

Potentiel des nouveaux capteurs radar multi-polarisation et polarimétrique pour la caractérisation des états de surface en milieu agricole

Noha Holah

▶ **To cite this version:**

Noha Holah. Potentiel des nouveaux capteurs radar multi-polarisation et polarimétrique pour la caractérisation des états de surface en milieu agricole. Sciences de la Terre. Université d'Orléans, 2005. Français. NNT : . tel-00010194

HAL Id: tel-00010194
https://theses.hal.science/tel-00010194

Submitted on 19 Sep 2005

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.

UNIVERSITE D'ORLEANS

THESE PRESENTEE A L'UNIVERSITE D'ORLEANS

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE D'ORLEANS

Discipline : Sciences de l'Univers

PAR

Noha HOLAH

Potentiel des nouveaux capteurs radar multi-polarisation et polarimétrique pour la caractérisation des états de surface en milieu agricole

Soutenue le : 12 septembre 2005

MEMBRES DU JURY

M. Guy RICHARD	DR, INRA d'Orléans	Président
Mme Anne Véronique AUZET	HDR, Chargée de recherche, CNRS	Rapporteur
M. Ferdinand BONN	Professeur, Université de Sherbrooke, Canada	Rapporteur
M. Mehrez ZRIBI	Chargé de recherche, CNRS	Examinateur
M. Ary BRUAND	Professeur, Université d'Orléans	Directeur de thèse
M. Nicolas BAGHDADI	HDR, BRGM	Co-Directeur de thèse

UNIVERSITE D'ORLEANS

THESE PRESENTEE A L'UNIVERSITE D'ORLEANS

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE D'ORLEANS

Discipline : Sciences de l'Univers

PAR

Noha HOLAH

Potentiel des nouveaux capteurs radar multi-polarisation et polarimétrique pour la caractérisation des états de surface en milieu agricole

Soutenue le : 12 septembre 2005

MEMBRES DU JURY

M. Guy RICHARD	DR, INRA d'Orléans	Président
Mme Anne Véronique AUZET	HDR, Chargée de recherche, CNRS	Rapporteur
M. Ferdinand BONN	Professeur, Université de Sherbrooke, Canada	Rapporteur
M. Mehrez ZRIBI	Chargé de recherche, CNRS	Examinateur
M. Ary BRUAND	Professeur, Université d'Orléans	Directeur de thèse
M. Nicolas BAGHDADI	HDR, BRGM	Co-Directeur de thèse

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Nicolas Baghdadi, co-directeur de ma thèse, pour m'avoir accueillie au BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et pour m'avoir épaulée durant toute la durée de cette thèse. Ses précieux conseils, aussi bien scientifiques que pratiques, m'ont permis d'avancer efficacement, ce qui a rendu ce travail très motivant et enrichissant.

Je remercie Ary Bruand, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), qui a accepté d'être mon directeur de thèse. Je remercie Mme Elisabeth Vergès, directrice de l'ISTO, pour m'avoir accueillie au sein de l'UMR. Je suis également reconnaissante à Christine King, BRGM, pour ses bons conseils et son soutien.

Je tiens vivement à remercier Anne Véronique AUZET et Ferdinand BONN pour avoir bien vouloir être les rapporteurs de cette thèse. Je remercie Max VIDAL, Mehrez ZRIBI , de m'avoir fait l'honneur de participer au jury.

Merci à tous les collèges que j'ai fréquentés et appréciés au BRGM (Steven Hosford, Olivier Cerdan, Rodrigo Pedreros, Claudie Carnec, Elisabeth Simonetto, Daniel Raucoules, ...) , à l'INRA (Odile Duval, Yves Le Bissonnais, …), au CETP (Mehrez Zribi).

Je tiens aussi à remercie mon pays d'origine (Egypte) pour avoir financé ma bourse d'étude, et le BRGM pour avoir accepté d'être l'établissement d'accueil, l'ESA (l'Agence Spatiale Européenne) pour avoir fournit les images ASAR/ENVISAT gratuitement à travers le projet No. 351 ENVISAT/ASAR, le programme ISIS de CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) pour avoir fourni les images SPOT et finalement, l'ONERA (Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales) pour avoir fourni les images RAMSES.

Enfin et surtout, je remercie mes parents, ma sœur et mon frère pour leur soutien. J'adresse enfin mes plus tendres pensées à mon mari et à ma fille qui m'ont soutenue courageusement pendant ces quelques années.

Sommaire

Introduction ……...…….……..7

Chapitre 1: Généralités……..12

1.1 La télédétection radar ……...12

1.1.1 Les capteurs aéroportés…….14

1.1.2 Les capteurs spatiaux……15

2. 1 Caractéristiques des images radar ……..17

2.1.1 "Speckle" ou chatoiement ……17

2.1.2 Distorsions ……...18

3.1 Pré-traitements des images radar ……21

3.1.1 La calibration ……...21

3.1.2 Le géocodage ……...21

3.1.3 Le géoréférencement ……22

3.1.4 La réduction du chatoiement par filtrage ……..22

4.1 Interaction entre le signal radar et le milieu ……..23

4.1.1 Paramètres instrumentaux ……23

4.1.1.1 Longueur d'onde ……..23

4.1.1.2 Polarisation ……..24

4.1.1.3 Angle d'incidence ……25

4.1.2 Paramètres de surface ……25

4.1.2.1 Rugosité de surface ……25

4.1.2.1.1 Influence de la longueur du profil et de la résolution spatiale sur la précision des paramètres rms et L ……..28

4.1.2.1.2 Filtrage des profils de rugosité ……29

4.1.2.1.3 Influence de la rugosité de surface sur le signal radar ……30

4.1.2.2 Humidité du sol ……32

4.1.2.2.1 La méthode gravimétrique ……33

4.1.2.2.2 La TDR (Time Domaine Reflectometry) ……...34

4.1.2.3 Texture du sol ……34

Chapitre 2: Potentiel des données polarimétriques en bande X pour la caractérisation de la rugosité de surface ……36

2.1 Objectifs……...36

2.2 Le capteur RAMSES……..37

2.3 Base des données……38

2.3.1 Site d'étude……..38
2.3.2 Image RAMSES……..39
2.3.3 Mesures terrains……..40
2.4 Traitement de données RAMSES……..43
2.4.1 Decomposition des données SAR polarimétriques……43
2.4.2 Paramètres polarimétriques……45
2.5 Interprétation des résultats……48
2.5.1 Interprétation de l'image RAMSES……48
2.5.2 Comportement du signal radar……49
2.5.3 Classification des données polarimétriques……56
2.5.4 Schéma de classification : arbre de décision ……...59
2.5.5 Comportement du signal radar en fonction de la rugosité de surface……...61
2.6 Conclusion……67
Chapitre 3: Apport du capteur ASAR d'ENVISAT en bande C pour la caractérisation des états de surface ……..……..69
3.1 Objectifs……...69
3.2 Le capteur ASAR d'ENVISAT……69
3.3 Base de données……..72
3.3.1 Description des sites d'étude……..72
3.3.2 Données ASAR……..74
3.3.3 Mesures terrains effectuées……74
3.3.3.1 Mesures d'humidité……...76
3.3.3.2 Mesures de densité apparente……...76
3.3.3.3 Mesures de rugosité……..76
3.4 Traitements des images ASAR……...79
3.4.1 Pré-traitements effectués sur les images ASAR……79
3.4.1.1 Calibration radiométrique des images ASAR……...79
3.4.1.2 Correction géométrique……82
3.4.1.3 Digitalisation des parcelles témoins et calcul des statistiques……..83
3.5 Interprétation des données……84
3.5.1 Comportement du signal radar en fonction de l'humidité……...84
3.5.2 Comportement du signal radar en fonction de la rugosité……89
3.5.3 Comportement du rapport des coefficients de rétrodiffusion acquis à deux incidences…….……93

3.6 Conclusion……95
Chapitre 4 : Modélisation du signal radar ……...98
4.1 Introduction ……98
4.1.1 Modèles physiques……...98
4.1.2 Modèles empiriques ou semi-empiriques……99
4.2 Revue bibliographique……..100
4.3 Objectifs……..101
4.4 Présentation du modèle IEM ……..103
4.5 Comportement du modèle IEM……105
4.5.1 Comparaison entre données mesurées et données simulées……105
4.6 Calibration empirique du modèle IEM ……..108
4.7 Validation du modèle IEM ……..110
4.8 Généralisation du paramètre de calibration ……..…113
4.9 Conclusion ……..…118
Chapitre 5 : Estimation de l'humidité et de la rugosité du sol à partir des données ASAR……...…..……..120
5.1 Estimation de l'humidité en utilisant des modèles d'inversion empiriques du signal radar……...120
5.1.1 Introduction…… ……..…120
5.1.2 Modèles d'inversion empiriques du signal radar ……..121
5.1.2.1 Concept……121
5.1.2.2 Modèle empirique pour l'estimation de l'humidité……124
5.1.3 Résultats et discussions……127
5.2 Cartographie de la rugosité de surface des sols nus ……133
5.2.1 Introduction……..133
5.2.2 Méthodologie ……..133
5.2.3 Validation ……139
5.3 Conclusion……..142
Conclusion générale et perspectives ……...144
Liste des figures ……150
Liste des tableaux ……153
Références…….……155
Annexe……170

Introduction

Le ruissellement et l'érosion des sols agricoles représentent un problème de grande envergure pour les gestionnaires territoriaux de plusieurs régions en Europe qui font face depuis plusieurs années à une augmentation des catastrophes naturelles : inondations, pertes de terres fertiles, dégradation des sols et de la qualité de l'eau. L'état du sol et en particulier l'humidité et la rugosité de surface a un rôle essentiel dans les processus hydrologiques de surface. Le ruissellement se produit quand la quantité de pluie excède la capacité d'infiltration du sol (Zobeck and Onstad, 1987; Boiffin et al., 1988 ; Brun et al., 1990 ; Le Bissonnais, 1990).

Les sols de texture limoneuse sont particulièrement sensibles au ruissellement car ils sont sujets au phénomène de battance ou d'encroûtement à la suite d'épisodes pluvieux (Le Bissonnais and Singer, 1992). Les interactions entre conditions météorologiques, pratiques agricoles et texture du sol provoquent des changements significatifs et rapides dans les propriétés hydrauliques de surface des sols. La détérioration de l'infiltrabilité du sol et de la capacité de stockage de surface est fortement influencée par les phénomènes d'encroûtement et de dégradation de la rugosité et conditionne la genèse du ruissellement à l'origine de problèmes érosifs (King et Le Bissonnais, 1992 ; Govers et al., 2000).

La sensibilité au ruissellement d'un sol en milieu agricole dépend de la topographie, du taux de couverture végétale, de la texture, de la teneur en eau et également de la rugosité de surface. Au fil des précipitations, un sol rugueux évolue vers un état de surface lisse, ce qui s'accompagne d'une diminution notable de sa capacité d'infiltration. La rugosité du sol est donc un paramètre essentiel dans le processus de ruissellement, qui dans le cas des sols limono-argileux est davantage lié aux états de surface qu'à la topographie et aux conditions climatiques. L'humidité du sol joue également un rôle majeur à l'interface entre l'atmosphère et les surfaces continentales. Les précipitations se répartissent en fonction de l'état hydrique du sol entre évapotranspiration, ruissellement de surface, infiltration, stockage de l'eau dans le sol. Il est très important de rappeler que dans de nombreuses régions cultivées, les surfaces agricoles nues une partie de l'année sont les plus contributives au ruissellement.

La télédétection spatiale est d'une importance primordiale pour la cartographie et la surveillance des problèmes environnementaux. Son intérêt réside dans la capacité

des capteurs satellitaires spatiaux à fournir des informations globales et permanentes de la planète. Les capteurs radar (Radio Detection And Ranging) permettent une cartographie quelles que soient les conditions météorologiques (nuages, pluie, …) et temporelles (jour-nuit), ce qui n'est pas le cas des capteurs optiques qui sont difficilement exploitables en hiver en raison de la couverture nuageuse. C'est au cours des années 1970 qu'a débuté la télédétection spatiale dans le domaine des hyperfréquences avec le satellite SEASAT. Mais ce sont les années 90 qui ont vu le développement de la collecte systématique d'images radar à ouverture synthétique (RSO ou SAR en anglais « Synthetic Aperture Radar ») avec le lancement de nombreux satellites radar : ALMAZ en 1991, ERS-1 en 1991, JERS-1 en 1992, navette spatiale SIR/C et XSAR en 1994, ERS-2 en 1995, RADARSAT-1 en 1995, ASAR d'ENVISAT en 2002. D'autres capteurs sont également prévus dans les années à venir comme par exemple ALOS, prévu en 2005, et RADARSAT-2, prévu début 2006.

Les systèmes RSO ont permis d'ouvrir de nouvelles perspectives pour l'observation de la terre grâce à une large amélioration de la résolution spatiale. Pour certaines applications, l'utilisation des radars spatiaux de la première génération (ERS-1/2, RADARSAT-1, JERS, …) est confrontée à des difficultés souvent liées à la caractéristique mono-bande de ces capteurs. En effet, ces capteurs sont des systèmes mono-configuration alors que plusieurs paramètres de surface influent simultanément sur le signal radar rétrodiffusé, ce qui rendait difficile l'estimation des caractéristiques de surface à l'aide des capteurs radar. Les radars spatiaux de la deuxième génération (ASAR d'ENVISAT lancé en 2002, ALOS prévu fin 2005, RADARSAT-2 prévu en 2006) devraient permettre d'accroître considérablement les capacités actuelles d'observation des surfaces continentales tant par l'accessibilité aux données spatiales que par les performances des instruments (configurations multiples de polarisation et d'angles d'incidence).

Pour un sol agricole nu, et dans le cas de gradients de pente modérés, le signal radar est dépendant des deux paramètres de la surface (topographie faible) : la constante diélectrique liée à l'humidité du sol et la rugosité de surface. De nombreuses études ont déjà été réalisées sur le potentiel de la télédétection radar à retrouver l'humidité et la rugosité du sol (e.g. Ulaby et al., 1978 ; Le Toan, 1982 ; Dobson and Ulaby, 1986 ; Bruckler et al., 1988 ; Oh et al., 1992 ; Fung and Chen,

1992 ; Dubois et al., 1995 ; Quesney et al., 2000 ; Le Hégarat et al., 2002 ; Baghdadi et al., 2002c ; Zribi et al., 2002 ; Srivastava et al., 2003 ; Oh, 2004). Plusieurs modèles de rétrodiffusion radar ont été développés ces dernières années. Ils ont pour objectif de modéliser la rétrodiffusion des surfaces naturelles et d'inverser la réponse radar pour retrouver les différents paramètres de la surface du sol. Ces modèles dépendent des caractéristiques de capteur (incidence, fréquence, polarisation,…) et de celles de la cible (humidité et rugosité). Ils sont classés suivant deux catégories. La première catégorie concerne des modèles physiques. Les plus connus parmi ces modèles sont le modèle des petites perturbations (SPM : Small Perturbation Model) développé par Rice et al. (1951), les modèles issus de l'approximation de Kirchhoff développé par Beckman et Spizzichino (1963) (GOM : Geometric Optics Model et POM : Physical Optics Model) et plus récemment le modèle IEM (Integral Equation Model) développé par Fung and Chen (1992). Ces différents modèles sont fondés sur les lois physiques de l'électromagnétisme. La deuxième catégorie concerne les modèles empiriques. Cette catégorie requiert une large base de données expérimentales. Les plus connus sont les modèles de Oh et de Dubois (Oh et al., 1992, 1994, 2002, 2004 ; Dubois et al., 1995). En pratique, il s'avère que les modèles de rétrodiffusion ne simulent pas toujours correctement le comportement du signal radar ce qui rend les processus d'inversion assez difficiles. L'étalonnage de ces modèles est donc souvent nécessaire pour corriger les erreurs éventuelles.

