rightarrow m_v = [3 : 46]\%$) pour différents angle d'incidence (de 30 $^\circ$ à 55 $^\circ$) avec $ks = 0.2$ et $kl_c = 2$

La figure 3.2-a représente les angles α_1 et α en fonction de la permittivité du sol pour différents angles d'incidence, pour un sol défini avec une rugosité $ks = 0.2$, $kl_c = 2$ et une fonction d'autocorrélation exponentielle. Dans le cas de cette surface, les angles α et α_1 sont quasiment identiques ce qui implique que λ_2 est nul donc seul le premier mécanisme est présent et les paramètres $SERD$ et $SDERD$ sont égaux à 1. Les valeurs de $DERD$ ne signifient rien puisqu'il est représentatif du rapport entre les mécanismes de double rebond et du volume qui sont nuls. L'entropie tend également à être nulle indiquant le caractère déterministe d'une surface peu rugueuse.

Les figures 3.2-b et -c représentent les rapports co-polarisé ($p = \frac{\sigma_{hhhh}}{\sigma_{vvvv}}$) et en polarisation croisée ($q = \frac{\sigma_{hvhv}}{\sigma_{vvvv}}$). Le paramètre q est très faible et augmente avec l'humidité, tandis que le paramètre p diminue avec la constante diélectrique.

Tous ces paramètres utilisés dans les différentes méthodes d'inversion classiques montrent leur dépendance au taux d'humidité.

Pour un sol plus rugueux ou de fréquence d'émission importante, des ambiguïtés peuvent apparaître. En effet, pour des caractéristiques de surface correspondant aux limites de validité du modèle IEM, le comportement de α_1 n'est plus monotone comme le montre la figure 3.3. Sur cette figure, les sols sont modélisés pour un angle d'incidence de 45 °, une fréquence de 1.3 GHz, une constante diélectrique variant de 5 à 35, un écart type des hauteurs variant de 0.36 cm à 8.44 cm et une longueur de corrélation de 10 cm avec une fonction d'autocorrélation exponentielle.

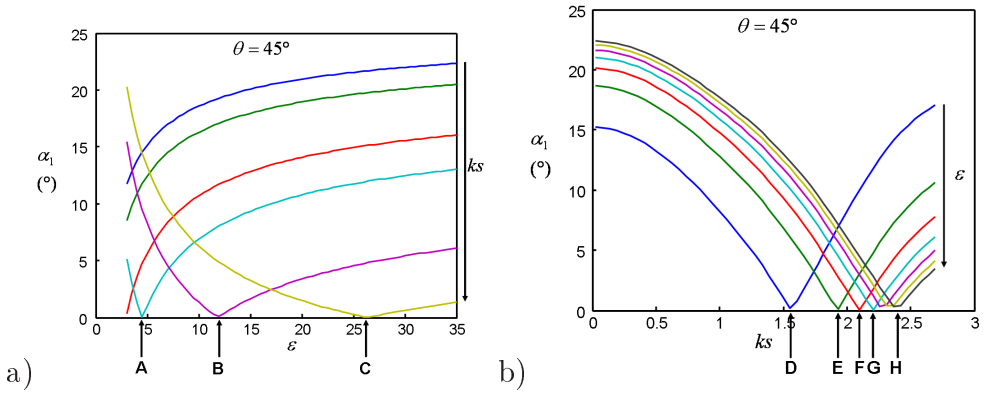


FIG. 3.3 – Ambiguïté de α_1 en fonction de a- ε avec $ks = [0.1, 0.6, 1.2, 1.5, 2, 2.3]$ b- ks avec $\varepsilon = [5 : 5 : 35]$ pour $\theta = 45$ °

Pour les même caractéristiques géométriques de la surface, une même valeur de α_1 a deux valeurs différentes d'humidité. Cette particularité entraîne un comportement ambiguë de α_1 caractérisé par le point de rebroussement illustré sur la figure 3.3. Sur la figure 3.3-b, cette même constatation peut être faite, plus le sol est rugueux et sec plus le domaine de validité du modèle est limité. En effet, la partie à droite du point de rebroussement pour la figure 3.3-b et la partie de gauche de la figure 3.3-a sont les zones limites de validité de l'IEM pour cette configuration particulière. Le changement de comportement polarimétrique est indiqué sur la figure 3.3-a-b par des flèches.

Cette limite s'observe également sur les courbes de l'angle α pour lequel la valeur devient supérieure à 45 ° (figure 3.4). Le mécanisme secondaire devient plus important cela signifie que le mécanisme de double rebond devient plus important que le mécanisme de diffusion simple. Il est à noter que dans notre étude, ces problèmes d'ambiguïté ne se posent pas du fait des faibles valeurs de ks en bande L. Il semble toutefois nécessaire dans un cas de figure différent, de bien prendre en compte des limitations du modèle avant de l'utiliser pour estimer l'humidité des sols surtout lorsque la bande de fréquence est supérieure à la bande L et donc que ks est élevé.

Afin de poser des critères d'utilisation, la première étape est d'analyser ce comportement ambiguë.

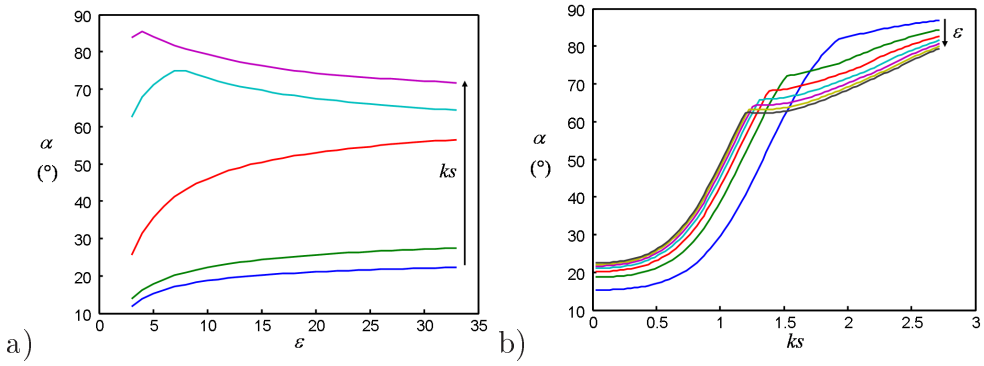


FIG. 3.4 – α en fonction de a- ε avec $ks = [0.1, 0.6, 1.2, 1.5, 2, 2.3]$ b- ks avec $\varepsilon = [5 : 5 : 35]$ pour $\theta = 45\ ^{\circ}$

Prenons le cas simplifié de la matrice de diffusion possédant des éléments croisés nuls [Ferro-Famil(2000)]. Le vecteur propre associé à la valeur propre non nulle est donnée par :

$$v = \frac{1}{\sqrt{|S_{hh}|^2 + |S_{vv}|^2}} \begin{bmatrix} S_{hh} + S_{vv} \\ S_{hh} - S_{vv} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

Ainsi, l'angle α correspondant est déterminé par

$$\alpha = \text{atan} \sqrt{\frac{|S_{hh} - S_{vv}|^2}{|S_{hh} + S_{vv}|^2}} \tag{3.19}$$

Avec cette simplification de l'angle α, il est plus facile d'identifier les conditions par lesquelles le mécanisme correspond à une diffusion par une surface. De plus, le paramètre normalisé Σ défini par

$$\Sigma = \frac{\sigma_{hhhh} - \sigma_{vvvv}}{\sigma_{hhhh} + \sigma_{vvvv}} \tag{3.20}$$

est observé en fonction de la constante diélectrique ou en fonction de la rugosité ks sur les figures 3.5-a et -b respectivement.

En reprenant les flèches de la figure 3.3, il est observé que la valeur nulle de Σ correspond aux changements de comportement de α_1. Dans ce cas, les coefficients de rétrodiffusion en co-polarisation sont identiques.

D'après ces remarques, trois critères pour définir la diffusion de surface sont définis :

– **Première condition**

$$\begin{aligned} \tan\alpha_1 &< 1 \\ |S_{hh} - S_{vv}|^2 &< |S_{hh} + S_{vv}|^2 \\ \Re(S_{hh}S_{vv}^*) &> 0 \end{aligned} \tag{3.21}$$

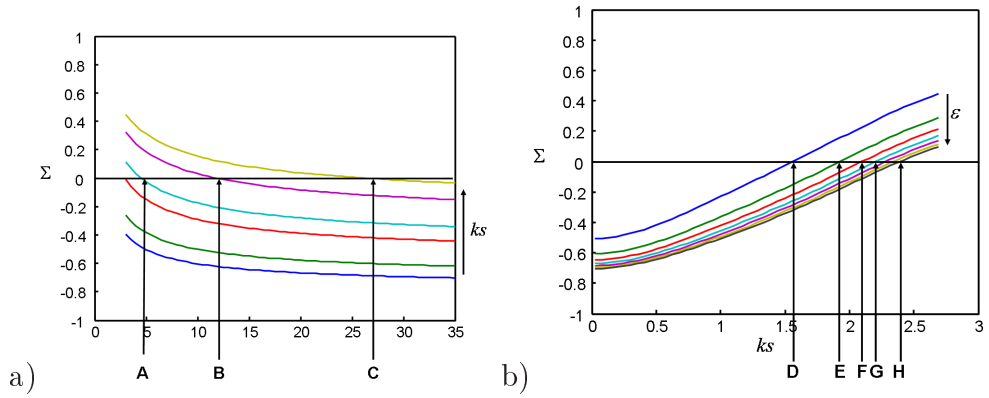


FIG. 3.5 – Σ en fonction de a- ε avec $ks = [0.1, 0.6, 1.2, 1.5, 2, 2.3]$ b- ks avec $\varepsilon = [5 : 5 : 35]$ pour $\theta = 45\ ^\circ$

$\Re(S_{hh}S_{vv}^*) > 0$ implique que S_{hh} et S_{vv} ont le même signe.

– **Seconde condition**

Cette seconde condition porte sur la phase des deux premiers éléments du vecteur propre c'est-à-dire δ_1.

$$\delta_1 = \arg\left(\frac{S_{hh} - S_{vv}}{S_{hh} + S_{vv}}\right) \tag{3.22}$$

$$\begin{aligned} \delta_1 < 0 \quad &\Rightarrow \quad |S_{vv}| > |S_{hh}| \\ \delta_1 > 0 \quad &\Rightarrow \quad |S_{vv}| < |S_{hh}| \end{aligned} \tag{3.23}$$

Elle considère que si $\delta_1 = 0$ alors $|S_{vv}| < |S_{hh}|$ [Cloude(2005)]. Par conséquent,

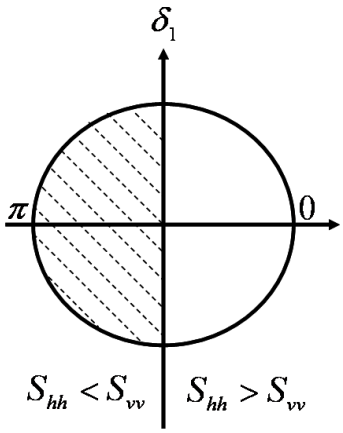


FIG. 3.6 – Domaine de validité de δ_1

comme la réponse d'un sol implique que $|S_{vv}| > |S_{hh}|$, il est nécessaire que $|\delta_1| > 90\ ^\circ$ comme le montre la figure 3.6

– **Troisième condition**

Cette troisième condition est due au modèle IEM quand une fonction d'autocorrélation exponentielle est utilisée pour décrire la rugosité. D'après [Fung(1994)],

$$\frac{kskl_c}{\sqrt{\varepsilon}} \leq 1.2 \tag{3.24}$$

Choix du modèle

Les coefficients de rétrodiffusion et les paramètres polarimétriques simulés avec le modèle IEM sont déterminés pour une rugosité fixée arbitrairement ($ks = 0.2$ et $kl_c = 2$). Sur la figure 3.7-a, différentes réponses de α_1 sont comparées pour différentes rugosités mesurées sur le site d'Alling (trait continu : rugosité quasiment lisse($ks = 0.1$ et $kl_c = 1$), trait pointillé : cas où la longueur de corrélation est la plus petite ($ks = 0.2$ et $kl_c = 2$), trait discontinu : cas où la rugosité est la rugosité moyenne mesurée sur Alling ($ks = 0.2$ et $kl_c = 3$)). Les trois réponses de α_1

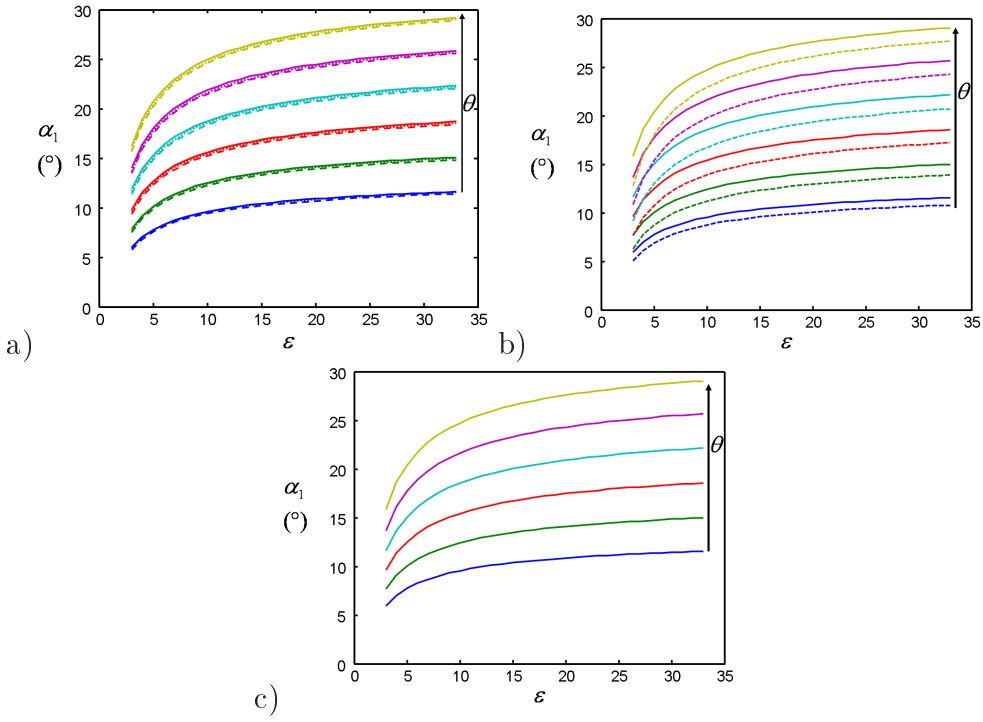


FIG. 3.7 – Effet de la rugosité sur le paramètre α_1 a- trait continu : $ks = 0.1$ et $kl_c = 1$, trait pointillé : $ks = 0.2$ et $kl_c = 2$, trait discontinu : $ks = 0.2$ et $kl_c = 3$, b- trait continu : $ks = 0.2$ et $kl_c = 2$, trait discontinu : $ks = 0.5$ et $kl_c = 3$, c- trait continu : $ks = 0.2$ et $kl_c = 2$ pour $\theta = 45$ °

sont confondues quelque soit l'angle d'incidence. L'influence de la rugosité sur ce paramètre polarimétrique est très faible sur la gamme de valeurs mesurées sur les champs nus (tableau 1.5). Ainsi, les valeurs de rugosité $ks = 0.2$ et $kl_c = 2$ seront utilisées par la suite. Il existe toutefois deux champs agricoles sur le site d'Alling qui présentent des valeurs de rugosité particulières. Pour le champ présentant une

rugosité $ks = 0.5$ et $kl_c = 3$, le paramètre α_1 simulé avec l'IEM est comparé à celui obtenu avec la rugosité fixée (figure 3.7-b). Des disparités apparaissent essentiellement pour un angle d'incidence élevé. En effet, l'effet de la rugosité augmente avec l'angle d'incidence. Cette comparaison montre une limitation à l'utilisation de α_1 mais semble peu fréquent dans la nature. De plus, quelque soit la rugosité choisie, son effet sera neutralisé avec la calibration expliquée dans la section 3.2.3.

La réponse de α_1 pour un angle d'incidence faible possède une dynamique faible par comparaison à un angle d'incidence élevé surtout pour une constante diélectrique supérieure à 15 comme indiqué sur la figure 3.7-c. Une constante diélectrique de 15 équivaut à un taux d'humidité m_v de 30%, soit un sol humide. Le but de l'estimation de l'humidité du sol est de classer les sols par catégorie : très sec, sec, humide, très humide... Ainsi, malgré la faible dynamique existant pour une constante diélectrique élevée à un angle d'incidence faible, le sol sera considéré humide.

Cette étude théorique a mis en avant la faible dépendance de α_1 déterminé avec le modèle IEM, à la rugosité et sa sensibilité au taux d'humidité montrant ainsi l'intérêt de ce paramètre. Une étude de ce paramètre sur les données SAR permet de confirmer ces remarques.

3.2.2 Analyse des paramètres polarimétriques sur les données SAR

3.2.2.1 Étude des paramètres polarimétriques utilisés dans les modèles classiques d'inversion

Dans ce paragraphe, les données des champs nus sur Alling et sur Agrisar sont utilisées pour l'étude des paramètres polarimétriques nécessaires aux méthodes d'inversion.

– **Analyse des paramètres polarimétriques sur le site d'Alling**

La figure 3.8 représente la moyenne et l'écart type des valeurs des paramètres de l'entropie H, l'angle α, le rapport co-polarisé p, le rapport en polarisation croisée q et l'angle α_1 sur les 21 champs nus d'Alling en mars en fonction des mesures terrain de la constante diélectrique. Dans cette première analyse, les champs ne sont pas différenciés par rapport à leur angle d'incidence car ces angles varient de 43 à 56 $^\circ$ et il était difficile de les représenter. A cette intervalle, l'effet angulaire de la rugosité isotrope est maximale.

L'entropie et l'angle α ont des valeurs très élevées à la limite des conditions d'utilisation de la méthode d'Hajnsek [Hajnsek(2003)]. En effet, l'estimation est possible si l'entropie est inférieure ou égale à 0.5 et que l'angle α est inférieur ou égal à 45 $^\circ$.
Le rapport en polarisation croisée est également élevé proche de sa limite de -11 dB. Ainsi, les modèles de Oh seront difficiles à utiliser car ces champs possèdent peu de points valides.

L'angle α_1 reste inférieur à 45 $^\circ$ caractéristique d'une réponse électromagnétique d'une surface. La figure 3.8-e montre l'influence de la constante diélectrique sur ce

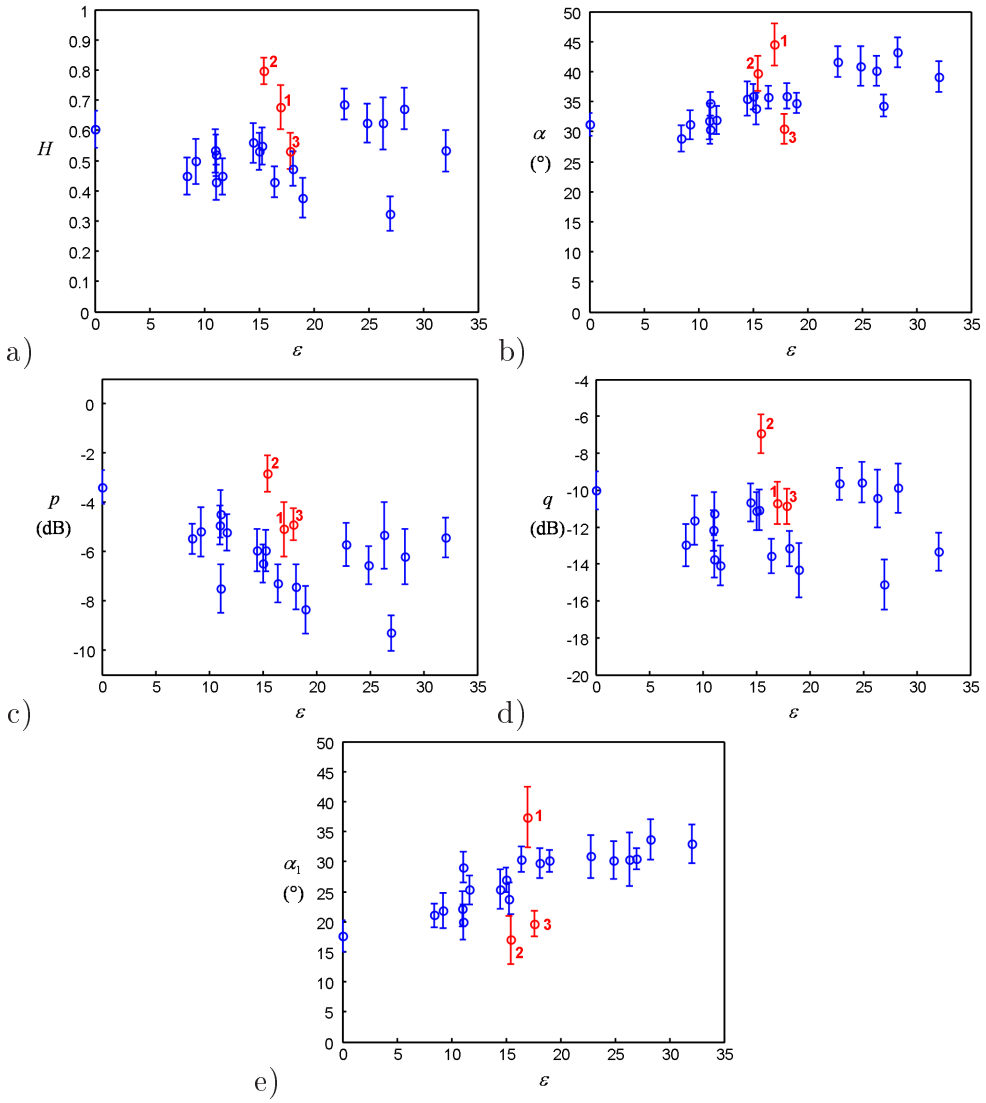


FIG. 3.8 – Paramètres polarimétriques sur les champs nus d'Alling en mars : a-H, b-α, c-p, d-q, e-α_1 en fonction de la constante diélectrique

paramètre. En effet, α_1 augmente avec la permittivité du sol. Toutefois, trois champs ne suivent pas cette tendance. Le champ 1 est le champ numéroté 653 où aucune information sur la rugosité n'est disponible. Le champ 2 numéroté 682, est très rugueux ($ks = 0.7$ et $kl_c = 3$) ce qui explique sa faible valeur en α_1 comme simulé sur la figure 3.7-b. Le troisième champ numéroté 265, a des mesures terrain hétérogènes, la constante diélectrique variant de 12 à 21 (soit un $m_v = [22 : 36]\%$).

Sur le site d'Alling, l'angle α_1 semble le plus pertinent pour estimer l'humidité des sols que les autres méthodes classiques qui sont limitées par le nombre de points valides. De plus, α_1 est un paramètre qui ne dépend pas des autres mécanismes de diffusion.

– **Analyse des paramètres polarimétriques sur le site de Görmin**

Durant la campagne d'AgriSAR qui a commencé en avril peu de champs nus sont présents. Seuls les champs 102 et 460 sont nus du 19 avril au 24 mai et jusqu'au 7 juin pour le champ 222. Ainsi, treize champs nus sont identifiés sur toute la campagne d'AgriSAR. Par ailleurs, le champ 460 a une réponse électromagnétique non homogène le 19 avril (qui ne peut être expliquée par manque d'information terrain), ce champ est divisé en deux parties représentées sur la figure 3.9 par les carrés rouges et bleus. Tous ces champs ont des angles d'incidence constants pour les différentes dates de vol SAR. Les champs 460 et 102 sont situés à une distance maximale de la fauchée et le champ 222 à une distance minimale. Ainsi, les angles d'incidence du champ 222 et ceux des champs 460 et 102 sont éloignés comme le montre la figure 1.23.

La figure 3.9 représente donc les paramètres polarimétriques de ces champs en fonction des mesures terrain du taux d'humidité m_v.

Comme pour les données d'Alling, l'entropie possède des valeurs limites pour l'utilisation de la méthode d'Hajnsek. L'angle α ne semble pas très significatif dans le sens où l'on observe peu l'influence de l'humidité sur ce paramètre. De même, le rapport en polarisation croisée est également élevé proche de sa valeur limite pour les champs nus.

Pour les données d'AgriSAR, l'angle α_1 reste inférieur à 45 $^\circ$ et n'a pas un comportement aussi sensible au taux d'humidité que sur les données d'Alling (figure 3.9-e). Cette anomalie ne peut s'expliquer par les mesures de rugosité puisque des problèmes ont eu lieu lors des mesures terrain. Toutefois, elle sera corrigée automatiquement par la suite. Par ailleurs, l'influence de l'angle d'incidence peut être observée sur cette figure. En effet, les réponses du champ 222 sont plus faibles que les réponses des deux autres champs. Ce comportement est le même que celui observé dans la partie théorique sur la figure 3.2-a de α_1 calculé avec le modèle IEM en fonction de la constante diélectrique et pour différents angles d'incidence.

Sur les deux campagnes de mesures, l'utilisation de l'angle α_1 semble pertinent pour l'inversion du fait de son comportement en fonction de l'humidité du sol. Une méthode simple basée sur l'utilisation conjointe de ce paramètre et du modèle IEM est par conséquent élaborée pour estimer l'humidité des sols.

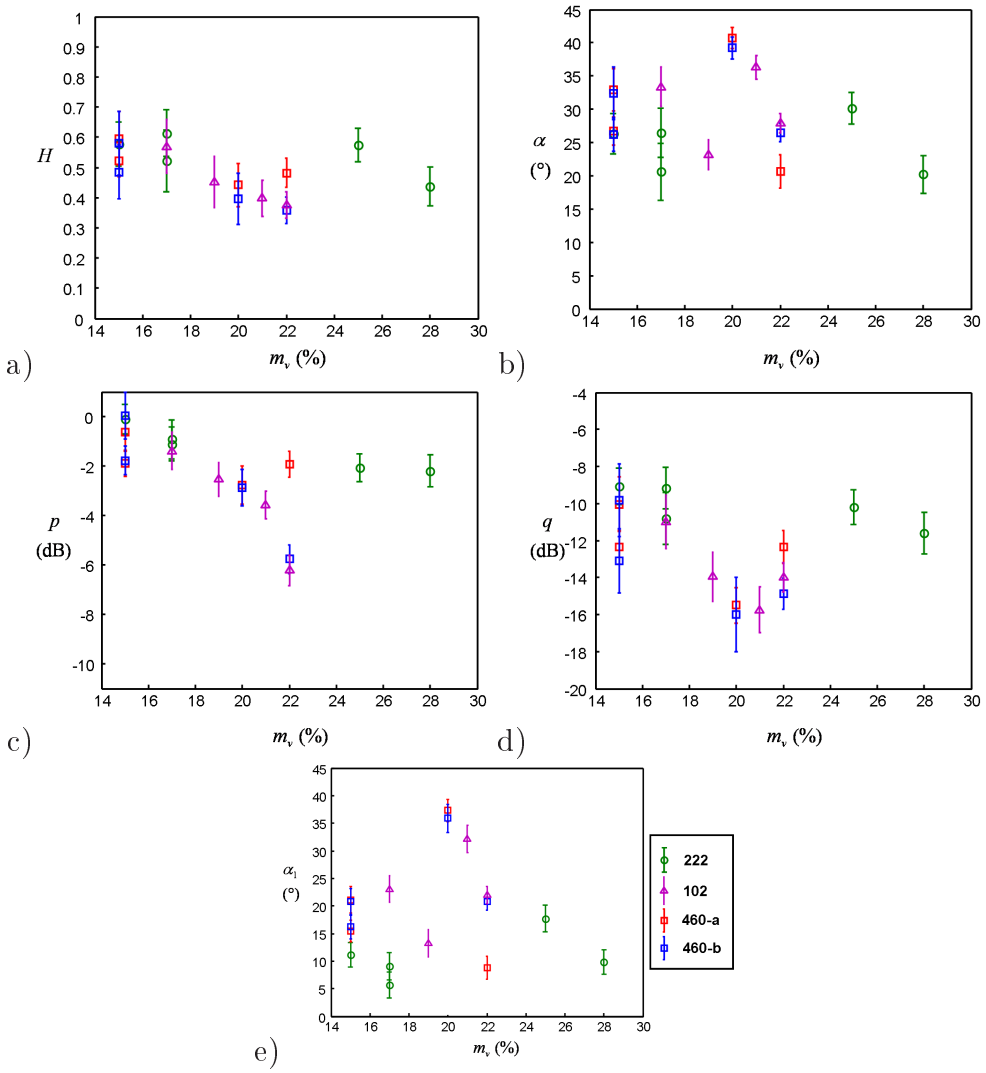


FIG. 3.9 – Paramètres polarimétriques sur les champs nus d'Agrisar : a-H, b-α, c-p, d-q, e-α_1 en fonction du taux d'humidité m_v en %

3.2.2.2 Utilisation de α_1 pour l'inversion

Dans un premier temps, il est important de comparer le comportement de l'angle α_1 calculé avec l'IEM et celui mesuré. En effet, pour une constante diélectrique réelle, le modèle IEM donne une partie imaginaire nulle pour l'élément $C_{13} = \sigma_{hhvv}$ de la matrice de covariance **C**. Donc pour déterminer l'angle α_1 des données, il est

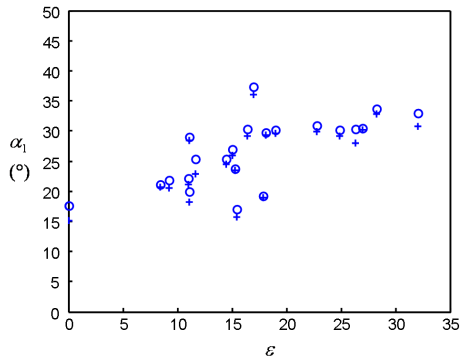


FIG. 3.10 – Moyennes des angles α_1 avec $\Im(\sigma_{hhvv})$ ('o') et sans $\Im(\sigma_{hhvv})$ ('+'), sur les champs nus d' Alling en mars fonction de la constante diélectrique

nécessaire de le calculer sans la partie imaginaire de $C_{13} = \sigma_{hhvv}$. Ainsi, sur la figure 3.10 est représentée la moyenne des angles α_1 déterminée avec et sans la partie imaginaire de C_{13}. Les valeurs de cet angle diminuent ou restent constant sans $\Im(\sigma_{hhvv})$. La tendance croissante avec le taux d'humidité reste vraie.

Sur la figure 3.11, l'angle α_1 déterminé sans la partie imaginaire de C_{13} est représenté pour les deux campagnes d'Alling et d'AgriSAR. Pour le site d'Alling

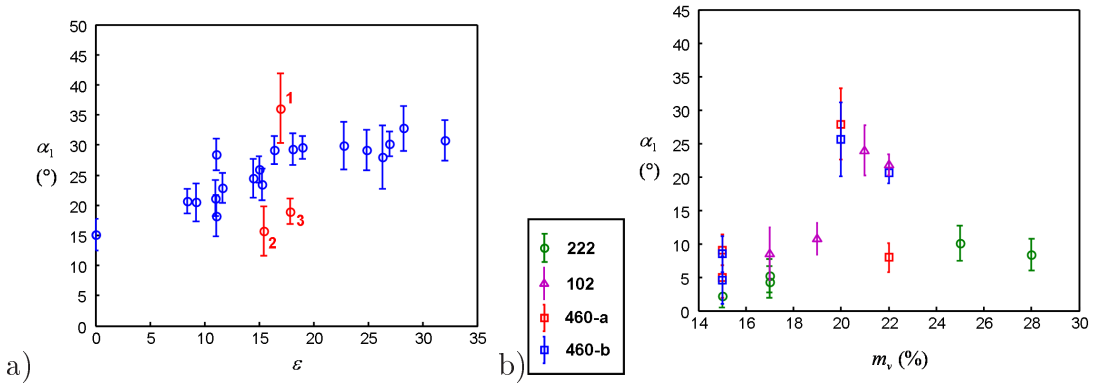


FIG. 3.11 – Moyennes de l'angle α_1 sans la partie imaginaire de σ_{hhvv} a- sur les champs nus d' Alling b- sur ceux d'AgriSAR en fonction de la constante diélectrique et du taux d'humidité

la tendance reste quasiment la même à quelques degrés près. Par contre, pour le site de Görmin, certaines valeurs diminuent d'une dizaine de degrés. Par ailleurs, l'augmentation de α_1 avec la constante diélectrique pour les champs à fort angle d'incidence, est supérieure à l'augmentation de α_1 pour un angle d'incidence plus

faible. De plus, son comportement sur le site de Görmin en fonction du taux d'humidité est meilleur. On peut considérer qu'en enlevant la partie imaginaire de C_{13} des données cela revient à supprimer une composante liée par exemple au bruit du système.

3.2.3 Méthode d'inversion α_1 semi-empirique

Dans le paragraphe précédent, il a été remarqué que la partie imaginaire en σ_{hhvv} du modèle est nulle. Ainsi, sur la figure 3.11, l'angle α_1 des données a été déterminé sans prendre en compte cette partie imaginaire. Cet ajustement entre le modèle IEM et les données n'est pas suffisant puisque le modèle IEM n'est toujours pas adapté pour estimer l'humidité des sols agricoles. En effet, un décalage entre les données et le modèle existe et la corrélation entre les canaux horizontal et vertical du modèle est proche de 1 ce qui n'est pas le cas des données comme le montre la figure 3.12. Différentes études ont élaboré des calibrations du modèle IEM notamment basées

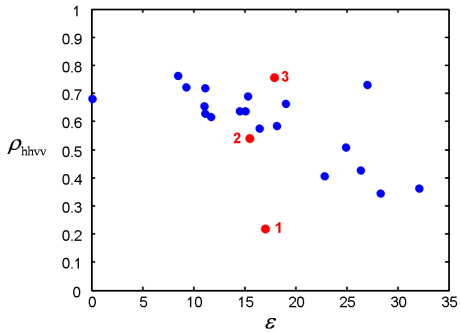


FIG. 3.12 – Coefficient de corrélation ρ_{hhvv} sur les données d'Alling en fonction de la constante diélectrique

sur le réglage de la longueur de corrélation de la surface [Baghdadi(2003)]. La méthode d'inversion étant basé sur α_1 implique une calibration du modèle basée plus particulièrement sur les canaux du modèle.

3.2.3.1 Calibration des canaux du modèle

En comparant le comportement des coefficients de rétrodiffusion co-polarisés des données et du modèle, il est à noter que la différence de puissance entre les deux canaux est beaucoup plus forte sur les données (figure 3.12). De plus, pour un sol, σ_{vvvv} est supérieur à σ_{hhhh}. De part cette remarque, nous faisons l'hypothèse arbitraire de calibrer un seul canal, le canal vertical c'est-à-dire :

$$\sigma'_{vvvv} = x\sigma_{vvvv} \qquad \text{et} \qquad \sigma'_{hhvv} = \sqrt{x}\sigma_{hhvv} \tag{3.25}$$

avec $x > 1$. Ainsi, l'angle α_1 défini par l'équation (3.16) dévient après calibration des canaux de polarisation du modèle

$$\tan\alpha'_1 = \frac{2\sqrt{x}\sigma_{hhvv} - \sigma_{hhhh} + x\sigma_{vvvv} - \sqrt{\Delta'}}{2\sqrt{x}\sigma_{hhvv} + \sigma_{hhhh} - x\sigma_{vvvv} + \sqrt{\Delta'}} = \frac{A+B}{C+D} \tag{3.26}$$

avec $\Delta' = \left(\sigma_{hhhh} - x\sigma_{vvvv}\right)^2 + 4x|\sigma_{hhvv}|^2$.

Pour faire une correction simple comme $\alpha_1' = a\alpha_1 + b$, il faut pouvoir mettre α_1' sous la forme

$$\alpha_1' = \frac{A+B}{C+D} = \frac{C}{C+D}\frac{A}{C} + \frac{B}{C+D} \tag{3.27}$$

$$\text{avec} \qquad \alpha_1 = \frac{A}{C}, \qquad a = \frac{C}{C+D}, \qquad b = \frac{B}{C+D} \tag{3.28}$$

où $A = 2\sigma_{hhvv} - \sigma_{hhhh} + \sigma_{vvvv} - \sqrt{\Delta}$ et $C = 2\sigma_{hhvv} + \sigma_{hhhh} - \sigma_{vvvv} + \sqrt{\Delta}$.