L'objectif de cette thèse est d'évaluer le potentiel des nouveaux et futurs capteurs radar pour la caractérisation de l'état de surface des sols nus en milieux agricoles. Des données radar acquises par le capteur aéroporté RAMSES en bande X (Radar Aéroporté Multi-Spectral d'Etude des Signatures) et par le nouveau capteur satellitaire ASAR d'ENVISAT (bande C) ont été utilisées pour analyser le comportement du signal radar en fonction de la rugosité et de l'humidité du sol. Pour le capteur RAMSES, l'utilisation de la bande X nous permettra d'évaluer les performances de cette bande pour la cartographie de la rugosité de surface. Cet intérêt pour la bande X se situe dans la perspective des futurs capteurs radar en bande X du programme PLEIADE / projet ORFEO (Optical and Radar Federated Earth Observation). Du point de vue théorique, on s'attend à des résultats moins prometteurs comparativement à ceux obtenus en bandes C et L. Cependant, le

mode polarimétrique et la bonne résolution spatiale laissent espérer des ouvertures encourageantes. L'aspect multi-polarisation et multi-incidence du capteur ASAR devrait améliorer les connaissances en physique de la mesure et la cartographie et le suivi des états de surface. L'objectif est de déterminer la meilleure configuration d'angle d'incidence et de polarisation pour une estimation optimale des deux paramètres du sol (rugosité et humidité).

Avant d'aborder les différentes parties de notre travail, nous consacrerons le premier chapitre à un rappel général sur la télédétection radar, les capteurs radar aéroportés et spatiaux, ainsi que les caractéristiques des images radar. Les paramètres instrumentaux des capteurs (longueur d'onde, polarisation et angle d'incidence) et ceux du sol (rugosité, humidité et texture du sol) seront également décrits dans ce chapitre.

Dans la deuxième partie, les données polarimétriques en bande X (fréquence de 9.6 GHz et longueur d'onde de 3.24 cm), obtenues par le capteur radar aéroporté RAMSES de l'ONERA (Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales) seront utilisées (site d'étude près d'Avignon) pour évaluer le potentiel des données RSO polarimétriques en bande X pour la cartographie de l'occupation du sol et pour analyser le comportement du signal radar en fonction de la rugosité de surface. Les théorèmes de décomposition polarimétrique proposés par Cloude et Pottier (1996) pour l'interprétation des paramètres polarimétriques seront détaillés et la base de données décrite ainsi que les résultats obtenus.

La troisième partie vise à approfondir la compréhension des phénomènes de diffusion et à améliorer les méthodes d'estimation de la rugosité et de l'humidité du sol à partir des mesures radar multi-incidence et multi-polarisation issues du capteur ASAR d'ENVISAT. Le but est d'étudier les performances d'ASAR pour l'estimation de la rugosité et de l'humidité des sols nus en milieux agricoles. L'apport de l'angle d'incidence (15° à 45°) et de la polarisation (HH, HV, VV) ainsi que la combinaison d'images issues de différentes incidences et polarisations (rapports de polarisation et d'incidence) seront analysés. Deux sites d'étude ont été choisis. Le premier est localisé à Villamblain dans la petite Beauce, près d'Orléans et le deuxième dans le bassin du Touch près de Toulouse. Le site de Villamblain a été choisi pour sa localisation proche du BRGM et du CETP, alors que le site de l'INRA d'Avignon a été

imposé par l'ONERA dans le cadre d'un vol militaire sur la zone. Seul le site du Touch a été choisi pour ses problèmes de ruissellement et d'érosion. Avec le mode multi-polarisation d'ASAR et la possibilité de choisir l'angle d'incidence approprié (entre 15° et 45°), on s'attend à des résultats plus prometteurs comparativement à ceux obtenus par ERS.

Dans la quatrième partie de cette thèse, nous allons tester le modèle de rétrodiffusion radar IEM. Ce modèle a pour objectif de simuler le coefficient de rétrodiffusion d'une surface donnée à partir des caractéristiques physiques du sol. Plusieurs études ont montré une inadéquation entre le coefficient de rétrodiffusion fourni par le modèle IEM et celui mesuré par le capteur radar. Cette différence est supposée être liée à l'incertitude des mesures de la longueur de corrélation, et/ou au modèle lui-même. Baghdadi et al. (2002b et 2004) ont proposé une calibration semi-empirique du modèle qui consistait à remplacer la longueur de corrélation (L) par un paramètre de calibration (Lopt) afin que les simulations du modèle soient en bon accord avec les mesures radar. La robustesse de la calibration semi-empirique proposée par Baghdadi et al. (2004) sera analysée dans le cadre de cette étude. Une généralisation du paramètre de calibration sera proposée dans le but d'élargir le domaine d'application du modèle IEM calibré (bande C, polarisations HH et VV, et incidences entre 20° et 50°).

Dans la dernière partie, des modèles semi-empiriques ont été utilisés pour inverser le signal radar et estimer ainsi l'humidité de surface à partir des données ASAR. L'apport de l'aspect multi-polarisation et multi-incidence sera étudié pour connaître la meilleure configuration radar pour estimer l'humidité de surface. De plus, une cartographie de la rugosité du sol sera effectuée.

Cette étude a été financée par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) avec un cofinancement du PNTS (Programme National de Télédétection Spatiale, projet Ritas), du PNRH (Programme National d'Hydrologie, projet Rides) et du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales, projet APIBAR). Les données ASAR ont été obtenues gratuitement par l'ESA à travers le projet No. 351 (ENVISAT/ASAR), et les données RAMSES ont été fournies par l'ONERA dans le cadre du projet Ritas. Les images SPOT ont été obtenues grâce au programme ISIS du CNES.

Chapitre 1 : Généralités et revue de littérature

1.1 La télédétection radar

Les systèmes radar ont pour principe l'émission d'ondes électromagnétiques et la réception du signal réfléchi par la surface. Ce sont des systèmes actifs qui envoient un signal électromagnétique pour illuminer la zone à imager et mesurer le signal rétrodiffusé par les cibles présentes. Contrairement aux capteurs optiques qui sont de systèmes passifs, les capteurs actifs ne dépendent pas des conditions solaires et peuvent opérer 24 heures sur 24. Les systèmes radar peuvent acquérir des images quelles que soient les conditions météorologiques (nuages, brume, brouillard, fumée, …), de jours comme de nuit, d'où leur appellation capteurs tout-temps.

La télédétection par des radars à synthétique d'ouverture (RSO) est maintenant une technique mature qui a démontré ses potentiels pour l'observation de la terre grâce à l'amélioration de la résolution spatiale. Cette amélioration est due à l'utilisation d'une antenne courte qui peut simuler une antenne virtuelle de longueur très importante et donc affiner la résolution spatiale des images. Les systèmes radars ont des applications dans de multiples domaines comme l'agriculture (caractérisations des états de surface des sols : rugosité et humidité), la géologie (la cartographie structurale, la détection des structures de sub-surface en milieu arides ou semi-arides, l'exploration minière et pétrolière,…), la détection des mouvements de surface par interférométrie (activité sismique, glissements de terrain, subsidence,…), les applications maritimes (surveillance du trafic maritime, détection des pollutions marines, …), l'hydrologie (la cartographie de la neige, la cartographie des inondations,…), la fabrication des Modèles Numériques de Terrain (MNT), …

Les capteurs radars sont aéroportés (embarqués sur des avions), héliportés (embarqués sur des hélicoptères), satellitaires (embarqués sur des plates-formes spatiales), et mêmes embarqués sur des navettes spatiales. Les satellites équipés de capteurs à synthétique d'ouverture (RSO) sont placés sur une orbite polaire héliosynchrone à environ 800 km d'altitude. De cette façon, ils observent toujours chaque région du globe à la même heure locale solaire. Elles se déplacent donc vers le nord d'un côté de la terre, et vers le sud dans l'autre moitié de leur orbite. Ces

deux types de passage du satellite se nomment respectivement orbite ascendante et orbite descendante (fig. 1). En règle générale, au cours de l'acquisition, l'antenne se déplace parallèlement à la zone à imager, la visée est alors qualifiée de latérale. Lorsque l'angle de dépointage est non nul, on dit que le radar fonctionne en mode oblique.

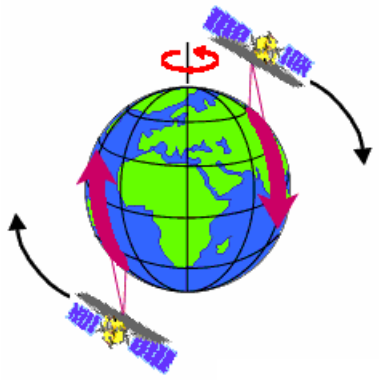


Figure 1 : Modes ascendant et descendant d'une orbite héliosynchrone.

Parmi les capteurs radars aéroportés et satellitaires les plus connus, il y a AirSAR, Convair-580 C/X , RAMSES, E-SAR, INGARA, STAR, EMISAR, PHARUS, SEASAT, JERS-1, ERS-1/2, RADARSAT-1/2, ASAR, ALOS et TerraSAR. Des missions de radars embarqués sur des navettes spatiales ont également eu lieu : SIR-A/B/C et SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).

Le signal radar dépend essentiellement de deux paramètres de surface dans le cas de sols nus en milieu agricole : la constante diélectrique liée à l'humidité du sol et la rugosité de surface. Plusieurs études ont été réalisées sur le potentiel des capteurs radar à retrouver l'humidité et la rugosité de surface (Ulaby et al., 1978 ; Le Toan, 1982 ; Dobson and Ulaby, 1986 ; Bruckler et al., 1988 ; Oh et al., 1992 ; Fung and Chen, 1992 ; Dubois et al., 1995 ; Le Hégarat et al., 2002 ; Baghdadi et al., 2002c ; Zribi et al., 2002 ; Srivastava et al., 2003). De plus, les techniques radar permettent un accès unique à une information de sub-surface jusqu'à des profondeurs allant de quelques dizaines de centimètres à quelques dizaines de mètres pour des basses fréquences (<1 GHz, Elachi et al., 1984 ; Schaber et al., 1986 and 1997 ; Grandjean et al., 2001 ; Paillou et al., 2002). Ce dernier aspect de la télédétection radar basse fréquence est un domaine nouveau très prometteur.

1.1.1 Les capteurs aéroportés :

- AirSAR : C'est un système polarimétrique aéroporté américain développé par le NASA/JPL (National Aeronautics and Space Administration / Jet Propulsion Laboratory-Californie). Il fonctionne en bandes C (5.66 cm), L (23 cm), et P (70 cm). La résolution spatiale du système AirSAR est de l'ordre de 12 m en portée et en azimut. L'angle d'incidence varie de 0° jusqu'à environ 70° (Moller et al., 2001).

- Convair-580 C/X : Développé et exploité par le centre canadien de télédétection (CCT), il a été l'un des systèmes les plus utilisés dans la recherche expérimentale et les applications RSO (radar à synthétique d'ouverture) avancées au Canada et dans le monde. Ce système fonctionne en bande C (5.66 cm) et en bande X (3.24 cm). Des données prises en polarisations croisées (HV et VH) peuvent être enregistrées simultanément pour les deux bandes (C et X). De plus, la bande C peut être utilisée comme un radar polarimétrique (4 modes de polarisation simultanément). Les images peuvent être obtenues avec une large gamme d'angles d'incidence (de 5° à presque 90°). Ce système possède une deuxième antenne sur le fuselage de l'avion qui permet au système en bande C d'opérer en tant que radar interférométrique (Brown et al., 1999).

- RAMSES : C'est un système radar polarimétrique aéroporté français développé par l'ONERA (Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales). Le système RAMSES fonctionne en bandes W, Ka, Ku, X, C, S, L, et P. La résolution spatiale peut atteindre la dizaine de centimètres et l'angle d'incidence varie de 10° à 80° (Dubois et al., 2002).

- E-SAR : C'est un système aéroporté allemand qui est opérationnel en 5 bandes de fréquences (X, C, S, L et P) avec une gamme de longueur d'onde allant de 3 à 70 cm. C'est un capteur polarimétrique avec une résolution spatiale de 2 à 5 m et en azimut 0.6 m (1 look) et 2 m (3 looks) et un angle d'incidence allant de 25° à 60° (Ulbrichet et Reigber, 1998).

- STAR (Sea Ice and Terrain Assessment) : C'est un système commercial canadien pour la surveillance de la glace de mer. Les systèmes STAR 1 et 2 fonctionnent tous

les deux en bande X, avec une polarisation HH. La couverture de la fauchée varie entre 19 et 50 km avec des résolutions allant de 5 à 18 m et des incidences allant de 35° à 55° (Tighe, 2000).

- INGARA ou AuSAR : C'est un capteur radar aéroporté développé par le DSTO (Defence Science and Technology Organisation) en Australie. Il fonctionne en bande X. C'est un système polarimétrique avec un angle d'incidence qui varie de 45° à 89° et une résolution spatiale d'environ 2 m (Preiss et al., 2002).

- EMISAR : C'est un capteur radar Danois (DCRS, Danish Center for Remote Sensing) polarimétrique qui fonctionne en bandes C et L avec des résolutions spatiales qui varient de 2 à 8 m (Christensen, 1996 ; Skou et al., 1997).

- PHARUS : C'est un système radar aéroporté polarimétrique Hollandais (TNO-FEL, Physics and Electronics Laboratory) qui fonctionne en bande C avec une résolution spatiale d'environ 3 m (Greidanus and Otten, 2002).

1.1.2 Les capteurs spatiaux :

- SEASAT : Il a été lancé en 1978. C'est le premier satellite de télédétection civile à comporter un capteur RSO. Ce capteur fonctionnait en bande L (23.5 cm) avec la polarisation HH. L'angle d'incidence variait entre 9° et 15°, avec une fauchée de 100 km et une résolution spatiale de 25 m. Ce système a été utilisé pour l'observation des océans et de la glace de mer. Le système SEASAT a été opérationnel pendant 3 mois seulement. Pendent ce temps, il a réussi à démontrer le potentiel des radars satellitaires (Mazzega and Houry, 1989).

- JERS-1 : En février 1992, l'agence nationale de développement du Japon a lancé ce satellite. Il fonctionnait en bande L avec la polarisation HH. La largeur de fauchée est approximativement de 75 km, avec une résolution spatiale de 18 m. L'angle d'incidence est d'environ 35°. La grande longueur d'onde de la bande L de JERS-1 permet une plus grande pénétration de l'énergie radar dans la végétation et autres types de surface (NSDA, 1999).

- ERS-1/2 : ERS-1 a été lancé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) en juillet 1991. Ce capteur fonctionnait en bande C. La largeur de fauchée est d'environ 100 km avec une incidence d'environ 23°, une polarisation VV, et une résolution spatiale de 30 m. La fréquence de visite (ou cycle) du ERS-1 peut varier en ajustant son orbite de 3 à 168 jours, selon le mode d'opération. Généralement, le cycle est de 35 jours. Les principales utilisations du ERS-1 étaient la surveillance et la recherche en océanographie et l'observation de la terre. Un deuxième satellite, le ERS-2 a été lancé en avril 1995 et contient un capteur radar identique à ERS-1 (ESA, http://earth. esa.int/ers/ ; Francis, 1992).

- RADARSAT-1 : Il a été lancé le 4 novembre 1995 par l'Agence Spatiale Canadienne (ASC). Ce capteur fonctionne en bande C avec la polarisation HH et une largeur de fauchée entre 50 et 500 km. La résolution spatiale varie de 10 à 100 m avec un angle d'incidence allant de 20° à 50° (http://radarsat.espace.gc.ca/ ; Singhory et Saint-Jean, 1999).

- ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) : Il a été lancé le soir du 28 février 2002 par l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Il fonctionne en bande C avec une résolution spatiale qui peut aller de 30 m jusqu'à 1 km et un angle d'incidence allant de 15° à 45°. C'est un capteur qui peut fonctionner en mode multi-polarisation (deux polarisations simultanément) (Torres et al., 1999).

- RADARSAT-2 : Il va être lancé début 2006 par l'Agence Spatiale Canadienne. C'est un capteur radar spatial polarimétrique qui fonctionnera en bande C avec une incidence allant de 20° à 50° et une résolution spatiale d'environ 3 m (http://radarsat.espace.gc.ca/) ; Mc Naim et al., 2000).

- ALOS (Advanced Land Observation Satellite) : Il va être lancé fin 2005 par l'Agence Spatiale Japonaise (NASDA). C'est un capteur radar spatial qui peut fonctionner en mode polarimétrique. Il fonctionnera en bande L avec une incidence allant de 8° jusqu'à 60° et une résolution spatiale qui variera de 7 m à 100 m (Hamazaki, 1997).

- Terra SAR : Il devrait être lancé en 2006 par l'Agence Spatiale Allemande (DLR) et EDAS Astrium. Ce capteur pourra fonctionner en mode multi-polarisation (deux

polarisations simultanément) pour la bande X et en mode polarimétrique (quatre polarisations simultanément) pour la bande L. L'angle d'incidence variera de 15° à 60° avec une résolution spatiale de 1 m en mode « Spotlight », 3 m en mode « StripMap » et 16 m en mode « ScanSAR ». Terra SAR aura la possibilité de fonctionner en mode interférométrique pour la production de modèles Numériques de Terrain (Werninghaus et Zerfowshi, 2003 ; Moreira et al., 2005).

- COSMO-SKYMED (COSMO stands for COnstellation of small Satellites of Mediterranean basin Observation) : Il correspond à la composante radar du programme ORFEO (Optical and Radar Federated Earth Observation) dont la réalisation a été confiée à l'ASI (Agence Spatiale Italienne). Les quatre satellites du programme COSMO-SKYMED devraient être lancé à partir de 2007. Ils fonctionneront en bande X avec une incidence qui variera de 20° à 59.5°. La résolution spatiale sera de l'ordre de 1 m pour le mode « Spotlight » avec une polarisation HH ou VV, de 3 à 15 m pour le mode « StripMap », et de 30 à 100 m pour le mode « ScanSAR ». Pour les deux derniers modes, les capteurs fonctionneront en polarisations HH ou/et VV, HV, VH (Rum, 2003).

2.1 Caractéristiques des images radar

2.1.1 « Speckle » ou chatoiement

Les images radar contiennent du bruit appelé « speckle » ou chatoiement. Cet effet se manifeste comme un texture poivre et sel sur les images. Le chatoiement est produit par l'interférence aléatoire, provenant de la diffusion multiple qui se produit dans chaque cellule de résolution.

Le chatoiement dégrade la qualité de l'image et peut rendre l'interprétation (visuelle ou numérique) plus difficile. Cet effet réduit également l'efficacité de la segmentation, de la classification et d'autres techniques d'extraction de l'information. Il est généralement préférable de réduire le chatoiement avant l'interprétation et l'analyse des images. Le filtrage spatial ou le traitement multi-visée permettent de réduire le chatoiement (Desnos et al., 1993 ; Touzi and Lopes 1994 ; Narasimha et al., 1995 ; Beauchemin et al., 1996 ; Polidori 1997 ; …).

Le traitement multi-visée est basé sur l'acquisition de plusieurs images distinctes d'une même scène et consiste à calculer la moyenne de toutes les images pour obtenir une image finale. On réduit ainsi l'effet de chatoiement.

Quant au filtrage spatial, de nombreux algorithmes ont été élaborés pour réduire le chatoiement dans les images RSO. Il y a des filtres simples comme par exemple les filtres moyen et médian. D'autres méthodes de filtrage plus complexes peuvent être utilisées pour réduire le chatoiement, tout en minimisant l'effet de lissage des données. Des filtres performants de type non linéaire ont été développés : Frost (Frost et al., 1982), Lee (Lee, 1980), Gamma-Map (Nezry et al., 1991 ; Lopes et al., 1993).

2.1.2 Distorsions

La géométrie de visée d'un radar cause une certaine distorsion sur l'image résultante. Il existe différents types de distorsion :

- La distorsion due à l'échelle oblique :

Cette distorsion se produit parce que le radar mesure la distance des objets obliquement au lieu de mesurer la vraie distance horizontale au sol. Bien que les cibles A1 et B1 (fig. 2) soient physiquement de la même grandeur, leurs dimensions paraissent différentes dans la portée proximale (A2 et B2).

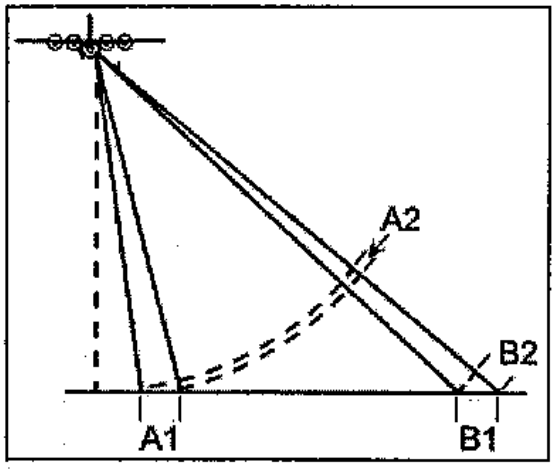


Figure 2 : Distorsion due à l'échelle oblique.

- La distorsion due au déplacement du relief (repliement) :

Le repliement est une autre sorte de distorsion géométrique observable sur les images radar. On observe principalement deux types de repliement :

Le « foreshortening »

Ce phénomène se caractérise par une représentation inexacte de la pente d'une structure et ce indépendamment de sa position dans le cône de détection. Il se produit quand le faisceau radar atteint la base d'une grande structure inclinée vers le radar avant d'atteindre son sommet. L'importance du repliement variera selon l'angle de la pente de la cible (la montagne ou les bâtiments par exemple). Un problème se pose lorsque le radar illumine au même moment la base et le sommet de la structure comme pour les points C et D. Dans un tel cas, le radar va considérer que les images C' et D' de ces points sont à un niveau identique et par conséquent qu'il n'existe aucune pente entre les deux (fig. 3).

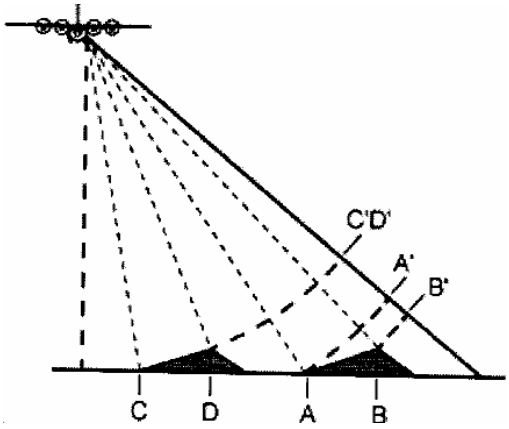


Figure 3 : Le repliement (foreshortening).

Le « layover »

Ce phénomène se produit quand le faisceau radar atteint le sommet d'une cible élevée (B) avant d'atteindre sa base (A). Le signal de retour de sommet de la cible sera reçu avant le signal de la base. Il en résulte un déplacement vers le radar du sommet de la formation par rapport à sa vraie position au sol, ce qui a pour effet de le replier sur sa base (B' à A') (fig. 4). Comme le « foreshortening », le « layover » est

plus important pour des petits angles d'incidence, dans la portée proximale du couloir et en terrain montagneux.

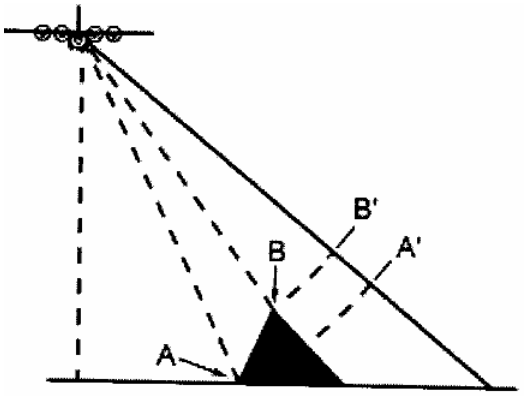


Figure 4 : Le repliement (layover).

- Distorsion due à l'effet d'ombre :

Les deux effets de repliement (« foreshortening » et « layover ») provoquent des ombres radars. Ces ombres se produisent lorsque le faisceau n'est pas capable d'illuminer la surface du sol. Les régions ombragées apparaîtront plus sombre sur une image car il n'y a pas d'énergie disponible pour la rétrodiffusion. Quand l'angle d'incidence augmente, l'effet d'ombre augmente (fig. 5).



Figure 5 : Zones d'ombre sur une image radar (parties foncées). Le radar visait de gauche à droite.

3.1 Pré-traitement des images radar

Cette phase consiste à calibrer radiométriquement les images radars, à corriger/diminuer les distorsions géométriques liées aux reliefs, et dans certains cas, à nettoyer au mieux les images de leurs chatoiements.

3.1.1 La calibration

Chaque pixel d'une image radar est défini par un compte numérique (CN). Ce compte numérique dépend des paramètres d'acquisition. Il est donc difficile de le comparer d'une image à une autre. Afin de pouvoir effectuer des analyses multi–temporelles et comparer différentes images, il est nécessaire de normaliser l'intensité du signal. Cette normalisation est assurée par la calibration radiométrique des images. Ce processus permet de calculer à partir du signal rétrodiffusé une grandeur sans dimension appelée le coefficient de rétrodiffusion σ^0. Le coefficient de rétrodiffusion dépend des paramètres physiques de la surface tels que la rugosité et l'humidité (dans le cas d'un sol nu), mais également des paramètres propres du capteur comme l'angle d'incidence, la polarisation et la longueur d'onde du radar. Le coefficient de rétrodiffusion s'exprime en général en décibel (dB).

3.1.2 Le géocodage

Le géocodage a pour but de corriger le déplacement des pixels concernés par les effets du relief en replaçant les pixels de l'image radar à leurs vraies positions. Cette correction s'effectue à l'aide d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) et consiste donc à éliminer les déformations géométriques des images radar afin de les rendre conformes à la réalité. L'utilisation du MNT permet la correction des déformations liées au mode prise de vue du satellite, ainsi qu'à l'angle de visée du satellite et au relief de la zone couverte. Il est donc nécessaire d'effectuer ce traitement sur des images radar acquises sur des zones d'étude accidentées. Par contre, si le milieu est caractérisé par une morphologie particulièrement plane, cette opération de géocodage est inutile (e. g. Curlander, 1982 ; Schreier et al., 1993).

3.1.3 Le géoréférencement

Les informations spatiales doivent être géoréférencées afin de permettre une localisation juste et précise en tout point de l'image. Cela permet également d'exploiter plusieurs images sur une zone particulière avec une cohérence géométrique parfaite entre les différents supports. Le géoréférencement est par conséquent une étape indispensable avant tout traitement d'image. La méthode utilisée dans cette étape est l'utilisation de points d'amer ou GCP « Ground Control Point ». Ce sont des points de contrôle visibles sur l'image radar dont les coordonnées exactes sont connues (GPS, carte topographique, etc.) ou bien qui sont également repérables sur une image déjà géoréférencée (radar ou optique). La qualité du géoréférencement dépend de la précision de localisation des points, du nombre de points et de la répartition des points sur l'image.

3.1.4 La réduction du chatoiement par filtrage

Afin d'améliorer la qualité de l'image radar, il est possible de réduire le chatoiement en utilisant des filtres spécifiques. Parmi ces filtres, il y a des filtres simples de type linéaire (médian et moyen) et des filtres plus complexes de type non linéaire (Frost, Lee, Gamma-Map).

Le filtre médian a été proposé par Tukey (1971) pour l'analyse des séries temporelles. Ce filtre est basé sur la notion de la médiane des observations. Pour une fenêtre d'une taille définie (NxN pixels), ce filtre remplace le pixel central par la médiane de la fenêtre. Cette technique permet de réaliser un lissage des informations de l'image et de réduire le niveau du bruit.

Parmi les filtres non linéaires les plus connus, on trouve le filtre Gamma-MAP (Gamma Maximum A Posteriori). C'est un filtre adaptatif développé pour les images RSO (Nezry et al., 1995). Il exploite l'hypothèse selon laquelle l'intensité des éléments de la scène se distribue selon une loi gamma. En se basant sur l'approche bayesienne, les chercheurs ont dérivé un filtre maximum a posteriori (Map) qui réduit le chatoiement et donne le meilleure résultat en terme d'amélioration de la qualité de l'image. Les propriétés texturales de la scène imagée sont mieux préservées. L'utilisation de tel filtre est approprié en zones hétérogènes (Dipak et al., 1993).

Il est important de garder à l'esprit que tous les filtres, les plus basiques comme les plus sophistiqués impliquent nécessairement une perte d'information. Ainsi, certains chercheurs préfèrent utiliser les images non-filtrées.

4.1 Interaction entre le signal radar et le milieu

Le signal radar dépend des paramètres instrumentaux (longueur d'onde, polarisation et angle d'incidence) et des paramètres physiques de la surface (rugosité, humidité, texture et type du sol, végétation, …) (e. g. Ulaby et al., 1986 ; Le Toan et al., 1982 ; Chanzy et al., 1998 ; Zribi et al., 2002).

4.1.1 Paramètres instrumentaux

4.1.1.1 Longueur d'onde

Les systèmes radar exploitent le domaine des hyperfréquences. Les longueurs d'ondes correspondantes varient de 1 mm à 1 m. Le domaine des hyperfréquences est beaucoup plus large que le domaine du visible (0.4 μm - 0.7 μm) et de l'infrarouge (1 μm - 1 mm) (fig. 6). Les ondes les plus courtes ont la fréquence la plus élevée (bande Ka par exemple) et les ondes les plus longues ont la fréquence la plus basse (bandes L et P). La sensibilité du signal radar aux paramètres de surface est plus importante en utilisant des ondes plus longues comme les bandes L et P (23 cm à 70 cm) (Ulaby et al., 1978).

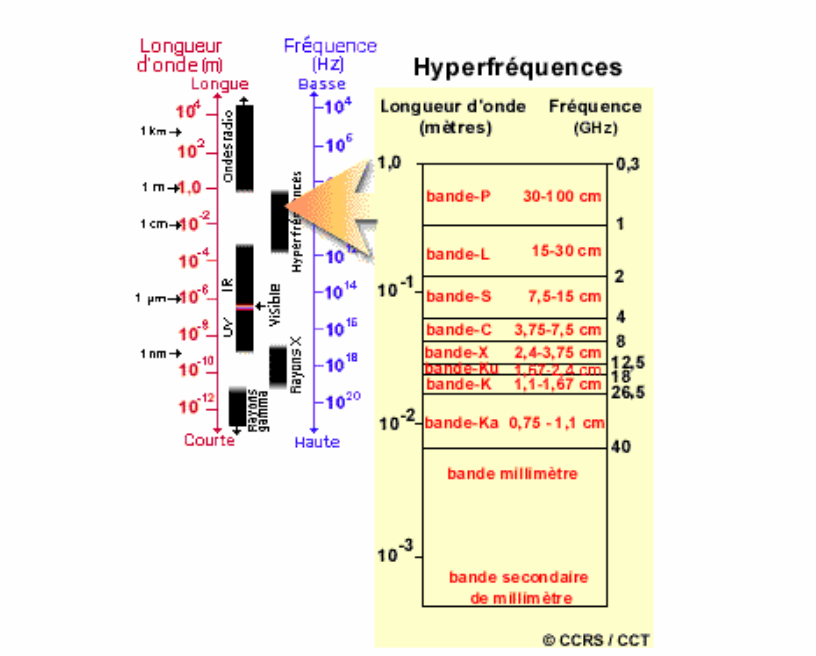


Figure 6 : Domaine des hyperfréquences (source : Centre Canadien de Télédétection (CCT), http://www.ccrs.nrcan.gc.ca).

4.1.1.2 Polarisation

La polarisation est une propriété de l'onde électromagnétique qui décrit l'orientation de son champ électrique, dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. L'onde émise par un radar d'observation de la terre est habituellement polarisée dans une direction donnée horizontale (H) ou verticale (V), l'énergie rétrodiffusée est également enregistrée dans un plan de polarisation précis (H ou V). Quatre configurations sont donc possibles : HH, HV, VH et VV, la première lettre indique la polarisation du signal émis et la seconde celle du signal mesuré. Quand les deux polarisations sont identiques (HH ou VV), l'acquisition est dite en polarisation parallèle ; pour deux directions perpendiculaires (HV ou VH), elle est dite en polarisation croisée.

Les premiers capteurs satellitaires sont des capteurs mono-polarisation (une seule polarisation) : ERS-1/2 (VV), RADARSAT-1 (HH), et JERS-1 (HH). Les capteurs radar de la deuxième génération sont multi-polarisation (deux polarisations simultanément) : ASAR d'ENVISAT (HH et HV ou HH et VV ou VH et VV), ou polarimétriques (4 polarisations simultanément) : ALOS et RADARSAT-2 (2006).

4.1.1.3 Angle d'incidence

C'est l'angle entre le faisceau du radar et la normale (fig. 7). L'angle d'incidence est une donnée importante car il détermine la façon dont sera réfléchi le signal radar. Les capteurs satellitaires radar de la première génération avait une visée fixe (ERS-1/2 fournissait des images avec un angle d'incidence de 23°). Cependant, certains capteurs ont des angles d'incidence variables, c'est le cas de RADARSAT-1 et d'ASAR d'ENVISAT qui sont équipés d'antennes mobiles pouvant acquérir des images avec des angles d'incidences allant de 20° à 50° pour RADARSAT-1 et de 15° à 45° pour ASAR.

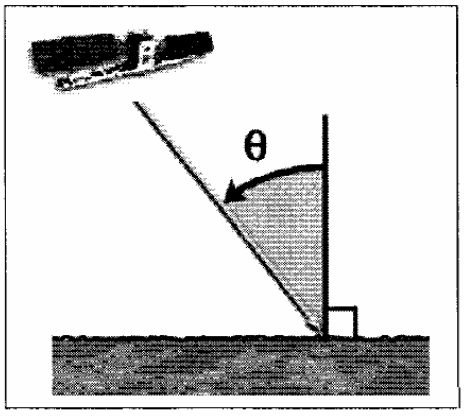


Figure 7 : Définition de l'angle d'incidence radar (θ).

4.1.2 Paramètres de surface

4.1.2.1 Rugosité de surface

La rugosité est un paramètre physique qui caractérise l'état de surface d'un objet. La caractérisation de ce paramètre peut se faire de façon mathématique grâce à un profil de la surface du sol. Un tel profil est réalisé à l'aide d'un rugosimètre (ou profilomètre) à aiguilles (fig. 8) ou à laser. Le profil de rugosité peut être représenté par la fonction f(x) = z, où x se situe sur un axe horizontal et z est la hauteur du profil par rapport à cet axe. La description de la rugosité de surface des sols agricoles nus est basée sur trois paramètres que sont l'écart type des hauteurs (*rms*), la longueur de corrélation (L) et la fonction d'autocorrélation (e. g. Ulaby et al., 1986 ; Fung et al., 1994 ; Zribi, 1998 ; Shi et al., 2002).



Figure 8 : Profil de rugosité réalisé par un profilomètre à aiguilles dans la direction parallèle aux sillons sur le site de Villamblain.

L'écart type des hauteurs

L'écart type des hauteurs (*rms* : root mean square) exprime la variation verticale de la rugosité du sol. Les valeurs de rms dépendent des pratiques agricoles et des effets de la pluie sur le sol. Le paramètre est défini comme suit :

$$rms^2 = \left\langle (z(x) - \langle z \rangle)^2 \right\rangle \quad (1)$$

où $z(x)$ est l'altitude mesurée à l'abscisse x, et $\langle z \rangle$ la hauteur moyenne définie par :

$$\langle z \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} z_i(x) \quad (2)$$

N est le nombre d'altitudes z_i disponibles dans un profil de hauteurs.

Dans le cas d'un sol nu, la rugosité de surface peut être décrite comme la variation moyenne des aspérités de la surface par rapport à une surface plane. En effet, l'influence de la rugosité d'une cible varie avec la configuration du signal : longueur d'onde (λ), angle d'incidence (θ) et polarisation.

Selon le critère de Rayleigh, une surface est dite rugueuse si l'écart type des hauteurs défini par le *rms* est ≥ $\frac{\lambda}{8\cos\theta}$; sinon, la surface est considérée comme lisse (Ulaby et al., 1982). Une même surface apparaît donc d'autant plus rugueuse avec une petite longueur d'onde, ou suivant un petit angle d'incidence.

Le paramètre *rms* ne suffit pas à caractériser la rugosité de la surface du sol. En effet, il ne tient pas compte des relations pouvant exister entre les différentes points de la surface.

La longueur de corrélation

Pour tenir compte de la relation qui peut exister entre les altitudes de deux points de la surface, écartés d'une distance u, on définit la fonction d'autocorrélation $(\rho(u))$ de la surface et on calcule la longueur de corrélation L :

$$\rho(u) = \frac{\langle \{z(x+u) - \langle z \rangle\}.\{z(x) - \langle z \rangle\} \rangle}{rms^2} \qquad (3)$$

Lorsque u = 0, la distance entre les altitudes de deux points de la surface est nulle, la corrélation entre ces deux points confondus est maximale et la fonction d'autocorrélation est unitaire $\rho(u) = 1.$

Lorsque u augmente, les points s'éloignent et sont de moins en moins corrélés et la fonction $\rho(u)$ diminue. Enfin, il existe une distance pour laquelle les points sont considérés comme n'étant plus corrélés. Cette distance est la longueur de corrélation (L). Elle est définie comme étant la distance (depuis l'origine du profil) à partir de laquelle la fonction d'autocorrélation est égale à e^{-1}. Lorsque la rugosité est faible et le sol est lisse, la fonction d'autocorrélation a une forme exponentielle. Inversement, pour des rugosités élevées, la fonction d'autocorrélation a une forme gaussienne (Ulaby et al., 1982 ; Oh et al., 1992 ; Fung et al., 1994 ; Rakotoarivony et al., 1995 ; Altese et al.,1996). De nouvelles approches basées sur l'analyse fractale de la surface ont été introduites pour améliorer la simulation du signal radar avec l'intégration d'un nouveau paramètre de rugosité qui est la dimension fractale (Zribi, 1998) :

$$\begin{aligned}\rho(x) &= e^{-\left(\frac{x}{L}\right)} \quad : \quad \text{exponentielle} \\ &= e^{-\left(\frac{x}{L}\right)^2} \quad : \quad \textit{gaussienne} \\ &= \mathrm{e}^{-\left(\frac{\mathrm{x}}{\mathrm{L}}\right)^{\tau}} \quad : \quad \textit{fractale}\end{aligned} \tag{4}$$

avec τ = -1.67 D + 3.67, D est la dimension fractale calculée à partir de la fonction de corrélation empirique qui ajuste le mieux possible la fonction expérimentale de telle sorte qu'elle soit comprise entre la fonction gaussienne et la fonction exponentielle. Plus la dimension fractale est forte, plus la fonction s'approche de la fonction exponentielle. Elle est de l'ordre de 1.4 pour les parcelles agricoles. Le coefficient τ est de l'ordre de 1.33 selon Zribi (1998). Plusieurs travaux ont montré la grande variabilité du coefficient de rétrodiffusion avec la forme de la fonction de corrélation (Altese et al., 1996).

4. 1.2.1.1 Influence de la longueur du profil et de la résolution spatiale sur la précision des paramètres *rms* et *L*

Oh et Kay (1998) ont montré que la précision associée aux mesures des paramètres de rugosité de surface (*rms* et *L*), est directement dépendante de la longueur du profil et de leur résolution horizontale. Ils ont trouvé que pour mesurer l'écart type des hauteurs (*rms*) et la longueur de corrélation (*L*) avec une précision de $\pm$ 5% de leur valeurs moyennes, la longueur du profil devrait être au moins 100*L* et 270*L* de long, respectivement (*L* est la longueur de corrélation). La précision des mesures pourrait être amélioré en moyennant plusieurs profils. Pour une longueur de corrélation qui varie entre 2 cm et 20 cm (95% de mesures), et pour 10 profils moyennés, on conclut que les profils de 2 m de long permettent une précision sur les mesures de *rms* meilleure que $\pm$ 5% et une précision sur *L* entre $\pm$ 5% et $\pm$ 15%.

Oh et Kay (1998) ont également montré que l'estimation du *rms* et de la longueur de corrélation avec une précision meilleure que $\pm$5% nécessite un pas d'échantillonnage des profilomètres inférieur à 0.5*L* et 0.2*L*, respectivement. Dans notre cas, ces contraintes sont respectées avec un pas d'échantillonnage de 1 cm et l'utilisation de plusieurs profils. De même, Winebrenner et al. (1989) ont rapporté que la résolution

horizontale d'un appareil de mesure de rugosité ne devrait pas être plus élevée que le quart de la longueur d'onde du radar, et qu'il est nécessaire de prévoir un pas d'échantillonnage équivalent ou égal à la moitié de la résolution (selon le critère d'échantillonnage de Nyquist). Pour des capteurs en bande C (~6cm de longueur d'onde), un pas d'échantillonnage d'au plus 7mm est donc nécessaire.

4. 1.2.1.2 Filtrage des profils de rugosité

Les profils de rugosité sont parfois légèrement inclinés quand le sol est ondulé, ce qui introduit une imprécision dans le calcul de la rugosité locale du sol. Pour améliorer la précision des mesures de rugosité, il est souvent nécessaire de filtrer les profils de rugosité (Borgeaud et al., 1995 ; Chanzy et al., 2003). Nos profils sont de 2 m de long avec un espacement entre les aiguilles de 1 cm. Pour améliorer la qualité de la mesure de rugosité, Rakotoarivony (1995) propose de soustraire à chaque profil la droite moyenne du profil brut.

La figure 9 montre un exemple de profil de rugosité avant et après filtrage. En général, le *rms* calculé avant filtrage change peu tandis que la longueur de corrélation diminue fortement après filtrage. Pour cet exemple, *rms* et *L* passent de 1.1 cm et 12.6 cm avant filtrage à 0.99 cm et 7 cm après filtrage, respectivement. Cette routine de filtrage a été écrite sous Matlab.

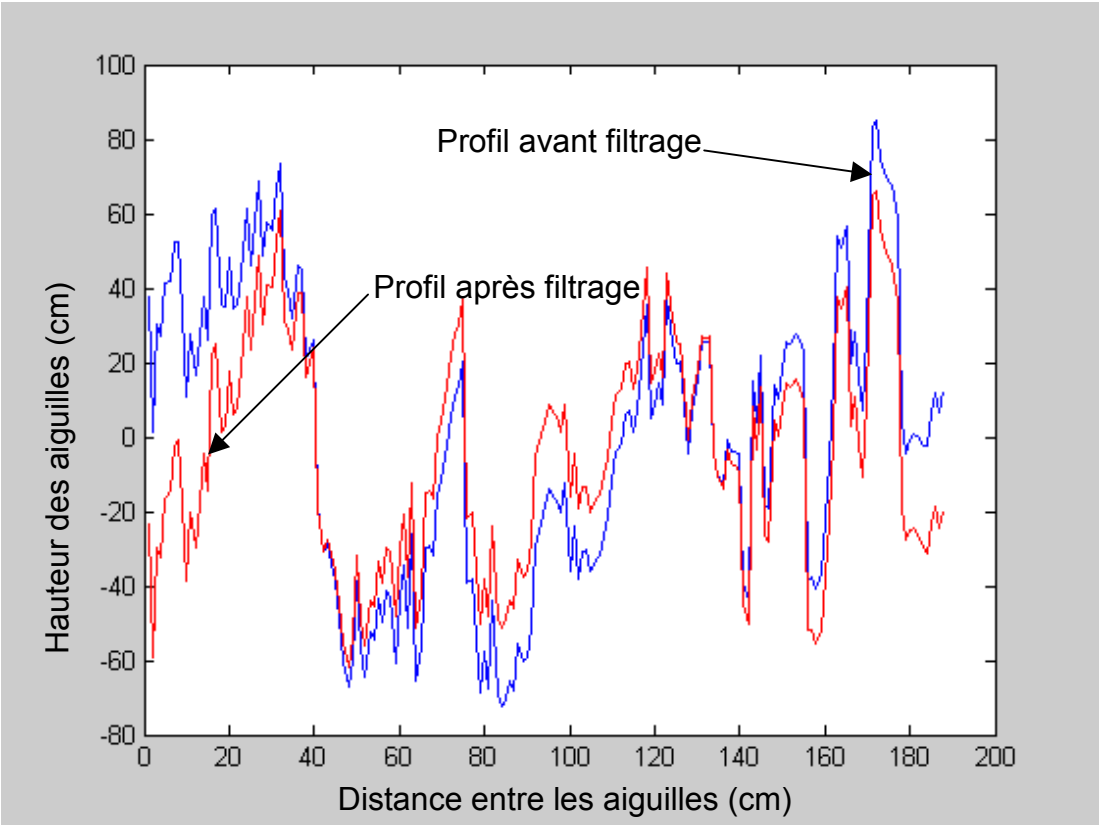


Figure 9 : Un profil de rugosité avant et après filtrage.

4.1.2.1.3 Influence de la rugosité de surface sur le signal radar

Pour un sol nu en milieu agricole, la rugosité de la surface du sol joue un rôle important dans la quantité d'énergie renvoyée vers le radar (fig. 10). Plus la rugosité d'une surface est forte, plus l'intensité du signal renvoyée vers le capteur est importante et plus la surface apparaît claire sur l'image radar (Ulaby et al., 1986 ; Fung, 1994). Quand l'angle d'incidence est élevé, la rugosité de surface est mieux perçue par les capteurs radar (Ulaby et al., 1986 ; Baghdadi et al., 2002a). En général, l'effet de la rugosité est atténué par la présence de la couverture végétale.

Ulaby et al. (1978) ont montré, en utilisant un angle d'incidence de 20° et la polarisation HH, que le coefficient de rétrodiffusion (σ^0) augmente avec la rugosité de surface. Le dynamique du coefficient de rétrodiffusion est plus grande en bande L (22 dB) qu'en bande C et X (6 dB et 3 dB, respectivement).

En fonction de la rugosité de surface, on peut distinguer trois types de mécanisme de diffusion :

- Réflexion spéculaire quand le signal interagit avec une surface lisse, l'énergie de l'onde est ainsi renvoyée dans une direction opposée à celle du système de réception du radar, seule une petite quantité d'énergie rétourne au radar et la surface apparaît alors foncée sur l'image radar (fig. 10a).

- Réflexion diffuse quand le signal interagit avec une surface rugueuse, l'énergie de l'onde est réfléchie dans toutes les directions et en particulier dans la direction du radar (fig. 10b).