Faisons le calcul pour démontrer que (3.28) est possible :

$$\tan\alpha_1' = \frac{2\sigma_{hhvv} + 2\sigma_{hhvv}(\sqrt{x}-1) - \sigma_{hhhh} + \sigma_{vvvv} + \sigma_{vvvv}(x-1) - \sqrt{\Delta'}}{2\sigma_{hhvv} + 2\sigma_{hhvv}(\sqrt{x}-1) + \sigma_{hhhh} - \sigma_{vvvv} - \sigma_{vvvv}(x-1) + \sqrt{\Delta'}} \tag{3.29}$$

avec

$$\Delta' = \sigma_{hhhh}^2 + x^2\sigma_{vvvv}^2 - 2x\sigma_{hhhh}\sigma_{vvvv} + 4x|\sigma_{hhvv}|^2 \tag{3.30}$$

$$\begin{aligned}\Delta' &= \sigma_{hhhh}^2 + \sigma_{vvvv}^2 - 2\sigma_{hhhh}\sigma_{vvvv} + 4|\sigma_{hhvv}|^2 - 2\sigma_{hhvv}(x-1) \\ &\quad +4\sigma_{hhvv}^2(x-1) + \sigma_{vvvv}^2(x^2-1)\end{aligned} \tag{3.31}$$

donc $\Delta' = \Delta + \gamma$. Puisque $\sqrt{\Delta+\gamma} > \sqrt{\Delta}$ alors il existe un terme U pour lequel $\sqrt{\Delta+\gamma} = \sqrt{\Delta} + U$ (avec $U < \gamma$) d'où

$$\tan\alpha_1' = \frac{A + 2\sigma_{hhvv}(\sqrt{x}-1) + \sigma_{vvvv}(x-1) - U}{C + 2\sigma_{hhvv}(\sqrt{x}-1) - \sigma_{vvvv}(x-1) + U} = \frac{A+B}{C+D} \tag{3.32}$$

Par conséquent, si on part de cette hypothèse de différence de niveau entre les canaux, le paramètre α_1' se met sous la forme $a\alpha_1 + b$.

Cette hypothèse et la formule qui en découle seront utilisées par la suite pour corriger le terme α_1.

3.2.3.2 Proposition d'une correction du modèle

Le site d'Alling possède sur toute sa zone des sols nus. Ainsi, l'ajustement du modèle IEM sur les données a été faite par rapport à ce site. La figure 3.13 représente la moyenne de tous les α_1 correspondant aux sols considérés nus ($\alpha_1 \leq 40$ °) et du modèle pour toutes les permittivités diélectriques en fonction de l'angle d'incidence. Les courbes des valeurs minimales et maximales des données et des valeurs moyennes de α_1 sont représentées sur la figure 3.13-a. De même pour le modèle, les trois courbes sont aussi représentées sur la figure 3.13-b. Ces figures montrent que les comportements entre les données et le modèle sont proches mais l'écart type des valeurs est différent. L'écart qui existe entre les trois courbes des données est beaucoup plus important que celui du modèle. Il faut donc ajuster le modèle aux données.

Le but de la correction est donc de dilater les courbes afin que les valeurs de α_1 du modèle correspondent à la même plage de valeurs que celle des données. La

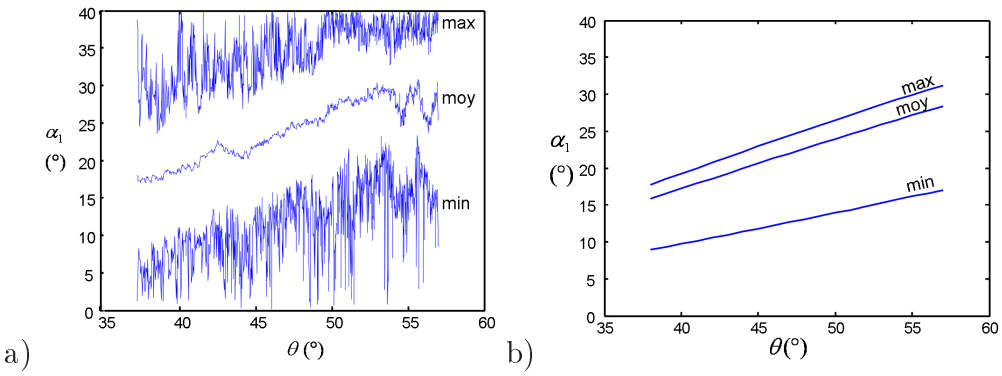


FIG. 3.13 – α_1 en fonction de l'angle d'incidence a- données b- modèle

correction de α_1 est dépendante de l'angle d'incidence et se met comme vu dans le paragraphe précédent, sous la forme linéaire suivante :

$$\alpha_{1_{correction}}(\theta) = a(\theta) * \alpha_{1_{model}}(\theta) + b(\theta) \tag{3.33}$$

Dans notre correction $\alpha_{1_{correction}}$, a et b sont définis par

$$a(\theta) = \frac{\alpha_{1_{max_{data}}}(\theta) - \alpha_{1_{min_{data}}}(\theta)}{\alpha_{1_{max_{model}}}(\theta) - \alpha_{1_{min_{model}}}(\theta)} \tag{3.34}$$

$$b(\theta) = -\text{mean}(a(\theta) * \alpha_{1_{model}}) + \text{std}(a(\theta) * \alpha_{1_{model}}) + \text{mean}(\alpha_{1_{data}}) \tag{3.35}$$

avec mean correspondant à la moyenne et std à l'écart type.

La première correction permet de dilater les courbes de α_1 du modèle et la seconde permet d'ajuster les valeurs de α_1 du modèle par rapport aux données.

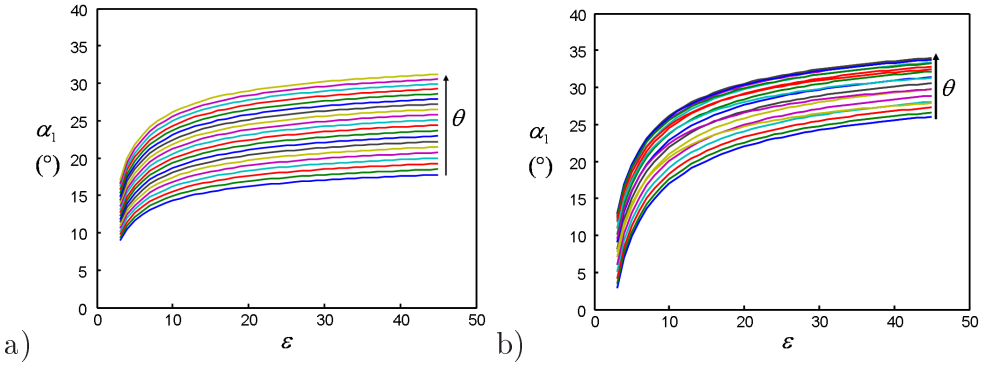


FIG. 3.14 – Courbes de α_1 du modèle, a- avant et b- après correction

Sur le site d'Alling, a ajuste le modèle aux données par une régression d'ordre 2 définie comme suit

$$a(\theta) = 22 * 10^{-4}\theta^2 - 27.09 * 10^{-2}\theta + 9.7731 \tag{3.36}$$

et b est déterminé avec $\text{mean}(\alpha_{1_{data}})$ défini pour le site d'Alling par

$$\text{mean}(\alpha_{1_{data}}) = -52.79 * 10^{-4}\theta^3 + 68.48 * 10^{-2}\theta^2 - 28.66\theta + 405.6 \tag{3.37}$$

avec θ en degré.

La figure 3.14-a représente les valeurs de α_1 du modèle sans correction. La correction $a(\theta) * \alpha_{1_{model}}$ permet de dilater les courbes de α_1 du modèle. Suite à la dernière étape (3.35), les courbes de la figure 3.14-b seront les courbes qui permettront de comparer les valeurs du modèle avec les données par le biais d'une table de référence et donc d'estimer l'humidité du sol. Cette méthode de calibration nécessite d'avoir une image de référence contenant des champs ayant une large gamme de valeur de taux d'humidité.

3.2.4 Estimation de l'humidité des sols en bande L

La méthode d'inversion α_1 est décrite dans l'organigramme de la figure 3.15. Le principe consiste tout d'abord à calibrer l'angle α_1 des données en le calculant sans la partie imaginaire de σ_{hhvv}, puis de calibrer le modèle IEM défini avec une rugosité fixe de $ks = 0.2$ et $kl = 2$. Cette dernière calibration est faite afin d'ajuster les valeurs du modèle avec celles des données calibrées. Cette méthode nécessite que la zone soit couverte de champs nus afin de calibrer le modèle c'est-à-dire en déterminant $a(\theta)$ qui dépend de la diversité des données en θ. Cette méthode présente l'avantage d'être simple à utiliser et les résultats de l'inversion sont rapidement obtenus. Sur les données d'Alling, l'angle α_1 sans partie imaginaire de σ_{hhvv} est représenté sur la figure 3.16-a. avec un masque sur les zones où $\delta_1 \leq 90$ °.

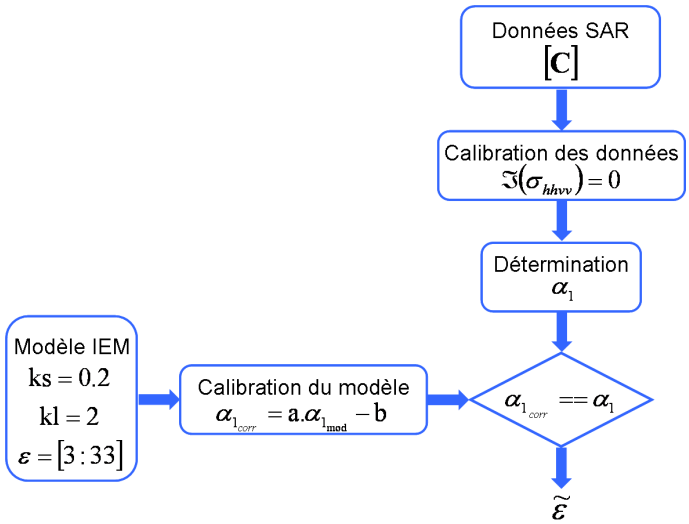


FIG. 3.15 – Organigramme de la méthode basée sur l'angle α_1

La constante diélectrique estimée par la méthode de la figure 3.15 est représentée sur la figure 3.16-b. La zone de droite de l'image apparaît plus humide que le reste ce qui s'explique par le fort taux de matière organique représenté sur la carte de la figure 1.17. Le reste de la zone est plus sèche. De plus dans cette zone de droite, l'humidité forte est aussi due à la présence de nombreux petits lacs.

Ensuite, les résultats sont validés par comparaison avec les mesures terrain. La figure 3.17-a représente l'image de l'estimation des 21 champs dont on possède les

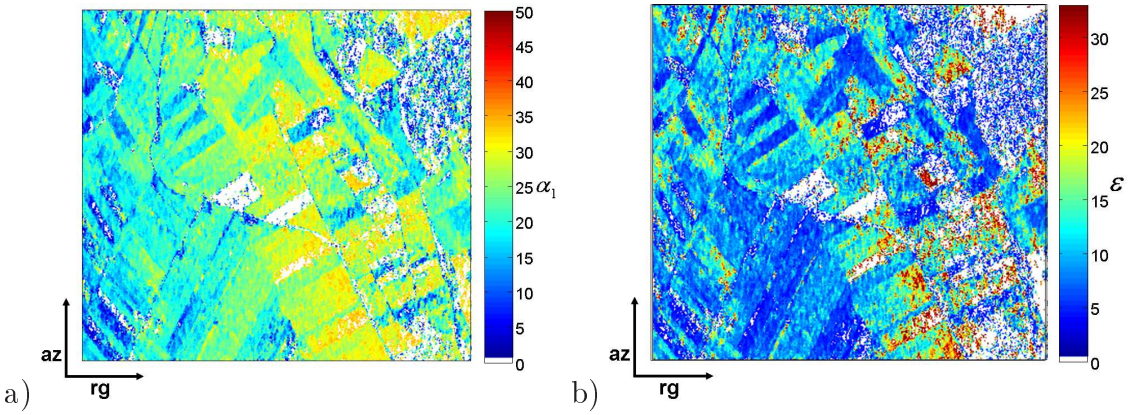


FIG. 3.16 – a-α_1 sans partie imaginaire de σ_{hhvv} b-Estimation de la constante diélectrique sur le site d'Alling

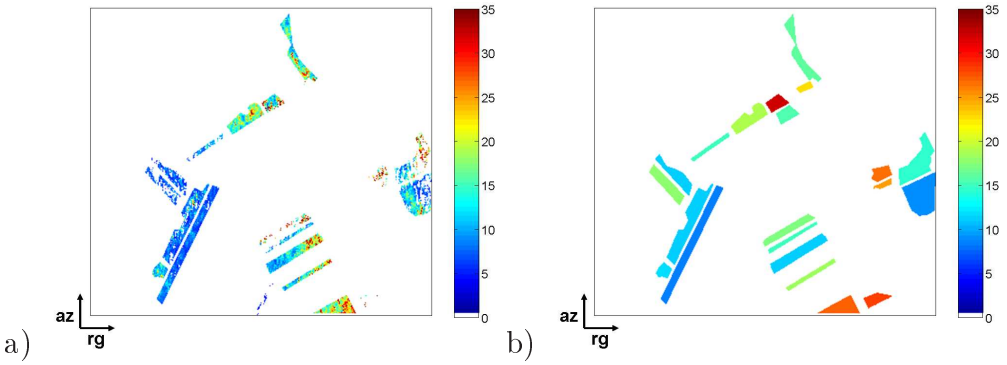


FIG. 3.17 – a- Estimation de la permittivité, b- Mesure terrain de 21 champs

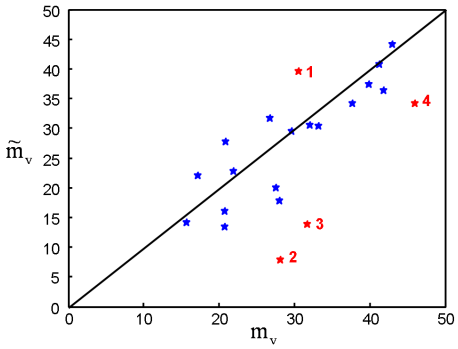


FIG. 3.18 – Comparaison entre l'estimation et les mesures terrain du taux d'humidité des 21 champs d'Alling

mesures terrain et la figure 3.17-b est représentative des mesures terrain. L'estimation est visuellement proche de la vérité terrain. Il est à noter que selon les champs, le nombre de mesures diffère et pour certains champs seulement deux mesures ont été acquises.

Sur la figure 3.18 est représentée l'estimation des constantes diélectriques en fonction des mesures terrain.

Cette méthode permet de déterminer une estimation de la constante diélectrique dont l'erreur relative est de 4 (équivalent à 5.5% pour m_v) et l'erreur absolue de 23.87% sur l'image d'Alling

$$erreur_{relative} = \frac{|\tilde{\varepsilon} - \varepsilon|}{\varepsilon} = 23.87\%. \tag{3.38}$$

Il est évident qu'il est très difficile de retrouver très précisément les valeurs d'humidité à partir seulement d'images SAR polarimétriques à cause du bruit du système, de l'hétérogénéité de l'humidité sur un champ, mais les résultats permettent au moins de classer les sols suivant différentes catégories très sec, peu humide, humide et très humide.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, les méthodes d'inversion les plus utilisées dans la littérature ont été présentées. Les paramètres polarimétriques utilisés dans ces méthodes montrent que peu de points peuvent être estimés du fait de leur limite de validité stricte.

Le paramètre polarimétrique α_1 a démontré des résultats pertinents dans son étude théorique et pratique. En effet, cet angle est fortement influencé par l'humidité des sols. Il augmente avec la constante diélectrique du sol et avec l'angle d'incidence.

Une méthode semi-empirique a été élaborée sur le site d'Alling qui consiste à calibrer le modèle et les données. La calibration des données consiste à déterminer l'angle α_1 en négligeant la partie imaginaire du coefficient σ_{hhvv} comme le modèle IEM. La calibration du modèle permet d'étendre les valeurs de ce modèle afin de les ajuster aux données. Cette seconde calibration nécessite que le site étudié soit principalement recouvert de zones sans végétation comme le site d'Alling pour que l'ajustement du modèle avec les données soit représentatives d'une grande diversité des caractéristiques du sol (pour différentes humidités possibles). Cette méthode donne des résultats probants avec une erreur relative de 24%.

L'inconvénient majeur de cette méthode vient dans la calibration du modèle puisque nécessitant une grande zone de champs nus. Par conséquent, une correction ne peut être faite sur le site d'Agrisar composé de nombreux champs recouverts de végétation. Étant donné que les données d'Agrisar ont été acquises par le même capteur, la calibration du modèle est alors considérée identique aux deux campagnes de mesure d'Alling et d'Agrisar. Cette analyse sera faite dans le chapitre 5.

Avant d'estimer l'humidité des sols d'Agrisar, il est d'abord important d'étudier deux autres types de sols qui existent sur Agrisar.

- les champs à structures périodiques (existant également sur Alling) sont étudiés dans le chapitre 4
- les champs recouverts de petites végétations sont étudiés dans le chapitre 5.

Bibliographie

[Allain(2003)] S. Allain, "Caractérisation d'un sol nu à partir de données SAR polarimétriques. Etude multi-fréquentielle et multi-résolutions", Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes, France, Décembre 2003.

[Allain(2004)] S. Allain, L. Ferro-Famil, E. Pottier, "Two novel surface model based inversion algorithms using multi-frequency polSAR data", Proceedings IGARSS'04, 2004.

[Baghdadi(2002)] N. Baghdadi, S. Gautier, C. King, "Retrieving surface roughness and soil moisture from SAR data using neural network", Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 28, no. 5, pp. 701-711, 2002.

[Baghdadi(2003)] N. Baghdadi, L. Bonnifait, C. King, A. Bourguignon, "Utilisation des images SAR pour la calibration empirique du modèle IEM dans un contexte de sols nus en zones agricoles", Revue de Télédétection, vol. 3, no. 1, pp. 1-16, 2003.

[Cloude(1999)] S. R. Cloude, "Eigenvalue parameters for surface roughness studies", Proceedings of SPIE Conference on Polarization : Measurement, Analysis and Remote Sensing II, vol. 3754, Denvers, Colorado, USA, July 1999.

[Cloude(2005)] S. R. Cloude, M. L. Williams, "The negative alpha filter : a new processing technique for polarimetric SAR interferometry", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 2, no. 2, pp. 187-191, 2005.

[Daniel(2008)] S. Daniel, S. Allain, L. Ferro-Famil, E. Pottier, "Surface parameter estimation over periodic surfaces using a time-frequency approach", Proceedings of IGARSS, Boston, USA, 2008.

[Dubois(1995-a)] P.C. Dubois, J.J. Van Zyl, T. Engman, "Measuring soil moisture with imaging radars", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 33, no. 4, pp. 915-926, 1995.

[Dubois(1995-b)] P.C. Dubois, J.J. Van Zyl, T. Engman, "Correction to Measuring soil moisture with imaging radars", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 33, no. 6, pp. 1340, 1995.

[Ferro-Famil(2000)] L. Ferro-Famil, "Télédétection multi-fréquentielle et multi-temporelle d'environnements naturels à partir de données SAR polarimétriques", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France, Décembre 2000.

[Fung(1994)] A. K. Fung, "Microwave scattering and emission models and their applications", Artech House, Norwood, MA, 1994.

[Hajnsek(2001)] I. Hajnsek, "Inversion of surface parameters using polarimetric SAR", PH. D. Dissertation, Universitat Jena, DLR Science Report, ISSN 1434-8454,2001.

[Hajnsek(2003)] I. Hajnsek, E. Pottier, S. R. Cloude, "Inversion of surface parameters from polarimetric SAR", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 4, pp. 727-744, 2003.

[Oh(1992)] Y. Oh, K. Sarabandi, F.T. Ulaby, "An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, no. 2, pp. 370-381, 1992.

[Oh(2004)] Y. Oh, "Quantitative retrieval of soil moisture content and surface roughness from multipolarized radar observations of bare soil surfaces", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, no. 3, pp. 596-601, 2004.

[Satalino(2003)] G. Satalino, G. Pasquariello, F. Mattia, "Model-based methods for soil moisture estimations from SAR data", Proceeding of IGARSS, 2003.

[Shi(1997)] J. Shi, J. Wang, A. Y. Hsu, P. E. O'Neill, T. Engmann, "Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, no. 5, pp. 1254-1265, 1997.

[Van-Zyl(1992)] J. J. Van-Zyl, "Application of Cloude's target decomposition theorem to polarimetric imaging radar", SPIE, vol. 1748, pp. 184-212, 1992.

[Zribi(2002)] M. Zribi, O. Fafin, N. Baghdadi, N. Holah, "A new empirical model to retrieval soil moisture and roughness from radar data", Remote Sensing of Environment, vol. 84, no. 1, pp. 42-52, 2002.

Chapitre 4

Estimation de l'humidité des sols rugueux à structure périodique

Les données SAR polarimétriques en bande L sont connues pour être particulièrement bien adaptées à l'étude des propriétés physiques du sol comme la rugosité et l'humidité. Différentes analyses de données SAR polarimétriques acquises sur des zones agricoles révèlent une proportion non négligeable de champs agricoles affectés par un phénomène dit de résonance de Bragg [Wegmüller(2004)] [Cordey(2004)]. Ce phénomène est dû à une structure de champs périodiques qui influence fortement la réponse électromagnétique. L'objectif de ce chapitre est d'estimer l'humidité des sols rugueux et périodiques.

Dans une première partie, les modèles d'inversion classiques sont démontrés inadaptés pour estimer l'humidité des sols des champs agricoles à structure périodique. Ainsi, une étude du comportement électromagnétique des sols périodiques est menée par le biais d'une analyse du modèle électromagnétique élaboré dans le chapitre 2. Elle permet de comprendre le comportement inhabituel des paramètres polarimétriques utilisés dans les méthodes classiques d'inversion. Dans une deuxième partie, une étude temps-fréquence met en avant le caractère non-stationnaire des champs agricoles à structure périodique et une méthode de détection de ces zones est présentée. Finalement, une analyse polarimétrique à partir d'une décomposition temps-fréquence permet de mieux comprendre la faiblesse des méthodes classiques d'inversion et de démontrer la pertinence de la méthode basée sur le paramètre α_1 élaborée dans le chapitre 3 pour estimer l'humidité des sols à structure périodique.

4.1 Problématique

Dans cette partie, la problématique liée à l'estimation de l'humidité des sols agricoles à structure périodique est présentée. Dans un premier temps, le comportement des paramètres polarimétriques utilisés dans les modèles classiques est analysé et soulève des anomalies sur ces champs périodiques. Dans un second temps, le comportement électromagnétique de ces champs est tout d'abord étudié à l'aide du modèle de diffusion de surface périodique développé dans le chapitre 2, il est ensuite analysé sur les données SAR d'Alling.

4.1.1 Méthodes d'inversion classiques

Les paramètres polarimétriques utilisés par les méthodes d'inversion classiques ont un comportement inhabituel sur les champs agricoles à structure périodique. Ces comportements sont mis en avant dans cette partie. La zone d'étude est sélectionnée sur la figure 4.1 représentant le *Span* du site d'Alling en mars. Les mesures terrain à

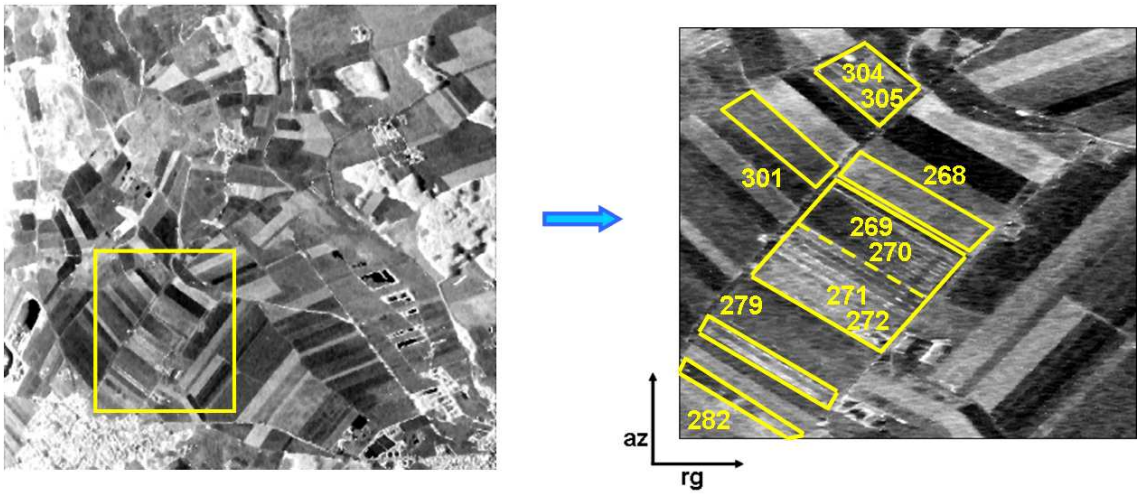


FIG. 4.1 – *Span* du site d'Alling en mars représentant les champs étudiés dans ce chapitre

Champs	Caractéristiques
268	champ nu labouré (Z_3)
269-270	semis d'hiver : $h_{veg} = 4$ cm, recouvert à 30%
271-272	pâturage : $h_{veg} = 10$ cm, recouvert à 95%
279	semis d'hiver (Z_2) : $h_{veg} = 15$ cm, recouvert à 80%
282	pâturage
301	pâturage (Z_4)) : $h_{veg} = 10$ cm, recouvert à 60%
304-305	supposé nu (Z_4))

TAB. 4.1 – Champs de référence

disposition des champs étudiés dans ce chapitre et sélectionnés sur la figure 4.1 sont détaillées dans le tableau 4.1. Concernant, le champ 304-305, aucune information terrain n'est disponible. Toutefois, d'après l'image optique acquise sur cette zone à la même période [Herold(2000)], ce champ apparaît nu. De plus, d'après la carte d'occupation des sols de juillet figure 1.15-e, il est recouvert de blé. Il sera donc considéré nu en mars pour cette étude.

4.1.1.1 Méthode de Oh

Le modèle de Oh décrit dans le chapitre 3 [Oh(2004)], utilise pour l'inversion les rapports co-polarisé et en polarisation croisée respectivement $p = \frac{\sigma_{hhhh}}{\sigma_{vvvv}}$ et $q = \frac{\sigma_{hvhv}}{\sigma_{vvvv}}$.

Ces paramètres représentés sur la figure 4.2 sont ceux de la zone sélectionnée sur le site d'Alling en mars (figure 4.1), représentant des champs périodiques (Z_1 et Z_2 sont deux champs supposés à structure périodique) et isotropes (Z_3 et Z_4).

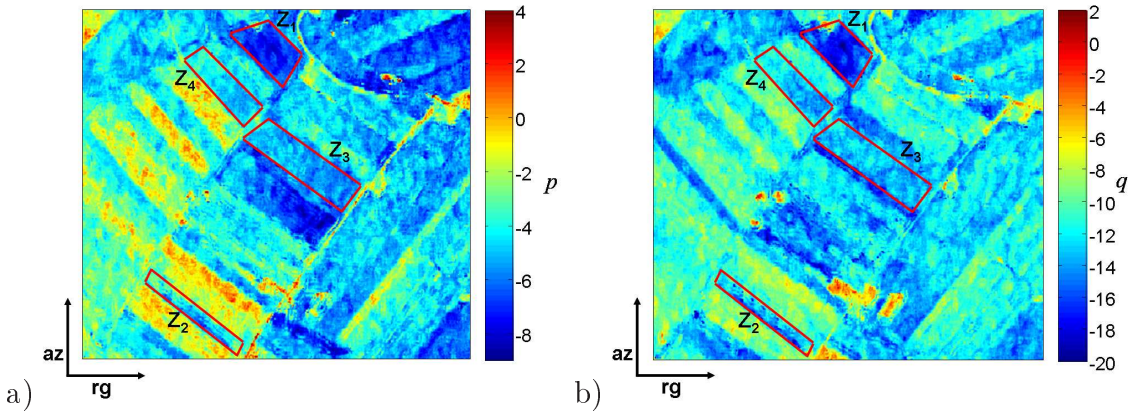


FIG. 4.2 – a- p, b- q du site d'Alling en mars

La figure 4.3 représente les paramètres p et q du modèle de Oh pour un angle d'incidence de 50 ° équivalent à celui de la zone sélectionnée. Ainsi, selon ces courbes, il est possible de connaître la tendance de l'estimation des quatre champs sélectionnés.

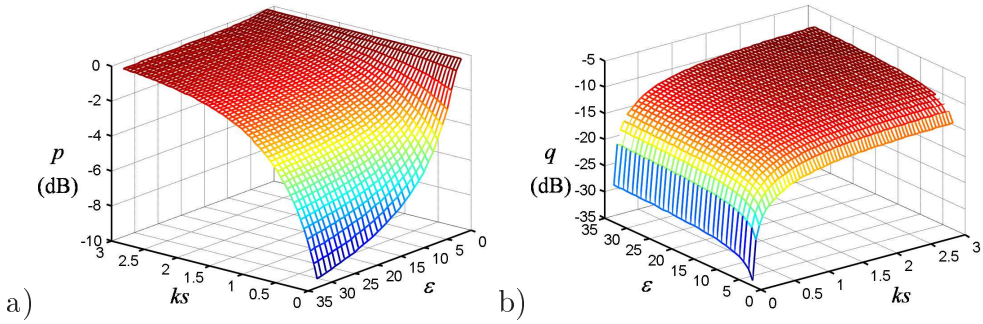


FIG. 4.3 – a- p, b- q du modèle de Oh pour un angle d'incidence de 50 °

Les champs Z_3 et Z_4 ont un p supérieur à -4 dB et un q proche de -14 dB et sont donc considérés comme modérément humide et rugueux comme tous les champs de cette zone d'après les mesures terrain d'Alling (chapitre 1). Par contre, les champs à structure périodique Z_1 et Z_2 présentent des caractéristiques polarimétriques différentes $p < -4$ dB et $q < -18$ dB et sont ainsi considérés par cette méthode d'inversion comme très humide et très lisse. Les paramètres p et surtout q sont trop faibles sur les champs à structure périodique. Le modèle de Oh basé sur ces deux paramètres semble par conséquent inadapté pour l'estimation des paramètres de surface sur ce type de champs agricoles.

4.1.1.2 Méthode X-Bragg

La troisième méthode présentée dans le chapitre 3 [Hajnsek(2003)], utilise les paramètres polarimétriques l'entropie H et l'angle α. Ces paramètres sont déterminés sur le site d'Alling et représentés sur la figure 4.4. Comme précédemment, grâce aux courbes du modèle de l'angle α en fonction de l'entropie (figure 4.5), il est possible de connaître l'estimation des quatre champs sélectionnés.

Les angles α des quatre champs sélectionnés sont quasiment identiques et proches de 30 °. Par contre, l'entropie est très différente entre les champs périodiques Z_1 et Z_2 et les autres Z_3 et Z_4. En effet, H tend à être nul sur les champs périodiques (surtout pour Z_1) alors que les deux autres champs ont une entropie proche de 0.5. L'estimation des champs périodiques sera erronée. En effet, comme l'estimation de Oh les champs sont considérés lisses ce qui n'est pas le cas.

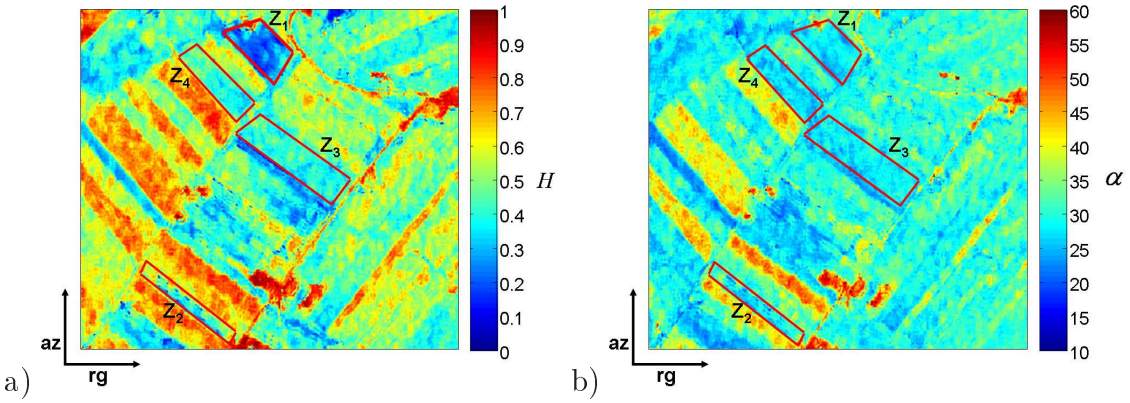


FIG. 4.4 – a- Entropie, b- angle α utilisant le modèle de X-Bragg

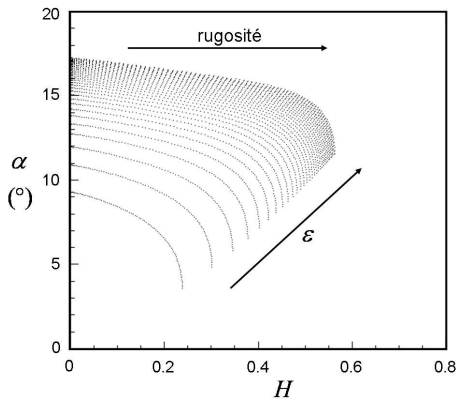


FIG. 4.5 – angle α en fonction de l'entropie pour une constante diélectrique variant de 3 à 33 (soit $m_v = [3 : 46]\%$) et une rugosité représentée par une variation du paramètre β_1 de 0 à 90 ° [Hajnsek(2003)]

Ces différentes observations des paramètres polarimétriques p, q, α et H, permettent de déduire que les paramètres en polarisation croisée et l'entropie rendent

l'estimation erronée par ses deux méthodes. Par conséquent, ces deux méthodes classiques d'estimation de l'humidité du sol ne sont pas adaptées pour les sols rugueux et périodiques.

Les anomalies détectées sur q et H pour les sols à structure périodique nécessitent une étude approfondie des sols rugueux et périodiques.

4.1.2 Comportement électromagnétique des champs périodiques

Le modèle électromagnétique développé dans le chapitre 2 est utilisé dans cette partie afin d'aider à la compréhension du phénomène particulier engendré par les sols périodiques. Ensuite, une étude des données SAR est faite également pour trouver le moyen d'estimer l'humidité du sol.

4.1.2.1 En théorie

Le modèle électromagnétique de Kirchoff à approximation scalaire adapté aux sols périodiques est utilisé afin d'analyser les comportements particuliers de la diffusion des surfaces rugueuses et périodiques.

Étude de l'orientation des champs à structure périodique

Ce modèle permet de déterminer les coefficients de rétrodiffusion en polarisation horizontale (σ_{hhhh}) et verticale (σ_{vvvv}) en fonction des angles d'incidence et diffusé, θ_i et θ_s, et des angles ϕ_i et ϕ_s comme le montre la figure 4.6-a.

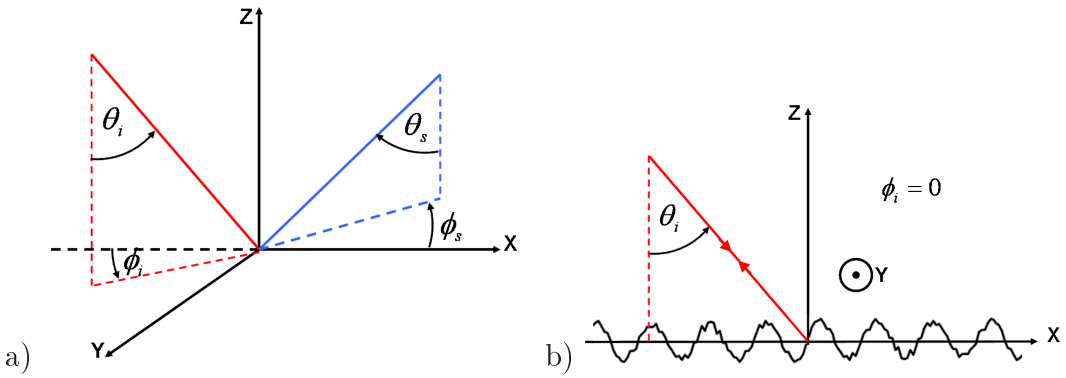


FIG. 4.6 – a- Diffusion de réflexion générale b- Diffusion de réflexion monostatique avec $\phi_i = 0$ et les sillons perpendiculaires à l'incidence

En monostatique,

$$\theta_s = \theta_i \quad , \quad \phi_s = \phi_i + \pi \quad \text{et} \quad \phi_i = 0. \tag{4.1}$$

Par ailleurs, la surface décrite dans ce modèle est caractérisée par

$$Z(x,y) = \xi(x,y) + B\cos\left(\frac{2\pi}{P}x\right) \tag{4.2}$$

où B et P caractérisent respectivement l'amplitude et la période des sillons. De plus, l'orientation des sillons est fonction de l'axe x comme le montre la figure 4.6-b. Donc la configuration du modèle avec $\phi_i = 0$ implique que les sillons sont uniquement perpendiculaires au plan incident de l'onde électromagnétique du fait de la définition de la surface (4.2). Ainsi, pour tenir compte de tous les autres cas possibles d'orientation de sillon, leur modélisation est faite par l'intermédiaire de l'angle ϕ_i, afin de ne pas changer la caractéristique de la surface dans la résolution du modèle électromagnétique. La figure 4.7 représente deux orientations différentes du radar par rapport au champ en A et en B, permettant de modéliser deux orientations de sillons différentes : au point A, les sillons sont perpendiculaires au plan incident et au point B ils sont orientés d'un angle ϕ_{row}.

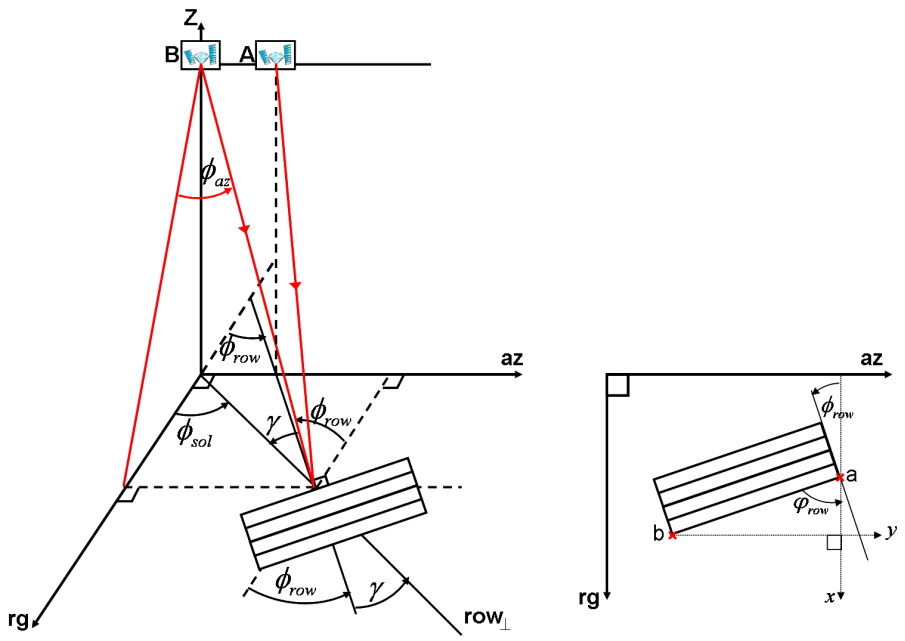


FIG. 4.7 – Diffusion de réflexion pour une orientation quelconque des sillons

Au point A, en considérant l'axe $row_\perp$ comme étant l'axe x du modèle, nous nous retrouvons dans le cas de figure décrit précédemment où ϕ_i est nul.

Au point B, le plan incident est décalé de l'angle γ par rapport à l'axe $row_\perp$. Ainsi, cet angle γ représente le nouvel angle ϕ_i du modèle et prend en compte la nouvelle orientation des sillons. γ est défini par

$$\gamma = \phi_{sol} - \phi_{row} \tag{4.3}$$

où l'angle ϕ_{row} désigne l'angle d'orientation des sillons dans le plan au sol. De plus, l'information récupérée par le radar (chapitre 1) est définie dans le plan oblique. Par

conséquent, l'angle ϕ_{sol} dépend des angles de visée du radar

$$\phi_{sol} = \text{atan}\left(\frac{\tan\phi_{az}}{\sin\theta}\right) \tag{4.4}$$

avec ϕ_{az} l'angle en azimut. De même, l'orientation des sillons observée sur une image SAR prend en compte la résolution de chaque cellule de résolution, en effet,

$$\varphi_{row} = \frac{\pi}{2} - \phi_{row} \tag{4.5}$$

$$\tan\varphi_{row} = \frac{\Delta x}{\Delta y} \qquad \text{avec} \qquad \begin{array}{l} \Delta x = |x_a - x_b|\delta_R \\ \Delta y = |y_a - y_b|\delta_y \end{array} \tag{4.6}$$

avec δ_R et δ_y les résolutions distance et azimut, et $|x_a - x_b|$ et $|y_a - y_b|$ le nombre de cellule de résolution en distance et en azimut. L'angle ϕ_{row} est alors défini par

$$\phi_{row} = \frac{\pi}{2} - \text{atan}\frac{\Delta x}{\Delta y}. \tag{4.7}$$

Étude des coefficients de rétrodiffusion

Les coefficients de rétrodiffusion déterminés par le modèle de diffusion de Kirchhoff à approximation scalaire adapté aux sols rugueux et périodiques sont composés de trois termes : une contribution cohérente, une contribution incohérente et une contribution des pentes qui est négligeable.

$$\sigma = \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{pente} \tag{4.8}$$

Étant en configuration monostatique, seule la composante incohérente est récupérée par le capteur SAR. Ainsi, la figure 4.8 représente la composante incohérente des coefficients de rétrodiffusion en polarisation horizontale σ_{hhhh} et verticale σ_{vvvv} en fonction de l'angle d'incidence θ pour un angle ϕ_i nul.

Les caractéristiques de la surface sont : une période de sillon P=1m, de hauteur B=10cm, un écart-type des hauteurs s=1cm et une constante diélectrique de ε=6 avec trois longueurs de corrélation différentes : $l_c = 100$cm, $l_c = 50$cm et $l_c = 10$cm.

Comme dans le cas des sols rugueux isotropes, les sols périodiques ont des coefficients de rétrodiffusion respectant la condition $\sigma_{vvvv} > \sigma_{hhhh}$. Sur cette figure, la longueur de corrélation joue un rôle prépondérant sur l'allure des courbes ou plus particulièrement sur la variance de la surface. Cette variance s_f^2 est définie par

$$s_f^2 = 2s^2(1 - \rho(x,y)) + 2B\sin\left(\frac{\pi}{P}x'\right)\sin\left(\frac{\pi}{P}x\right) \tag{4.9}$$

où la composante de gauche est la partie aléatoire et celle de droite la composante déterministe. La fonction de corrélation gaussienne est définie comme suit

$$\rho(x,y) = e^{-\left(\frac{x^2+y^2}{l_c^2}\right)}. \tag{4.10}$$

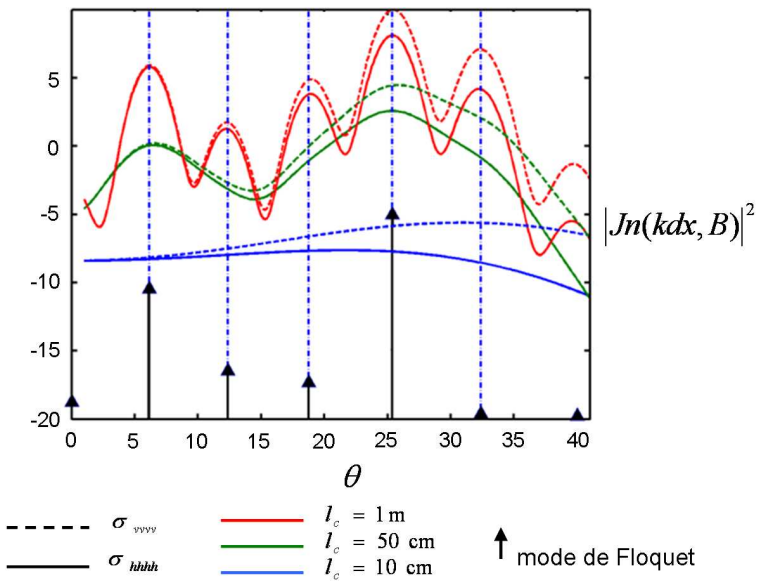


FIG. 4.8 – Coefficients de rétrodiffusion σ_{hhhh} et σ_{vvvv} en fonction de l'angle d'incidence θ pour différentes longueurs de corrélation l_c (l_c = 100cm, l_c = 50cm, l_c = 10cm) et localisation et amplitude des modes de Floquet

Ainsi, pour une longueur de corrélation faible, la surface devient plus rugueuse et la composante aléatoire de la variance de la surface est plus importante que celle de la composante déterministe. A l'inverse, pour une longueur de corrélation plus grande, la surface tend à être lisse et donc uniquement périodique. Ainsi, la composante déterministe de la variance devient supérieure à la composante aléatoire. Par ailleurs, il est intéressant de noter que plus la variance du sol tend à être déterministe, plus la composante incohérente tend à être cohérente aux points de faire apparaître des pics d'intensité.

Modes de Floquet

Pour certaines caractéristiques de surface, les coefficients de rétrodiffusion présentent des pics de puissance dûs aux modes de Floquet [Chuang(1981)]. Ces modes sont définis par un réseau de diffraction formé par les angles de diffusion d'un sol périodique (dans ce paragraphe, le sol est considéré lisse) comme le montre la figure 4.9. Les angles de diffusion sont déterminés par la relation suivante

$$\sin\theta_{2m} = \sin\theta_1 + m\frac{\lambda}{P} \tag{4.11}$$

avec $m = 0, \pm1, \pm2, \ldots$ [Beckmann(1963)].

Chaque entier m correspond à un mode de diffusion propagé dans la direction θ_{2m} comme représenté sur la figure 4.9. Le nombre total de modes possibles est limité par la condition suivante :

$$|\sin\theta_{2m}| \leq 1. \tag{4.12}$$

Le mode $m = 0$ se trouve dans la direction spéculaire. Les modes $m = \pm 1$ se situent de chaque coté de la direction spéculaire. Les modes continuent de chaque coté jusqu'au dernier respectant la condition (4.12). Ils se propagent jusqu'à un angle proche de $\theta_{2m} = \pm\frac{\pi}{2}$.

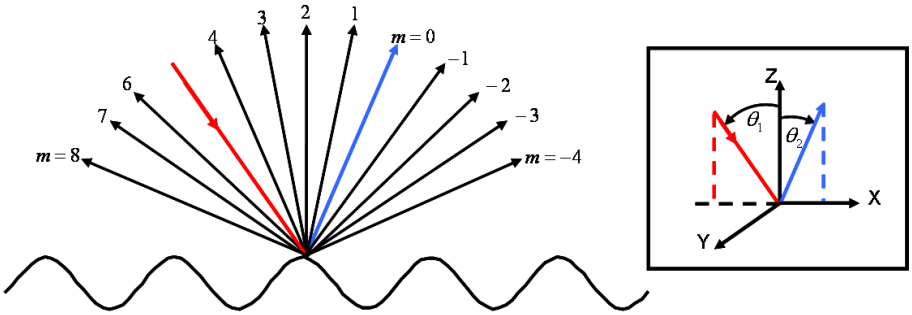


FIG. 4.9 – Réseau de diffusion sur un sol périodique

Phénomène de Bragg

De plus, les modes de Floquet dépendent du phénomène de Bragg qui est une sommation des contributions constructives et destructives des diffuseurs (chapitre 1). Les conditions de résonance de Bragg sont définies par

$$\sin\theta_i \cos\phi_i = n\frac{\lambda}{2P} \tag{4.13}$$

avec $n = 0, 1, 2, \ldots$.

L'angle d'incidence pour lequel le phénomène de Bragg existe est déterminé par

$$\theta_i = \operatorname{asin}\left(\frac{n\pi}{Pk\cos\phi_i}\right). \tag{4.14}$$

La localisation et l'amplitude des modes de Floquet en fonction de l'angle d'incidence sont définies par la fonction de Bessel suivante

$$|Jn(kdzB)|^2 = \mathcal{F}(\theta_i, \phi_i, P, B, k) \tag{4.15}$$

et sont également représentées sur la figure 4.8.

Les conditions de Bragg dépendent donc de θ_i, ϕ_i, n et P. La figure 4.10 donne des exemples pour lesquels les conditions de résonance de Bragg sont respectées.

4.1.2.2 En pratique

Après une étude théorique du comportement électromagnétique des champs à structure périodique, il est intéressant d'étudier le comportement des données mesurées par le capteur E-SAR.

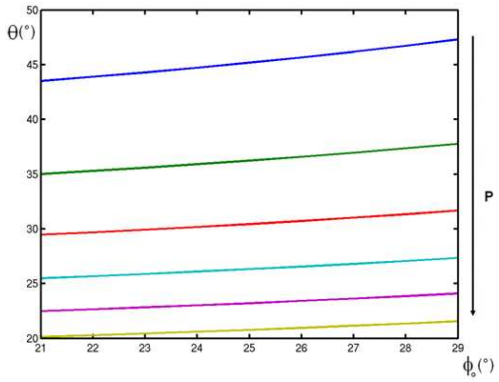


FIG. 4.10 – Exemple théorique validant les conditions de Bragg avec $P = [50, 60, 70, 80, 90, 100]$cm et $n = 3$

La figure 4.11 représente la réponse du *Span* des champs 269-270 et 271-272 du site d'Alling en mars sur lequel apparaît des zones de forte intensité électromagnétique formant des lignes blanches [Cordey(2004)]. Par rapport à l'étude théorique vue précédemment, il semblerait logique de déduire que ces lignes blanches sont dues à des résonances de Bragg et donc à des modes de Floquet. Or, d'après les conditions de Bragg qui définissent les abscisses angulaires des modes, le rapport $\frac{\lambda}{P}$ devrait être infiniment faible (très inférieur à 1) pour avoir par exemple six raies sur un même champ (pour une variation infime de θ)(figure 4.10). Cette condition ne peut pas être obtenue donc les raies que l'on observe ne sont pas dues au phénomène de Bragg. Sur quasiment toutes les observations, le champ entier résonne et pas uniquement

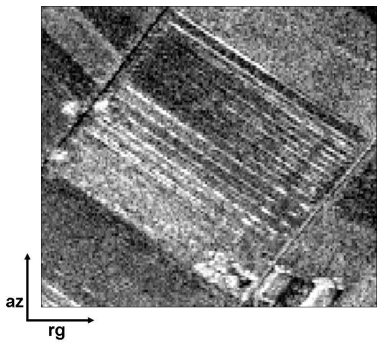


FIG. 4.11 – Réponse du *Span* des champs 269-270 (champs de semis d'hiver de hauteur de 4 cm recouvert à 30%) et 271-272 (champs de pâturage de hauteur de 10 cm recouvert à 95%) du site d'Alling en mars

une seule rangée. Ce phénomène peut s'observer grâce à une étude temps-fréquence (section 4.2). Le phénomène de résonance implique que le mécanisme de diffusion est quasi déterministe et très énergique. L'étude du principe de la synthèse SAR permet de mieux appréhender ce phénomène de résonance (chapitre 1).

Synthèse SAR d'une réponse cohérente à l'intérieur d'une cellule de résolution

L'intégration cohérente des différents diffuseurs de la cellule de résolution (le signal reçu pour un pixel) est définie par

$$s_r = \int_{x_1}^{x_2} a e^{j\frac{4\pi}{\lambda}r(x)} dx \tag{4.16}$$

avec a une constante, x_1 et x_2 les limites de la cellule de résolution comme représenté sur la figure 4.12.

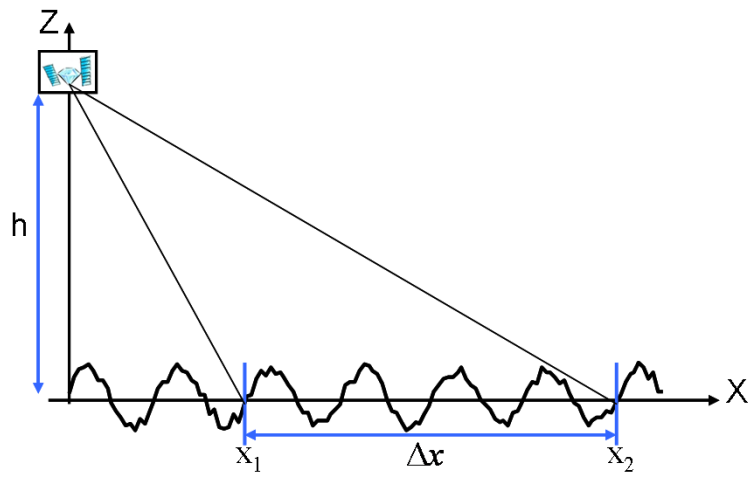


FIG. 4.12 –

Pour simplifier l'étude, l'angle d'incidence θ est considéré constant à l'intérieur d'une cellule de résolution, c'est-à-dire pour un pixel de l'image SAR, mais varie d'un pixel à l'autre.

On considère également une grille d'intégration régulièrement échantillonnée en x. La constante $r(x)$ est de plus définie par

$$r(x) = \frac{x}{\sin\theta}. \tag{4.17}$$

Ainsi, le signal reçu, s peut s'écrire sous la forme

$$s_r = \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} a\, \mathrm{e}^{j\frac{4\pi}{\lambda}\frac{x}{\sin\theta}}\, \mathrm{d}x. \tag{4.18}$$

La solution de l'intégrale (4.18), est donnée par

$$s_r = a\frac{\lambda\sin\theta}{2\pi}\, \mathrm{e}^{j\frac{2\pi}{\lambda\sin\theta}(2x_1+\Delta x)} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda\sin\theta}\Delta x\right) \tag{4.19}$$

Le signal reçu pour une cellule de résolution donne une fonction périodique de période λ qui s'annule tous les $\frac{\lambda}{2}$. La taille de la cellule de résolution Δx est constante,

seul θ varie d'un pixel à l'autre et donne ces variations d'intensité qui apparaissent sur les images SAR.

Ces études théorique et pratique permettent d'identifier le comportement électromagnétique particulier des sols rugueux et périodiques. En effet, la réponse électromagnétique de ces champs à structure périodique est cohérente ce qui implique que lors de la synthèse SAR, ces champs résonnent. Cette résonance est étudiée dans la partie suivante grâce à une analyse temps-fréquence.

4.2 Détection de zones non-stationnaires

L'approche temps-fréquence choisie dans cette étude permet de localiser les zones non-stationnaires [Moreira(1995)] [Ferro-Famil(2003)] [Ferro-Famil(2005)]. Pendant l'acquisition du signal, une cible est illuminée pour différentes positions le long de la trajectoire de vol du capteur SAR et chaque diffuseur est ainsi observé par le capteur sous différents angles azimutaux (figure 4.13). Ainsi, le comportement électromagnétique changeant des structures géométriques anisotropes peut être observé. Par conséquent, la diffusion de certains milieux naturels comme les champs agricoles périodiques ou quasi-périodiques est susceptible de varier suivant les angles azimutaux du fait de leurs propriétés anisotropes.

4.2.1 Analyse Temps-Fréquence

4.2.1.1 Décomposition Temps-Fréquence

Une scène ou un point est illuminé sous différents angles d'azimut comme le montre la figure 4.13. Une image SAR de cette zone ou de ce point résulte de l'intégration de ces différentes réponses électromagnétiques, pour différentes positions en azimut et/ou distance.

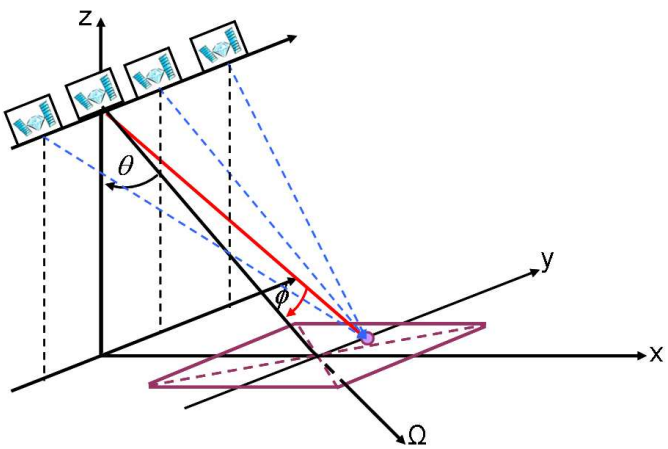


FIG. 4.13 – Intégration en azimut d'une cible

La synthèse SAR s'effectue par compression d'impulsion (chapitre 1). Elle se réalise en calculant la convolution du signal reçu $s_r(u, y_a)$ définie dans l'équation (1.30) du chapitre 1. Ce calcul peut s'opérer dans le domaine fréquentiel par une simple multiplication. Ainsi, dans le domaine fréquentiel, le signal reçu est défini par $s_r(k_{rg}, k_{az})$ où k_{rg} est le nombre d'onde en distance

$$k_{rg} = (k + k_0)\cos\phi - k_0 \tag{4.20}$$

k_{rg} est équivalent à k en supposant l'ouverture d'antenne ϕ faible, et k_{az} est le nombre d'onde en azimut

$$k_{az} = (k + k_0)\sin\phi \tag{4.21}$$

avec k le nombre d'onde et k_0 le nombre d'onde à la fréquence porteuse f_0. Par ailleurs, la fréquence réelle de l'onde, f', interagissant avec la cible est la fréquence du signal transporté autour de la fréquence porteuse. A cette fréquence, les nombres d'onde deviennent [Leducq(2006)] :

$$k_{rg} \approx \frac{4\pi}{c}(f' - f_0) \tag{4.22}$$

$$k_{az} = -\frac{4\pi f'}{c}\sin\phi. \tag{4.23}$$

Ainsi, la valeur du spectre de la réponse du diffuseur en un point (k_{rg}, k_{az}) renseigne sur la réflectivité de la cible pour un angle ϕ et une fréquence f' tels que :

$$f' \approx f_0 + \frac{ck_{rg}}{4\pi} \tag{4.24}$$

$$\phi = -\operatorname{asin}\left(\frac{ck_{az}}{4\pi f'}\right) \tag{4.25}$$

défini sur les plages de paramètres suivantes

$$f' \in \left[f_0 - \frac{W}{2}, f_0 + \frac{W}{2}\right] \tag{4.26}$$

$$\phi \in \left[-\frac{\phi_{az}}{2}, \frac{\phi_{az}}{2}\right] \tag{4.27}$$

où W est la bande de fréquence. Le spectre en azimut et l'ouverture d'antenne en azimut sont ainsi liés comme schématisé sur la figure 4.14.

Ainsi, puisque les signaux SAR sont bidimensionnels, une décomposition temps-fréquence peut être effectuée suivant la dimension distance et/ou azimut.

4.2.1.2 Principe de construction des sous-images

Dans le domaine SAR, la décomposition temps-fréquence ou décomposition en 'sous-vues' permet d'étudier les variations du signal en fonction de la position du porteur [Moreira(1995)]. Cette approche nécessite en général de disposer du signal brut mesuré par le capteur, c'est-à-dire la vidéo brute.

Généralement, les données disponibles sont les images SAR synthétisées et non les vidéos brutes. Le développement précisé ci-dessus, a mis en avant le fait que le

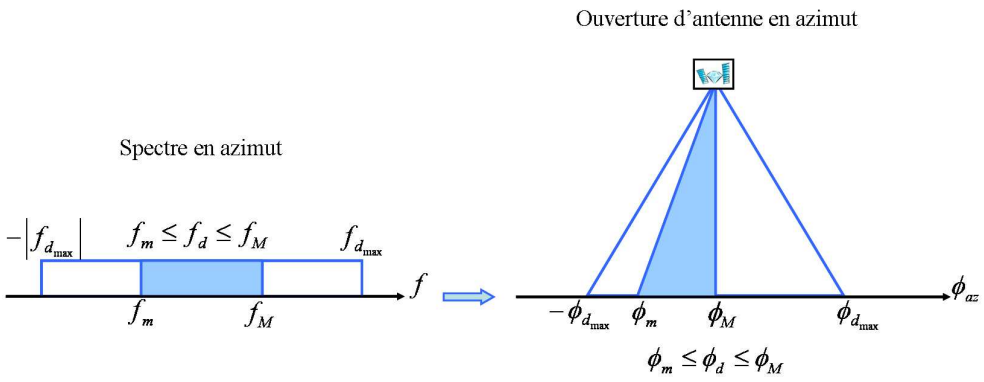


FIG. 4.14 – Spectre Doppler lié à l'ouverture de l'antenne en azimut

contenu spectral en azimut renseigne sur la variabilité angulaire de la réflectivité. Ainsi, la décomposition temps-fréquence directement appliquée sur les images SAR est une décomposition en 'sous-images' puisque le calcul s'effectue à partir de l'image synthétisée c'est-à-dire à partir de l'information cohérente de la matrice **S**.

La figure 4.15 schématise la décomposition en sous-images de l'image en résolution complète du site d'Alling et la procédure de construction de ces sous-images. Ainsi, à partir de l'image en pleine résolution, une transformation dans le domaine fréquentiel permet de distinguer dans notre cas quatre zones spectrales permettant d'obtenir quatre sous-images.

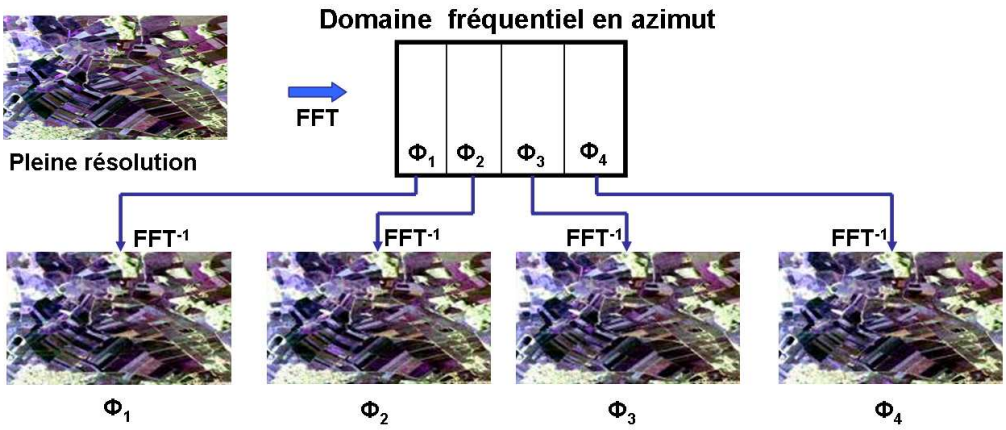


FIG. 4.15 – Construction schématisée de 4 sous-images

La construction des sous-images correspondant à la position spectrale $\omega = [\omega_{rg}, \omega_{az}]$, se décompose en cinq étapes.

– **Calcul du spectre** de l'image SAR par TF bidimensionnelle :
Dans cette thèse, une transformée de Fourier (TF) à court terme (STFT : Short-Time Fourier Transfom) est utilisée car présentant de nombreux avantages liés à

l'interprétation physique des grandeurs manipulées [Ferro-Famil(2007)]. Ce type de transformation permet de décomposer un signal bi-dimensionnel en différentes composantes spectrales par convolution avec une fonction analysante.

– **Détection des bords du spectre :**
La transformation de Fourier sur-échantillonne le signal, par conséquent, il est nécessaire de sélectionner le spectre utile afin de ne pas compenser le signal avec du bruit dans l'étape suivante.

– **Dépondération du spectre :**
Lors de la synthèse SAR, il est courant d'effectuer des pondérations du spectre par des fenêtres de type de Hamming afin de diminuer l'amplitude des lobes secondaires. La dépondération du spectre est une étape essentielle qui permet de compenser ces pondérations de même que l'influence du diagramme d'antenne dans la direction azimutale.

– **Sélection d'un voisinage de $\boldsymbol{\omega}$** par fenêtrage du spectre :
Isoler une zone du spectre au voisinage de ω permet de créer le spectre d'une sous-image paramétrée par $\omega = (\omega_{rg}, \omega_{az})$.

– **Obtention de la sous-image** par transformée de Fourier inverse

Les différents calculs de ces cinq étapes ne sont pas développés dans cette thèse mais le sont dans [Leducq(2006)] [Ferro-Famil(2007)].

4.2.1.3 Analyse Temps-Fréquence

La décomposition temps-fréquence de l'image SAR peut se faire dans la direction azimutale et/ou distance.

Analyse temps-fréquence dans la direction azimutale

La composante azimutale de la position spectrale présente une forte signification physique puisqu'elle est reliée à l'angle d'observation en azimut ϕ suivant :

$$\omega_{az} = 2\omega_0 \frac{V_{sar}}{c} sin\phi. \tag{4.28}$$

Une étude temps-fréquence en azimut permet d'étudier d'éventuels comportements anisotropes de la réponse de diffuseurs ou milieux complexes. Cette analyse est utilisée pour la suite des travaux de cette thèse.

Analyse temps-fréquence en distance

La composante spectrale en distance est comprise dans la bande de fréquence du chirp utilisé et peut être nécessaire pour mettre en évidence des comportements de réflectivité dépendants de la fréquence.

Il est important de noter que la pertinence d'une analyse temps-fréquence, en distance et/ou en azimut, est directement liée à la taille du domaine spectral à disposition, qui dépend non seulement des caractéristiques du capteur, mais aussi des

paramètres utilisés lors de la focalisation comme la résolution.

Caractéristiques techniques des sous-images

Les sous-images utilisées dans cette étude sont toutes traitées de la même façon. La décomposition temps-fréquence est faite arbitrairement uniquement dans la direction azimutale avec une résolution correspondant à 20% de la pleine résolution. Ce traitement implique que le spectre de l'image est découpé en quatre sous-spectres

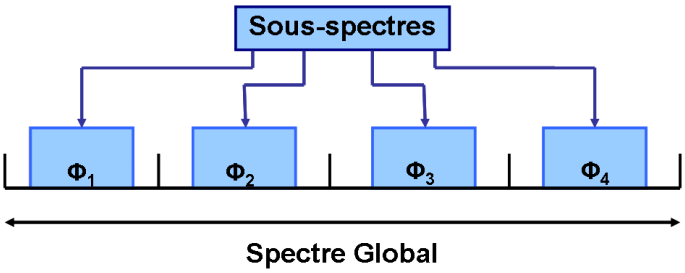


FIG. 4.16 – Découpage du spectre global en 4 sous-spectes

disjoints de taille identique représentant 20% du spectre global comme illustrés sur la figure 4.16. Les quatre sous-images sont alors créées à partir des quatre sous-spectres.

La figure 4.17 donne le *Span* de l'image en pleine résolution et pour les quatre sous-images soit pour quatre angles d'azimut différents : ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 et ϕ_4. L'observation des quatre champs du sites d'Alling étudiés précédemment, Z_1, Z_2, Z_3 et Z_4 permet de mettre en avant la stationnarité de Z_3 et Z_4 et la non-stationnarité de Z_1 et Z_2. En effet, Z_3 et Z_4 ont un *Span* qui ne varie pas suivant les différents angles d'azimut alors que les deux autres varient. Il est possible d'observer que Z_1 résonne sur la sous-image 3 alors que Z_2 résonne à la sous-image 4.

Il est à noter que les champs sélectionnés hormis Z_3 et Z_4 de la figure 4.1 sont non-stationnaires. De plus, la moitié du champs 269-270 résonnent sur la sous-image 3 et entièrement à la sous-image 4.

Ainsi, du fait de leur variation entre chaque sous-image, la stationnarité des champs à structure périodique entre chaque sous-image peut être testée permettant de détecter les zones non-stationnaires comme expliqué dans le paragraphe suivant.

4.2.2 Détection de zones non-stationnaires

Une approche statistique basée sur le maximum de vraisemblance est utilisée afin d'identifier les zones non-stationnaires [Ferro-Famil(2003)] [Ferro-Famil(2005)]. Si la matrice de cohérence de chaque sous-image suit la même distribution alors la zone est stationnaire.

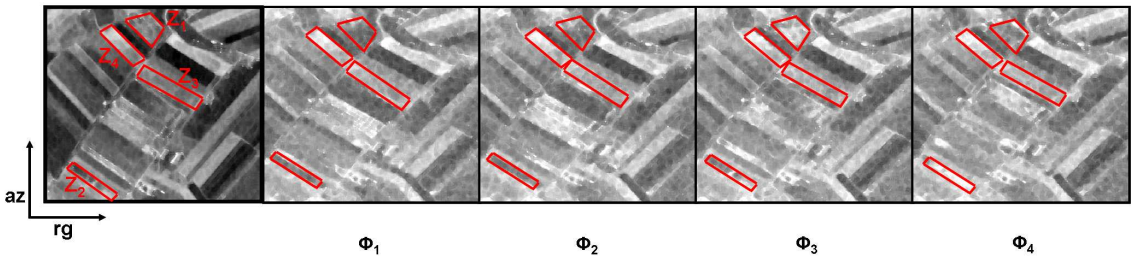


FIG. 4.17 – Span pour la résolution complète et les 4 sous-images

4.2.2.1 Test de stationarité

La procédure de détection de comportements non-stationnaires est réalisée sur R matrices de cohérence, $\mathbf{T_i}$, échantillonnées sur des portions indépendantes du plan $(\omega_{rg}, \omega_{az})$. Il s'agit de tester l'hypothèse de stationnarité selon laquelle les R matrices suivent la même densité de probabilité de Wishart $W_{\mathbb{C}}(n_i, \Sigma)$:

$$H_0 = \Sigma_1 = \cdots = \Sigma_R = \Sigma_0. \tag{4.29}$$

Le test au maximum de vraisemblance correspondant est défini par [Ferro-Famil(2005)] :

$$\Lambda = \frac{\prod_{i=1}^{R} |T_i|^n}{|T_t|^{nR}} \qquad \text{avec} \qquad T_t = \frac{1}{R}\sum_{i=1}^{R} T_{ii}. \tag{4.30}$$

La validité de l'hypothèse vérifiant que chaque matrice de cohérence suit la même distribution, est testée par la moyenne du taux de maximum de vraisemblance Λ, construit à partir des sous-images.

Le taux de maximum de vraisemblance du site d'Alling est représenté sur la figure 4.18-b. Ce taux varie de 0 à 1. Afin de détecter les zones non-stationnaires, il est nécessaire de fixer un niveau de fausse alarme qui définit le traitement de décision (0 : stationnaire, 1 : non-stationnaire) (figure 4.18-c). Ce seuil est fixé arbitrairement à 0.25.

Sur le site d'Alling, de nombreux champs sont détectés non stationnaires. Il semble donc important d'effectuer une détection sur les données SAR avant d'envisager une quelconque étude d'estimation de paramètres de surface.

4.2.2.2 Détection de zones non-stationnaires sur le site de Görmin

Les données traitées correspondent à celles acquises pendant les trois campagnes intensives d'avril, juin et juillet de la campagne d'AgriSAR. A ces dates, le test de stationnarité est appliqué afin de détecter les zones non-stationnaires. Par ailleurs, l'impact des angles d'incidence peut être observé en utilisant les deux acquisitions SAR quasi orthogonales des campagnes intensives : Görmin 1 et Görmin 2 (chapitre 1). Les données du 20 avril ne sont pas présentées ici puisque présentant des interférences radio-fréquence (RFI) [Reigber(2005)].

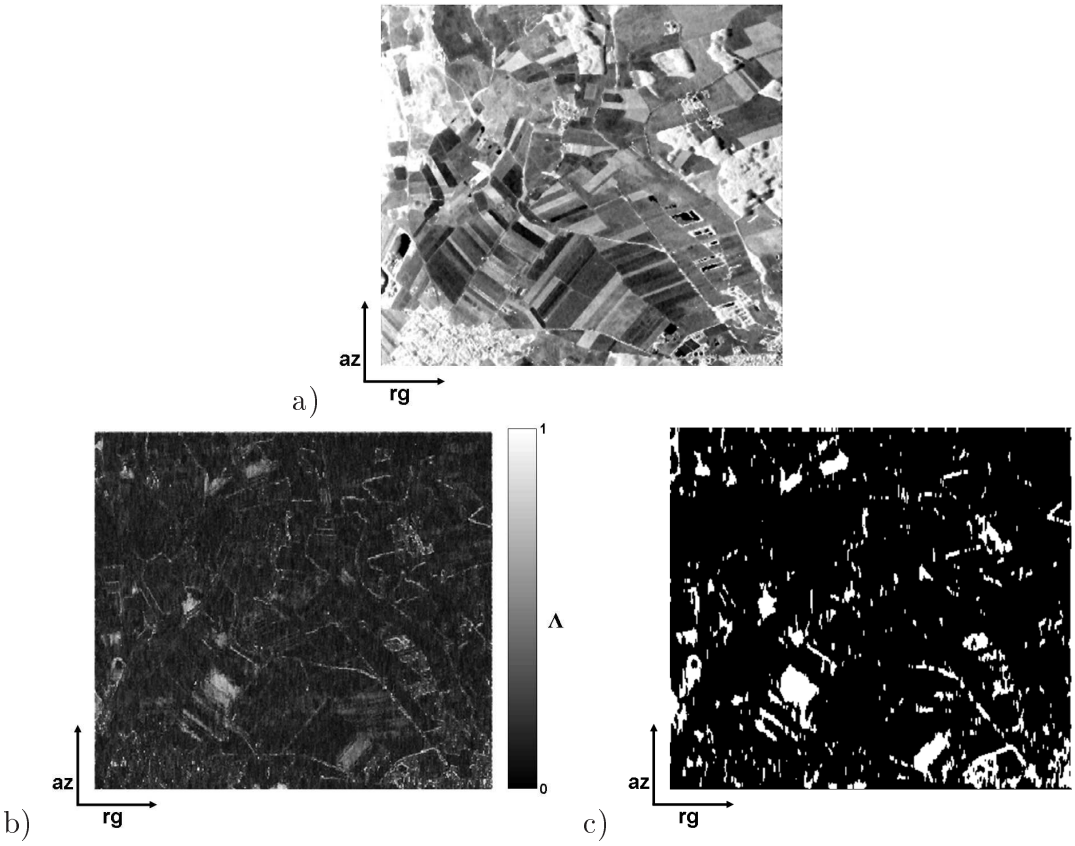


FIG. 4.18 – a- *Span* , b- Λ, c- décision : les pixels blancs correspondent aux zones non-stationnaires et les pixels noirs aux zones stationnaires

Première campagne (avril)

Lors de l'acquisition du 19 avril, le site est constitué de trois champs nus (460, 102, et 222 de la figure 4.19-a) et de champs recouverts de petites végétations telles que de jeunes pousses de blé et de colza. Le colza à cette date est composé de grosses feuilles denses de 20 cm de haut qui recouvrent tout le sol. Le blé jeune est une plante de 14 cm planté sur des rangées parallèles entre elles. La structure du champ de blé est considérée périodique (comme les champs 221 et 391 de la figure 4.19-a).