- Réflexion multiple quand le signal est réfléchit entre plusieurs surfaces. Une très grande partie du signal est renvoyée vers le capteur. La réflexion multiple caractérise les bâtiments et les forêts (fig. 10c).

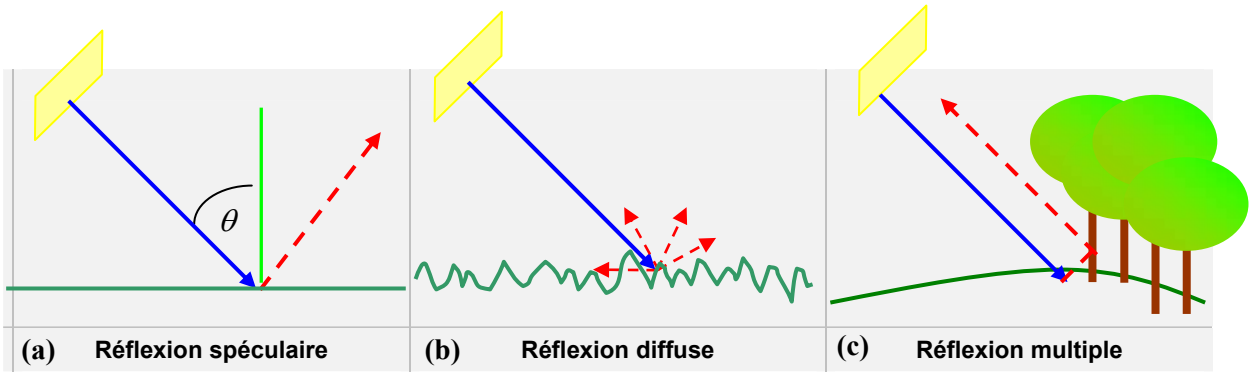


Figure 10 : Réflexion du signal radar en fonction de la rugosité de surface.

Si l'énergie radar réussit à pénétrer dans le milieu, il se produit un phénomène de diffusion volumique. L'énergie radar diffusée dans un volume est constituée de réflexions provenant des différentes composantes (ou des diverses couches) à l'intérieur du volume. Par exemple, dans une forêt, la diffusion peut provenir des feuilles au sommet des arbres, des autres feuilles et des branches en dessous, ainsi que des troncs et du sol. Une diffusion volumique augmente ou diminue la brillance d'une image, selon la quantité d'énergie diffusée à l'extérieur du volume en direction du radar.

4.1.2.2 Humidité du sol

Le potentiel d'extraction de l'humidité de surface à partir de diffusiomètres de terrain a été démontré il y a des décennies déjà. Qu'il s'agisse de l'étude sur des sols nus (Ulaby et al., 1978 ; Bernard et al.,1982 ; Chanzy et al., 1998 ; Zribi et al., 2002), ou couverts de végétation (Ulaby et al.,1986 ; Zribi et al., 2003). La sensibilité du signal radar à l'humidité du sol dépend de certains paramètres comme l'angle d'incidence, la polarisation, et la longueur d'onde.

Les différentes études ont montré que la configuration optimale pour obtenir la meilleure sensibilité de coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité du sol (avec un minimum d'influence de la rugosité de surface) combine une bande C (polarisation HH) et un angle d'incidence faible entre 7 et 17° (Ulaby et al., 1986 ; Le Toan et al., 1982 ; Beaudoin et al., 1990).

Cependant, Autret et al. (1989) ont montré grâce à une étude théorique basée sur le modèle IEM (Integral Equation Model) que la meilleure configuration pour estimer l'humidité du sol est l'utilisation du rapport HH/VV avec un angle d'incidence supérieur à 35°. D'autres études ont monté que le signal radar est légèrement plus sensible à l'humidité en polarisation VV qu'en polarisation HH, pour une humidité du sol inférieur à 35%, (Beaudoin et al., 1990 et Geng et al., 1996). Pour des sols très humides (>30-35%), le signal radar n'est plus sensible à l'humidité du sol (Dobson et Ulaby, 1981 and 1986 ; Bruckler et al., 1988 ; Chanzy, 1993 ; Geng et al., 1996).

En milieu agricole, la profondeur de pénétration de l'onde radar dans le sol (d) est très faible (quelques centimètres en bande C). Cette profondeur, qui est définie par l'équation suivante : $P(d)/P(0)=1/e$ (P est la puissance électromagnétique), dépend de la constante diélectrique du sol et de la longueur d'onde. Bruckler et al. (1988) ont trouvé, en utilisant un sol argileux-limoneux, que la profondeur de pénétration du signal radar en bande C diminue de 5 à 1 cm quand l'humidité du sol augmente de 10 à 30% (polarisation HH et angle d'incidence de 15°). Pour une surface donnée, les longueurs d'ondes les plus longues (bandes P et L) peuvent pénétrer plus profondément que les longueurs d'ondes les plus courtes (bandes C et X) (Ulaby et al., 1982).

Il existe de nombreuses techniques expérimentales pour estimer ponctuellement l'humidité de surface. Parmi les techniques les plus utilisées, il y a la méthode gravimétrique et la mesure par sonde TDR (Time Domaine Reflectometry).

4.1.2.2.1 La méthode gravimétrique

Cette méthode détermine la teneur en eau pondérale d'un échantillon de sol en comparant son poids humide P_h (prélevé tel quel) à son poids sec P_s . Ce dernier (P_s) est obtenu après avoir soumis l'échantillon à une température de 105°C pendant 24 heures dans une étuve. La teneur en eau pondérale est définie comme suit :

$$W_P(\%) = 100 \left[\frac{P_h - P_s}{P_s} \right] \quad (5)$$

L'humidité pondérale W_p (en % ou g. g^{-1}) est convertie en humidité volumique m_v (en % ou $cm^3.cm^{-3}$) en utilisant la densité apparente du sol D_a :

$$m_v(\%) = D_a \; W_P(\%) \quad (6)$$

Cette méthode est longue car on doit attendre 24 heures pour le séchage des échantillons. De plus, elle impose de mesurer la densité des sols afin d'accéder à des humidités volumiques. Malgré ces inconvénients, cette technique reste cependant la plus exacte et sert comme référence pour l'étalonnage des mesures d'humidité par TDR.

La mesure de densité apparente consiste à enfoncer le cylindre verticalement sur une surface de sol aussi horizontale que possible, en le frappant doucement à l'aide d'un maillet pour éviter un tassement qui perturberait la mesure. Quand le cylindre a entièrement pénétré dans le sol, on enlève la terre qui l'entoure et on le fait glisser sur une plaquette de bois, de manière à éviter toute perte de matériel. On procède de même pour la face supérieure et l'ensemble est maintenu avec un élastique et placé dans un sachet. La densité apparente est définie par la relation (Lozet et al., 1986 ; Duchaufour, 1995) :

D_a = poids de l'échantillon sec / le volume de cylindre (7)

4.1.2.2.2 La TDR (Time Domaine Reflectometry)

Elle consiste à émettre une impulsion électromagnétique micro-onde le long de 2 guides d'onde (parfois 3) de longueur connue, enfoncés dans le sol, et à mesurer le temps de transit du signal retour. La technique TDR fournit des teneurs en eau intégrées qui dépendent de la géométrie de la mesure (Fellner-Feldegg, 1969 ; Wilson, 1971). Il est recommandé de procéder à un étalonnage préliminaire de l'appareil par comparaison avec les mesures obtenues par la méthode gravimétrique. Enfin, on précise que la relation d'étalonnage permettant d'estimer l'humidité du sol à partir de sa permittivité diélectrique n'est pas valable en cas de sol gelé. Quesney (1999) a observé une chute brutale des humidités enregistrées par la sonde TDR et il a affirmé que cette chute était associée à des températures au sol inférieures à 0°C conduisant à une chute de la permittivité diélectrique et non pas à une décroissance réelle de l'humidité de surface.

Walker et al. (2004) ont comparé les mesures d'humidité obtenues par gravimétrie à celles obtenues par TDR en utilisant des guides d'onde de 5, 10, et 15 cm de long. Les mesures d'humidité effectuées par TDR en utilisant les guides d'onde de 10 et 15 cm sont en bon accord avec les mesures obtenues par gravimétrie (précision d'environ $\pm$ 2.5%). En revanche, en utilisant le guide d'onde de 5 cm, la précision est d'environ $\pm$ 7%. Pour des humidités inférieures à 15%, les mesures faites par TDR avec le guide d'onde de 5 cm montrent des variations qui peuvent atteindre 10% par rapport aux mesures gravimétriques.

4.1.2.3 Texture du sol

Le signal radar dépend de la texture du sol (sa composition en sable, limon et argile). Ulaby et al. (1978) ont utilisé deux types de sol (un sol argileux avec 49.0% d'argile et un sol limoneux avec 17.2% d'argile). Ils ont observé que la sensibilité du signal radar à l'humidité augmente quand le pourcentage d'argile dans le sol diminue (0.22 et 0.33 dB/0.01 g/cm^3, respectivement). Une différence similaire qui est due à la texture du sol est observée par Schmugge et al. (1976). De même, Dobson and Ulaby (1981) ont mesuré le signal radar en fonction de l'humidité pour plusieurs types de sols avec approximativement la même rugosité. Ils ont trouvé que la

sensibilité du signal radar à l'humidité est plus forte pour des sols sablo-limoneux que pour des sols limono-argileux.

Certaines études ont trouvé des résultats contradictoires parce que le type de sol était différent. A titre d'exemple, Le Toan et al. (1982) et Ulaby et al. (1986) ont montré que la sensibilité du signal radar à l'humidité est supérieure ou égale en polarisation HH à ce qu'elle est en polarisation HV (incidence de 10°). Avec une incidence de 20°, le contraire est observé. Hirosawa et al. (1978, 1980) et Kobayashi et Hirosawa (1984) ont montré que la sensibilité du signal radar à l'humidité est 4 fois plus grande en polarisation HV qu'en polarisation HH (angle d'incidence de 30°). La seule différence entre l'expérience menée par Hirosawa au Japon et les équipes aux Etats Unis et en Europe était le type de sol. Les sols utilisés par Hirosawa étaient développés sur des matériaux d'origine volcanique et possèdaient des densités apparentes très faibles (0.5 à 0.6) alors que les sols utilisés aux Etats Unis et en Europe étaient de type argileux avec une densité apparente qui varie entre 1.2 et 1.7.

L'objectif de cette étude est d'analyser l'apport du nouveau capteur ASAR d'ENVISAT et le potentiel des futures capteurs en bande X (TerraSAR, COSMO-SKYMED, ….) pour l'estimation de la rugosité et de l'humidité de surface des sols nus en milieu agricole.

Chapitre 2 : Potentiel des données polarimétriques en bande X pour la caractérisation de la rugosité de surface

2.1 Objectifs

La télédétection spatiale, en particulier le radar et ses développements récents en polarimétrie, présente un grand potentiel dans la caractérisation des paramètres géométriques de la surface. L'exploitation de cet apport est encore à développer à cause de la complexité de la donnée qui demande une connaissance approfondie des mécanismes de rétrodiffusion des ondes électromagnétiques. La télédétection hyperfréquence active a montré un grand potentiel dans la caractérisation des paramètres géophysiques des surfaces naturelles, en particulier l'humidité et la rugosité de la surface du sol (Ulaby et al., 1978 ; Le Toan, 1982 ; Dobson and Ulaby, 1986 ; Bruckler et al., 1988 ; Oh et al., 1992 ; Fung and Chen, 1992 ; Dubois et al., 1995 ; Le Hégarat et al., 2002 ; Baghdadi et al., 2002a et b ; Zribi et al., 2002). La plupart des radars de la première génération possèdent une seule polarisation (émettent et reçoivent des signaux polarisés selon une seule direction) ; c'est le cas de ERS-1/2 (polarisation VV), JERS-1 (polarisation HH) et Radarsat (polarisation HH). Le système ASAR d'ENVISAT lancé en mars 2002 fournit quant à lui des données en mode multi-polarisation (2 polarisations acquises simultanément : HH et VV ou HH et HV ou VV et VH) avec une gamme d'incidence allant de 15° à 45°. Les capteurs radar aéroportés (RAMSES, Convair-580, AirSAR, E-SAR, …) ont facilité l'accès à des données radar en mode polarimétrique (4 polarisations acquises simultanément : HH, HV, VH et VV). Dans ce chapitre, le capteur RAMSES (Radar aéroporté multi-spectral d'étude des signatures) en bande X sera utilisé pour étudier la capacité de cette bande à identifier les différentes classes de rugosité. Dans le paragraphe 2.4, on détaillera les paramètres polarimétriques utilisés pour évaluer le potentiel du capteur polarimétique en bande X pour la cartographie de l'occupation du sol. Comme le futur capteur radar du programme PLEIADE sera en bande X (projet ORFEO, Optical and Radar Federated Earth Observation), il a été nécessaire de tester les performances de la bande X pour la caractérisation des états de surface en milieu agricole. Les images RAMSES ont été fournies par l'ONERA (Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales, France) dans le cadre du projet RITAS (Ramses Imagerie pour une Thématique Agricole).

L'objectif de ce chapitre est :

1- D'analyser les images radar polarimétriques acquises par le capteur radar RAMSES en 2002 en bande X (campagne RITAS, Avignon) en fonction de la rugosité du surface.

2- D'évaluer de façon expérimentale le potentiel de l'information polarimétrique pour la discrimination des différentes classes d'occupation du sol présentes sur notre site d'étude.

2.2 Le capteur RAMSES

La télédétection radar polarimétrique vise à caractériser le comportement électromagnétique d'une cible par analyse des signaux émis et reçus. La polarisation d'une onde diffusée est très fortement liée aux caractéristiques géométriques et à la structure physique de la cible observée. Depuis ces dernières années, des radars polarimétriques aéroportés ont été développés. Parmi ces capteurs polarimétriques, on trouve le capteur RAMSES développé par l'ONERA. Il permet d'acquérir des images dans une large gamme de fréquences (de la bande P à la bande W) avec une longueur d'onde allant de moins de 1 cm jusqu'à 1 m (tab. 1) (Sicard, 1996 ; Boutry, 1998 ; Le Coz et al., 1998 ; Bruyant, 2000 ; Dubois et al., 2002). Les images peuvent être acquises avec une haute résolution spatiale (quelque dizaines de centimètres) et des incidences allant de 10° à 80°.

Afin d'évaluer le potentiel des données radar en bande X, le radar RAMSES a effectué, dans le cadre du projet RITAS, des mesures polarimétriques sur le site de l'INRA d'Avignon.

Bande	P	L	S	C	X	Ku	Ka	W
Longueur d'onde (cm)	30-100	23	9.6	5.6	3.25	1.62-2.4	0.75-1.1	< 0.75
Polarisation émise	V/H	V/H	V/H	V/H	V/H	V/H	V	L/R
Polarisation reçue	V/H	V/H	V/H	V/H	V/H	V/H	V	L/R

Tableau 1 : Les bandes fréquentielles utilisées par le système RAMSES ; V : vertical, H : horizontale, L : « left » gauche, et R : « right » droite.

2.3 Base de données

2.3.1 Site d'étude

Le site d'étude se trouve près d'Avignon (sud de la France, latitude 43° 55` N et longitude 04° 53` E, fig. 11). Il est localisé aux alentours de l'INRA d'Avignon et couvre une partie de la commune de Montfavet. Le site d'étude se situe dans le département de Vaucluse. Il contient des zones agricoles composées de champs de blé, de sols nus, de vergers (pêche, abricot, et poire), de forêts, des zones d'habitations (immeubles et maisons individuelles), des bâtiments industriels, et des routes. La forêt présente sur le site d'étude est couverte principalement de pins et de buissons. Les immeubles d'habitation sont des bâtiments divisés en deux catégories : bâtiments bas (un ou deux étages) et bâtiments hauts (trois étages ou plus). En général, les bâtiments sont caractérisés par leurs toîts plats (souvent revêtus de graviers ou de goudron). Au moment du passage de capteur RAMSES, quatre trièdres et un dièdre (cibles ponctuelles) ont été placés pour faciliter la calibration des images.