La figure 4.19-a représente le *Span* du site de Görmin 1. Des raies de fortes intensités apparaissent sur certains champs de blé comme les champs 221 et 391. La résonance peut être due à la structure périodique de cette culture ou aux sillons causés par le passage d'un véhicule agricole. En effet, des études ont été faites dans ce domaine et font apparaître des comportements similaires à ceux des sols périodiques [Tavakoli(1991)] [Whitt(1994], une réponse cohérente peut donc être reçue depuis une végétation périodique.

La figure 4.19-b représente la moyenne du taux de maximum de vraisemblance Λ servant de test de stationnarité. Tous les champs qui ont un Λ élevé sont des champs de jeunes blés. Ainsi, après décision avec un seuil de 0.25, ces champs sont détectés non-stationnaires (figure 4.19-c).

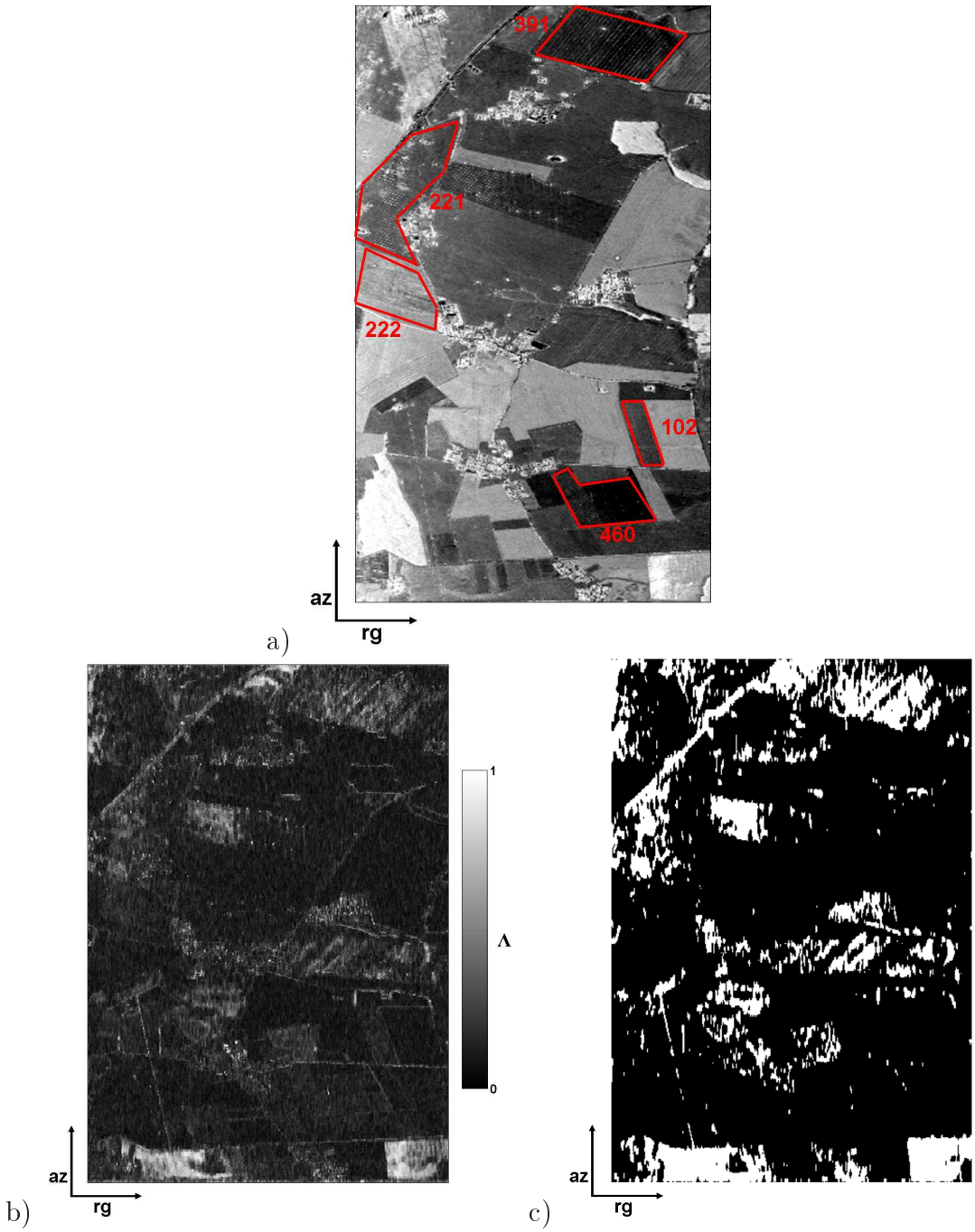


FIG. 4.19 – a- *Span* , b- Λ, c- Détection des zones stationnaires sur Görmin1 pour le 19 avril

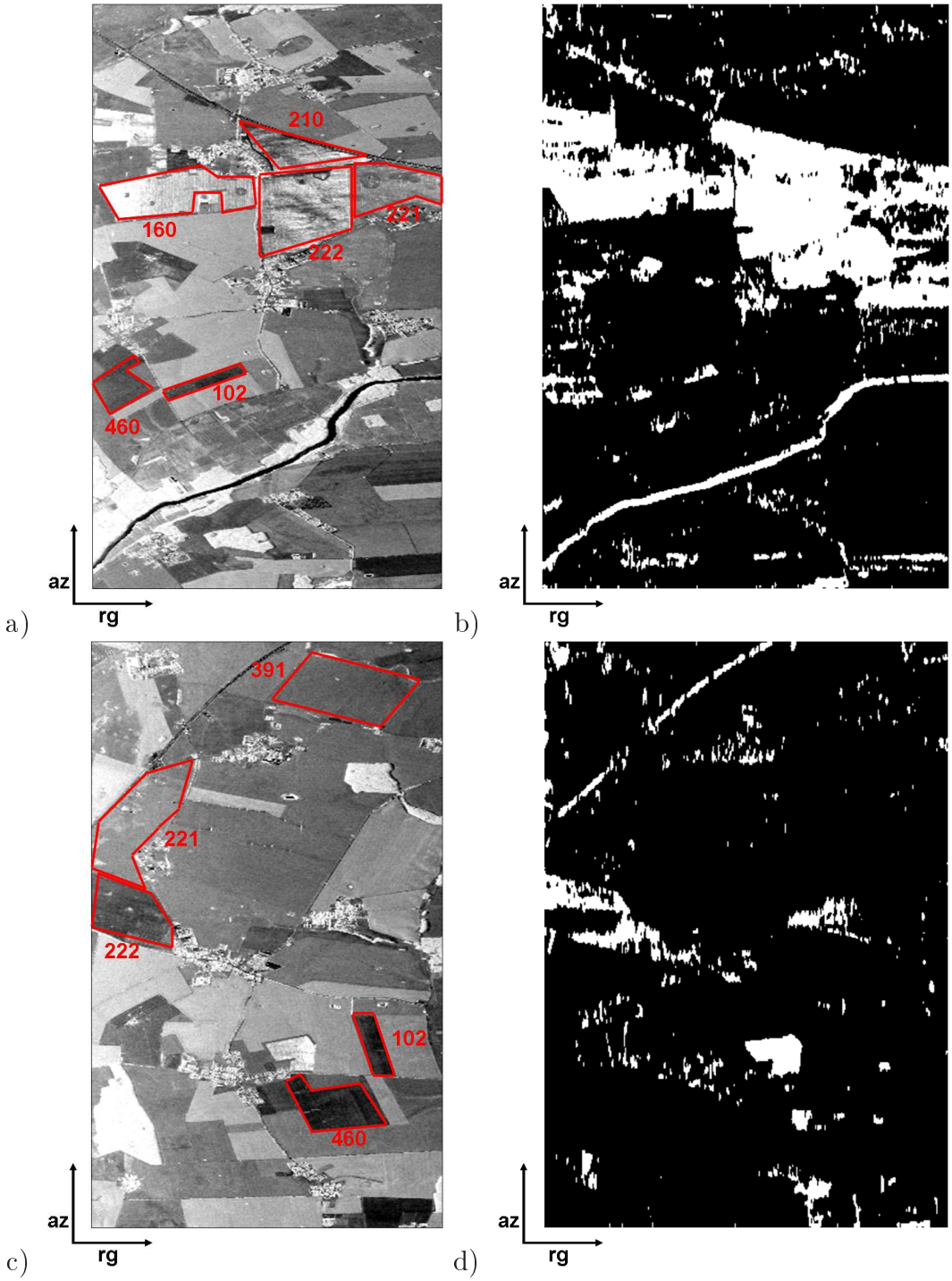


FIG. 4.20 – Seconde campagne intensive : a- *Span* b- Détection de stationnarité pour le 6 juin et c- *Span* d- Détection de stationnarité pour le 7 juin

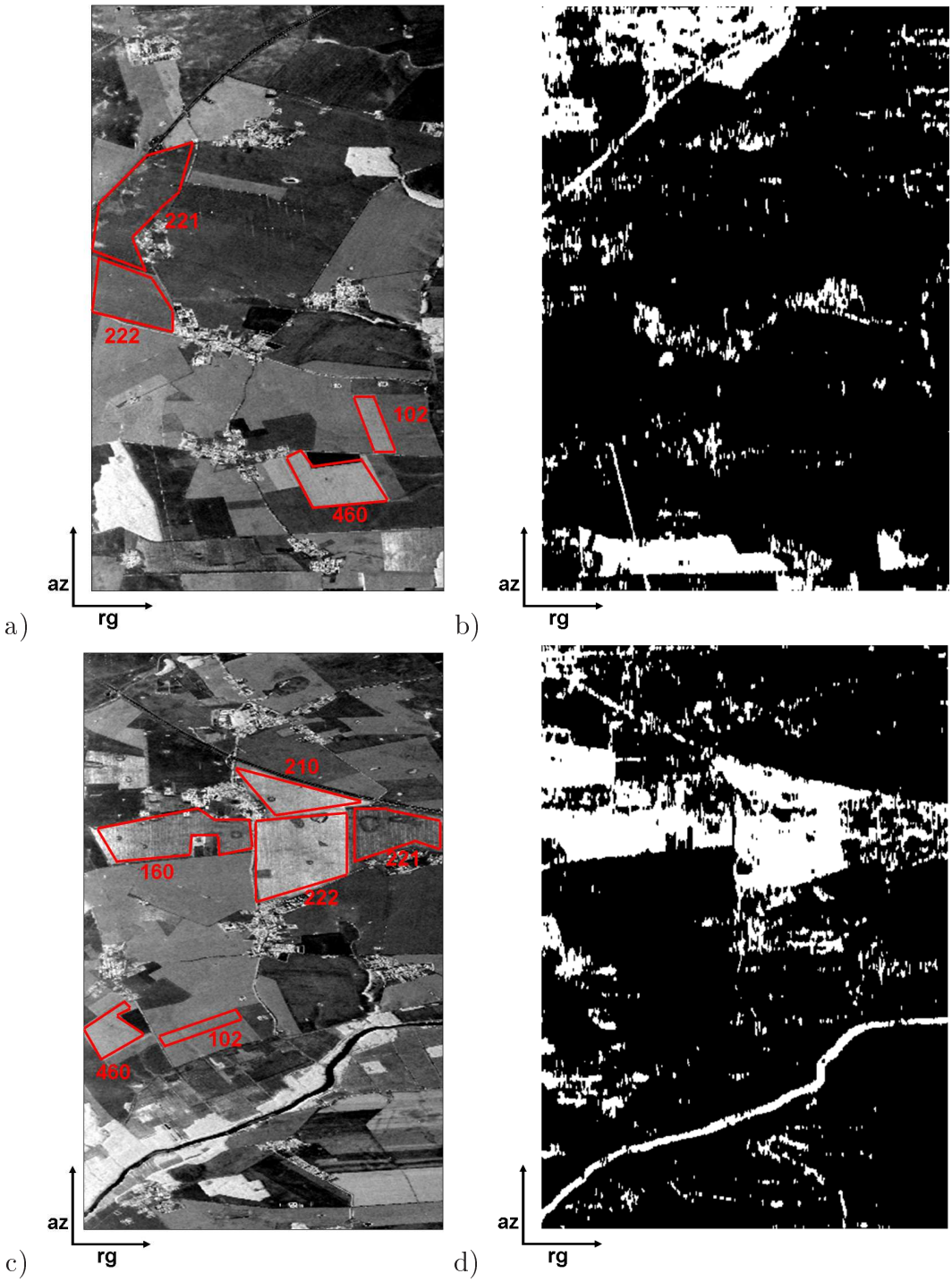


FIG. 4.21 – Troisième campagne intensive : a- *Span* b- Détection de stationnarité pour le 5 juillet et c- *Span* d- Détection de stationnarité pour le 6 juillet

Il est ainsi possible de déduire qu'une partie des champs agricoles à structure périodique nus ou recouverts de végétations sont détectés non-stationnaires.

Deuxième campagne (juin)

La seconde campagne a lieu le 6 et 7 juin (Görmin2 et Görmin1 respectivement). A ces dates, les betteraves sucrières (460 et 102) commencent à pousser, le blé est plus haut et le colza est haut et dense (aucune mesure terrain de la hauteur n'est disponible). Les champs 210 et 222 sont des champs à structure périodique.Au sommet de chaque sillon espacé de 75 cm, du maïs est planté. Malgré la présence de cette petite végétation de 6 à 8 cm de haut, ces champs sont considérés périodiques et nus par rapport à la longueur d'onde du radar.

La figure 4.20-a représente le *Span* du site de Görmin 2 du 6 juin. Aucune zone contenant des raies parallèles de fortes intensités n'apparaît. Toutefois, certains champs (160, 222, 221, 210) ont une forte intensité sur toute leur zone. Il est à noter qu'une bande sombre traverse le champ 222 sans doute due à un dénivelé de topographie qui traverse ce champ [AgriSAR(2006)]. Ces quatre champs sont détectés comme non-stationnaires sur la figure 4.20-b. Ces champs ont une structure périodique : sols nus périodiques pour les champs 210 et 222 et végétations à structure périodique pour 160 et 221 comme le montre l'image optique (figure 4.22).

FIG. 4.22 – Image optique de la seconde campagne de mesure

La figure 4.20-c représente le *Span* du site de Görmin 1 du 7 juin. Sous cet angle, aucun champ ne résonne. Toutefois, le champ 222 est détecté non-stationnaire alors que le champ 221 ne l'est pas (figure 4.20-d). Le blé 221 est plus haut que celui du 19 avril (aucune mesure terrain), mais conserve sa structure périodique puisque détecté non-stationnaire sur Görmin 2 (221 est orienté de la même façon que le champ 160 de la figure 4.22). L'orientation différente de visée du radar ne permet pas de détecter le caractère périodique des plantes. D'ailleurs, les sillons périodiques sont perpendiculaires à l'angle de visée du radar de Görmin 2 (figure 4.22). Le champ 222 a des sillons périodiques donc un comportement déterministe. Ainsi, sa réponse électromagnétique est cohérente (4.19) entraînant un comportement non-stationnaire. Le champ 222 est traversée par une zone stationnaire la même qui est observée sur

le *Span* de Görmin 2 (figure 4.20-a). Cette stationnarité est due au dénivelé qui modifie l'aspect déterministe du sol pour un angle d'observation faible comme sur le site de Görmin 1. Le champ 221 n'est pas non-stationnaire sur cet angle de vue. L'orientation du radar par rapport à l'orientation des champs (quasiment parallèle) a une grande influence sur la détection des non-stationnarités.

Troisième campagne (juillet)

La dernière campagne intensive a lieu les 5 et 6 juillet (Görmin1 et Görmin2 respectivement). Les plantes de blé ont quasiment peu changé au niveau de leur forme (le champ 160 est haut de 95 à 115 cm), les champs de maïs ont poussé sur des rangées périodiques (de hauteur 80 à 130 cm, de sillons espacés de 75 cm). La figure 4.21-a est le *Span* du site de Görmin 1, sous cet angle aucun champ résonnant n'est observable tout comme sur le *Span* du 7 juin (figure 4.20-b) à la différence qu'ici, aucun champ n'est détecté non-stationnaire (figure 4.21-b) (tous ont leurs structures périodiques quasiment parallèles à l'angle de visée Görmin 1).

Le *Span* de Görmin 2 représenté sur la figure 4.21-c, a des fortes intensités sur les champs 160, 210 et 222. Le champ 221 possède quelques raies de résonance parallèles. Ces quatre champs sont détectés non-stationnaires sur la figure 4.21-d comme ils l'étaient également le 6 juin. Comme en juin, les végétations à structure périodique comme le blé (160 et 221) et le maïs (210 et 222) résonnent sous un angle d'orientation privilégié perpendiculaire à la structure périodique.

En conclusion, toutes les zones non-stationnaires sont des zones à structures périodiques mais toutes les structures périodiques, notamment la végétation, ne sont pas forcément toutes non-stationnaires, comportement dépendant de l'orientation des structures.

L'analyse polarimétrique suivante étudie les variations des réponses électromagnétiques des différentes sous-images donc des différents angles azimut de la scène, afin de mieux comprendre la non-stationnarité de certains champs et l'impact sur leur réponse électromagnétique.

4.3 Analyse polarimétrique

L'analyse suivante permet d'étudier le comportement des paramètres polarimétriques suivant les différents angles d'azimut donc suivant différentes sous-images.

4.3.1 Etude sur les données d'Alling

En utilisant la méthode temps-fréquence, l'analyse polarimétrique permet de comprendre pourquoi les méthodes classiques d'inversion ne sont pas adaptées aux sols rugueux périodiques. La figure 4.23 représente les paramètres polarimétriques utilisés pour ces méthodes d'inversion (p, q, H et α) sur deux champs stationnaires

et deux autres non-stationnaires pour quatre sous-images avec une résolution de 20%.

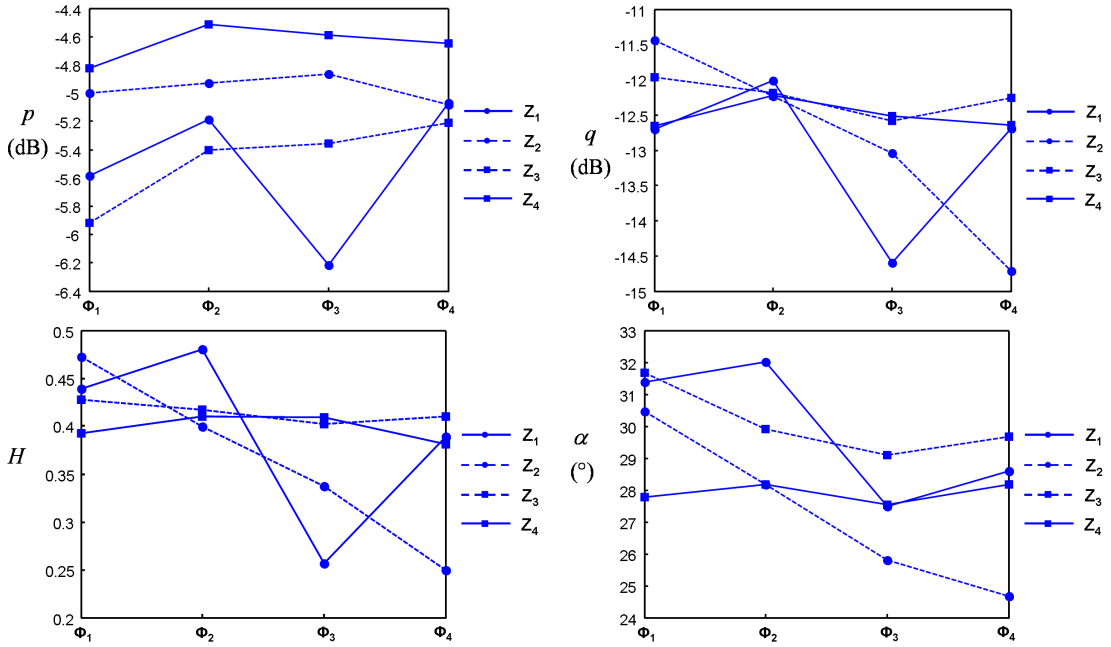


FIG. 4.23 – p, q, H, α sur 2 champs non-stationnaires Z_1 et Z_2 et 2 champs stationnaires Z_3 et Z_4 pour les 4 sous-images qui sont présentés sur la figure 4.17

Le taux de co-polarisation présente de faibles variations pour les différents angles d'azimut. En effet, le comportement de p dans le cas de champs stationnaires et non-stationnaires est similaire. Ce paramètre peut être utile pour l'estimation de l'humidité des sols mais son échelle de valeur en fonction de la permittivité ε est trop faible pour une précision pour l'estimation.

Les variations du taux de polarisation croisé ($\pm$3dB), de l'entropie H ($\pm$0.2) et de l'angle α ($\pm$6 °) sont importantes selon les sous-images, c'est-à-dire suivant les différents angles d'azimut. Les paramètres q et H permettent de bien observer les résonances. En effet, les sous-images pour lesquelles q et H ont des valeurs très faibles correspondent aux résonances observées (Z_1 dans la sous-image 3 et Z_2 la sous-image 4). Ainsi, les algorithmes d'inversion basés sur ces paramètres ne sont pas valides pour estimer l'humidité des sols puisque ces paramètres varient en fonction des angles d'azimut et sont donc inadaptés aux comportements non-stationnaires d'une cible.

Dans le chapitre 3, une nouvelle méthode d'estimation basée sur le paramètre α_1 a été élaborée. Sur la figure 4.24, le paramètre α_1 est représenté pour les quatre champs de référence pour les quatre sous-images. Ce paramètre varie peu (maximum de 3 °). Ainsi, la méthode de α_1 peut être utilisée pour estimer l'humidité des sols périodiques.

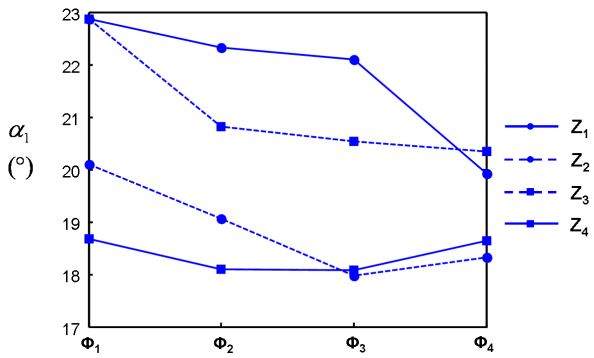


FIG. 4.24 – α_1 sur 2 champs non-stationaires Z_1 et Z_2 et 2 champs stationnaires Z_3 et Z_4 pour les 4 sous-images qui sont présentés sur la figure 4.17

4.3.2 Etude sur les données d'Agrisar

Sur le site de Görmin, une analyse polarimétrique similaire à celle faite sur Alling est réalisée sur le champ 222 pour les deux dernières campagnes intensives et pour les deux angles d'incidence. La figure 4.25 représente les moyennes des paramètres polarimétriques : p, q, H, α, α_1, δ_1, p_r et $SDERD$ sur le champ 222 le 6 juin (Z_1 non-stationnaire), le 7 juin (Z_2 stationnaire), le 5 juillet (Z_3 stationnaire) et le 6 juillet (Z_4 non-stationnaire) en fonction des quatre sous-images. Z_1 et Z_2 correspondent au champ 222 lorsqu'il est encore nu et Z_3 et Z_4 correspondent au champ 222 avec de la végétation (maïs).

Analyse des champs nus

Les remarques faites sur Alling sont les mêmes pour les champs nus (Z_1 et Z_2). p varie de 1.5 dB et q de 4 dB avec la résonance identifiée à la sous-image 1. α varie de près de 7 ° et l'entropie de 0.35. L'angle α_1 varie de seulement 2 ° et semble donc plus adapté aux sols nus périodiques.

Le paramètre p_r a un comportement proche de celui de l'entropie mais il varie moins. $SDERD$ varie de 0.2 mais d'après l'étude du chapitre 5, un sol est considéré nu pour $SDERD > 0.5$, donc malgré les variations de ce paramètre, son interprétation physique reste cohérente. δ_1 varie et passe la limite de validation d'un sol nu où $\sigma_{hhhh} < \sigma_{vvvv}$ à la sous-image 4.

Analyse des champs recouverts de végétation

Dans cette analyse nous nous intéressons davantage aux paramètres polarimétriques α, α_1, δ_1, p_r et $SDERD$ utilisés dans le chapitre 5.

Contrairement à son comportement invariant sur les sols nus, α_1 varie de 6 ° avec un pic à la sous-image 2. L'angle α varie de seulement 3 °. δ_1 est constant. p_r varie peu comme $SDERD$. Ainsi, les paramètres choisis pour l'étude des sols recouverts de végétation du chapitre 5, δ_1, α, p_r et $SDERD$ semblent être pertinents par rapport à leur stationnarité.

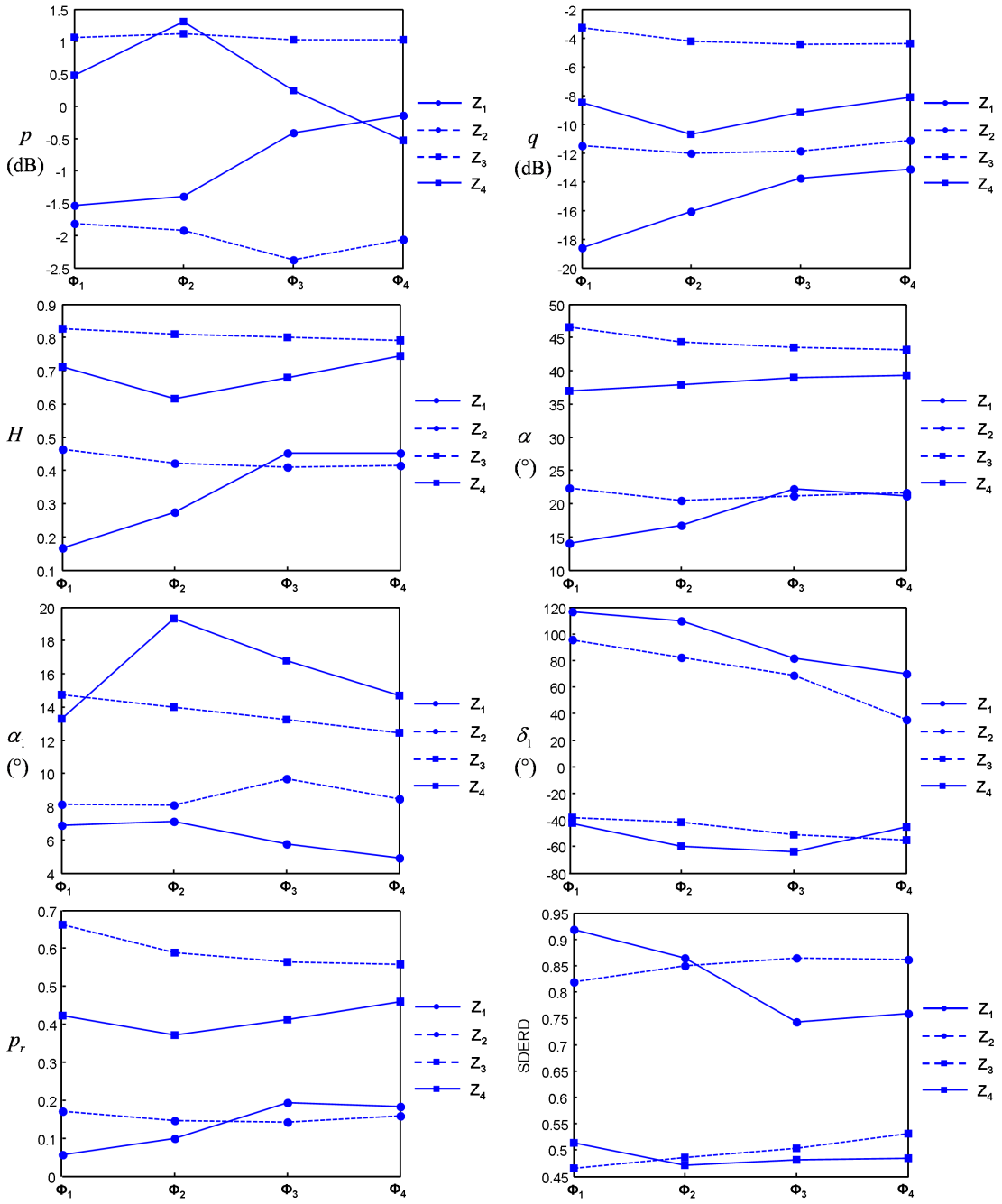


FIG. 4.25 – p, q, H, α, α_1, δ_1, p_r et SDERD sur la partie non-stationnaire du 6 juin (Z_1) et du 6 juillet (Z_3) , et sur la partie stationnaire du 7 juin (Z_2)et du 5 juillet (Z_4), en fonction des quatre sous-images

4.4 Estimation de l'humidité des zones non- stationnaires

Comme il a été observé sur plusieurs jeux de données SAR, le paramètre α_1 sur les zones de surface est invariant pour différents angles azimutaux. Il n'est donc pas

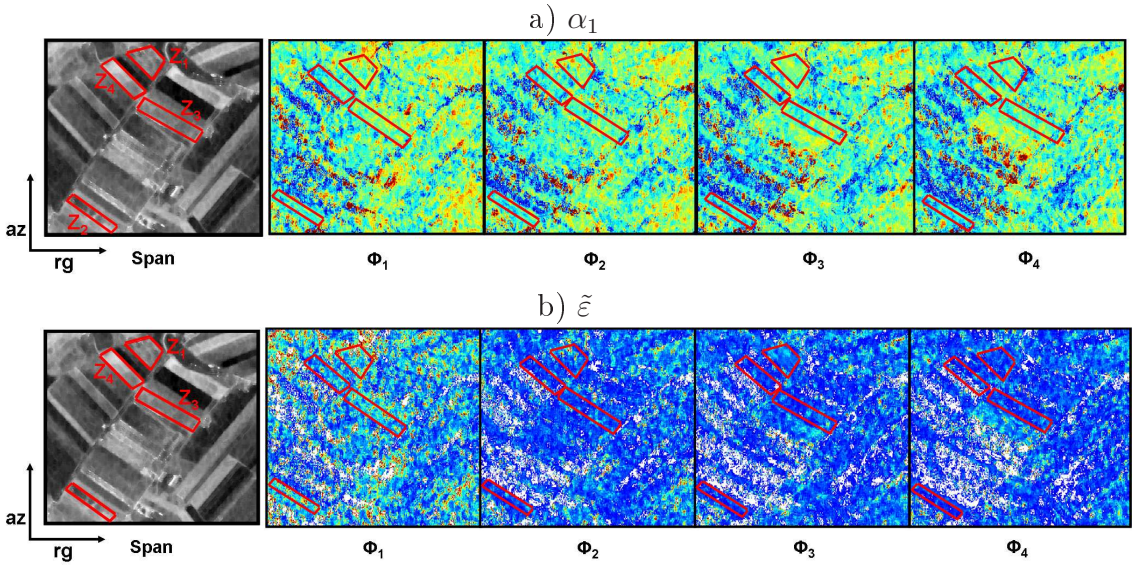


FIG. 4.26 – a- α_1, b- Estimation de l'humidité pour les 4 sous-images de la zone d'étude du site d'Alling

sensible à la structure périodique d'un sol nu. Ainsi, les avantages présentés par ce paramètre permettent de l'utiliser afin d'estimer l'humidité des sols. La méthode d'inversion décrite dans le chapitre 3, est basée sur cet angle.

Une estimation de la constante diélectrique est réalisée sur l'image d'Alling de mars en pleine résolution et également pour les quatre sous-images comme le montre la figure 4.26. L'estimation de cette permittivité semble constante pour chacune de ces cinq images. Une différence apparaît sur le masque de validité due aux variations de δ_1 comme le montre la figure 4.25.

Cette insensibilité à la variation des angles azimutaux se confirme sur les courbes de la figure 4.27. Les variations de la constante diélectrique estimée des champs non-stationnaires (Z_1 et Z_2) sont les mêmes que celles des champs stationnaires (Z_3 et Z_4). Ainsi, nous pouvons conclure, que la méthode basée sur le paramètre α_1 est bien adaptée à l'estimation de l'humidité des sols rugueux et périodiques. Il est à noter que les résultats de cette estimation ne peuvent être comparés aux vérités terrain car inexistantes pour ces champs.

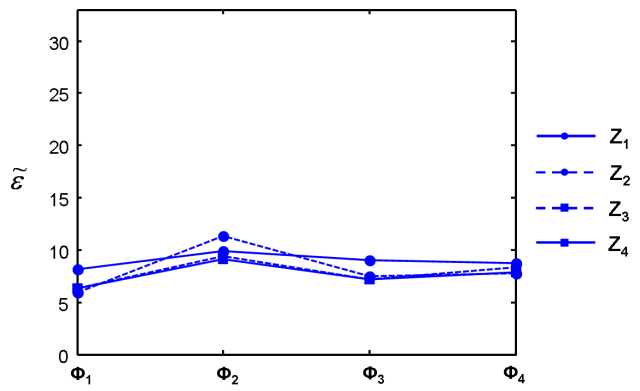


FIG. 4.27 – ε sur 2 champs non-stationaires Z_1 et Z_2 et 2 champs stationnaires Z_3 et Z_4 pour les 4 sous-images qui sont présentées sur la figure 4.17

4.5 Conclusion

Les capteurs SAR à haute résolution possèdent une grande ouverture de faisceau en azimut ansi qu'une largeur de bande transmise importante. Au cours de la formation d'une image SAR, différents angles azimutaux et longueurs d'onde sont intégrés afin de focaliser l'image SAR pleine résolution. Les variations des réponses électromagnétiques dues aux diversités d'angle et de fréquence ne sont pas prises en considération.

Cette partie présente une méthode d'analyse temps-fréquence qui est utilisée pour décomposer des images SAR déjà focalisées dans les domaines spectraux en distance et/ou en azimut. Cette représentation permet de caractériser la réponse électromagnétique de la scène, observée sous différents angles de visée en azimut et pour différentes longueurs d'onde. Cette approche peut être appliquée sur différents types de scènes [Leducq(2006)] [Ferro-Famil(2007)] :

- les zones urbaines semi-artificielles, constituées de batiments et d'infrastructures urbaines
- les scènes naturelles composées de champs agricoles et de forêts.

Dans notre cas, cette décomposition a permis de détecter des comportements non-stationnaires sur les sols à structure périodique. Par le biais d'une analyse polarimétrique suivant différentes sous-images, le comportement inhabituel des paramètres polarimétriques (p, q, H et α) utilisés dans les méthodes classiques d'inversion a été mis en avant. Ces paramètres varient en fonction de l'angle d'azimut pour des zones non-stationnaires ce qui implique qu'ils sont inadaptés pour l'estimation de l'humidité des sols à structure périodique. Par contre, cette même étude polarimétrique a relevé la pertinence du paramètre α_1 qui se comporte de la même façon sur des champs stationnaires ou non. Ainsi, la méthode basée sur ce paramètre et élaborée dans le chapitre 3, est une méthode adaptée pour l'estimation de l'humidité des sols à structure périodique.

La présence de végétation plantée périodiquement a aussi pu être détectée dans ce chapitre. Ces champs ont suivant la trajectoire du radar un comportement non-stationnaire.

Bibliographie

[AgriSAR(2006)] "AGRISAR 2006, Agricultural Bio-/Geophysical retrievals from frequent repeat SAR and optical imaging", http ://earth.esa.int/campaigns/DOC/AGRISAR_Final_Report.pdf

[Chuang(1981)] S. L. Chuang, J. A. Kong, "Scattering of waves from periodic surfaces". IEEE Proc., vol.69,pp. 1132-1144, 1981.

[Cordey(2004)] R. Cordey, U. Wegmüller, C. Werner, P. Meadows, "Flashing fields : A preliminary investigation", Proc. 4th Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR data for Land Applications, Innsbruck, Austria, 2004.

[Beckmann(1963)] P. Beckmann, A. Spizzichino, "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces", MacMillan, New York, International Series of Monographs on Electromagnetic Waves, vol.4, Oxford :Pergamon, 1963.

[Ferro-Famil(2003)] L. Ferro-Famil, A. Reigber, E. Pottier, W. M. Boerner, "Scene Characterization Using Subaperture Polarimetric SAR Data". IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 41, No. 10, October 2003.

[Ferro-Famil(2005)] L. Ferro-Famil, A. Reigber, E. Pottier, "Nonstationary natural media analysis from polarimetric SAR data using a two-dimensional time-frequency decomposition approach". Can. J. Remote Sensing, vol. 31, No. 1, pp. 21-29, 2005.

[Ferro-Famil(2007)] L. Ferro-Famil, "Traitement du signal radar polarimétrique. Aspects théoriques et applications à la télédétection", Habilitation à diriger des recherches de l'Université de Rennes, France, Juillet 2007.

[Hajnsek(2003)] I. Hajnsek, E. Pottier, S. R. Cloude, "Inversion of surface parameters from polarimetric SAR", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 4, pp. 727-744, 2003.

[Herold(2000)] M. Herold, H. Zwenzener, I. Hajnsek, M. Davidson, C. C. Schmullius, "Acquisition and evaluation of field measurements from the Alling-SAR 2000 campaigns",Proceedings of the Retrieval of bio- and geo-physical parameters from SAR Data for Land Applications, University of Sheffield, UK, 2000.

[Leducq(2006)] P. Leducq, "Traitements temps-fréquence pour l'analyse de scènes complexes dans les images SAR polarimétriques", Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes, France, Juin 2006.

[Moreira(1995)] J. R. Moreira, W. Keydel, "A new MTI-SAR approach using reflectivity displacement method", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 33, no. 5, pp. 1238-1244, 1995.

[Oh(2004)] Y. Oh, "Quantitative retrieval of soil moisture content and surface roughness from multipolarized radar observations of bare soil surfaces", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, no. 3, pp. 596-601, 2004.

[Reigber(2005)] A. Reigber, L. Ferro-Famil, "Interference suppression in synthesized SAR images", IEEE Transaction Geoscience end Remote Sensing letters, vol. 2, No. 1, 2005.

[Tavakoli(1991)] A. Tavakoli, K. Sarabandi, F. T. Ulaby, "Horizontal propagation through periodic vegetation canopies", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 39, No. 7, 1991.

[Whitt(1994] M. W. Whitt, F. T. Ulaby, "Radar response of periodic vegetation canopies", International Journal Remote Sensing, vol. 15, no. 9, pp. 1813-1848, 1994.

[Wegmüller(2004)] U. Wegmüller, C. Werner, R. Cordey, "Flashing fields ! A preliminary investigation", Proc. ENVISAT Symposium 2004, Salzburg, Austria, 2004.

Chapitre 5

Étude des sols recouverts de petites végétations

Sur les zones agricoles étudiées dans les deux chapitres précédents, il existe en plus des sols nus, de nombreux champs recouverts de végétations. La présence de ces nombreux champs permet d'étudier la possibilité d'estimer le taux d'humidité de ces sols avec végétation.

De nombreuses études récentes se sont penchées sur ce problème. Comment estimer l'humidité du sol recouvert de petites végétations ? [Bindlish(2001] a proposé de modéliser la végétation avec des paramètres empiriques qu'il extrait de la réponse électromagnétique afin d'obtenir la contribution de la surface. [Hajnsek(2009)] fait de même en ajoutant au modèle X-Bragg (chapitre 3), la décomposition de Freeman qui définit une matrice empirique de la réponse polarimétrique de la végétation [Freeman(1998)].

Dans cette optique, nous avons décidé d'étudier les sols recouverts de petites végétations non pas suivant le type de culture comme de nombreuses classifications le proposent [Ferrazzoli(1997)] [Lee(1999)] [Hoekman(2003)] [Skriver(2005)], mais suivant la forme, la hauteur et l'occupation au sol. Dans un premier temps, ce chapitre présente une classification des différents types de champs agricoles. Cette classification est faite en deux étapes distinctes. Avec les données d'Alling, une étude comportementale des paramètres polarimétriques est effectuée afin d'en tirer les paramètres les plus sensibles à la végétation. Puis, une classification utilisant la technique des Machines à Vecteur de Support, SVM, et une évolution temporelle des classes sont proposées et appliquées sur les données d'AgriSAR.

Enfin, une estimation de l'humidité des sols recouverts de petites végétations est réalisée sur le site d'AgriSAR afin de comparer l'impact du type de champ sur l'estimation de l'humidité.

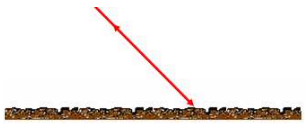
5.1 Étude des paramètres polarimétriques pour la classification

5.1.1 Définition des classes

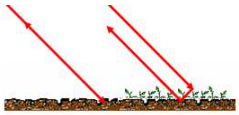
L'objectif de ce chapitre est d'estimer l'humidité des sols recouverts de petites végétations. Avant d'envisager une estimation de cette humidité, il semble important d'identifier le style de végétation susceptible de permettre cette estimation. En effet, d'après le modèle électromagnétique du chapitre 2, la contribution du sol est atténuée par le terme Υ^2 (2.113) qui dépend des caractéristiques physiques de la végétation. Une plante petite et de feuillage peu dense atténuera moins la contribution surfacique qu'une plante haute et de feuillage dense. C'est dans cette optique que les champs agricoles d'Alling ont été distingués en quatre catégories (sols nus, jeunes plantes et petites végétations, plantes céréalières (blé, orge, seigle, avoine, luzerne, alpage), plantes hautes et denses (betterave sucrière, trèfles, pommes de terre, maïs)). Dans cette étude du comportement des paramètres polarimétriques pour la classification, les données de mars et de juillet sont utilisées.

Les données de mars permettent de distinguer deux catégories de sols : les sols nus et les sols recouverts de jeunes plantes. En juillet, la diversité végétale est plus importante et plus intéressante. En effet, les champs agricoles présentent des cultures différentes : maïs, pommes de terre, betteraves sucrières, orges, seigles, avoines, blés. . .La forme des plantes et la manière dont elles sont plantées nous permettent de distinguer les champs agricoles d'hiver et d'été par quatre catégories.

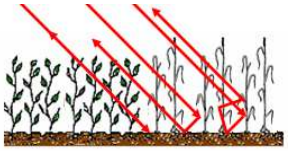
Ces quatre catégories dépendent de la forme, de la hauteur des plantes et de leur occupation aux sols, comme elles sont résumées et schématisées sur la figure 5.1. Les catégories de 1 à 4 peuvent être considérées comme représentatives de l'évolution des plantes du sol nu à la plante à pleine maturité.



Cat1 : Sols nus
(champs récoltés, labourés, hersés)



Cat2 : Jeunes plantes et petites végétations
(céréales d'hivers, semences, petites herbes)



Cat3 : Plantes céréalières (blé),
(orge, seigle, avoine, luzerne, alpage)

Cat4 : Plantes hautes et denses
(betterave sucrière, trèfles, pommes de terre, maïs)

FIG. 5.1 – Quatre différentes catégories de champs agricoles

La première catégorie représente les champs nus. Le deuxième catégorie regroupe les jeunes plantes car petites en tailles et espacées entre elles permettant ainsi que dans une cellule de résolution les plantes occupent autant voire moins de place que le sol nu. Ainsi, la contribution de la surface est suffisamment importante pour être récupérée et analysée afin d'estimer ses caractéristiques notamment diélectriques. La troisième catégorie regroupe les plantes que l'on qualifiera de plantes céréalières c'est-à-dire les plantes comme le blé, hautes, fines, possédant de nombreuses tiges verticales. Cette catégorie ne permet pas de récupérer suffisamment d'information sur la diffusion de surface mais cette information existe et peut sans doute être supposée si l'on veut caractériser la contribution particulière de ce type de culture. Certaines études identifient une matrice polarimétrique modélisant des plantes orientées comme des plantes céréalières ou non orientées [Bindlish(2001], [Neumann(2007)], [Hajnsek(2009)], [Neumann(2009)]. La quatrième catégorie regroupe les plantes plus hautes comme le maïs en juillet mais aussi des plantes plus petites mais denses, touffues avec de grosses feuilles comme les betteraves sucrières. Cette végétation se comporte comme un volume dense et compact où la contribution du sol est considérée négligeable ou tendant à l'être car très atténuée par le volume contrairement à la troisième catégorie.

Afin d'identifier ces quatre catégories, il est d'abord nécessaire de faire une analyse des paramètres polarimétriques en fonction de ces catégories.

5.1.2 Comportement des paramètres polarimétriques

Grâce à l'identification des différentes catégories de champs agricoles, une étude polarimétrique est effectuée afin de comparer les comportements polarimétriques des quatre catégories de champs pour identifier les paramètres polarimétriques sensibles au changement de catégories pour la classification. La figure 5.2 représente la moyenne des paramètres polarimétriques tels que l'entropie, le paramètre de Lüneburg, les paramètres $SERD$ et $SDERD$ et les angles α et α_1 des différents champs agricoles du site d'Alling en mars et en juillet. Les écart types des différents paramètres polarimétriques observés sur la figure 5.2 sont donnés dans le tableau 5.1 par catégories sur la totalité de champs agricoles observés.

Paramètre	totalité des champs	Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 4
H	0.08	0.09	0.1	0.07	0.05
p_r	0.18	0.1	0.13	0.31	0.25
$SERD$	0.13	0.08	0.09	0.19	0.17
$SDERD$	0.25	0.1	0.16	0.43	0.35
α_1	10.23 $^\circ$	7.5 $^\circ$	5.79 $^\circ$	15.32 $^\circ$	15.24 $^\circ$
α	4.4 $^\circ$	4.25 $^\circ$	4.49 $^\circ$	4.54 $^\circ$	4.56 $^\circ$

TAB. 5.1 – Écart type des paramètres polarimétriques représentés sur la figure 5.2 sur tous les champs et par catégories

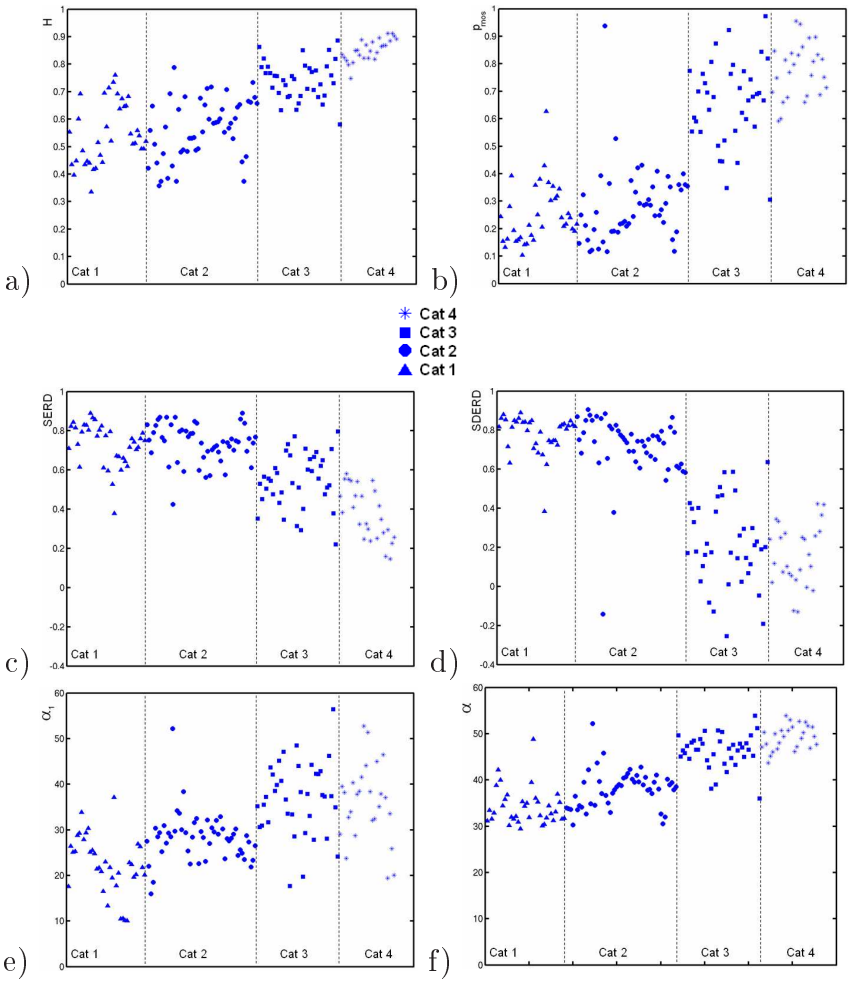


FIG. 5.2 – Données SAR polarimétriques de différentes catégories des champs agricoles. a- H, b- p_{rnos}, c- $SERD$, d- $SDERD$, e- α_1 and f- α

L'entropie représentée sur la figure 5.2-a augmente linéairement avec l'évolution de la végétation c'est-à-dire avec l'augmentation de la contribution volumique de la végétation. Cette pente est faible tout au long des quatre catégories. En effet, le mécanisme globale de rétrodiffusion devient de plus en plus aléatoire avec la croissance de la végétation. Il est à noter que ce paramètre possède un très faible écart type sur la globalité des champs étudiés (0.08). De plus, pour les catégories 1 et 2, les variations de ce paramètre sont importantes. En effet, H varie de 0.4 à 0.7.

Le paramètre de Lüneburg, p_r représenté sur la figure 5.2-b, a deux niveaux de valeurs bien distincts et un écart type faible à deux niveaux également. En effet, pour les catégories 1 et 2, il est inférieur à 0.5 et d'écart type 0.1 alors que celui des catégories 3 et 4 est supérieur à 0.5 avec un écart type de 0.3. Ce paramètre permet de séparer deux groupes de catégories.

Le paramètre $SERD$ diminue linéairement avec la végétation. En effet, avec l'apparition de la végétation, ce paramètre qui est le rapport entre la diffusion simple et multiple diminue car la diffusion multiple apparaît et augmente avec l'apparition d'un volume. Cette diffusion multiple est toutefois inférieure à la diffusion simple

qui reste majoritaire. Son écart type de valeur est faible sur l'ensemble des données (0.13).

Comme pour le paramètre de Lüneburg, le paramètre $SDERD$ représenté sur la figure 5.2-c possède deux niveaux de valeurs distincts entre les deux premières catégories et les deux dernières tout comme ses valeurs d'écart type. Ceci est dû à l'apparition de diffusion double liée à la végétation agricole. En effet, les plantes caractérisées ici peuvent être schématisées comme des tiges donc le niveau de diffusion simple diminue. En ce qui concerne les petites plantes denses, la contribution simple diminue également, c'est pourquoi le rapport entre simple et double diffusion de ces plantes diminue également.

La figure 5.2-e représente le paramètre α_1. Ce paramètre augmente légèrement avec la végétation. Dans le cas de diffusion de surface les valeurs de α_1 se situent entre 0 et 40 $^\circ$ et pour la diffusion de végétation, ce paramètre prend des valeurs autour de 45 $^\circ$. Sur les données, ces valeurs se retrouvent avec, pour les catégories 1 et 2, un comportement correspondant plutôt à une surface et pour les catégories 3 et 4, un comportement correspondant à la végétation. Les valeurs de α_1 sont très distribuées au sein d'une même catégorie, en effet, cet angle est très sensible à l'humidité du sol et de la plante, et selon ces caractéristiques, il peut varier fortement comme le montre ses valeurs d'écart type.

L'angle α représenté sur la figure 5.2-f, augmente également en fonction de la végétation mais a un écart type beaucoup plus faible que α_1 par catégorie car α représente le mécanisme global du milieu. Cette augmentation permet de distinguer les différentes catégories de façon plus ou moins significatives d'autant que sont écart type est constant de l'ordre de 4.4 $^\circ$.

Le paramètre δ_1 est un paramètre permettant d'évaluer la relation $\sigma_{vvvv} > \sigma_{hhhh}$ caractéristique des sols nus comme vu dans les chapitres 2 et 3. Ce paramètre est représenté sur la figure 5.3 et dans le tableau 5.2. On peut constater que les catégories 1 et 2 ont un $|\delta_1| > 90$ $^\circ$ caractéristique des surfaces contrairement aux deux autres catégories indiquant que $\sigma_{vvvv} < \sigma_{hhhh}$. Il est à noter que la majorité des champs catégories 1 et 2 ont un $\delta_1 > 90$ $^\circ$ ce qui explique que l'écart type est important sur ce paramètre pour les catégories 3 et 4 où δ_1 évolue dans toute sa plage de valeurs soit de 180 $^\circ$.

Quelques champs ont un comportement polarimétrique différent de la majorité des champs agricoles qui peut être du à leurs caractéristiques biophysiques.

Paramètre	totalité des champs	Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 4
δ_1	71.85 $^\circ$	61 $^\circ$	37 $^\circ$	105 $^\circ$	103 $^\circ$

TAB. 5.2 – Écart type de δ_1 représenté sur la figure 5.3 sur tous les champs et par catégories

De nombreux autres paramètres polarimétriques ont été étudiés mais n'ont pas montré de comportement caractéristique pour différencier les différentes catégories.

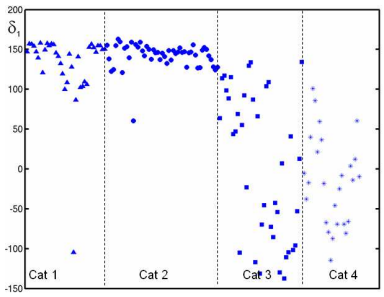


FIG. 5.3 – δ_1 pour les quatre catégories de champs agricoles

A partir de cette analyse polarimétrique, une classification hiérarchique très simple est présentée dans le paragraphe suivant. Elle utilise les paramètres les plus pertinents qui sont : δ_1, p_r, $SDERD$, $SERD$ et α. Elle va permettre de valider l'utilisation de ces paramètres pour la classification des sols recouverts de végétation.

5.1.3 Classification hiérarchique

A partir des observations faites lors de l'étude comportementale des paramètres polarimétriques en fonction des différentes catégories de champs agricoles, cinq paramètres polarimétriques sont utilisés pour une classification hiérarchique. Cette méthode de classification est constituée en deux étapes. La première étape consiste à identifier la catégorie A regroupant les catégories 1 et 2 (sols nus majoritaires), de la catégorie B regroupant les catégories 3 et 4 (végétation majoritaire). La seconde étape sert à séparer la catégorie 1 de la catégorie 2, de même pour les catégories 3 et 4. L'organigramme de cette classification hiérarchique est représentée sur la figure 5.4.

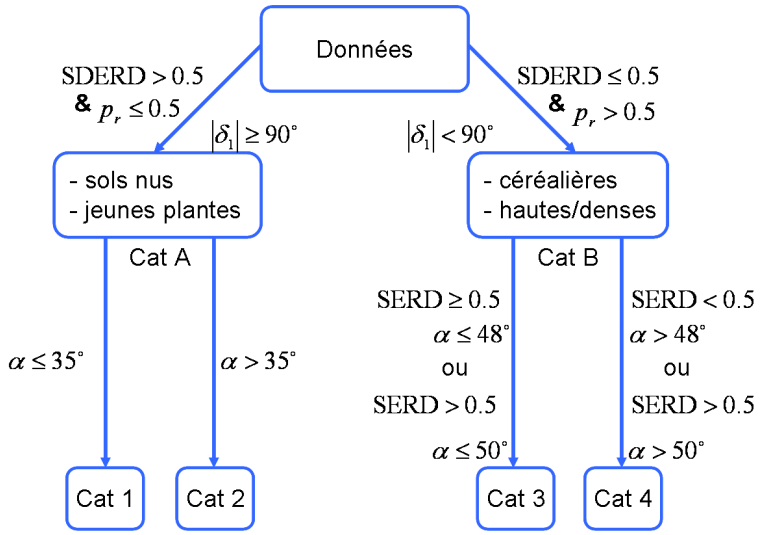


FIG. 5.4 – Organigramme de la classification hiérarchique

Pour séparer la catégorie A et B, les trois paramètres δ_1, p_r et $SDERD$ sont utilisés. Le paramètre δ_1 dépend de la pénétration de l'onde selon la présence de la végétation est donc sensible à la contribution de la surface sur la réponse électromagnétique reçue.

Les paramètres p_r et $SDERD$ se basent sur les valeurs propres de la matrice $\mathbf{T}$ uniquement, c'est-à-dire sur les puissances associées au mécanisme de diffusion et donc à la forme géométrique des plantes. Les seuils associés à p_r et $SDERD$ sont 0.5.

La seconde étape de la classification hiérarchique consiste à séparer les champs en quatre catégories. Les paramètres α et $SERD$ sont utilisés.

L'angle α est assez sensible pour séparer les catégories 1 et 2. En effet, les sols nus sont caractérisés par un angle α inférieur à 35 °, alors que les valeurs de cet angle sont supérieures à 35 ° pour les champs recouverts de petites végétations. Pour différencier les catégories 3 et 4, il est nécessaire d'utiliser un paramètre supplémentaire, ainsi $SERD$ est utilisé. Les champs de céréales sont identifiés pour $SERD \geq 0.5$ et pour $\alpha \leq 50$ °, alors que les champs avec des plantes hautes et/ou denses présentent des valeurs telles que $SERD < 0.5$ et $\alpha > 50$ °.

5.1.4 Résultats

La classification hiérarchique présentée dans le paragraphe précédent est appliquée sur les données d'Alling en mars et en juillet.

La première étape consiste à séparer les catégories 1 et 2 (Cat A) des catégories 3 et 4 (Cat B) et les résultats sont représentés sur la figure 5.5 où les figures -a sont les cartes de mesures terrain, les figures -b sont les résultats selon la méthode avec p_r et $SDERD$ et les figures -c sont ceux de la méthode avec δ_1.

Pour la méthode avec p_r et $SDERD$, certains champs ne sont pas identifiés car ne correspondant à aucune catégorie. Toutefois, la distinction Cat A et Cat B est visuellement correcte.

Les résultats de la seconde étape sont représentés sur la figure 5.6 où les figures -a sont les cartes de mesures terrain, les figures -b sont les résultats selon la méthode avec p_r et $SDERD$ et les figures -c sont ceux de la méthode avec δ_1. Certains champs ne peuvent également être classés car ils n'appartiennent pas aux critères définis.

Même si les résultats de cette classification semblent visuellement proches des mesures terrain que nous possédons sur Alling, cette étude n'est pas quantifiable du fait du peu d'information que nous possédons. De plus, les zones d'entraînement ont été prises sur les 2 dates, en mars et en juillet, et l'influence de l'humidité du sol peut avoir eu un impact sur nos observations. Toutefois, les paramètres retenus lors de cette première étape sont adaptés pour classifier les sols recouverts de petites végétations.

Dans la partie suivante, une classification plus robuste basée sur les Machines à Vecteur de Support (SVM) utilisant ces paramètres en entrée est développée et appliquée sur les données d'AgriSAR.

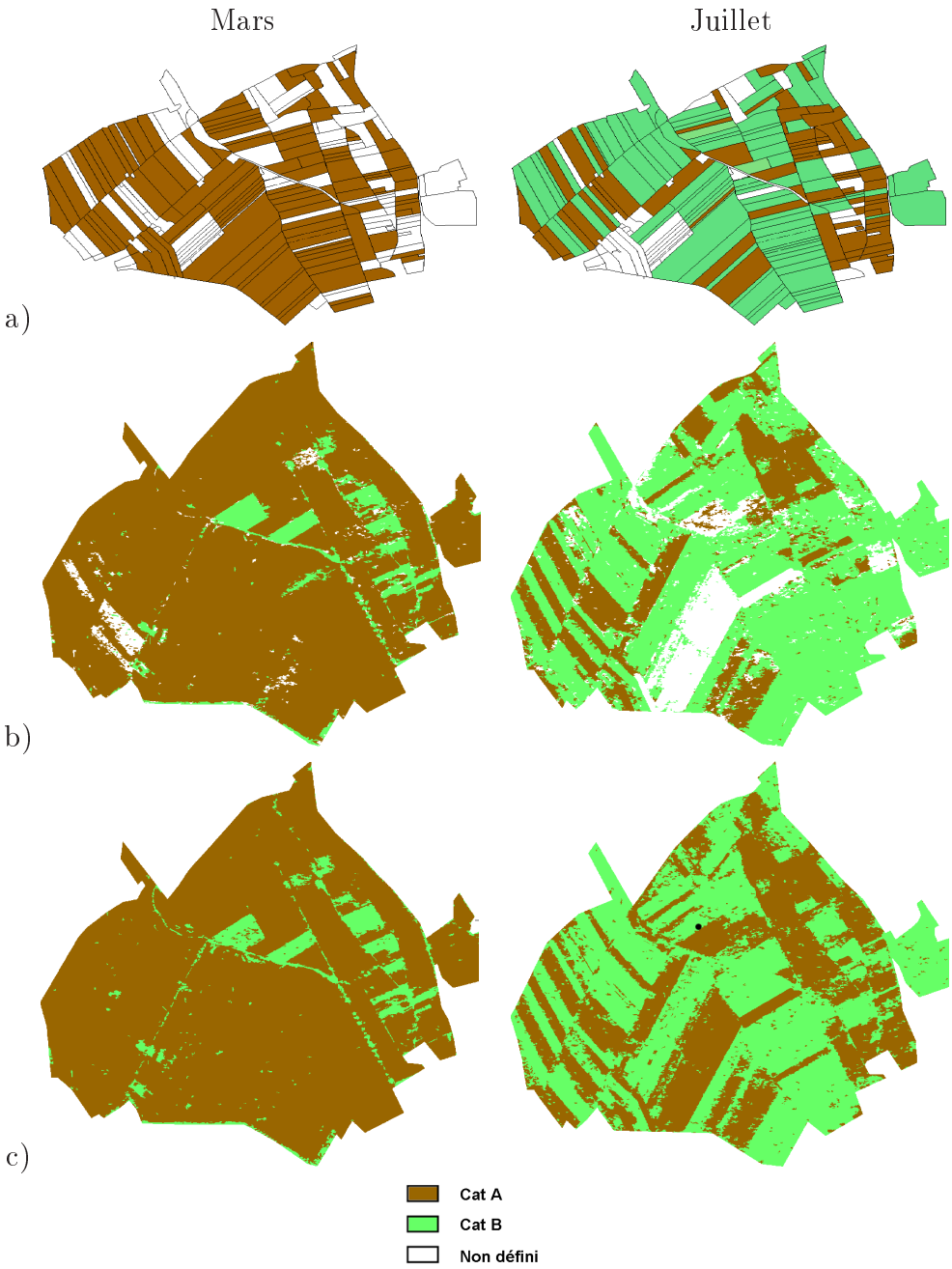


FIG. 5.5 – a- Mesures terrain, b-p_{rnos} & $SDERD$, c-δ_1

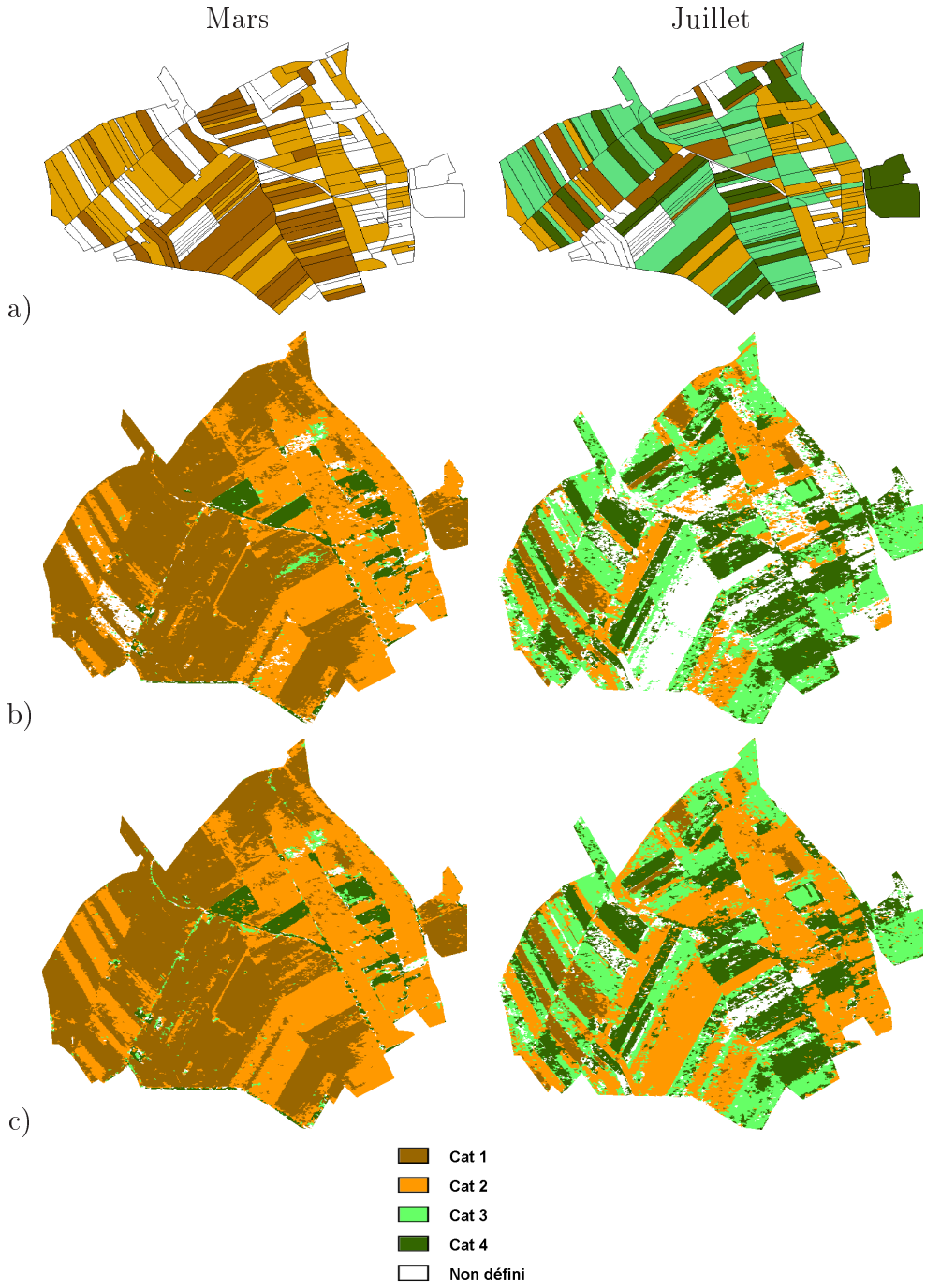


FIG. 5.6 – a- Mesures terrain, b-p_{rnos} & $SDERD$, c-δ_1

5.2 Classification SVM

Cette classification utilise les données de la campagne de mesure AgriSAR pendant laquelle de nombreuses mesures terrain ont été acquises. Sur ce site, cinq champs ont été mesurés régulièrement d'avril à août pendant la période de culture. Ces champs de référence possèdent des mesures d'humidité des sols, d'indices de surface foliaire (LAI : Leaf Area Index), de biomasses (Bio.) et de masses sèches de végétation (Veg.). Ainsi, la caractérisation des différentes catégories de sols recouverts de végétation se base sur toutes ces informations. Afin de mieux comparer les résultats issus de cette classification, les données utilisées dans cette partie sont des données géo-référencées GTC (chapitre 1) [AgriSAR(2006)].

Dans cette partie, une classification plus robuste que la classification hiérarchique est développée. Dans la classification hiérarchique, le plan séparant deux classes est trop rigide avec un choix arbitraire des seuils. Ainsi, la classification SVM qui peut identifier deux classes non linéairement séparables est utilisée.

5.2.1 Principe du SVM

Le SVM, Machines à Vecteur de Support ou Séparateurs à Vastes Marges, fait parti des méthodes à noyaux inspirées de la théorie statistique de l'apprentissage de Vladimir Vapnik. C'est une classification dite binaire par apprentissage supervisé [Vapnik(1998)] [Duda(2000)].

Cette méthode consiste à déterminer un séparateur linéaire entre deux classes dans un espace approprié. Étant supervisée, elle utilise des jeux d'entraînement nommés également jeux d'apprentissage et est basée sur des fonctions mathématiques complexes appelées fonctions noyaux permettant la séparation optimale des données.

Le but de l'apprentissage est de déterminer une fonction qui correspond aux exemples d'entraînement et qui prédit les sorties pour de nouvelles entrées. Les entrées peuvent être des descripteurs d'objets, dans notre cas, ce seront des paramètres polarimétriques et en sortie la classe des objets donnés.

Le séparateur linéaire qui va séparer les données et maximiser la distance entre ces deux classes est appelé dans la littérature hyperplan.

Sur la figure 5.7-a, est représenté un exemple de deux classes, 'o' et '+', séparées par le séparateur linéaire et une marge qui est la distance entre le séparateur linéaire et les données. Cette marge doit être maximisée pour une meilleure efficacité du SVM. En effet, comme le montre l'exemple figure 5.7-b, avec une faible marge, lors de la classification d'un nouvel élément n'appartenant pas à l'apprentissage, une erreur de classification se produit et l'entrée 'o' sera classée '+'. Or avec une marge plus importante donc optimale, le nouvel élément sera bien classé dans les cercles figure 5.7-c.

Cet exemple correspond au cas simple linéairement séparable comme la classification hiérarchique vue dans la première partie. Or, la séparation des classes est plus souvent non linéaire et l'avantage du SVM est sa capacité à changer l'espace

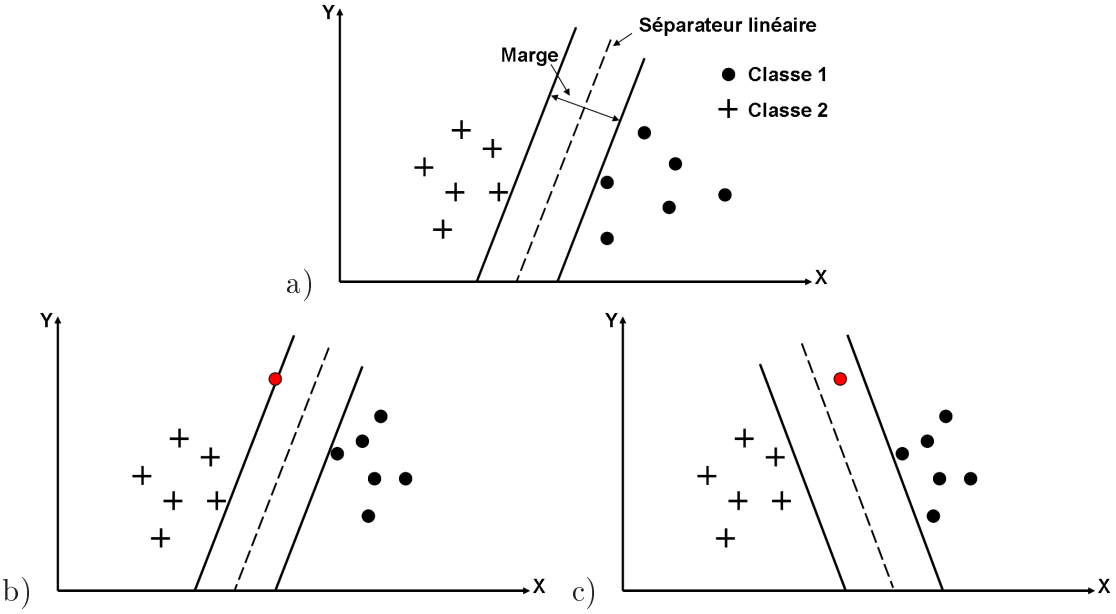


FIG. 5.7 – Plan 2D représentant 2 classes à séparer. a- Visualisation du séparateur et de la marge, b- marge faible, c- marge optimale

des données. La transformation des données séparables non linéairement dans un nouvel espace permet une séparation linéaire des données comme le montre la figure 5.8. Cette transformation dite non linéaire est réalisée par une fonction noyau. Les fonctions noyaux paramétrables les plus connues sont les fonctions : linéaire, polynomiale, gaussienne et laplacienne.