La composition granulométrique du sol, c'est à dire le pourcentage des constituants en limon, argile et sable, est de 53%, 31.6%, et 15.4%, respectivement.



Figure 11 : Location géographique du site d'étude près d'Avignon.

2.3.2 Image RAMSES

Le capteur RAMSES a effectué le 20 mars 2002 des mesures polarimétriques en bande X (fréquence de 9.6 GHz et longueur d'onde de 3.24 cm). La résolution azimutale des données est de 0.64 m et la résolution radiale est d'environ 0.66 m. Durant le vol, l'angle d'incidence variait entre 13° et 36° (début et fin de l'image dans la direction radiale, respectivement). L'altitude du vol était d'environ 3658.94 m. Les données ont par la suite été calibrées par l'ONERA.

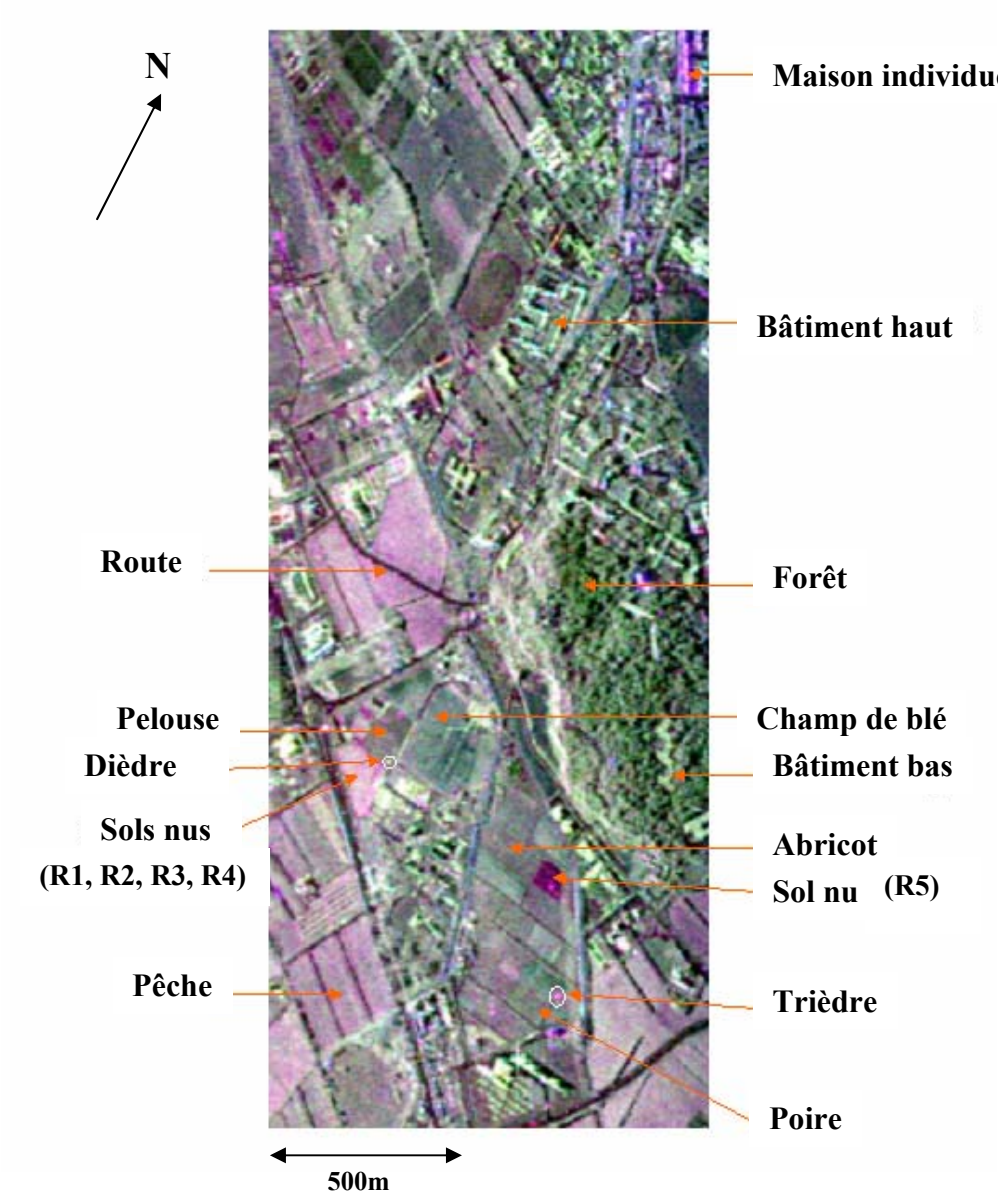


Figure 12 : Segment de l'image RAMSES polarimétrique en bande X (HH en rouge, HV en vert et VV en bleu). Le point central correspond aux coordonnées : Lat. 43° 55` N et Long. 04° 53` E. L'angle d'incidence varie de 25° à 36° (de gauche à droite de l'image).

2.3.3 Mesures terrains

Une campagne terrain a eu lieu le jour du passage du capteur (20 mars 2002). Des parcelles témoins de blé, de vergers (pêche, abricot, et poire), et de sols nus ont été choisies sur notre site d'étude (fig.13). Une base de données contenant le maximum d'informations sur les parcelles témoins a été réalisée. Elle comporte des mesures de rugosité et d'humidité du sol, de LAI (Leaf Area Index) et de hauteur de végétation.

Les mesures de rugosité et d'humidité ont été effectuées sur cinq parcelles de sol nu (R1 à R5). De même, nous avons mesuré pour des parcelles de blé la hauteur de la végétation et le LAI (tab. 2).

Les mesures de rugosité ont été effectuées à partir d'un rugosimètre à aiguilles de 2 m de long et un pas d'échantillonnage de 1 cm (écart entre les aiguilles). Les mesures de rugosité sur une parcelle ont consisté à réaliser 10 mesures dont 5 suivant la direction du travail du sol (parallèle aux sillons) et 5 perpendiculaires à cette direction. Au moment de l'acquisition radar, les parcelles (R1 à R4) étaient fraîchement labourées. Quand à la parcelle R5, elle avait été labourée quelques mois plus tôt.

Les valeurs de *rms* relevées variaient de 0.8 à 2.4 cm. Ces valeurs dépendaient des pratiques agricoles et des effets de pluie sur le sol. La longueur de corrélation est obtenue à partir de la fonction de la corrélation qui décrit la relation qui peut exister entre les altitudes de deux points de la surface. Les valeurs de la longueur de corrélation variaient de 3.04 à 6.42 cm. La fonction de corrélation est usuellement ajustée par une fonction exponentielle ou gaussienne.

Les mesures d'humidité ont été effectuées sur le premier centimètre du sol puisque la profondeur de pénétration du signal radar en bande X est faible (3 cm de longueur d'onde) (Bruckler et al., 1988 ; Ulaby et al., 1982). Quinze échantillons de sol ont été prélevés pour chaque parcelle de sol nu et une mesure précise de la quantité d'eau volumique contenue dans les échantillons a été réalisée en laboratoire en utilisant la méthode gravimétrique. Cinq mesures de densité apparente ont été faites pour chaque parcelle. La densité apparente varie pour les sols nus entre 1.2 et 1.3 avec

un écart type de 0.05, et de 1.3 à 1.5 pour les champs de blé avec un écart type de 0.07. Les résultats montrent que la teneur en eau volumique de sol nu varie entre 8.6% et 22.2%. Pour les parcelles R1 à R4, l'humidité était du même ordre de grandeur (d'environ 20%) alors que pour la parcelle R5, l'humidité était faible (8.6%).

Onze parcelles de blé ont également été étudiées en réalisant 10 à 12 mesures de hauteur de la végétation pour chaque parcelle. La valeur moyenne de la hauteur de végétation est de 0.36 m avec un écart type d'environ 0.06 m. La mesure de LAI a également été calculée. Sa valeur est de 1.81 m²/m² avec un écart type de 0.75.

Parcelle	**Caractéristique**	θ **(°)**	D_a	m_v **(%)**	**rms (cm)**	L **(cm)**	**H (m)**	**LAI (m²/m²)**
R1	Sol nu	26.1	1.24	15.7	2.40±0.20	5.51±1.65	0	0
R2	Sol nu	26.3	1.25	20.0	1.64±0.20	4.43±1.21	0	0
R3	Sol nu	26.5	1.23	21.0	1.28±0.15	3.34±0.64	0	0
R4	Sol nu	26.6	1.29	22.2	0.85±0.15	3.04±0.98	0	0
R5	Sol nu	31.7	1.20	8.6	0.80±0.22	6.42±1.99	0	0
B01, B02, B03, B04, B05, B06, B07, B08, B11, B13, B14	blé	26.6 à 31.9	1.3 à 1.5	-	-		0.36±0.06	1.81±0.75

Tableau 2 : Vérité terrain sur nos parcelles témoins. θ : angle d'incidence, D_a : densité apparente, m_v : humidité volumique du sol 0-1 cm, rms : écart type des hauteurs, L : longueur de corrélation, H : hauteur de la végétation, et LAI : leaf area index.

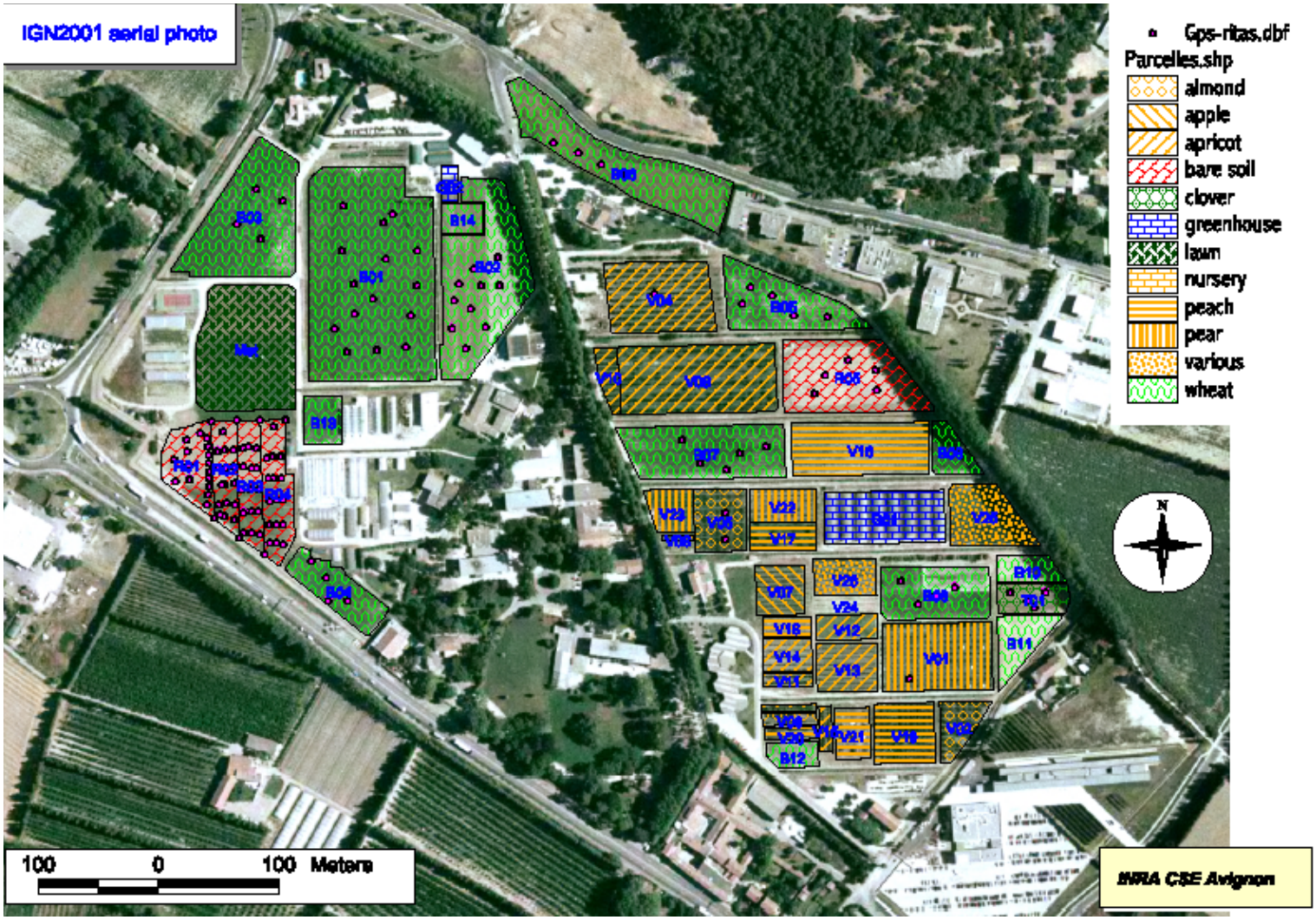


Figure 13 : Parcelles témoins documentées sur la photo-aérienne de l'IGN.

2.4 Traitement des données RAMSES

2.4.1 Décomposition des données SAR polarimétriques

Le principe de base de tout système radar consiste à émettre une onde en direction d'une cible puis à analyser l'onde rétrodiffusée afin de déduire un maximum d'informations sur la cible visée. Les systèmes radar conventionnels permettent de mesurer l'amplitude, la phase différentielle de l'onde reçu par rapport à l'onde incidente afin de déterminer les caractéristiques d'une cible radar telles que sa forme, sa distance par apport au radar. Afin d'augmenter les possibilités d'analyser les cibles, des systèmes radar ont été conçus afin de tenir compte de l'état de polarisation de l'onde, donnant naissance à une nouvelle théorie de la physique du radar : la polarimétrie (Ferro-Famil et Pottier, 2001 ; Cloude et Pottier, 1996 et 1997, …).

Lors de l'interaction entre une onde électromagnétique incidente et une cible radar, L'onde diffusée possède en général des propriétés polarimétriques différentes de celle de l'onde incidente. Pour une configuration de mesure donnée, la modification de la polarisation due à la cible est modélisée sous la forme d'un opérateur matriciel.

Dans le cas cohérent, le comportement polarimétrique de la cible est représenté par la matrice de diffusion cohérente. Dans le cas incohérent, c'est la matrice de Kennaugh qui représente le comportement polarimétrique de la cible. Un RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) polarimétrique mesure la matrice de diffusion complexe cohérente (S). C'est une matrice (2 x 2) à éléments complexes qui lie le vecteur de Jones incident E_i à celui diffusé E_s, tous les deux définis dans une base polarimétrique (H, V) :

$$E_S = SE_i = \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} E_i \qquad (8)$$

S_{pq} est la coefficient de diffusion complexe, avec p la polarisation émise et q la polarisation reçue (p et q = H (Horizontal) ou V (Vertical)). En configuration monostatistique, lorsque l'émetteur de l'onde incidente et le récepteur de l'onde diffusée sont localisés au même endroit, la matrice est symétrique et $S_{HV} = S_{VH}$.

Le vecteur de Jones E permet de décrire complètement les propriétés polarimétriques d'une onde plane monochromatique. Il contient l'information complète sur les amplitudes et les phases des composantes du champ, ainsi que sur l'état de polarisation de l'onde.

L'information polarimétrique d'une cible est représentée par la matrice de cohérence [T] qui peut être calculée directement à partir de vecteur cible de la manière suivante :

$$\langle [T] \rangle = \left\langle k_p \cdot k_p^{*T} \right\rangle \tag{9}$$

Le vecteur cible k_P correspondant est défini comme suit :

$$k_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{pmatrix}^T \tag{10}$$

Les symboles *, ^{T} et <.> représentent respectivement les trois opérateurs « conjugué », « transposé » et « moyen ».