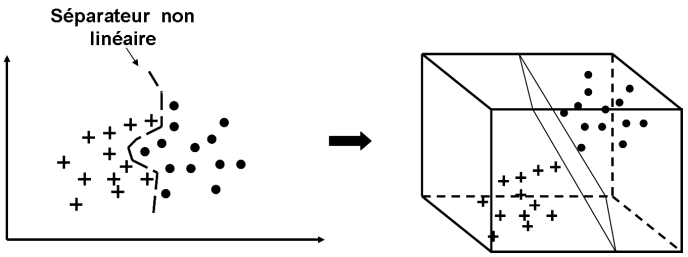


FIG. 5.8 – Plan 2D et Plan transformé

L'algorithme du SVM utilisé [Lardeux(2008)], a les caractéristiques techniques suivantes :

- méthode dit du 1 contre 1 pour multi-classes,
- fonction de noyau gaussienne nommée aussi RBF (Radial Basis Fonction),
- le paramètre γ est optimisé conjointement au paramètre de coût.

Pour plus d'information sur le SVM et l'implémentation, les références bibliographiques suivantes sont assez complètes [Vapnik(1998)] [Duda(2000)].

5.2.2 Identification des classes

La précision des mesures terrain associée à l'observation des paramètres polarimétriques sur onze dates d'acquisition ont permis de définir huit classes de champs. Ce grand nombre de classe est dû à une diversité de champs beaucoup plus importante que sur les deux images d'Alling mais l'objectif reste le même : classifier les champs pour pouvoir ensuite inverser le taux d'humidité du sol. Le tableau 5.3 présente ces huit catégories de champs agricoles avec leurs caractérisations et les critères des paramètres biophysiques associés. Sur la figure 5.9, des photos correspondantes à chaque classe sont représentées. Le choix des classes a été fait indépendamment de l'humidité du sol mesurée. L'humidité peut varier fortement pour une même classe.

Classe	Caractérisation	Critère
1	Sol nu	LAI = 0 Bio = 0 Veg = [0 : 30]%
2	Petites végétations espacées, sol non recouvert	LAI = [0 : 3] Bio < 0.5 Veg = [10 : 30]%
3	Plantes asséchées styles céréales	LAI = [1 : 4] Bio = [1 : 2] Veg = [20 : 45]%
4	Grosses feuilles, pas hautes et peu nombreuses, sol recouvert	LAI = 1.2 Bio < 1 Veg = 15%
5	Petites touffes de végétaux, dense, sol recouvert	LAI = [3 : 4] Bio < 1 Veg = [10 : 30]%
6	Plantes asséchées de type colza	LAI = [1 : 4] Bio = [1 : 2] Veg = [20 : 45]%
7	Plantes de type céréale, hautes et denses, fines et nombreuses	LAI => 4 Bio[1 : 2.2] ∀Veg
8	Peu de plantes mais hautes ou avec de grosses feuilles (denses)	LAI = [2 : 5] Bio = [0 : 1] Veg = [10 : 20]%

TAB. 5.3 – Caractérisation et critères des 8 classes de champs agricoles

Les plantes de type céréalière telles que le blé et l'orge sont séparées des plantes de type colza.

La classe 3 et la classe 6 sont proches de par leurs critères, la différence vient du type de plante : colza ou céréalière.

La classe 4 est une classe particulière car ne correspondant qu'à un seul champ : le colza (140) et à une seule date, le 19 avril.

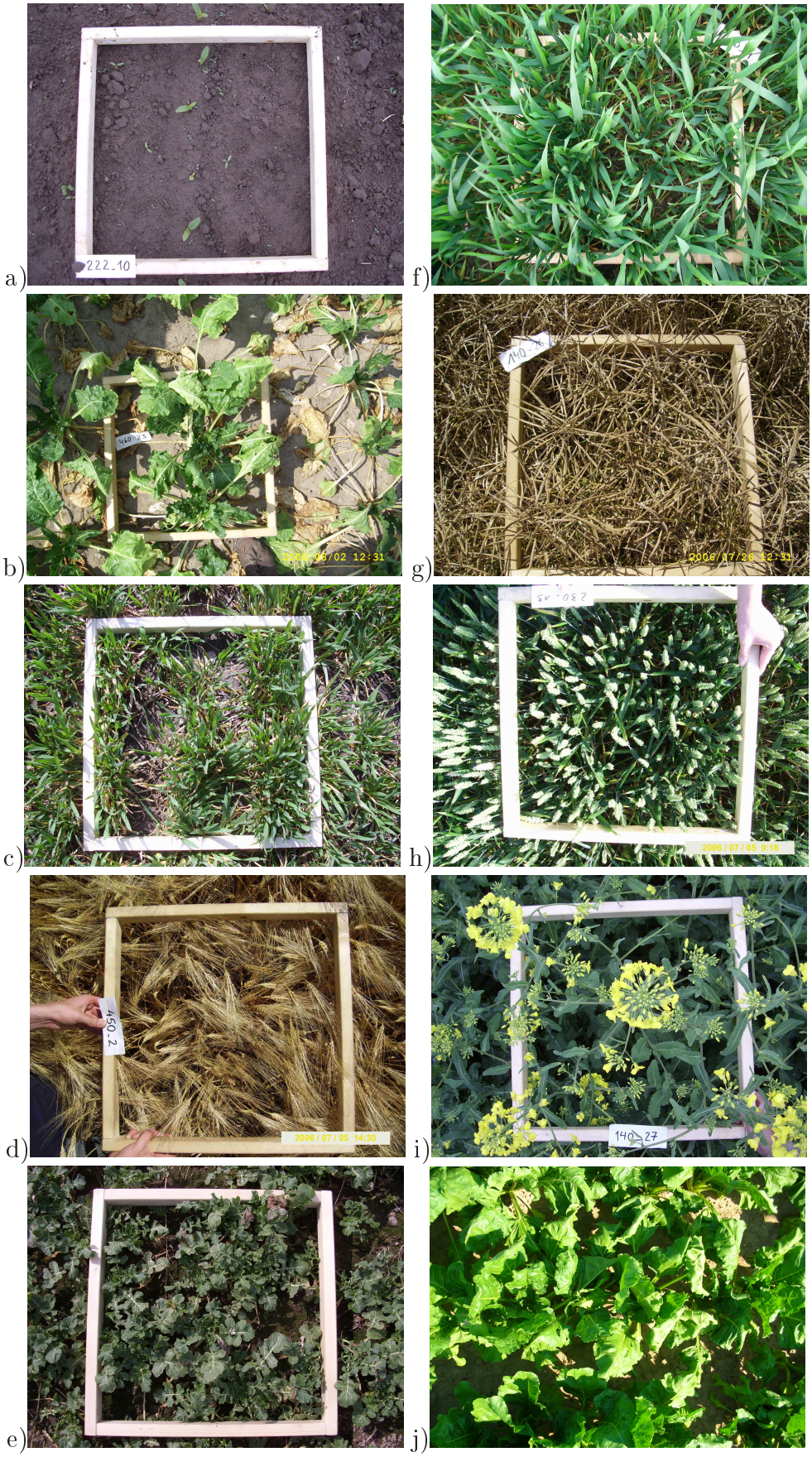


FIG. 5.9 – a- Classe 1, b-c- Classe 2, d- Classe 3, e- Classe 4, f- Classe 5, g- Classe 6, h- Classe 7, i-j- Classe 8

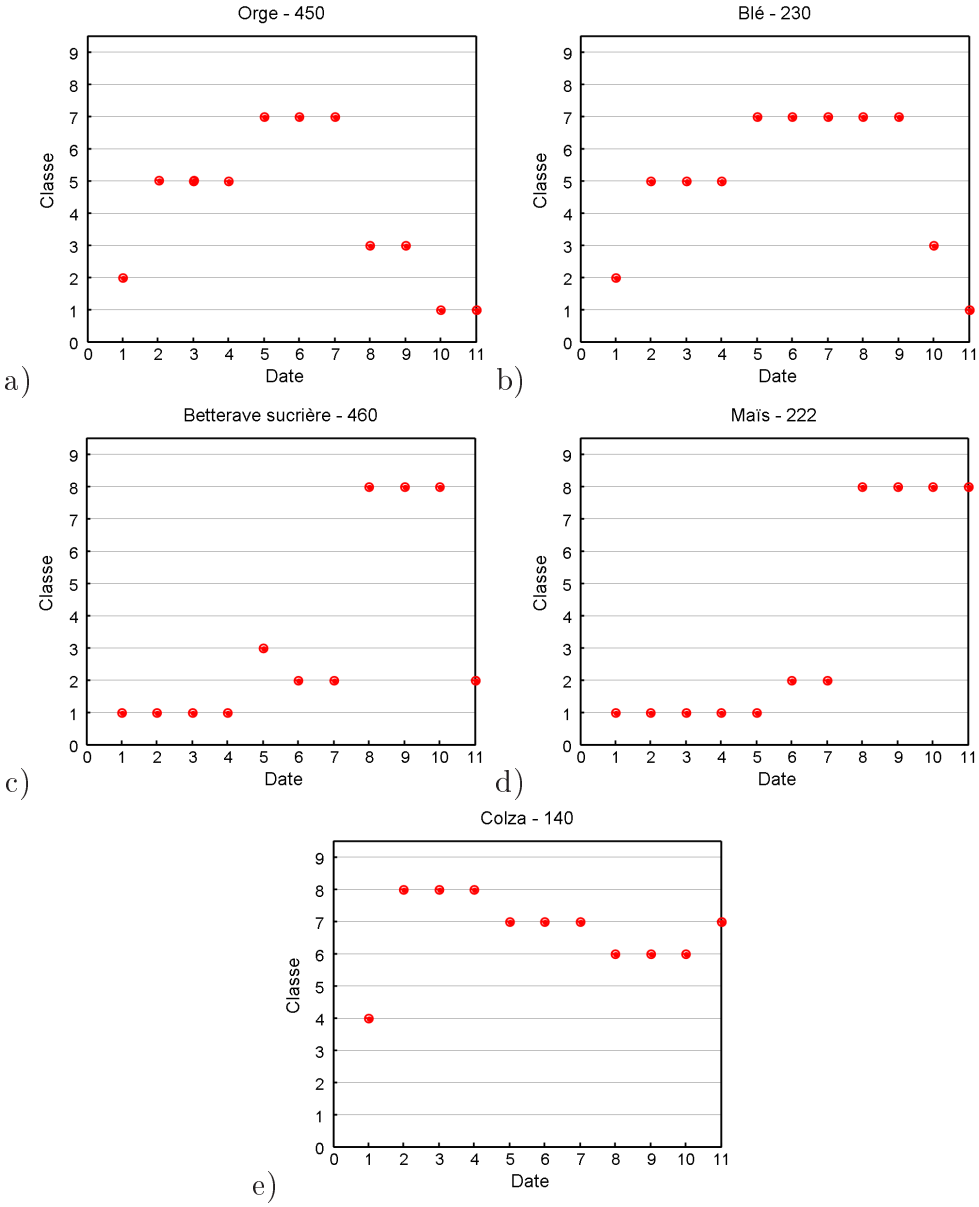


FIG. 5.10 – Évolution des classes pour les différentes dates pour les cinq champs de références

Les classes 2 et 3 ainsi que les classes 5 et 6 ont des réponses polarimétriques proches.

La figure 5.10 identifie par date le choix des classes qui a été déterminé pendant ces travaux pour les cinq champs de références.

5.2.3 Cartes de classification

5.2.3.1 Méthodologie

L'apprentissage des classes a consisté à regrouper pour chacune des huit classes les données radar acquises sur les onze dates (tableau 5.4). Parmi chaque classe 500 pixels ont été choisis aléatoirement, ce qui peut correspondre à une moyenne de 80 pixels par classe pour chaque date. (Un test sur 1000 pixels choisis de la même manière convergeait de la même façon que pour 500 pixels, mais était moins rapide)(tableau 5.4). Le choix de ce faible nombre de pixels d'apprentissage a pour objectif d'obtenir une classification la moins supervisée possible pour déterminer la robustesse du choix des paramètres d'entrée de la classification.

Classes	Cl 1	Cl 2	Cl3	Cl 4
Nb de pixels	1338771	758298	318688	104118
Classes	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8
Nb de pixels	493892	312354	1224840	1185370
Nb de pixels total	5736331			

TAB. 5.4 – Nombre de pixels par classe sur les onze dates

Modèles de classification SVM

Afin de déterminer la meilleure combinaison de paramètres pour la classification des champs agricoles avec la méthode SVM, l'apprentissage du modèle a été faite pour différents cas de paramètres d'entrées.

Trois jeux de paramètres polarimétriques d'entrée sont testés :
- méthode SVM 4P : quatre paramètres polarimétriques observés dans la première partie : δ_1, $p_{r_{nos}}$, $SDERD$ et α (le paramètre $SERD$ est trop ambiguë pour séparer autant de classes et ne fait par conséquent pas partie des paramètres utilisés pour cette nouvelle classification),
- méthode SVM [C] : cinq éléments de la matrice de covariance dans le cas de la symétrie de réflexion : σ_{hhhh}, σ_{vvvv}, σ_{hvhv}, $\Re(\sigma_{hhvv})$ et $\Im(\sigma_{hhvv})$,
- méthode SVM [C]+4P : combinaisons des deux premiers jeux de paramètres avec σ_{hhhh}, σ_{vvvv}, σ_{hvhv}, $\Re(\sigma_{hhvv})$, $\Im(\sigma_{hhvv})$, δ_1, $p_{r_{nos}}$, $SDERD$ et α.

Pour cette dernière méthode, les jeux d'apprentissage ont été choisis de deux façons distinctes : sur les onze dates comme pour les autres méthodes et sur seule-

ment trois dates représentatives des huit classes (19 avril, 16 mai et 5 juillet).

Méthode d'analyse des résultats de classification

Afin d'analyser les résultats de classification, différents paramètres de précision sont définis à partir de la matrice de confusion. Le tableau 5.5 donne un exemple général d'une matrice de confusion pour trois classes.

Les éléments de la diagonale D_i correspondent au nombre de pixels bien classés alors que les autres éléments correspondent aux pixels mal classés. $\Sigma[\mathbf{T}]$ est le nombre total de pixels.

nb de pixels	Classification				
Vérité Terrain	Classe 1	Classe 2	Classe 3	ΣT_i	Précision producteur
Classe 1	D_1	$(1,2)$	$(1,3)$	ΣT_1	$\frac{D_1}{\Sigma T_1}$
Classe 2	$(2,1)$	D_2	$(2,3)$	ΣT_2	$\frac{D_2}{\Sigma T_2}$
Classe 3	$(3,1)$	$(3,2)$	D_3	ΣT_3	$\frac{D_3}{\Sigma T_3}$
ΣC_i	ΣC_1	ΣC_2	ΣC_3	$\Sigma[\mathbf{T}] = \mathbf{\Sigma(\Sigma C_i)} = \mathbf{\Sigma(\Sigma T_i)}$	
Précision utilisateur	$\frac{D_1}{\Sigma C_1}$	$\frac{D_2}{\Sigma C_2}$	$\frac{D_3}{\Sigma C_3}$	Précision moyenne $\frac{\Sigma(\frac{D_i}{\Sigma T_i})}{\text{nb classes}}$	Précision globale $\frac{\Sigma D_i}{\Sigma[\mathbf{T}]}$

TAB. 5.5 – Matrice de confusion générale pour trois classes

Les termes déterminés dans la matrice de confusion sont :
- la **somme de la diagonale** de la matrice de confusion, $\mathbf{\Sigma D_i}$, représente le nombre total de pixels correctement classifiés,
- la **précision producteur** fournit la mesure de la qualité de l'analyse lors de la production de la carte classifiée,
- la **précision utilisateur** fournit à l'utilisateur une mesure de la probabilité d'une classification adéquate des pixels durant le processus de classification,
- la **précision moyenne** prend en compte la somme des précisions de production sur le nombre de classes,
- la **précision globale** est la proportion du nombre total de pixels correctement classés sur le nombre total de pixels.

Analyse des différents modèles SVM pour la classification

Une étude globale des résultats est faite avec l'apprentissage des classes sur trois dates (modèle SVM $[C]$+4P 3 dates) et sur onze dates (les modèles SVM 4P,$[C]$ et $[C]$+4P 11 dates) afin d'identifier le meilleur modèle SVM.

Dans cette partie, les résultats de classification sont analysés. La figure 5.11 représente la précision moyenne producteur et la précision globale pour les quatre modèles de SVM pour les onze dates numérotées de 1 à 11 comme l'indique le tableau 5.6.

Les valeurs des précisions moyenne et globale sont quasiment les mêmes pour chaque date et pour chaque modèle.

Numéro	1	2	3	4	5
Date	19 avril	11 mai	16 mai	24 mai	7 juin
6	7	8	9	10	11
13 juin	21 juin	5 juillet	12 juillet	26 juillet	2 août

TAB. 5.6 – Références des 11 dates

Le modèle SVM $[C]$ a une précision moyenne de production et une précision globale supérieures à 70% sauf pour le 2 août où elles sont proches de 60% ce qui reste convenable pour des résultats de classification. Un problème est à noter pour le 24 mai. En effet, à cette date la classification est très mauvaise, puisque d'après la figure 1.21, il y a eu de fortes précipitations. Une étude de [Mattia(2007)], faite sur les données d'AgriSAR a mis en avant la très forte dépendance du coefficient de rétrodiffusion en polarisation horizontale vis à vis de l'humidité du sol. Ainsi, cette dépendance a un impact sur la matrice de covariance $\mathbf{C}$ et provoque une mauvaise classification.

Le modèle SVM 4P a une précision moyenne de production et une précision globale supérieures à 60% sauf pour le 13 juin où elles sont proches de 35%. Le modèle SVM $[C]$ est plus précis que le modèle SVM 4P sauf pour la quatrième date (le 24 mai) où le second modèle ne semble pas être affecté par la forte humidité du sol.

Le modèle SVM $[C]$+4P 11 dates, récupère les informations des deux autres modèles. Ainsi, la mauvaise estimation du 24 mai est compensée de même celle du 13 juin est améliorée par rapport au modèle SVM 4P. Ces deux précisions nous informent que le modèle SVM $[C]$+4P estime en moyenne correctement les classes au cours du temps, seule le 13 juin est très moyen.

Le modèle SVM $[C]$+4P 3 dates est très performant aux trois dates d'apprentissage par contre sur les autres dates, il n'est pas du tout fiable. Les modèles dont l'apprentissage a été fait sur toutes les images sont beaucoup plus précis que celui dont l'apprentissage a été fait sur trois dates. En effet, le fait d'avoir pris des pixels d'apprentissage sur les onze dates implique que cette classification soit indépendante du taux d'humidité qui n'est pas du tout pris en compte alors qu'en se limitant aux trois dates, ce n'est plus le cas.

Une étude des précisions producteur et utilisateur pour les huit différentes classes en fonction des onze dates est effectuée en Annexe B pour les quatre modèles. La conclusion faite sur les performances du modèle SVM $[C]$+4P 11 dates se confirme de nouveau.

Cette étude montre que le modèle SVM le plus performant pour cette classification de huit classes de sols recouverts de petites végétations, est le modèle SVM $[C]$+4P pour lequel l'apprentissage regroupe les onze dates. Ce modèle est par conséquent, celui qui est choisi pour la classification SVM des champs agricoles et sera

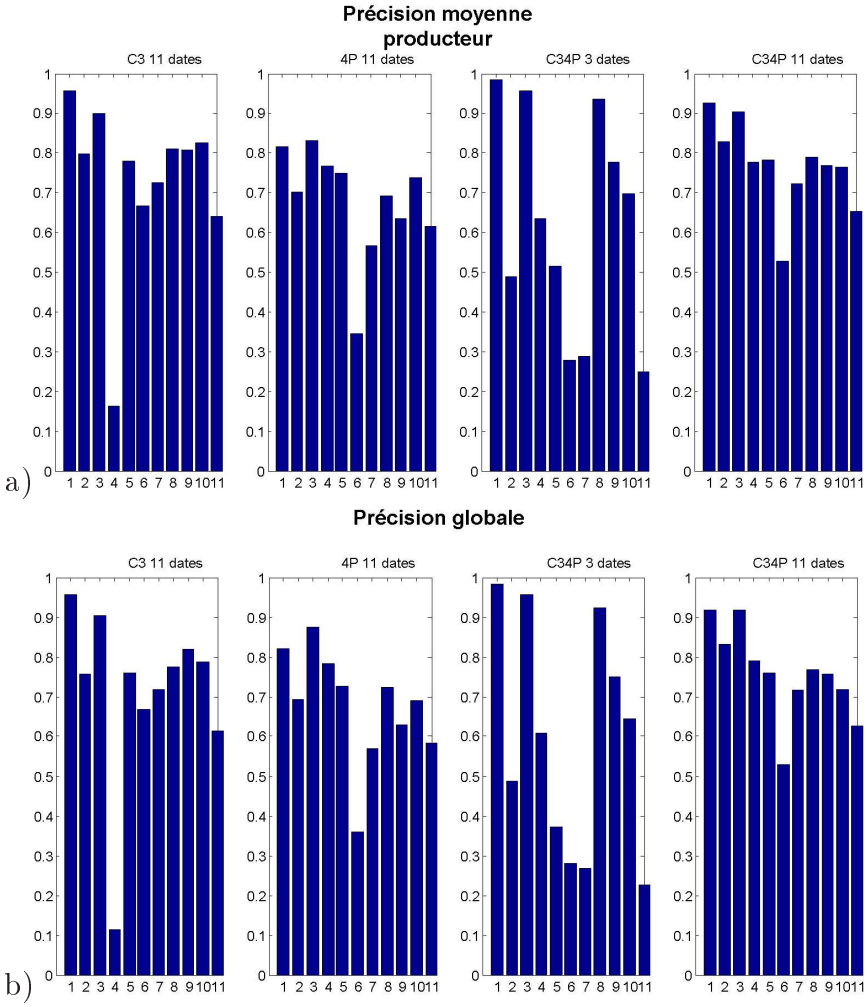


FIG. 5.11 – a- Précision moyenne de production b)- Précision globale en fonction des 11 dates

celui étudié dans la suite de ce chapitre.

5.2.3.2 Analyse des résultats de classification sur les cinq champs de référence

Pour une meilleure analyse des résultats, il est intéressant d'étudier les résultats par classe. Les tableaux de la matrice de confusion sont présentés en Annexe A pour le modèle SVM $[C]$+4P pour les onze dates.

Cette étude résulte de l'analyse conjointe de la figure 5.10, des résultats des matrices de confusion (Annexe A), des histogrammes associés représentant les précisions producteur et utilisateur (figure 5.12) et de la figure 5.10 représentant les courbes en fonction du temps des résultats de classification pour chaque type de culture.

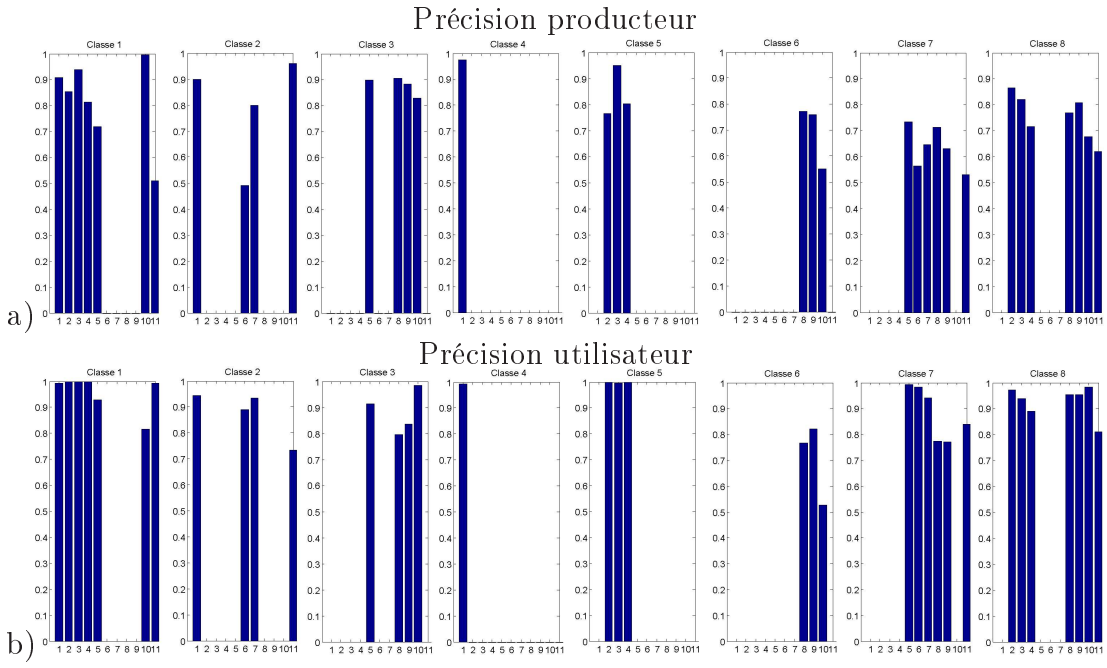


FIG. 5.12 – a- Précision de production, b- Précision d'utilisateur en fonction des 11 dates des 8 classes du modèle SVM $[C]$+4P 11 dates

L'analyse générale des résultats de classification donne de bons résultats par classe.

La classe 4 est très bien estimée mais cette classe n'existe que pour un champ et à une seule date donc ces résultats ne peuvent pas être pris en compte dans le bon fonctionnement de la classification.

Les classes 3 et 5 sont les mieux estimées avec des précisions utilisateur et producteur très élevées dans les deux cas (Classe 3 : précisions supérieures à 80%, Classe 5 : précisions utilisateur et producteur supérieures à 99 % et 76% respectivement) . Ces deux classes ont des réponses polarimétriques bien singulières par rapport au reste des classes et il y a ainsi pas d'erreurs de classification.

Les classes 1 et 8 correspondant aux classes extrêmes de champ nu et de végétation dense respectivement présentent aussi de bon résultats de classification (Classe 1 : précisions utilisateur et producteur supérieures à 90 % et 80% respectivement, Classe 8 : précisions utilisateur et producteur supérieures à 90 % et 70% respectivement). Ces classes ont aussi des caractéristiques bio et géophysiques particulières.

Les classes 2, 6 et 7 ont des résultats de précision un peu moins bons car elles ont des comportements proches d'autres classes. Par exemple, les classes 2 et 3 et les classes 5 et 6 ont des caractéristiques qui peuvent se confondre dans certains cas. Le choix arbitraire des classes n'est pas toujours évident quand le champ se situe entre deux étapes phénologiques.

Certaines anomalies sont néanmoins détectées pour certaines dates particulières. Ainsi, alors que sur l'ensemble des dates, la classe 2 a une précision utilisateur supérieure à 70% et celle producteur supérieure à 80%, le 13 juin la précision producteur est de 49%. Cette mauvaise estimation à cette date est due à l'état transi-

toire du champs de maïs 222 c'est-à-dire que ce champ se situe entre la classe 1 et la classe 2 comme le montre la figure 5.13. En effet, malgré le nombre important de pixel correctement classé en 2, un nombre non négligeable de pixel sont classés 1. En observant l'évolution de la plante de maïs (photos de la figure 5.13), le 7 juin le champ est classé 1, le 21 juin il est classé 2 et le 13 juin, ce champ est entre les deux classes d'où la mauvaise classification de la plante. Ce genre d'erreur de classification apparaît également le 2 août sur le champ de blé 230 qui se trouve également entre deux classes.

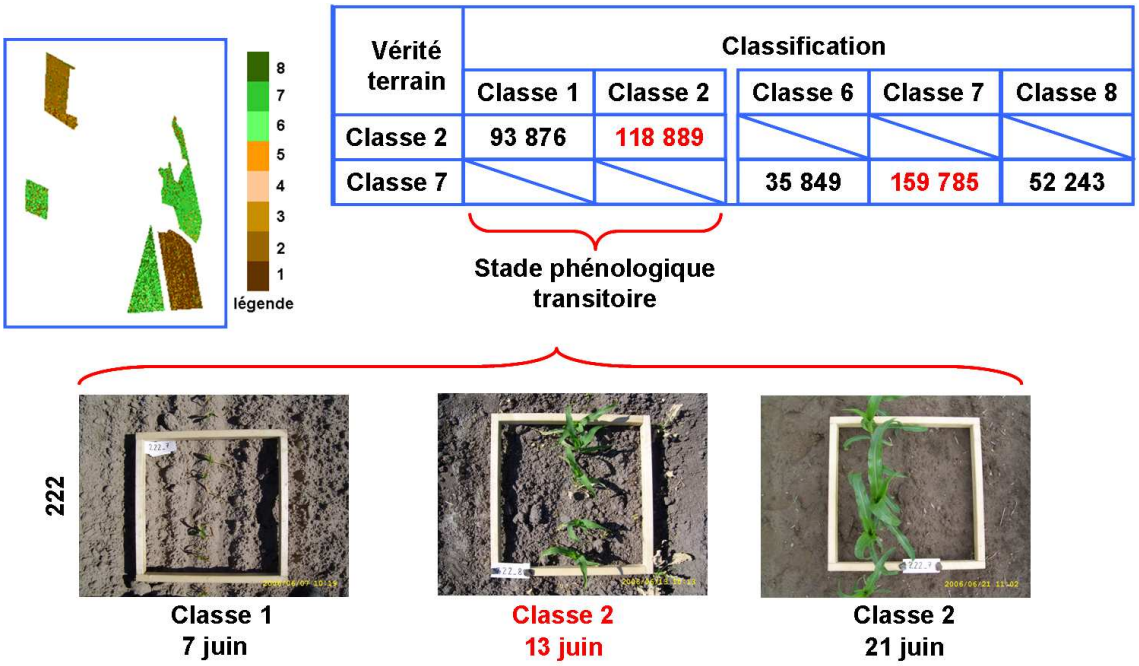


FIG. 5.13 – Résultat de classification du 13 juin

De plus, en observant les différentes matrices de confusion, les données qui correspondent à la classe 7 sont majoritairement classées en classe 7 mais aussi en classe 6 et 8 car ce sont tous des champs composés de végétation. Comme le montre le tableau de la figure 5.13, un certain nombre de pixels appartenant à la classe 7 sont classés en 6 et 8 ayant pour conséquence de réduire la précision producteur à 55%. De même, la classe 6 présente des résultats peu satisfaisant (précision producteur de 56%) le 26 juillet se confondant avec la classe 5.

Visuellement, sur les cartes de classification (figures 5.15 et 5.17), les classes sont proches des cartes de mesures terrain (figures 5.14 et 5.16). Il faudrait peut-être envisager de fusionner les classes ayant des caractéristiques physiques et polarimétriques semblables. Étant donné l'objectif de ces travaux, seules les zones où le sol est apparent et où l'atténuation de Υ^2 n'empêche pas l'estimation de l'humidité du sol nous intéressent. Ainsi dans ce cadre, les résultats de cette classification sont très satisfaisants.

Les résultats de classification suivent bien l'évolution des plantes comme représenté sur la figure 5.10. L'orge (450) et le blé (230) sont de jeunes plantes en avril qui ar-

rivent à maturité en mai puis s'assèchent en juin pour être ramassées en été. Le maïs (222) ne pousse qu'à partir de juin pour être à maturité en juillet/août. La classification identifie bien les quatre stades phénologiques du colza (140) : rosette d'une vingtaine de feuilles, montaison et floraison (ces deux stades se confondent car la forme de la plante reste la même), plante à maturité avec ses fruits siliques, et enfin l'assèchement de la plante. La betterave sucrière est petite en juin, à maturité en juillet et coupée en août.

Les résultats de classification sur les cinq champs de référence sont très concluants. Toutefois, ces mêmes champs ont servi pour l'apprentissage, il est intéressant de voir l'évolution sur tous les champs du site de Görmin.

5.2.3.3 Cartes de classification sur tout le site de Görmin

La classification SVM est ainsi effectuée sur toute la zone aux différentes dates d'acquisition et les différentes cartes résultantes sont représentées sur les figures 5.15 et 5.17.

Ces résultats peuvent être comparés aux cartes de mesures terrain des 23 champs de la zone, déterminés par type de culture figure 5.14 et figure 5.16 pour les onze dates. En effet, le comportement de tous les champs d'une même culture est fixé arbitrairement comme évoluant de la même façon. Or, il est évident que deux champs de plantations identiques peuvent évoluer différemment. Donc le fait que les mesures terrain ne concordent pas forcément avec les résultats de classification peut être dû à cette hypothèse. Cependant, les résultats de classification restent encourageants pour la plupart des dates et cultures. Quelques anomalies sont toutefois à relever.

Le 19 avril, les champs de colza sont les moins bien classés. Ceci s'explique par le fait que la classe 4 du champ de colza a été entraîné pour le SVM que sur un champ de colza et à une seule date, c'est pourquoi ce même champ est très bien classé et que les autres sont problématiques. Il faudrait pour améliorer cette classification, entraîner davantage la classe 4 sur d'autres champs.

Le 11 mai, les champs d'orge sont mal classés. En effet, lors de l'apprentissage nous émettions des doutes sur la classe de ce champ à cette date. Par conséquent, la classe 5 n'a pas été entraînée pour le SVM sur ce champ ce qui expliquerait ce mauvais résultat.

Les champs de blé réagissent pour toutes les dates de façon différentes du champ de référence 230. Il semblerait que les champs de blé évoluent par groupe de champs de blé. En effet, les champs 221, 230, 292 et 391 (chapitre 1) ont le même comportement polarimétrique évoluant avec leurs stades phénologiques similaires. L'hypothèse probable expliquant les différences entre les champs de blé, est que les champs de blé ont été cultivés différemment et peuvent avoir texture de sol différente étant donné que quatre textures de sol apparaissent sur ce site (chapitre 1).

A partir de ces résultats, il est intéressant de connaître l'impact que cette petite végétation peut avoir sur l'estimation de l'humidité des sols.

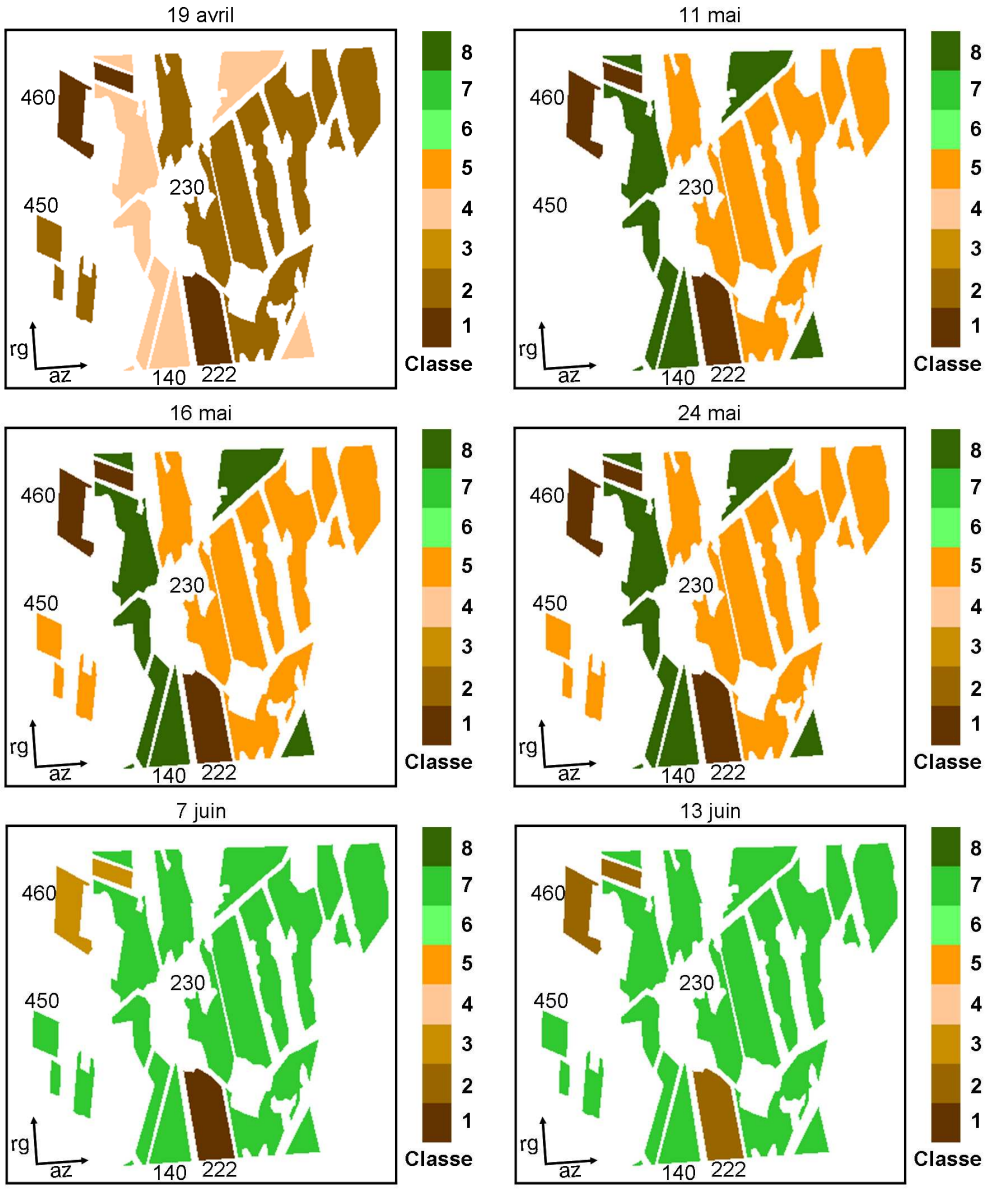


FIG. 5.14 – Cartes des mesures terrain pour tous les champs pour les dates du 19 avril au 13 juin

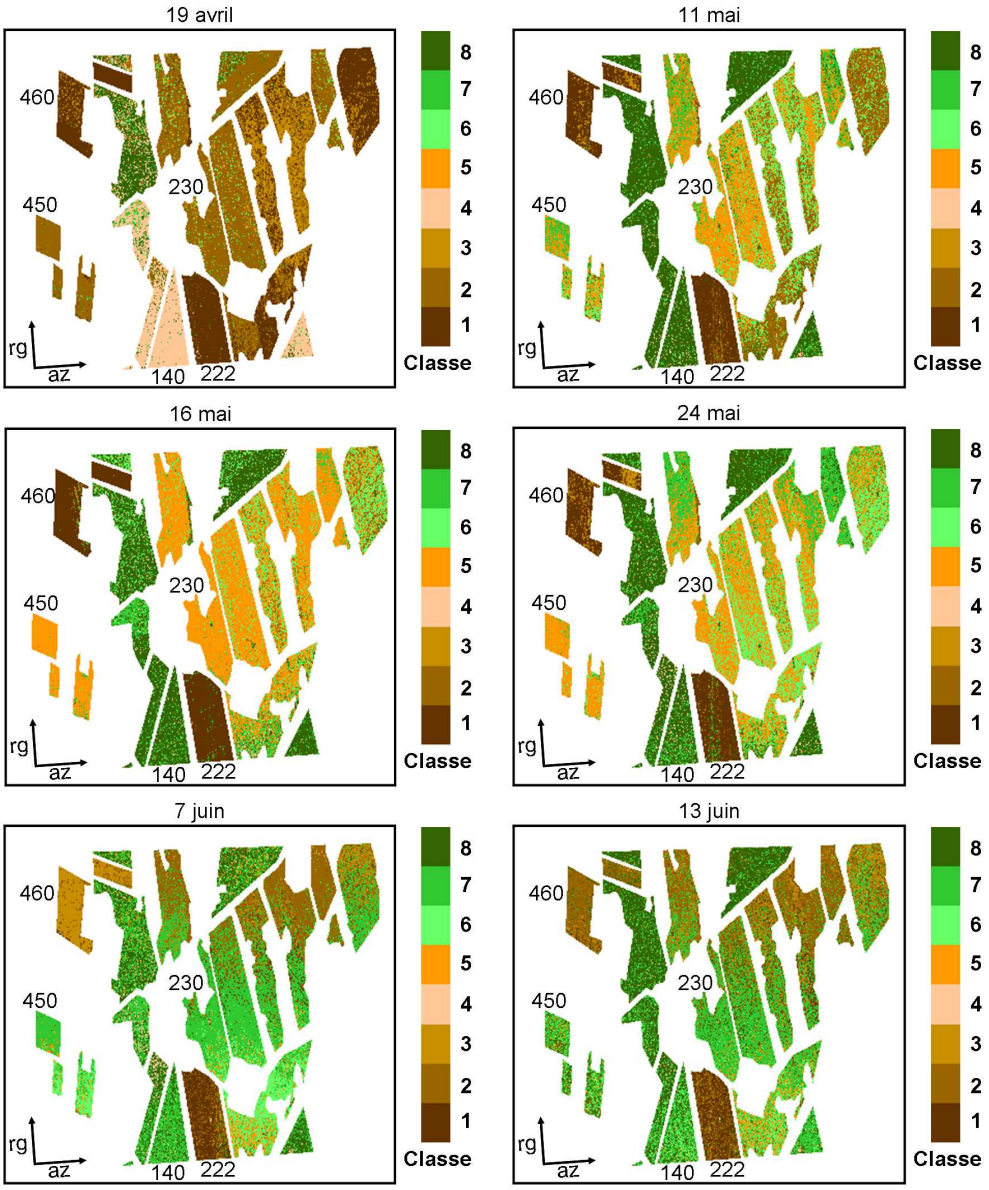


FIG. 5.15 – Cartes des résultats de classification pour tous les champs pour les dates du 19 avril au 13 juin

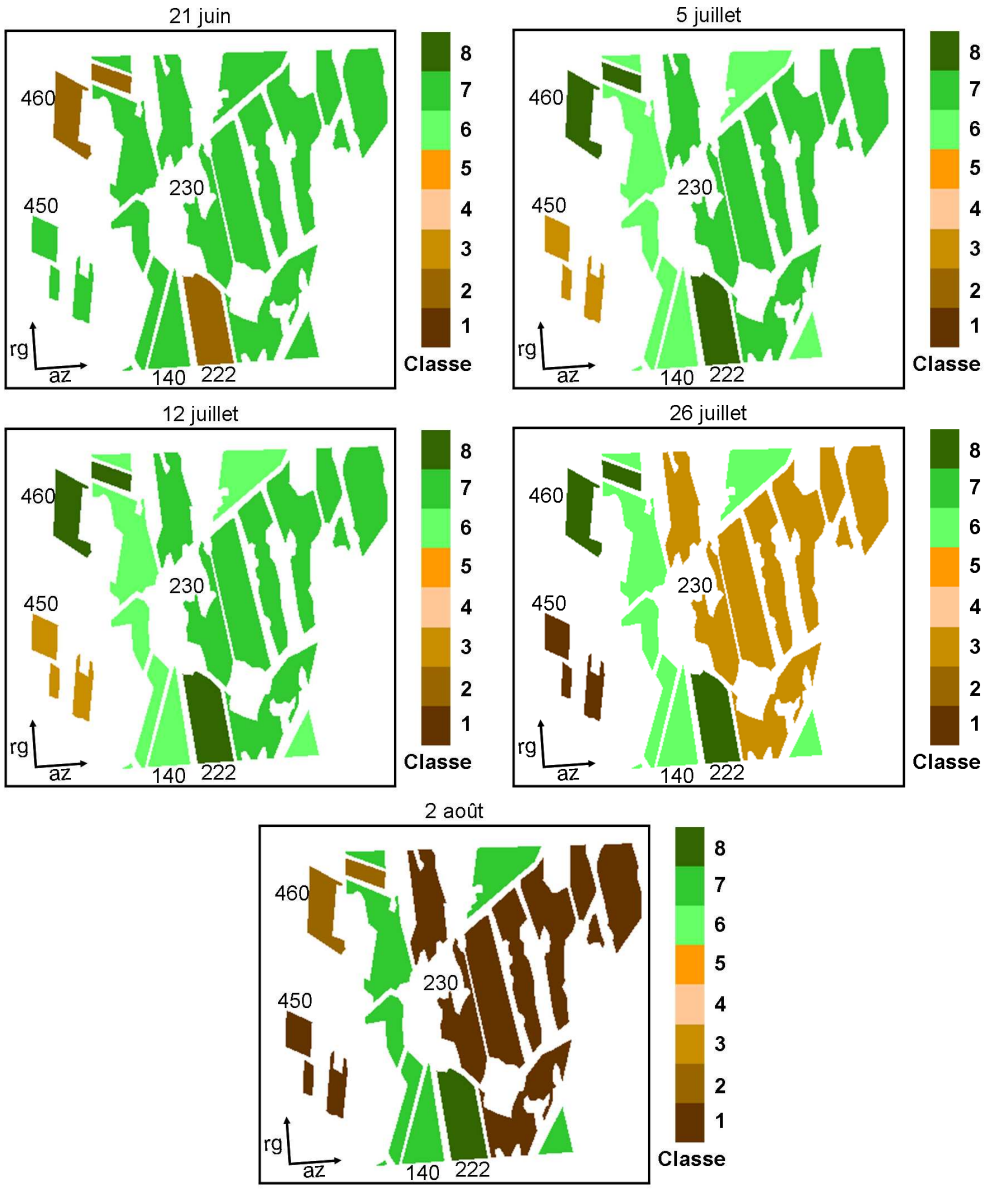


FIG. 5.16 – Cartes des mesures terrain pour tous les champs pour les dates du 21 juin au 2 août

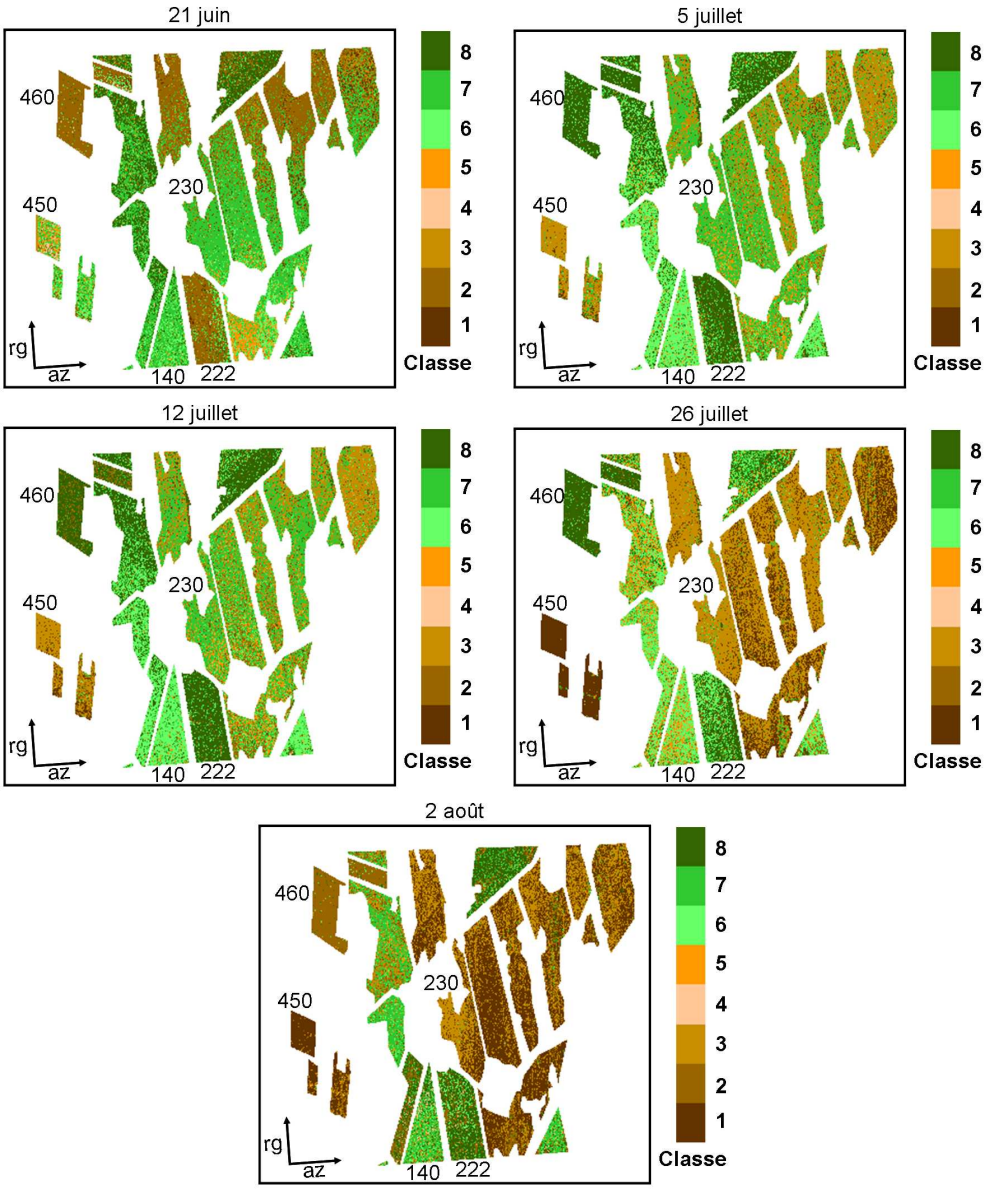


FIG. 5.17 – Cartes des résultats de classification pour tous les champs pour les dates du 21 juin au 2 août

5.3 Estimation de l'humidité des sols recouverts de petites végétations

La méthode d'estimation de l'humidité des sols utilisée est la méthode basée sur le paramètre α_1 (chapitre 3). Cette méthode adapte le modèle de diffusion IEM sur les données. Pour cela, il faut impérativement une zone contenant essentiellement des sols nus. Or, le site de Görmin comporte peu, voire aucun sol nu. Par conséquent, l'adaptation du modèle sur les données d'AgriSAR n'est pas possible. Étant donné, que le capteur E-SAR de mesure du site d'Alling et d'AgriSAR est le même, nous supposons que la correction du modèle d'IEM est la même pour les deux sites. Le problème en utilisant cette correction serait de sur- ou sous-estimer l'humidité. Cette méthode est utilisée afin surtout de connaître l'impact de la végétation ou plutôt du type de végétation sur l'estimation de l'humidité des sols afin de mieux appréhender ce problème.

L'estimation de l'humidité des sols est faite sur les 23 champs du site de Görmin. Les figures 5.18 et 5.19 représentent cette estimation de l'humidité des sols m_v obtenue avec la méthode de α_1, pour les onze dates et combinée au modèle de Topp pour la transformation de la constante diélectrique en taux d'humidité (chapitre 3).

Il est à noter à première vue que certains champs ne peuvent pas être estimés. En comparant ces cartes d'estimation du taux d'humidité avec les cartes des résultats de classification vues précédemment, les champs classés 5 et 6 ne peuvent pas être estimés. En effet, leurs caractéristiques polarimétriques impliquent un angle $|\delta_1| < 90\ ^\circ$, soit $S_{hh} > S_{vv}$ qui est une condition limite à la méthode d'inversion basée sur α_1 (chapitre 3).

De plus, les champs classés 7 et 8 ont une contribution volumique trop importante qui atténue la contribution de surface rendant impossible l'estimation de l'humidité des sols recouverts par ce type de végétation.

Estimation par classe

La figure 5.20 représente l'estimation d'humidité pour les cinq champs de référence en fonction du temps. Il est possible de comparer ces estimations à l'évolution des classes de ces champs (figure 5.10). Il a noter que les mesures terrain d'humidité ont été faites à différents endroits d'un même champ et ces mesures peuvent variées notamment la mesure terrain No. 2 ($m_{v_{gd_2}}$) du champ de maïs 222 dont les mesures sont très élevées comme celle No. 3 ($m_{v_{gd_3}}$) du champ de blé 230.

Il est tout d'abord important de ne pas tenir compte des estimations aux dates pour lesquelles les champs sont classés 5 et 6 du fait du peu de pixels estimés et donc de la faible fiabilité que cela implique. Ces champs sont :

- l'orge (450) daté du 11 mai, du 16 mai et du 24 mai,
- le blé (230) daté du 11 mai, du 16 mai et du 24 mai,
- le colza (140) daté du 5, du 12 et du 26 juillet.

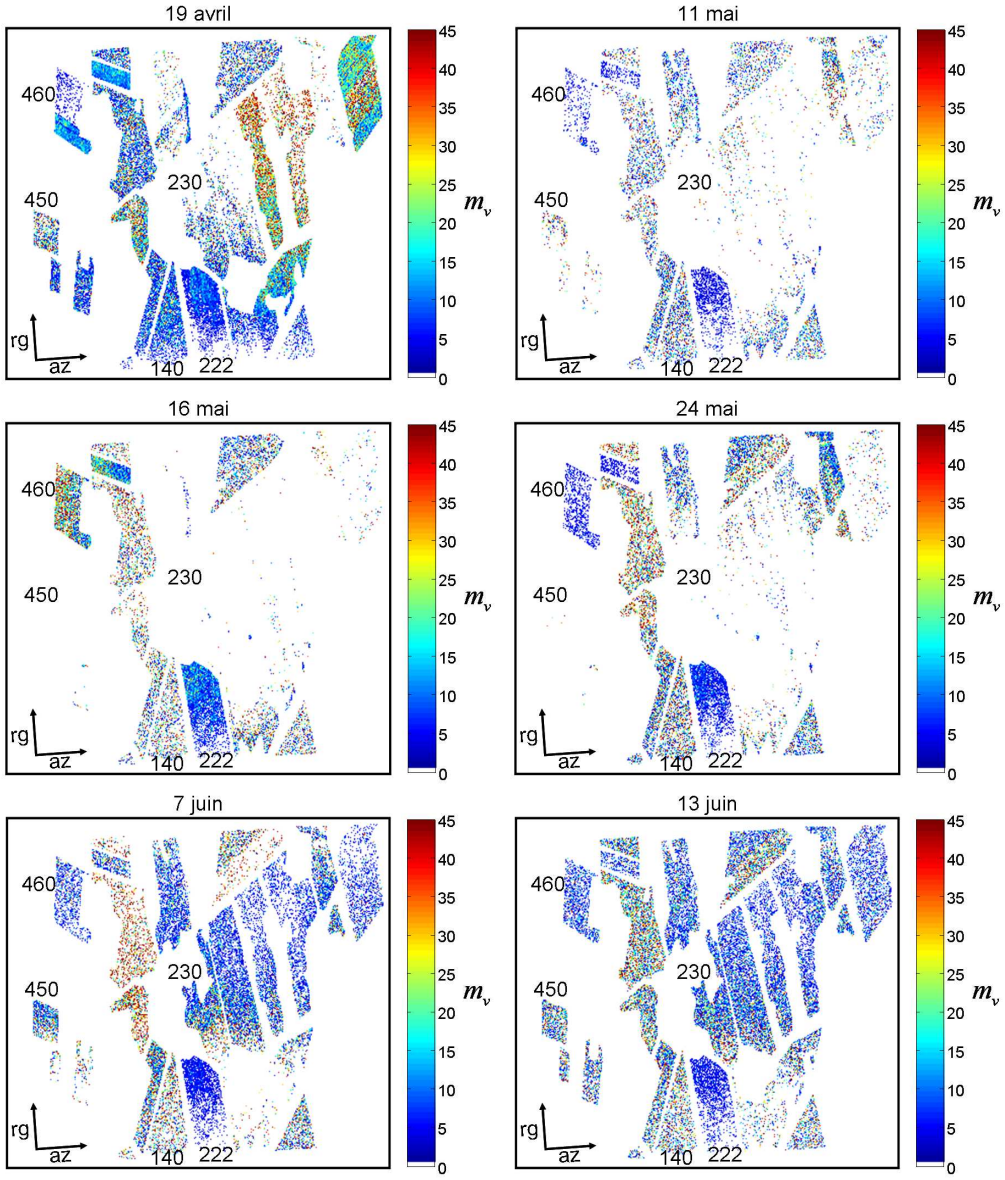


FIG. 5.18 – Cartes des résultats d'estimation de l'humidité m_v pour tous les champs pour les 11 dates

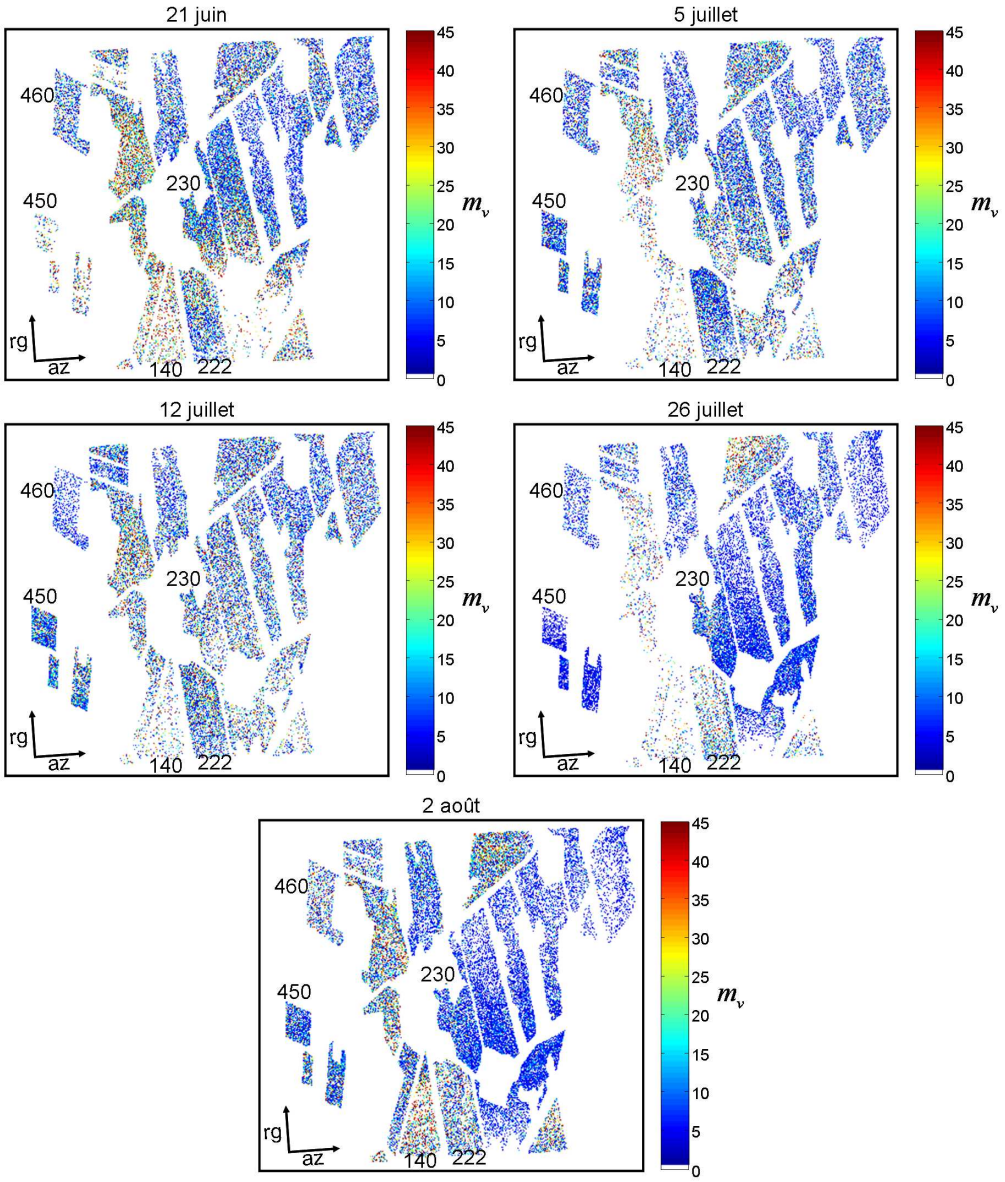


FIG. 5.19 – Cartes des résultats d'estimation de l'humidité m_v pour tous les champs pour les 11 dates

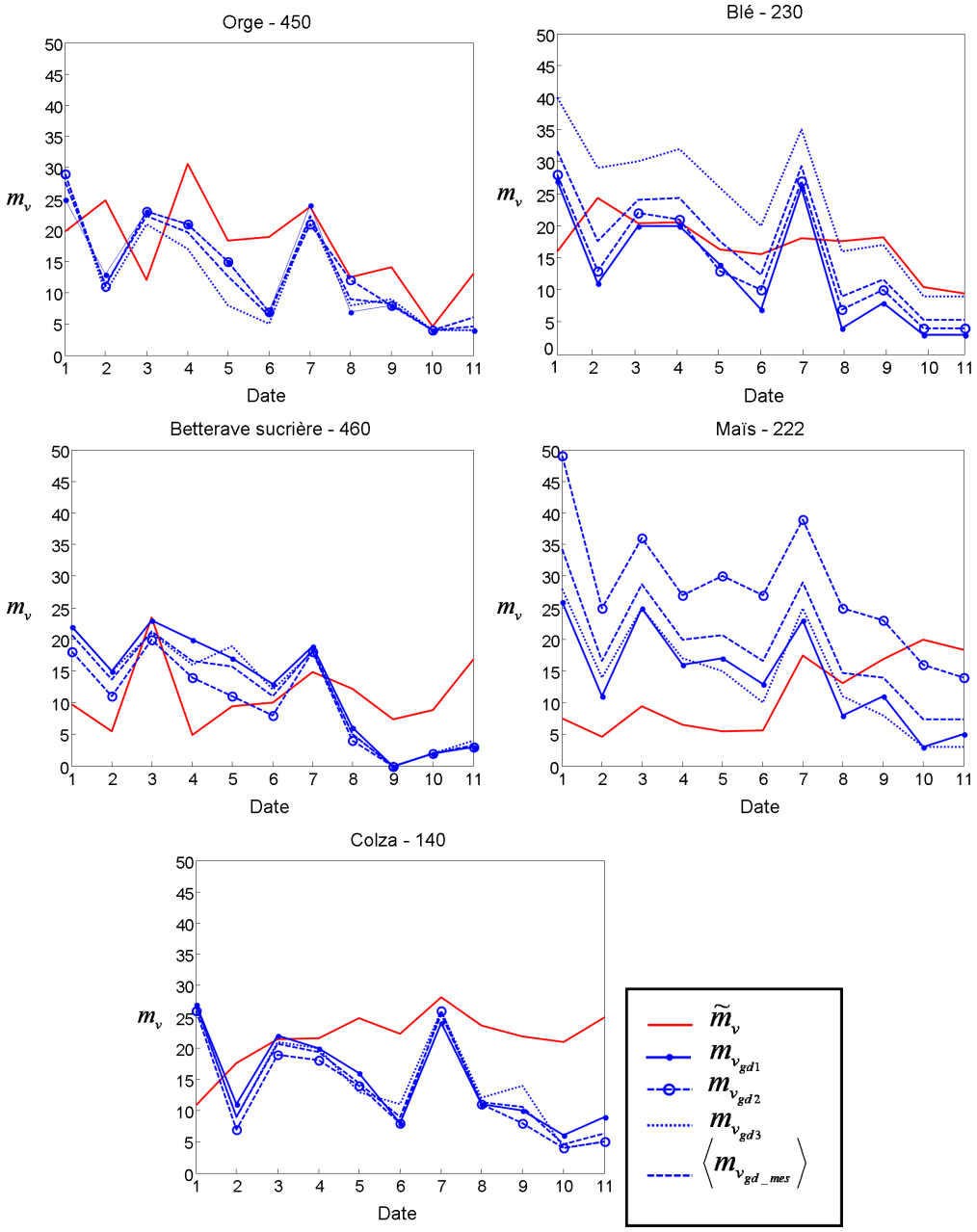


FIG. 5.20 – Cartes des résultats d'estimation de l'humidité m_v pour tous les cinq champs de référence pour les 11 dates

Si l'on observe à présent le champ de betterave sucrière du 19 avril au 24 mai, le champ est classé 1 puis classé 3 pour le 7 juin et classé 2 pour les 13 et 21 juin. L'estimation suit la tendance des courbes des mesures terrain en sous-estimant le taux d'humidité du sol. Dès lors que le champ comporte une composante végétale importante c'est-à-dire classé 8, la courbe d'estimation suit toujours la tendance des mesures terrain à la différence que le taux d'humidité devient surestimé.

Cette remarque peut également se faire pour le champ de maïs. En effet, du 19 avril au 7 juin ainsi que du 13 au 21 juin, le champ est classé respectivement 1 puis 2 et le taux d'humidité est sous-estimé tout en suivant la tendance des mesures terrain. Lorsque ce champ passe en classe 8, la contribution volumique est très importante et l'estimation tend à surestimer l'humidité.

De même, le taux d'humidité du champ de colza est sous-estimé quand le champ est classé 4 puis est surestimé lorsque la contribution volumique est importante c'est-à-dire quand le champ est classé 7 et 8.

Plus les classes tendent vers la classe 8, plus il est difficile de donner un sens aux analyses de ces résultats puisque la composante du sol est fortement atténuée et il est aussi supposé que l'humidité de la plante est également estimée.

Il est à noter que suite à une période de végétation, une fois la récolte faite, le taux d'humidité reste surestimé même si le champ se trouve dans une classe inférieure à 4, comme le montre le champ de betterave sucrière pour le 2 août ainsi que les champs de blé et d'orge.

5.4 Conclusion

Cette étude sur les sols recouverts de petites végétations permet de conclure que plusieurs informations sont à prendre en compte avant d'envisager une estimation de l'humidité des sols. En effet, le modèle de diffusion présenté dans le chapitre 2, met en avant l'impact de la végétation sur la réponse électromagnétique. La contribution de surface est atténuée par la végétation. Suivant que la forme, la hauteur de la végétation, l'onde sera atténuée différemment. C'est pourquoi, une classification de différents types de végétation a été élaborée dans ce chapitre. Cette classification a permis de classer huit types de champs agricoles. La première catégorie rassemble les champs nus, les champs recouverts de petites végétations espacées entre elles et laissant des zones du sol non recouvertes, les champs de céréales quand elles commencent à s'assécher (en été en général). La deuxième catégorie regroupe les champs où le sol devient moins apparent voire recouvert totalement par de petites plantes comme des plantes avec des grosses feuilles ou des champs recouverts de nombreuses touffes de végétaux assez denses. La troisième catégorie regroupe les champs recouverts de plantes assez hautes comme les plantes de colza desséchées qui ont de nombreuses tiges orientées aléatoirement ou les plantes céréalières hautes, denses, fines et très nombreuses et enfin les plantes qui peuvent être très hautes (de l'ordre du mètre) avec des feuilles qui comme pour le maïs s'entremêlent entre elles ou alors les plantes petites mais très denses avec de très grosses feuilles compactes.

Toutes ces catégories de plantes ont un comportement électromagnétique différent qu'il serait intéressant de pouvoir en définir une matrice électromagnétique

modélisant leur réponse et leur impact sur le sol sous cette végétation. Ceci permettrait d'améliorer de récentes études comme [Hajnsek(2009)] qui utilise la décomposition de Freemann afin de récupérer une matrice de la végétation qu'il peuvent extraire de la réponse électromagnétique comme [Bindlish(2001].

Par ailleurs, l'estimation de l'humidité des sols réalisée dans ce chapitre mise en comparaison avec les résultats de classification a permis de mettre en avant l'impact de la végétation sur l'estimation. En effet, en présence de végétation, l'humidité est surestimée du fait que l'humidité du sol et de celle de la plante sont confondues dans la réponse diélectrique. Il est vrai que la méthode de α_1 n'est pas entièrement bien adaptée aux sites d'AgriSAR, toutefois, les résultats d'inversion sont concluant car donnent une tendance sur l'évolution de l'humidité des sols. La classification permet toutefois d'ajuster les résultats sachant que lors de présence de végétation, l'humidité peut être surestimée, à l'inverse lors de non présence de végétation, l'humidité est sous-estimée. La surestimation du taux d'humidité est sans doute due à l'humidité de la plante elle-même, de même la sous-estimation des zones classées de 1 à 4, peut être due à la mauvaise calibration du modèle IEM utilisé dans la méthode d'inversion.

De plus, il pourrait être envisagé de calibrer le modèle α_1 en tenant compte, suivant la classe du champs, de la contribution de la végétation afin d'estimer au mieux le taux d'humidité.

Bibliographie

[AgriSAR(2006)] "AGRISAR 2006, Agricultural Bio-/Geophysical retrievals from frequent repeat SAR and optical imaging", http ://earth.esa.int/campaigns/DOC/AGRISAR_Final_Report.pdf

[Bindlish(2001] R. Bindlish, A. P. Barros, "Parametrization of vegetation backscatter in radar-based, soil moisture estimation", Remote Sensing of Environment, no. 76, pp. 130-137, 2001.

[Duda(2000)] R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork , "Pattern classification", Wiley-Interscience, Second edition, 2000.

[Ferrazzoli(1997)] P. Ferrazzoli, S. Paloscia, P. Pampaloni, G. Schiavon, S. Sigismondi, D. Solimini, "The potential of multifrequency polarimetric SAR in assessing agricultural and arboreous biomass", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, pp. 5 - 17, 1997.

[Freeman(1998)] A. Freeman, S. L. Durden, "A trhee-component model for polarimetric SAR imagery", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, no. 3, pp. 963-973, 1998.

[Hajnsek(2009)] I. Hajnsek, T. Jagdhuber, H. Schön, K. P. Papathanassiou, "Potential of estimating soil moisture under vegetation cover by means of PolSAR", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 47, no. 2, pp. 442-454, 2009.

[Hoekman(2003)] D. H. Hoekman, M. A. M. Vissers, "A new polarimetric classification approach evaluated for agricultural crops", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 12, pp. 2881-2889, 2003.

[Lardeux(2008)] C. Lardeux, "Apport des données radar polarimétriques pour la cartographie en milieu tropical", Thèse de Doctorat de l'Université de Paris-Est, France, Décembre 2008.

[Lee(1999)] J. S. Lee, M. R. Grunes, T. L. Ainsworth, L. J. Du, D. L. Schuler, S. R. Cloude, "Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex wishart classifier", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, no. 5, pp. 2249-2258, 1999.

[Mattia(2007)] F. Mattia, G. Satalino, A. Balenzano, V. Pauwels, N. Verhoest, H. Skriver, M. Davidson, "Exploiting L-band SAR for the improvement of surface process modelling", Proceedings of 5th Retrieval of Bio and Geophysical parameters from SAR dat for Land applications, Bari, Italy, 2007.

[Neumann(2007)] M. Neumann, S. Daniel, L. Ferro-Famil, S. Allain, A. Reigber, E. Pottier, "Ground-Agriculture Separation my Means of PolInSAR", Proceedings of POLINSAR, Frascati, Italy, 2007.

[Neumann(2009)] M. Neumann, "Remote sensing of vegetation using multi-baseline polarimetric SAR interferometry : theoretical modeling and physical parameter retrieval", Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes 1, France, 2009.

[Skriver(2005)] H. Skriver, J. Dall, T. Le Toan, S. Quegan, L. Ferro-Famil, E. Pottier, P. Lumsdon, R. Moshammer, "Agricultural classification using PolSAR data", Proceedings of PolInSAR, Frascatti, Italy, 2005.

[Vapnik(1998)] V. Vapnik, "Statistical learning theory", Wiley-Interscience,1998.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion

L'objectif principal de cette thèse était d'estimer l'humidité des sols nus ainsi que tester la faisabilité et les problèmes rencontrés pour l'estimation de l'humidité sur les sols à structure périodique et les sols recouverts de petites végétations.

Le premier chapitre introduit trois parties distinctes. Tout d'abord, le principe de fonctionnement du capteur et la construction de l'imagerie SAR sont détaillés. La deuxième partie traite de la description physique, géométrique (rugosité) et diélectrique (humidité) des sols. La description physique met en avant la complexité du milieu de par sa structure et de par sa texture. Ainsi, suivant la composition physique du sol, ce dernier sera plus ou moins apte à retenir l'eau. La description diélectrique fait le lien entre la réponse électromagnétique et l'humidité du sol. Enfin, la description géométrique introduit la notion de rugosité du sol. La troisième partie présente sur les deux campagnes de mesures utilisées dans ce manuscrit : Alling en 2000 et Görmin en 2006.

Le deuxième chapitre traite de l'information reçue par le radar et de sa modélisation. La première partie introduit la notion de polarimétrie. La polarimétrie radar est utile à la caractérisation physique et diélectrique d'une cible. La majorité des paramètres polarimétriques décrits dans ce chapitre ont ensuite été utilisés pour l'étude des trois types de champs agricoles : nus, à structure périodique et recouverts de petites végétations. La seconde partie présente trois modèles de diffusion électromagnétiques associés aux trois types de sols agricoles étudiés. Le modèle IEM est appliqué pour les sols nus. Il est ensuite utilisé notamment dans le chapitre 3 pour modéliser les paramètres polarimétriques utiles à l'inversion. Un modèle simple de diffusion de sols recouverts de petites végétations est proposé. Basé sur la méthode du transfert radiatif, il met en avant l'influence de la végétation et l'atténuation sur la réponse électromagnétique du sol sous la végétation. Enfin, un modèle de diffusion basé sur le modèle de Kirchhoff à approximation scalaire est adapté aux sols périodiques. Ce nouveau modèle sert dans le chapitre 4 à la compréhension du comportement particulier des paramètres polarimétriques sur les champs à structure périodique grâce à sa formulation simple et proche des données SAR.

Le troisième chapitre porte sur l'estimation de l'humidité des sols nus isotropes. Trois méthodes d'inversion classiques sont présentées et une quatrième est élaborée. Cette nouvelle méthode est basée sur le paramètre α_1. Elle consiste à calibrer le

modèle de diffusion IEM afin d'ajuster les valeurs du modèle aux données. Cette méthode est simple d'utilisation et peut être facilement appliquée sur les sols nus des images SAR. Les résultats d'estimation sont très concluant. L'inconvénient majeur de cette méthode est que cet ajustement ou calibration semi-empirique nécessite que la zone de l'image SAR soit essentiellement constituée de champs nus présentant une large diversité d'humidité. En utilisant la correction faite sur Alling, l'estimation de l'humidité permet d'obtenir des valeurs d'humidité proche des données terrain sur la zone comme cela a été fait sur le site de Görmin dans le chapitre 5.