Cloude et Pottier (1996) ont proposé un théorème de décomposition polarimétrique basé sur une décomposition des valeurs et vecteurs propres de la matrice de cohérence [T]. Ce théorème permet une analyse des propriétés statistiques d'une cible distribuée par une décomposition en trois cibles pures associées à des mécanismes de rétrodiffusion mathématiquement orthogonaux.

La décomposition aux valeurs et vecteurs propres d'une matrice de cohérence [T], associée à une cible distribuée, peut être formulée de la manière suivante :

$$\langle [T] \rangle = \sum_{i=1}^{3} \lambda_i V_i V_i^{*T} \tag{11}$$

où λ_i sont les trois valeurs propres, réelles et positives ou nulles $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$. V_i sont les vecteurs propres à éléments complexes. Ils sont orthogonaux et de norme unitaire. Les vecteurs propres sont paramétrés au moyen de 4 variables angulaires afin d'interpréter le phénomène de diffusion :

$$V_i = \left[\cos\alpha_i , \sin\alpha_i \cos\beta_i e^{j\delta_i} , \sin\alpha_i \sin\beta_i e^{j\gamma_i} \right]^T \tag{12}$$

où α_i , β_i , δ_i , *et* γ_i représentent l'ensemble de 4 paramètres indépendants qui caractérisent le phénomène de diffusion.

2.4.2 Paramètres polarimètriques

En utilisant les valeurs et vecteurs propres de la matrice de cohérence [T], trois paramètres principaux sont utilisés pour caractériser les résultats de la décomposition : entropie (H), angle $\overline{\alpha}$ et anisotropie (A). L'entropie représente le comportement aléatoire de la diffusion globale. Elle est définie de la façon suivante :

$$H = -\sum_{i=1}^{3} P_i \cdot \log_3(P_i) \quad , \quad 0 \le H \le 1 \tag{13}$$

avec

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^{3} \lambda_j} \tag{14}$$

où P_i sont les valeurs propres normalisées.

L'entropie (H) varie entre 0 et 1. Une faible entropie (H~0) représente une réflexion de surface de la cible observée. Par contre, une forte entropie (H~1) représente une rétrodiffusion totalement aléatoire.

L'anisotropie (A) représente la distribution des deux valeurs propres les plus petites, c'est-à-dire l'importance de mécanismes de diffusion secondaires (Ferro-Famil et Pottier, 2001 ; Scheuchl et al., 2001) :

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad , \quad 0 \le A \le 1 \tag{15}$$

Lorsque les deux mécanismes les plus petits sont égaux, A est égal à 0 ; et lorsque la probabilité du troisième mécanisme est nulle, l'anisotropie est égale à 1.

Le paramètre α représente le mécanisme de diffusion moyenne dominant. Il est calculé à partir de valeurs et vecteurs propres de la matrice de cohérence [T] et est définie par :

$$\overline{\alpha} = \sum_{i=1}^{3} \alpha_i P_i \tag{16}$$

où α_i sont les mécanismes de diffusion présentés par les trois vecteurs propres. $\overline{\alpha}$ =

0 correspond à une réflexion de surface, $\overline{\alpha}$ = 45° correspond à une diffusion de volume et $\overline{\alpha}$ = 90° correspond à une double réflexion.

Ces trois paramètres polarimétriques, H, A, et $\overline{\alpha}$, sont invariants par relation autour de l'axe de visée du radar et sont étroitement liés à la structure et aux propriétés géophysiques de la scène observée (Ferro-Famil et Pottier, 2001). Pour l'interprétation des paramètres polarimétriques, Cloude et Pottier (1997) ont proposé une classification H/$\overline{\alpha}$ qui consiste en une segmentation des données RSO par identification du mécanisme de rétrodiffusion moyen $\overline{\alpha}$ et du caractère aléatoire du phénomène de rétrodiffusion global, H.

La segmentation selon ces deux indicateurs polarimétriques est effectuée par un découpage déterministe du plan (H/$\overline{\alpha}$) en huit zones d'analyse (fig. 14). Les frontières de décision sont fixées de façon arbitraire. Les seuils de décision sont répartis sur l'axe $\overline{\alpha}$ de façon à ce que chaque intervalle de décision encadre un mécanisme de rétrodiffusion.

L'axe H est partagé en trois zones traduisant un comportement polarimétrique quasiment déterministe (H varie entre 0 et 0.5), modérément aléatoire (H varie entre 0.5 et 0.9) et fortement aléatoire (H est supérieur à 0.9).

L'axe $\overline{\alpha}$ est partagé aussi en trois intervalles qui correspondent à une réflexion de surface ($\overline{\alpha}$ varie entre 0° et 40°), à une réflexion de volume ($\overline{\alpha}$ varie entre 40° et 50°) et à une double réflexion ($\overline{\alpha}$ est supérieur à 50°). Cloude et Pottier (1997) donnent une interprétation du phénomène de rétrodiffusion globale pour chacune de ces huit zones :

<u>Zone 1</u> :

Cette zone caractérise une double réflexion ($\overline{\alpha} \geq 55°$) avec une très forte entropie (H $\geq$ 0.9). Un tel phénomène de rétrodiffusion est rencontré lors de l'observation de forêt ou des zones recouverte de végétation possédant des branches et un feuillage développés.

Zone 2 :

Cette zone correspond à une diffusion du volume ($40° \leq \overline{\alpha} \leq 55°$) et à forte entropie. Elle correspond à des zones de végétation et de forêt.

Zone 3 :

Elle représente une double réflexion et une entropie moyenne ($0.5 \leq H \leq 0.9$). La double réflexion sur le sol et sur les troncs d'arbres est perturbée par le passage du signal à travers la canopée, entraînant une augmentation du caractère aléatoire. Ce mécanisme se reproduit en présence d'une forêt ou des bâtiments en bandes L et P (Cloude et Pottier, 1997).

Zone 4 :

Cette zone caractérise une diffusion du volume et une entropie moyenne. Un tel phénomène est rencontré lors de l'étude des régions recouvertes des végétaux comme la forêt.

Zone 5 :

Cette zone correspond à une réflexion de surface ($0 \leq \overline{\alpha} \leq 40°$) et une entropie moyenne. Ce type de mécanisme de rétrodiffusion peut être rencontré en milieux agricoles pour des surface avec peu de végétation. Dans cette zone, on trouve également des sols nus. L'augmentation de la rugosité de surface et de la longueur de corrélation produit une augmentation de l'entropie (Cloude et Pottier, 1997).

Zone 6 :

Cette zone caractérise une double réflexion ($\overline{\alpha} \geq 47.5°$) et une faible entropie ($H \leq 0.5$). Les cibles associées à cette région sont généralement des dièdres métalliques ou diélectriques isolés et des bâtiments.

Zone 7 :

Cette zone représente une diffusion de volume avec une faible entropie. Elle correspond à des surfaces composées de particules qui possèdent toutes plus ou moins la même orientation. C'est donc des surfaces qui vont produire un mécanisme de réflexion fortement polarisé (entropie faible).

Zone 8 :

Cette zone correspond à une réflexion de surface ($\overline{\alpha} \leq 42.5°$) et à une faible entropie. Les milieux naturels correspondants peuvent être l'eau en bandes L et P (grandes longueurs d'ondes) et les surfaces très lisses en général (Cloude et Pottier, 1997).

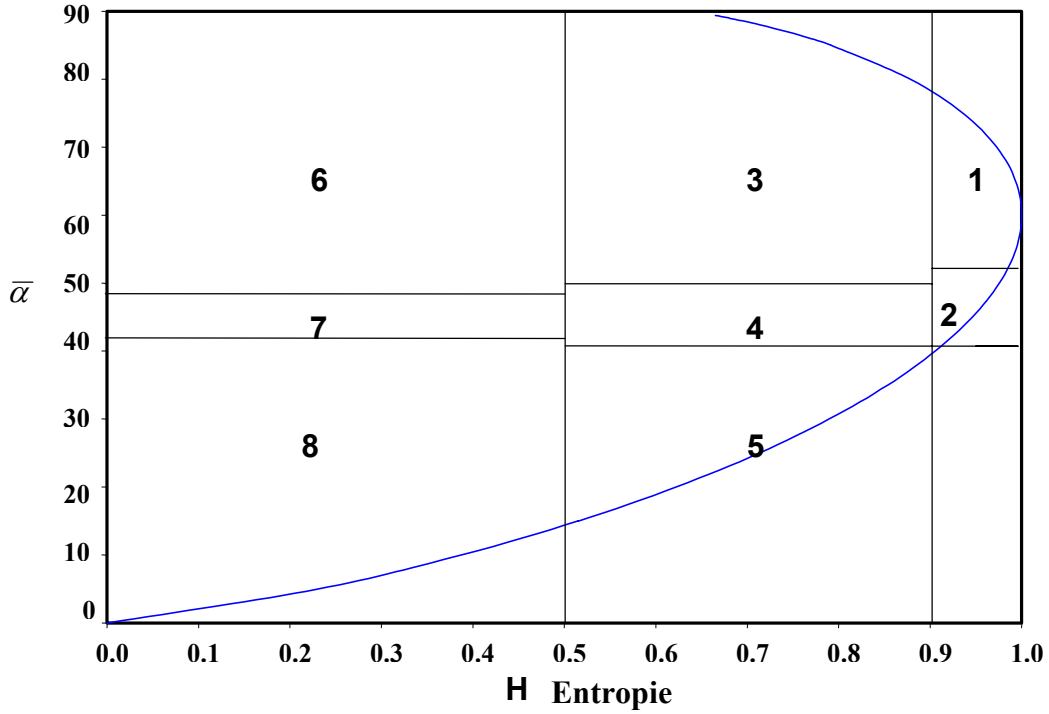


Figure 14 : Plan (H-$\overline{\alpha}$) segmenté en huit régions qui correspondent à des caractéristiques de rétrodiffusion spécifiques.

2.5 Interprétation des résultats

2.5.1 Interprétation de l'image RAMSES

La photo-interprétation de l'image RAMSES (cf. fig. 12) montre que la rétrodiffusion est bien différente selon les surfaces. La forte signature est attribuée au phénomène de diffusion multiple (bâtiments, maisons individuelles, …). D'autre part, les routes apparaissent sur l'image en teintes foncées dues à leurs surfaces lisses (réflexion de surface). La forêt, les champs de blé, et les arbres fruitiers ont une signature similaire sur l'image ; il est donc difficile de les séparer. De même, les parcelles de sol nu (R1 à R4) qui ont des rugosités entre 0.85 et 2.4 cm sont impossible à distinguer, en

partie, à cause de la courte longueur d'onde de la bande X. En effet, le signal radar sature plus vite avec la rugosité de surface quand la longueur d'onde est faible (< 1 cm en bande X).

2.5.2 Comportement du signal radar

Dans cette partie, nous avons évalué le potentiel des paramètres polarimétriques pour discriminer les principales classes présentes sur notre site d'étude : sol nu avec plusieurs types de rugosité, champs de blé, arbres fruitiers, forêt, bâtiments, maisons individuelles et routes. Les paramètres polarimétriques utilisés sont ceux qui sont le plus fréquemment utilisés dans la littérature : coefficients de rétrodiffusion, rapports de polarisation HV/HH, HV/VV, et VV/HH, coefficients de corrélation, entropie, anisotropie et angle $\overline{\alpha}$.

Lors de notre campagne terrain, nous avons choisi pour chaque classe plusieurs sites d'entraînements. Les figures 15 à 18 montrent le comportement du signal radar en fonction des différentes classes. Les points correspondent à la valeur moyenne sur les sites d'entraînements.

- Coefficients de rétrodiffusion (fig.15) : Les résultats montrent une faible discrimination entre les zones forestières et les zones agricoles quelle que soit la polarisation (HH, HV et VV). Pour les parcelles de sols nus (R1 à R4) qui ont des rugosités différentes (0.85 à 2.40), le signal radar est presque le même. La parcelle R4 a la même rugosité que la parcelle R5 (0.85 et 0.80, respectivement) mais le signal radar est bien différent pour les deux parcelles. La présence de croûte de battance sur la parcelle R5 en est la cause. En effet, la parcelle R5 a été travaillée plusieurs mois avant la parcelle R4 et de ce fait, elle a reçu une quantité de pluie beaucoup plus importante que celle reçue sur la parcelle R4. La différence du signal entre les parcelles R4 et R5 est plus importante en polarisation HV (10 dB) qu'en polarisations HH et VV (8 dB).

En polarisation HV, on observe une grande séparation entre les différents types de bâtiments (hauts et bas) et les maisons individuelles, et entre les routes et les autres classes. En polarisation HH, on constate une bonne séparation entre les bâtiments hauts et bas, et une séparation moyenne entre les bâtiments et les maisons

individuelles. En polarisation VV, on constate une discrimination moyenne entre les bâtiments hauts et bas. En polarisations HH et VV, on observe une séparation moyenne entre les sols nus et les zones agricoles, et une grande séparation entre les sols nus et les routes.

- Rapports de polarisations (fig. 16) : Les rapports de polarisations (HV/HH, HV/VV, et VV/HH) montrent une faible séparation entre les différentes classes en général. Seules les maisons individuelles peuvent être extraites sans ambiguïté en utilisant les rapports HV/HH et HV/VV. De même, le rapport VV/HH montre une bonne discrimination entre la forêt et les parcelles de blé, entre les bâtiments bas et les maisons individuelles, et une discrimination moyenne entre les bâtiments hauts et les maisons individuelles. Les sols nus et les routes sont clairement distinguables des autres classes en utilisant le rapport de polarisation HV/VV mais ils ne sont pas eux mêmes séparables. On constate également grâce aux rapports HV/HH et HV/VV, une grande discrimination entre les maisons individuelles et les bâtiments et entre les sols nus et la forêt.

- Coefficients des corrélation (fig. 17) : La magnitude du coefficient de corrélation calculé entre HH et VV montre une bonne séparation entre les sols nus et les autres classes, et entre les maisons individuelles et les bâtiments bas. Grâce au coefficient de corrélation entre HV et HH, une forte séparation est observée entre les bâtiments hauts et les bâtiments bas, tandis que la séparation est moyenne entre les bâtiments hauts et les maisons individuelles. Les résultats montrent également que les coefficients de corrélation entre les co-polarisations (HH et VV) et la cross-polarisation (HV) sont presque identiques avec des valeurs très faibles pour les zones agricoles et la forêt (< 0.3) et que le potentiel de discrimination entre ces classes est quasiment nul.

- Entropie (fig. 18a) : Les résultats montrent une grande discrimination entre les bâtiments et les maisons individuelles, et entre les sols nus et les autres classes du milieu agricole (forêts, vergers et champs de blé). On peut séparer deux groupes :

Faible entropie (< 0.5)	Moyenne entropie (> 0.5)
Les trièdres, dièdres, et maisons individuelles.	Les sols nus, routes, forêts, champs de blé, arbres fruitiers, bâtiments.

- Angle $\overline{\alpha}$ ***(fig. 18b) :*** Les résultats montrent une grande discrimination entre les sols nus et les autres classes. On peut distinguer trois types de mécanismes de diffusion :

Réflexion de surface ($\overline{\alpha}$ < 42.5°)	Réflexion de volume (42.5°< $\overline{\alpha}$ < 55°)	Double réflexion (55°< $\overline{\alpha}$ < 90°)
Sols nus, routes, trièdres, champs de blé et arbres fruitiers.	Forêts, et bâtiments bas.	Maisons individuelles, bâtiments hauts et dièdres.