Le quatrième chapitre traite de l'estimation de l'humidité sur les sols périodiques à partir de données SAR. Les méthodes classiques décrites dans le chapitre 3 sont démontrées ici comme inadaptées pour l'estimation de l'humidité des sols à structure périodique. En effet, les paramètres polarimétriques ont un comportement inhabituel sur les champs à structure périodique : leurs valeurs sont trop faibles. Une décomposition en temps-fréquence permet tout d'abord de détecter le comportement non-stationnaire des champs à structure périodique, ce qui rend le processus d'inversion problématique. Ces cartes de détection montre aussi que les champs nus à structure périodique comme les champs avec de la végétation à structure périodique peuvent être non-stationnaires. La détection de non-stationnarité dépend aussi de l'orientation du radar par rapport à l'orientation des structures périodiques. Cette dernière peut ne pas apparaître sur l'image SAR. La décomposition temps-fréquence crée également des sous-images correspondant à différents angles d'observation en azimut. Une analyse polarimétrique sur ces sous-images permet de comprendre le comportement inhabituel des paramètres polarimétriques. En effet, la résonance d'un champ pour un certain angle d'azimut entraîne une chute des valeurs des paramètres polarimétriques. Seul le paramètre α_1 reste invariant. Cette analyse polarimétrique met ainsi en évidence la pertinence du paramètre α_1 pour l'estimation de l'humidité des sols périodiques. La nouvelle méthode d'inversion basée sur ce paramètre (chapitre 3) est testé sur les sols périodiques. Cette estimation est quasi invariante pour les différentes sous-images.

Le cinquième chapitre élabore une classification des champs agricoles basée sur la forme, la taille et la densité des plantes. La première partie porte sur l'analyse des paramètres polarimétriques et leurs évolutions suivant quatre catégories différentes identifiées comme sols nus, recouverts de jeunes plantes, plantes céréalières et plantes hautes et/ou denses observées sur les données d'Alling. Les paramètres de Lüneburg, $SDERD$, l'angle δ_1, $SERD$ et l'angle α sont retenus dans l'algorithme d'une classification hiérarchique. Les résultats sont visuellement probants. Ensuite, une classification plus complète basée sur la SVM est proposée. Avec les informations de mesures terrain à disposition, nous avons augmenté le nombre de classes de quatre à huit. Une première catégorie de classes regroupe les champs nus, les champs recouverts de petites végétations espacées entre elles et laissant des zones du sol non recouvertes, les champs de céréales quand elles commencent à s'assécher (en été en général). Une deuxième catégorie de classes rassemble les champs où le sol devient moins apparent voire recouvert totalement par de petites plantes comme les rosettes du colza, ou recouverts de touffes de végétaux assez denses. La troisième catégorie de

classes regroupe les champs recouverts de plantes assez hautes comme les plantes de colza desséchées, les plantes céréalières ou encore les plantes très hautes (de l'ordre du mètre). Pour distinguer ces huit classes, la SVM est utilisée avec les paramètres pertinents retenus lors de la première étude. Seul le paramètre $SERD$ n'a pas pu être utilisé à cause du nombre trop important de classes. Quatre modèles de SVM sont testés. Seul le modèle SVM $[C]$+4P est retenu. L'apprentissage a été fait de façon aléatoire afin d'être le moins supervisé possible, sur onze dates. Les résultats de classification sont très bons. L'évolution pour les différentes cultures au cours du temps peut être observée. Enfin, la méthode d'inversion élaborée dans le chapitre 3 est testée sur le site de Görmin avec la même calibration que pour le site d'Alling. Les résultats de l'estimation de l'humidité des sols nus sont sous-estimés. Ceci est sans doute dû au fait que la calibration n'a pas été effectuée sur le site de mesure. Par ailleurs, l'estimation de l'humidité pour les sols recouverts de petites végétations est surestimée pour les classes comprises entre 5 et 8. En conclusion, la méthode donne une tendance de l'humidité pour le cas où la calibration n'a pas pu être faite sur le site et l'estimation devient difficile lorsque la végétation est trop importante.

Il semble important de suivre la procédure décrite sur la figure 5.21 afin d'estimer l'humidité d'une zone agricole complexe c'est-à-dire constituée de champs nus, à structure périodique et/ou recouverts de petites végétations. Cette procédure con-

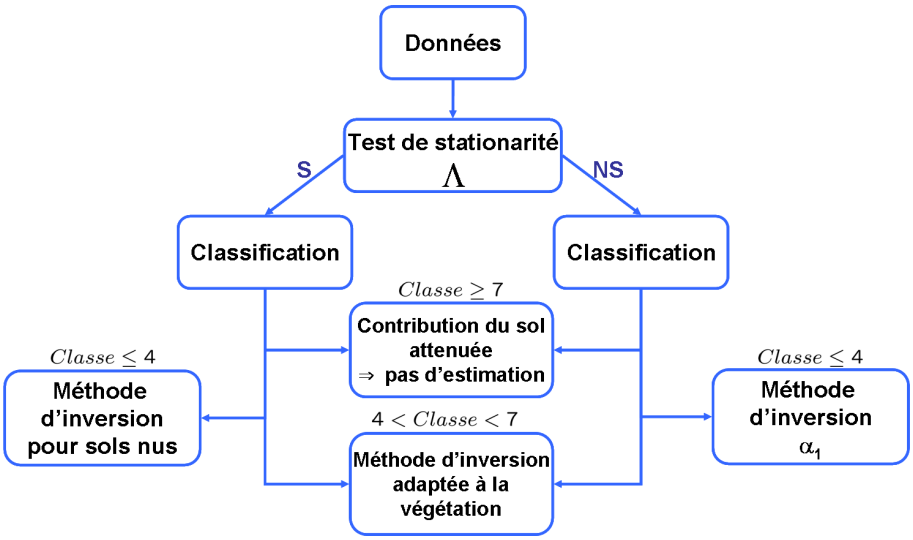


FIG. 5.21 – Procédure pour estimer l'humidité des sols agricoles

siste tout d'abord à détecter les zones non-stationnaires pour pouvoir les traiter avec des méthodes appropriées. Une classification de la zone est ensuite nécessaire afin d'identifier le type de sol et d'appliquer les méthodes d'inversion adaptées aux sols nus. Pour les zones recouvertes de petites végétations, une méthode d'inversion doit pouvoir prendre en compte les différentes classes de végétations. Il semble toutefois peu probable de pouvoir estimer l'humidité des sols où la végétation est dense et/ou haute car l'humidité de la plante aura un impact trop important par rapport à celle du sol.

Perspectives

Par rapport aux trois axes développés au cours de cette thèse, trois perspectives distinctes peuvent être envisagées :

– Les sols nus

La méthode d'inversion élaborée dans ce manuscrit est simple et donne des résultats de carte d'humidité satisfaisants. Toutefois, cette méthode comporte un inconvénient majeur. Elle nécessite une zone majoritairement composée de sols nus pour ajuster le modèle aux données. Or, ce type de scène est rare. Nous pensons qu'il serait intéressant de combiner les informations de plusieurs jeux de données afin d'améliorer l'ajustement empirique de notre méthode. De même, il faudrait tester cette méthode sur des données acquises par un autre capteur qu'E-SAR. De plus, la méthode élaborée dans cette thèse n'a pas tenu compte de la rugosité. Il serait donc fort intéressant d'améliorer cette méthode en la considérant dans l'ajustement.

– Les sols à structure périodique

Avec l'arrivée de nombreux capteurs satellitaires, nous sommes en droit de nous demander si les champs agricoles à structure périodique résonnent toujours et si une étude temps-fréquence permet de détecter ces champs non-stationnaires. De même, est ce qu'une étude faisant intervenir des données polarimétrique et interférométrique (PolInSAR) donnerait une information complémentaire aux phénomène de résonance ? En effet, l'interférométrie trouve des applications directes en géophysique grâce à sa capacité à déceler, à partir de l'information contenue dans la différence de phase entre deux images de la scène illuminée, des variations de la topographie du terrain de l'ordre de la longueur d'onde employée.

Une étude urbaine des réponses périodiques de certains immeubles pourrait être également effectuée. Il serait possible d'utiliser le modèle de diffusion électromagnétique basé sur la méthode de Kirchhoff à approximation scalaire pour l'étude des toits périodiques, par exemple, souvent présents dans un paysage urbain. Une modification de l'équation d'entrée, c'est-à-dire la caractéristique du sol peut être envisagée.

– Les sols recouverts de petites végétations

Lors de l'étude du modèle de diffusion de sols recouverts de végétations, deux paramètres optiques caractérisent entre autres la réponse électromagnétique de ce milieu. Il serait donc intéressant de se pencher sur les paramètres optiques qui permettent d'estimer la végétation. Ainsi, nous pensons qu'il est très important de combiner les données polarimétriques SAR et les données optiques. Une caractérisation optique et électromagnétique de la végétation permettrait de l'identifier au mieux afin de l'extraire pour estimer la réponse du sol sous la végétation.

La classification a été élaborée afin de détecter différents types de végétation. Le but final serait de pouvoir identifier un comportement polarimétrique par classe.

Ainsi, après classification, la composante végétale de la réponse totale pourrait être extraite afin de récupérer une réponse électromagnétique du sol comme proposé dans [Hajnsek(2009)].

La technique PolInSAR est très utilisée pour caractériser la végétation style forêt. Il serait intéressant de tester certaines techniques, notamment celle récemment proposée par [Neumann(2009)].

Par ailleurs, de premières observations ont été faites et ont mis en évidence des comportements intéressants sur les valeurs propres pour deux angles d'incidence différents. C'est pourquoi, une étude serait intéressante à mener sur l'évolution des différents mécanismes de diffusion de la végétation et même d'un sol nu selon différents angles d'incidence.

Annexe

Annexe A

Matrices de confusions

	Classification				
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	ΣT_i	Précision producteur (PP)
Cl 1	D_1	$(1,2)$	$(1,3)$	ΣT_1	$\frac{D_1}{\Sigma T_1}$
Cl 2	$(2,1)$	D_2	$(2,3)$	ΣT_2	$\frac{D_2}{\Sigma T_2}$
Cl 3	$(3,1)$	$(3,2)$	D_3	ΣT_3	$\frac{D_3}{\Sigma T_3}$
ΣC_i	ΣC_1	ΣC_2	ΣC_3	$\Sigma[\mathbf{T}] = \mathbf{\Sigma(\Sigma C_i) = \Sigma(\Sigma T_i)}$	
Précision utilisateur	$\frac{D_1}{\Sigma C_1}$	$\frac{D_2}{\Sigma C_2}$	$\frac{D_3}{\Sigma C_3}$	**Précision Moyenne** **PM**$= \frac{\Sigma(\frac{D_i}{\Sigma T_i})}{\text{nb classes}}$	**Précision Globale** **PG**$= \frac{\Sigma D_i}{\Sigma[\mathbf{T}]}$

Tab. A.1 – Matrice de confusion général pour trois classes

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	219759	8898	9975	709	1	6	43	2592	241983	90.8
Cl 2	1306	161314	3567	26	4991	5769	2136	307	179416	89.9
Cl 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 4	10	530	5	101615	73	7	660	1218	104118	97.5
Cl 5	0	0	0		0	0	0	0	0	0
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΣC_i	221075	170742	13547	102350	5065	5782	2839	4117	525517	
Précision utilisateur	99.4	94.4	0	99.2	0	0	0	0	**PM 92.7**	**PG 91.8**

Tab. A.2 – Matrice de confusion du 19 avril sur les cinq champs de références

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	206672	20586	13034	193	10	1	478	1009	241983	85.4
Cl 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	94	2230	588	25	103438	16811	10441	1433	135060	76.58
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 8	94	317	919	5833	191	4256	2527	89981	104118	86.4
ΣC_i	206860	23133	14541	6051	103639	21068	13446	92423	481161	
Précision utilisateur	99.9	0	0	0	99.8	0	0	97.3	**PM 82.8**	**PG 83.1**

TAB. A.3 – Matrice de confusion du 11 mai sur les cinq champs de références

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	227412	383	3329	3	363	83	5194	5216	241983	93.9
Cl 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	49	1715	123	41	170513	4280	2331	364	179416	95.1
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 8	116	104	549	2587	465	3979	10734	85584	104118	82.1
ΣC_i	227577	2202	4001	2631	171341	8342	18259	91164	525517	
Précision utilisateur	99.9	0	0	0	99.5	0	0	93.8	**PM 90.4**	**PG 92.1**

TAB. A.4 – Matrice de confusion du 16 mai sur les cinq champs de références

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	196669	9301	22504	18	36	27	4889	8539	241983	81.2
Cl 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	168	539	55	8	144399	28396	5363	488	179416	80.4
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 8	51	160	240	6797	275	3049	19040	74506	104118	71.5
ΣC_i	196888	10000	22799	6823	144710	31472	29292	83533	525517	
Précision utilisateur	99.8	0	0	0	99.7	0	0	89.1	**PM 77.7**	**PG 79.1**

TAB. A.5 – Matrice de confusion du 24 mai sur les cinq champs de références

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	105734	31324	6416	409	7	26	1480	1671	147067	71.8
Cl 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 3	6217	3300	85352	0	1	11	33	2	94916	89.9
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	1728	4578	1611	2005	9704	24087	208008	31813	283534	73.3
Cl 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΣC_i	113679	39202	93379	2414	9712	24124	209521	33486	525517	
Précision utilisateur	93.1	0	91.4	0	0	0	99.2	0	**PM 78.3**	**PG 75.9**

TAB. A.6 – Matrice de confusion du 7 juin sur les cinq champs de références

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 2	93876	118889	16583	171	15	182	2631	9636	241983	49.1
Cl 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	3229	14774	5795	1788	9971	35849	159785	52343	283534	56.3
Cl 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ΣC_i	97105	133663	22378	1959	9986	36031	162416	61979	525517	
Précision utilisateur	0	88.9	0	0	0	0	98.3	0	**PM 52.7**	**PG 53.1**

TAB. A.7 – Matrice de confusion du 13 juin sur les cinq champs de références

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 2	4897	193544	6843	779	1152	12768	11455	10545	241983	79.9
Cl 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	1186	13628	8365	6428	16719	40325	183031	13852	283534	64.5
Cl 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΣC_i	6083	207172	15208	7207	17871	53093	194486	24397	525517	
Précision utilisateur	0	93.4	0	0	0	0	94.1	0	**PM 72.2**	**PG 71.6**

TAB. A.8 – Matrice de confusion du 21 juin sur les cinq champs de références

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 3	1684	770	40155	0	171	400	1145	31	44356	90.5
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	70	862	188	1	8791	80334	6490	7382	104118	77.1
Cl 7	1697	3594	9305	9	18892	3917	96501	1145	135060	71.4
Cl 8	5817	7536	845	26	1082	20050	20450	186177	241983	76.9
ΣC_i	9268	12762	50493	36	28936	104701	124586	194735	525517	
Précision utilisateur	0	0	79.5	0	0	76.7	77.4	95.6	**PM 79.1**	**PG 76.7**

TAB. A.9 – Matrice de confusion du 5 juillet sur les cinq champs de références

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 3	3596	1334	39126	0	18	82	197	3	44356	88.2
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	84	1088	207	66	4263	79108	11690	7612	104118	75.9
Cl 7	1272	8270	6651	61	24352	7967	85070	1417	135060	62.9
Cl 8	1845	21236	812	382	127	9116	13086	195379	241983	80.7
ΣC_i	6797	31928	46796	509	28760	96273	110043	204411	525517	
Précision utilisateur	0	0	83.6	0	0	82.1	77.3	95.5	**PM 76.9**	**PG 75.8**

TAB. A.10 – Matrice de confusion du 12 juillet sur les cinq champs de références

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	44225	3	45	0	0	0	83	0	44356	99.7
Cl 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 3	8477	4442	111859	5	1268	1684	6623	702	135060	82.8
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	158	7520	639	0	29386	57404	6778	2233	104118	55.1
Cl 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 8	1404	8960	975	129	2152	49702	14515	164146	241983	67.8
ΣC_i	54264	20925	113518	134	32806	108790	27999	167081	525517	
Précision utilisateur	81.4	0	98.5	0	0	52.7	0	98.2	**PM 76.3**	**PG 71.8**

TAB. A.11 – Matrice de confusion du 26 juillet sur les cinq champs de références

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	91420	5299	80910	42	253	371	916	205	179416	50.9
Cl 2	10	91132	37	16	444	1125	299	1853	94916	96.1
Cl 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	142	3717	698	6123	7540	11561	55169	19168	104118	52.9
Cl 8	390	24083	866	1717	1062	18356	9456	91137	147067	61.9
ΣC_i	91962	124231	82511	7898	9299	31413	65840	112363	525517	
Précision utilisateur	99.4	73.3	0	0	0	0	83.7	81.1	**PM 65.4**	**PG 62.5**

TAB. A.12 – Matrice de confusion du 2 août sur les cinq champs de références

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	252049	8951	10101	710	1	6	43	2592	274453	91.8
Cl 2	334390	701036	243413	211	19941	33955	6537	3815	1343298	52.1
Cl 3	0		0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 4	1226	135215	599	271888	3521	10269	24768	132027	579513	46.9
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΣC_i	587665	845202	254113	272809	23463	44230	31348	138434	2197264	
Précision utilisateur	42.8	82.9	0	99.6	0	0	0	0	**PM 63.6**	**PG 55.7**

TAB. A.13 – Matrice de confusion du 19 avril sur tous les champs

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	230836	20744	21178	193	10	1	479	1012	274453	84.1
Cl 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	8241	305051	67613	321	447303	255077	111601	45272	1240479	36.1
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 8	440	2422	2370	13969	2117	25135	26871	506189	579513	87.3
ΣC_i	239517	328217	91161	14483	449430	280213	138951	552473	2094445	
Précision utilisateur	96.3	0	0	0	99.5	0	0	91.6	**PM 69.1**	**PG 56.5**

TAB. A.14 – Matrice de confusion du 11 mai sur tous les champs

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	259796	384	3412	3	363	83	5196	5216	274453	94.6
Cl 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	4327	99527	5446	7231	924404	222472	68375	11516	1343298	68.8
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 8	714	2907	2025	17708	4943	56806	75699	418711	579513	72.2
ΣC_i	264837	102818	10883	24942	929710	279361	149270	435443	2197264	
Précision utilisateur	98.1	0	0	0	99.4	0	0	96.1	**PM 78.5**	**PG 72.9**

TAB. A.15 – Matrice de confusion du 16 mai sur tous les champs

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	218039	9346	33558	18	36	27	4890	8539	274453	79.4
Cl 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	4424	37763	3032	1332	683581	328243	251330	33593	1343298	50.8
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 8	228	1738	1568	28857	2205	17240	83960	443717	579513	76.5
ΣC_i	222691	48847	38158	30207	685822	345510	340180	485849	2197264	
Précision utilisateur	97.9	0	0	0	99.6	0	0	91.3	**PM 68.9**	**PG 61.2**

TAB. A.16 – Matrice de confusion du 24 mai sur tous les champs

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	105734	31324	6416	409	7	26	1480	1671	147067	71.8
Cl 2	0	0		0	0	0	0	0	0	0
Cl 3	8487	7545	111097	0	3	62	186	6	127386	87.2
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	46793	364291	94775	32228	88631	196710	829484	269899	1922811	43.1
Cl 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΣC_i	161014	403160	212288	32637	88641	196798	831150	271576	2197264	
Précision utilisateur	65.6	0	52.3	0	0	0	99.7	0	**PM 67.4**	**PG 47.6**

TAB. A.17 – Matrice de confusion du 7 juin sur tous les champs

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 2	94239	141364	18628	171	25	371	3447	16208	274453	51.5
Cl 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	67422	381918	162720	8648	73698	136735	652912	438758	1922811	33.9
Cl 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΣC_i	161661	523282	181348	8819	73723	137106	656359	454966	2197264	
Précision utilisateur	0	27.1	0	0	0	0	99.4	0	**PM 42.7**	**PG 36.1**

TAB. A.18 – Matrice de confusion du 13 juin sur tous les champs

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 2	7778	213932	6975	2392	1524	18722	12433	10697	274453	77.9
Cl 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	48614	469395	87337	14693	92536	158676	791650	259910	1922811	41.1
Cl 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΣC_i	56392	683327	94312	17085	94060	177398	804083	270607	2197264	
Précision utilisateur	0	31.3	0	0	0	0	98.4	0	**PM 59.5**	**PG 45.7**

TAB. A.19 – Matrice de confusion du 21 juin sur tous les champs

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 3	8258	6878	72196	2	1968	2090	9809	1618	102819	70.2
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	669	8644	1196	133	30621	269603	54611	214036	579513	46.5
Cl 7	40425	57296	418470	47	79094	41630	572623	30894	1240479	46.1
Cl 8	5910	7898	877	26	1093	22174	21052	215423	274453	78.4
ΣC_i	55262	80716	492739	208	112776	335497	658095	461971	2197264	
Précision utilisateur	0	0	14.6	0	0	80.3	87.1	46.6	**PM 60.3**	**PG 51.4**

TAB. A.20 – Matrice de confusion du 5 juillet sur tous les champs

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1		0	0	0		0	0	0	0	0
Cl 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 3	15969	14672	68064	13	587	879	2102	533	102819	66.1
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	757	10702	1273	481	8648	243510	65683	248459	579513	42.1
Cl 7	24036	121579	329254	272	117276	74202	555239	18621	1240479	44.7
Cl 8	2005	32259	979	388	130	9244	16688	212760	274453	77.5
ΣC_i	42767	179212	399570	1154	126641	327835	639712	480373	2197264	
Précision utilisateur	0	0	17.1	0	0	74.2	86.7	44.2	**PM 57.6**	**PG 49.1**

TAB. A.21 – Matrice de confusion du 12 juillet sur tous les champs

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	99715	143	1342	5	120	41	1238	215	102819	96.9
Cl 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 3	295484	79365	797971	38	2942	7473	44310	12896	1240479	64.3
Cl 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	6142	37717	6142	55	136396	229343	85046	78672	579513	39.5
Cl 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 8	2106	11512	1153	129	2156	50351	15021	192025	274453	69.9
ΣC_i	403447	128737	806608	227	141614	287208	145615	283808	2197264	
Précision utilisateur	24.7	0	98.9	0	0	79.8	0	67.6	**PM 67.7**	**PG 60.1**

TAB. A.22 – Matrice de confusion du 26 juillet sur tous les champs

	Classification									
Vérité Terrain	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8	ΣT_i	PP
Cl 1	742178	105232	471952	413	2337	1478	9377	10331	1343298	55.2
Cl 2	16	121067	75	16	529	1901	489	3293	127386	95.1
Cl 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 4	0	0	0	0	0		0	0	0	0
Cl 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 6	0		0	0	0	0	0	0	0	0
Cl 7	6252	88200	47977	9936	23038	38652	234401	131057	579513	40.4
Cl 8	390	24083	866	1717	1062	18356	9456	91137	147067	61.9
ΣC_i	748836	338582	520870	12082	26966	60387	253723	235818	2197264	
Précision utilisateur	99.1	35.7	0	0	0	0	92.3	38.6	**PM 63.1**	**PG 54.1**

TAB. A.23 – Matrice de confusion du 2 août sur tous les champs

Annexe B

Précisions producteur et utilisateur

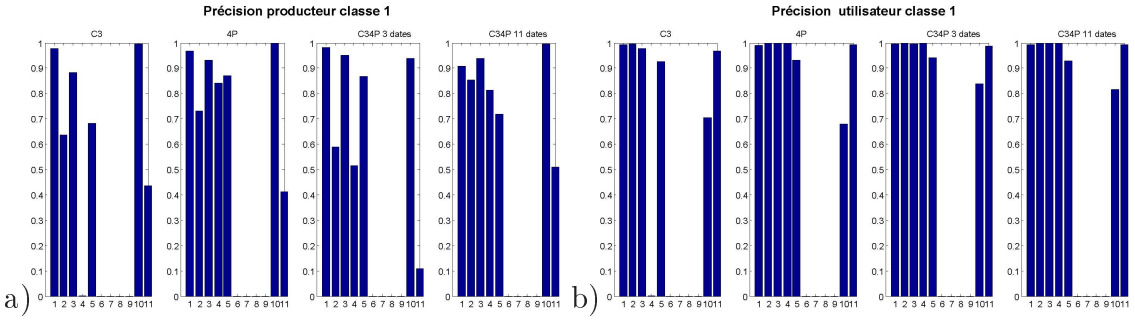


FIG. B.1 – Classe 1 : a- Précision de production b)- Précision d'utilisateur en fonction des 11 dates

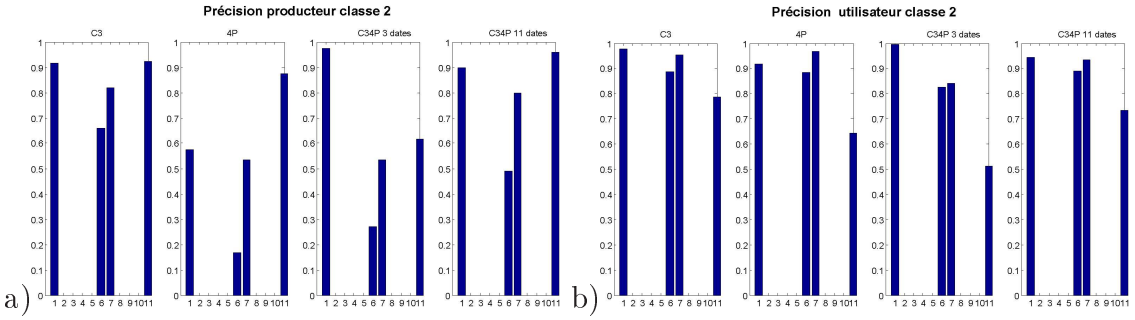


FIG. B.2 – Classe 2 : a- Précision de production b)- Précision d'utilisateur en fonction des 11 dates

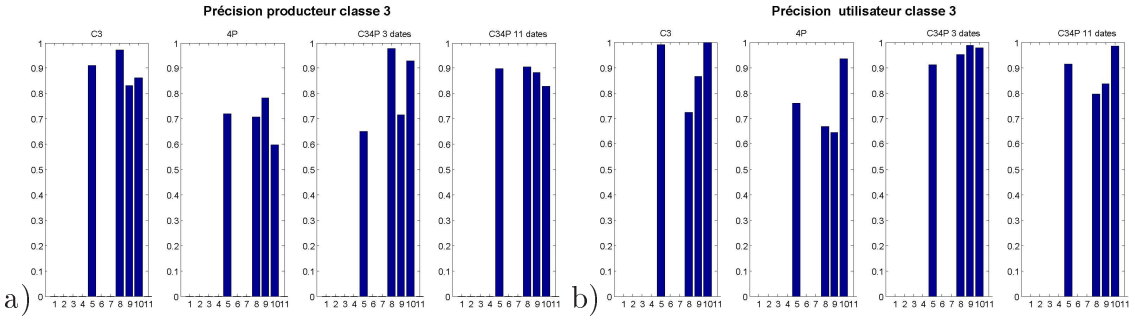


FIG. B.3 – Classe 3 : a- Précision de production b)- Précision d'utilisateur en fonction des 11 dates

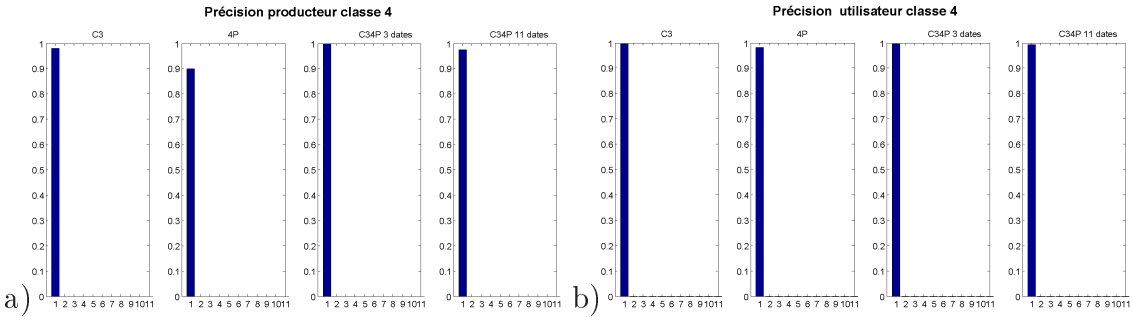


FIG. B.4 – Classe 4 : a- Précision de production b)- Précision d'utilisateur en fonction des 11 dates

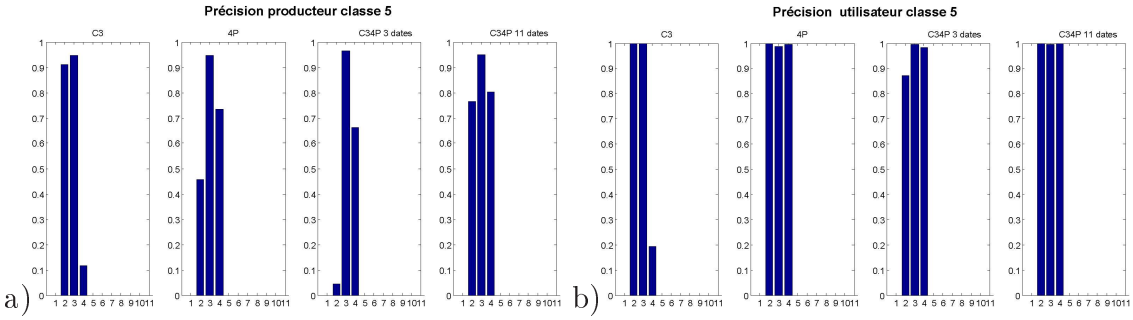


FIG. B.5 – Classe 5 : a- Précision de production b)- Précision d'utilisateur en fonction des 11 dates

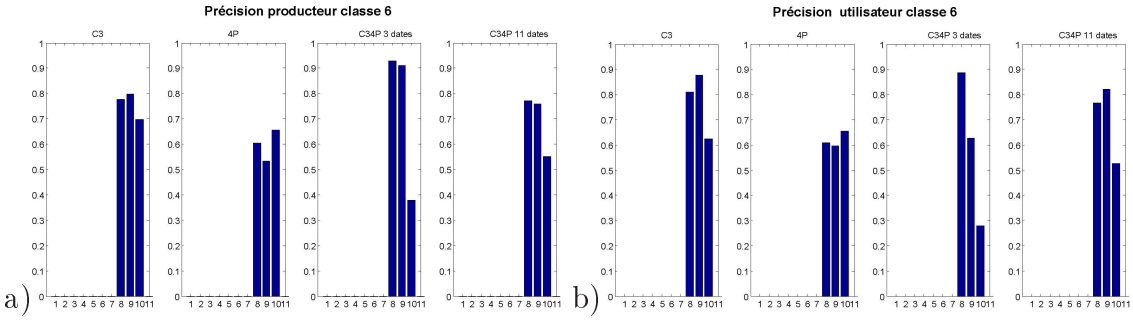


FIG. B.6 – Classe 6 : a- Précision de production b)- Précision d'utilisateur en fonction des 11 dates

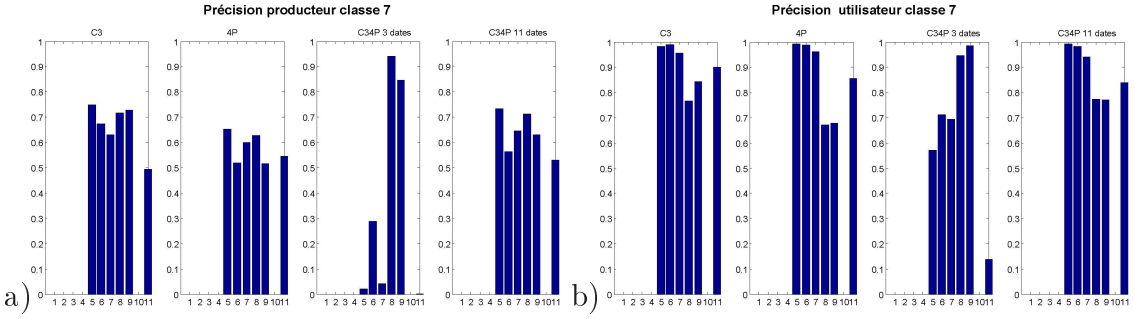


FIG. B.7 – Classe 7 : a- Précision de production b)- Précision d'utilisateur en fonction des 11 dates

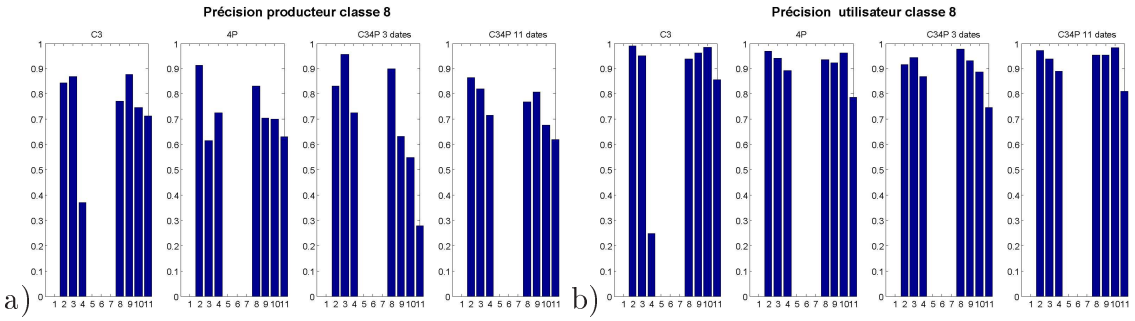


FIG. B.8 – Classe 8 : a- Précision de production b)- Précision d'utilisateur en fonction des 11 dates

Résumé

Ce travail porte sur la faisabilité d'estimer l'humidité de différents types de sols agricoles cultivés à l'aide de données SAR polarimétriques acquises en bande L par le radar aéroporté du centre aérospatial allemand, E-SAR.
Différents modèles électromagnétiques sont étudiés afin de simuler le comportement de la rétrodiffusion des ondes par les sols nus et recouverts de végétation, et de déterminer l'influence de l'humidité du sol sur la réponse du radar. Par ailleurs, les sols agricoles à structure périodique sont modélisés afin de comprendre leur comportement électromagnétique particulier.
Les méthodes d'inversion classiques sont démontrées non valides pour les sols périodiques. Ainsi, une nouvelle méthode d'inversion de l'humidité basée sur le paramètre polarimétrique alpha 1 est développée et appliquée sur des images radar contenant des sols nus. Différentes cartes d'humidité sont ainsi obtenues. De plus, une méthode basée sur une décomposition temps-fréquence du signal radar permet de détecter ces champs non-stationnaires.
Une dernière étude est menée avec des images multi-dates sur des champs recouverts de végétation. Afin de déterminer la faisabilité d'estimer l'humidité de ces sols agricoles, une identification des différents types de végétation est nécessaire. Ainsi, une classification basée sur la méthode des machines à vecteur support et sur l'analyse du comportement des paramètres polarimétriques est développée. Les cartes de végétation résultantes permettent de suivre l'évolution temporelle des cultures.
Mots clés : Télédétection, Radar à ouverture synthétique, Polarimétrie, Modélisation électromagnétique, Sols rugueux et/ou périodiques, Sols recouverts de végétation, Classification, Temps-Fréquence.

Abstract

This work deals with the feasibility of the soil moisture estimation over different kinf of agricultural fields from polarimetric SAR data acquired in L band by the airborne radar of Germany Aerospatiale center, E-SAR.
Different electromagnetic models are studied in order to simulate the backscattering behavior from bare and vegetated soils and to determine the soil moisture influence on radar response. Furthermore, the plowed agricultural fields are modelled by using periodic structure within the surface geometry in order to understand their particular electromagnetic behavior.
Classical inversion methods are proved no valid for the periodic soils. Thus, a new inversion method based on the polarimetric parameter alpha 1 is developed and applied on radar images where bare soils occur. Thus, different moisture mapping are obtained. Moreover, a method based on a time-frequency decomposition allows to detect nonstationary fields.
The last study is performed using multi-temporal images over fields covered by vegetation. In order to determine the feasibility to estimate soil moisture, an identification of different kind of vegetation is necessary. Thus, a classification based on the support vector machine and on the analysis of polarimetric parameter behavior is developed. The obtained vegetation maps allow to follow temporal evolution of plants.
Keywords: Remote sensing, Synthetic aperture radar, Polarimetry, Electromagnetic modelisation, rough and/or periodic soil, soil covered by vegetation, Classification, Time-Frequency.