- Anisotropie (fig. 18c) : Une grande séparation entre les bâtiments et les maisons individuelles a été notée. Par contre, il est impossible de séparer les autres classes. Dans notre site d'étude l'anisotropie n'est pas un paramètre de séparation pertinent entre les différentes classes. En effet, la valeur de l'anisotropie est la même pour la plupart des classes (0.3 < A < 0.4). Pour le reste des classes, l'anisotropie est supérieure à 0.5. On peut séparer deux groupes de classes :

A < 0.5	A > 0.5
Routes, sols nus, arbres fruitiers, forêts, champs de blé et bâtiments bas.	Bâtiments hauts, maisons individuelles, dièdres et trièdres.

La figure 19 montre les images de l'entropie, l'angle $\overline{\alpha}$ et l'anisotropie calculées sur une partie de l'image RAMSES.

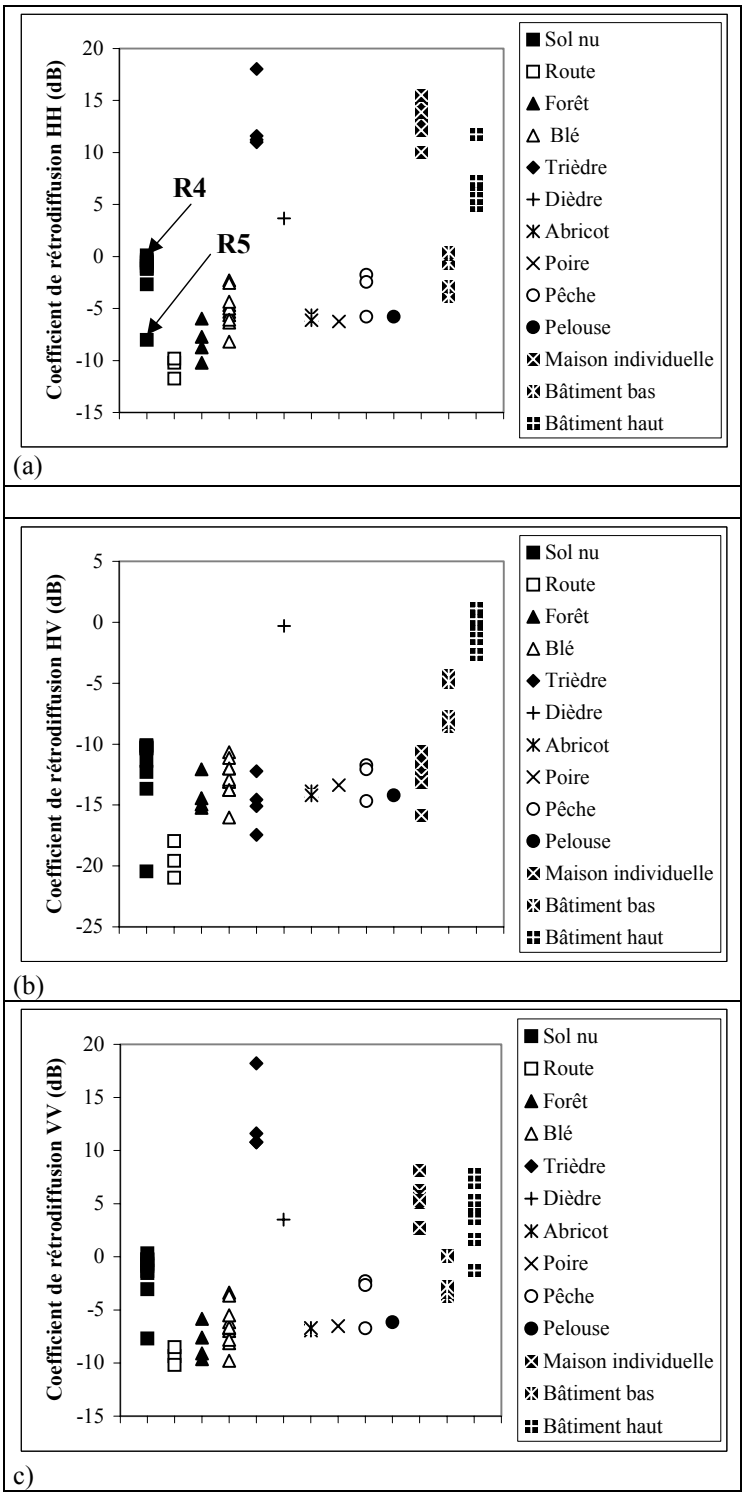


Figure 15 : Comportement des coefficients de rétrodiffusion issus des données RAMSES polarimétriques en bande X en fonction des différentes classes. Chaque point représente la valeur moyenne pour chaque site d'entraînement.

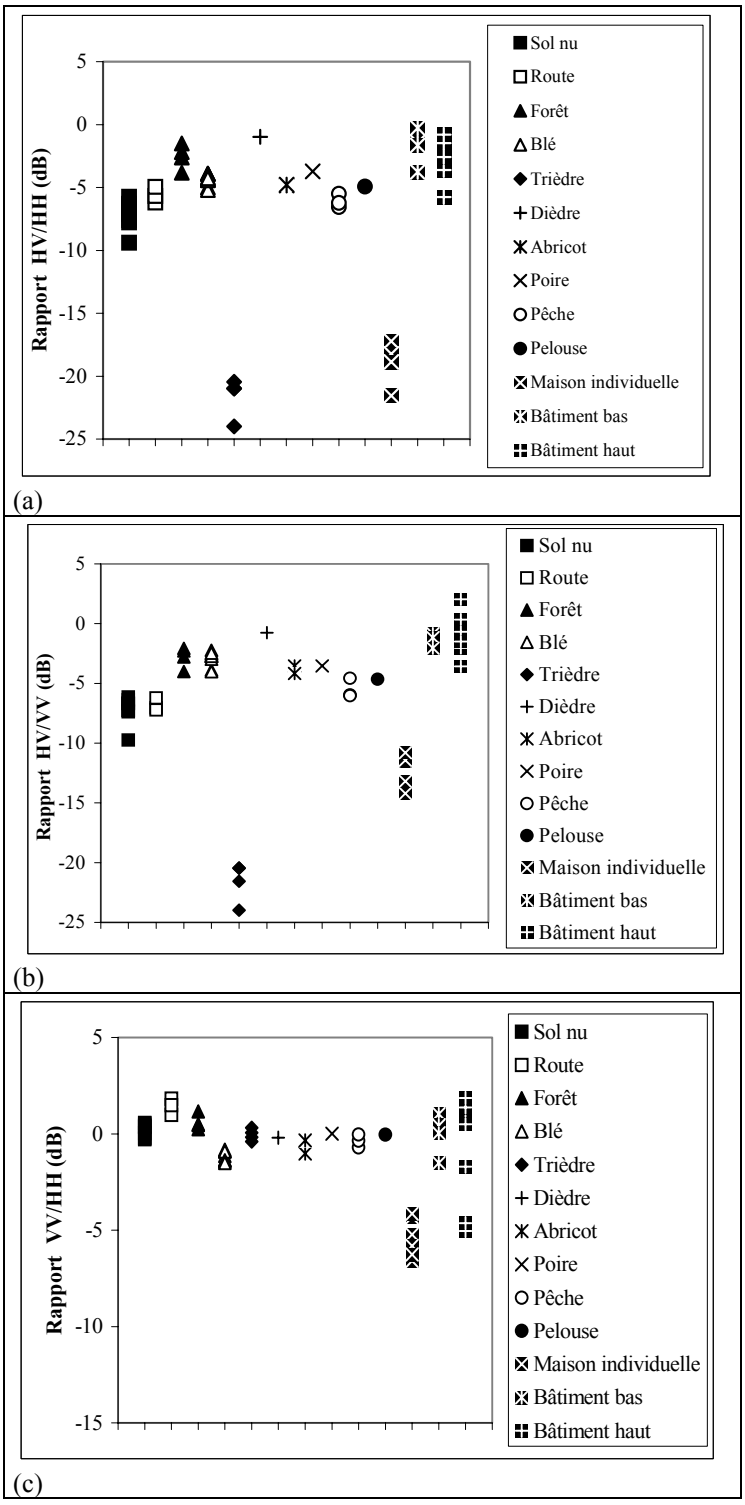


Figure 16 : Comportement des rapports de polarisation issus des données RAMSES polarimétriques en bande X en fonction des différentes classes. Chaque point représente la valeur moyenne pour chaque site d'entraînement.

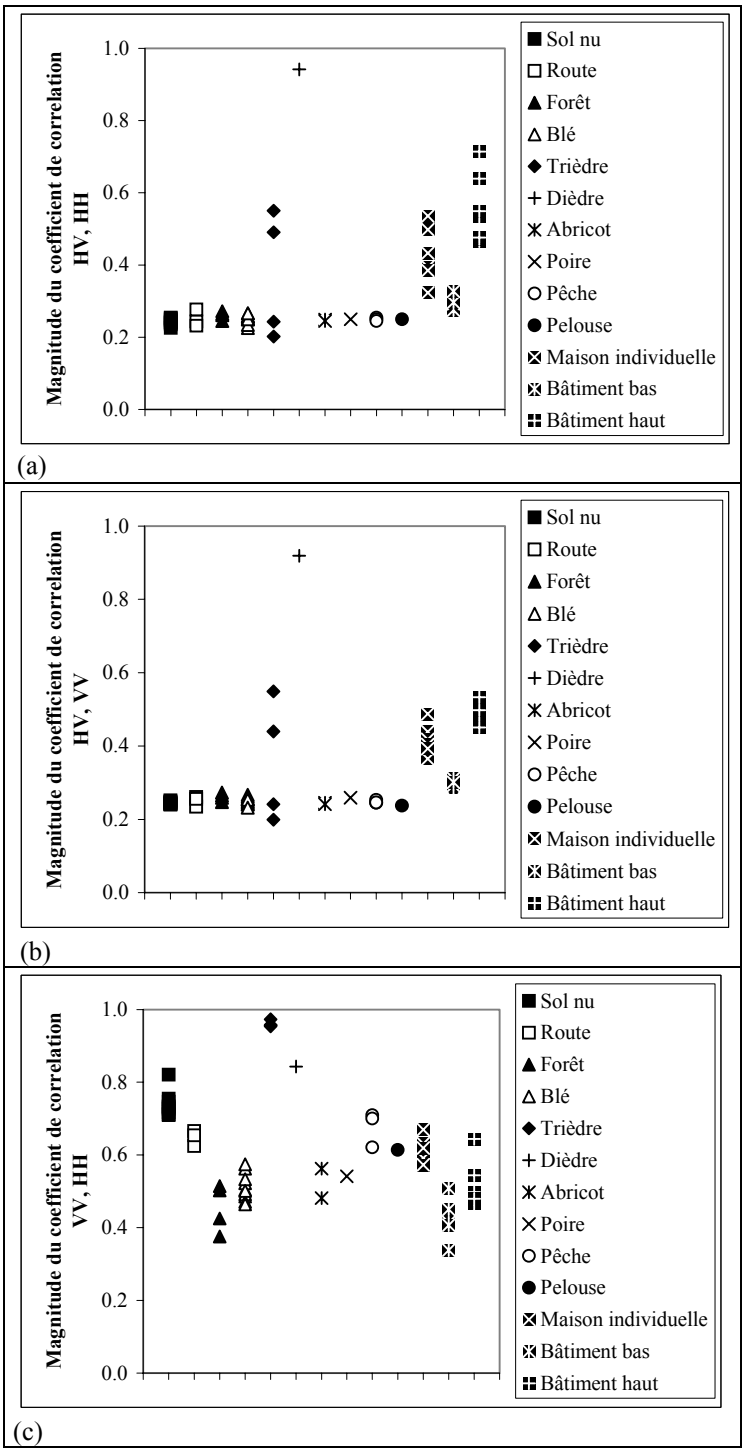


Figure 17 : Comportement des magnitudes des coefficients de corrélation issus des données RAMSES polarimétriques en bande X en fonction des différentes classes. Chaque point représente la valeur moyenne pour chaque site d'entraînement.

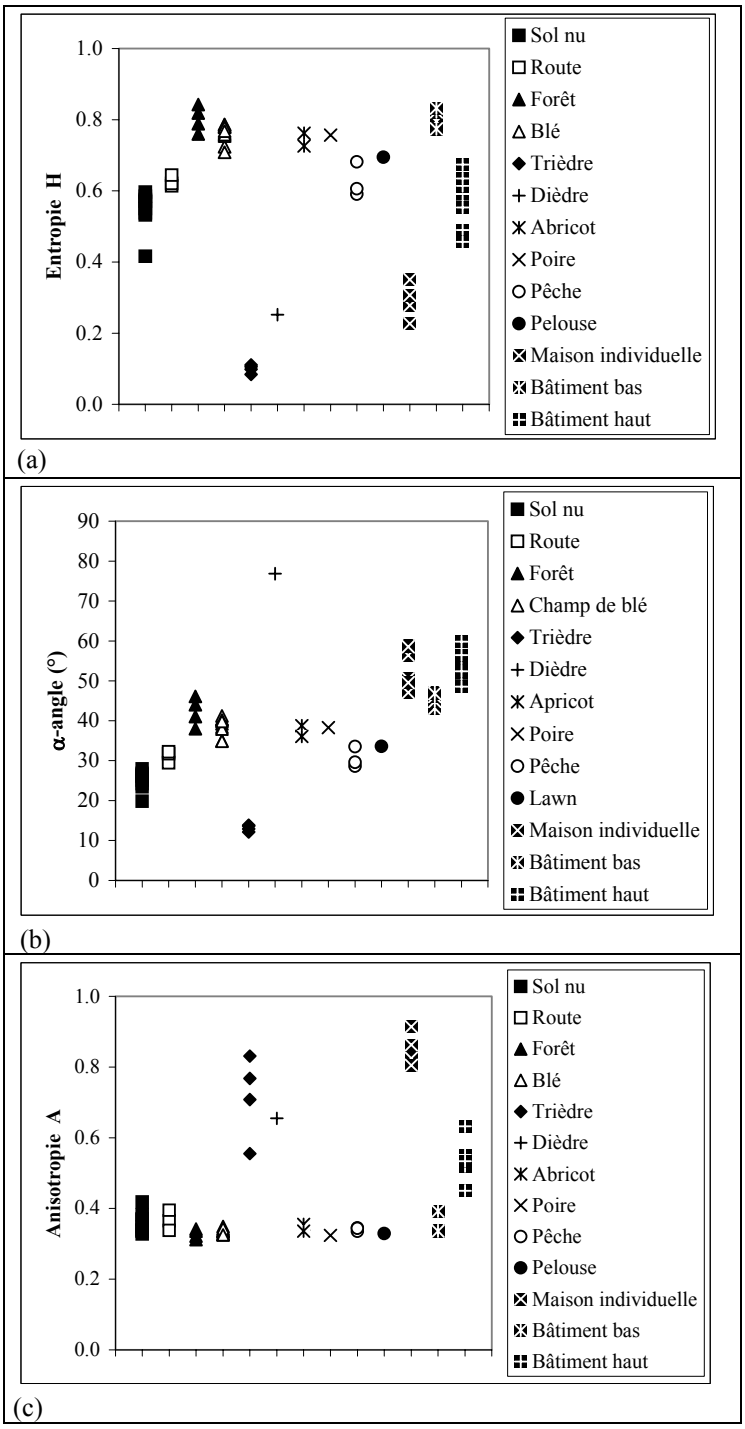


Figure 18 : Comportement de l'entropie (H), de l'angle $\overline{\alpha}$ et de l'anisotropie (A) calculés à partir des données RAMSES polarimétriques en bande X en fonction des différentes classes. Chaque point représente la valeur moyenne pour chaque site d'entraînement.

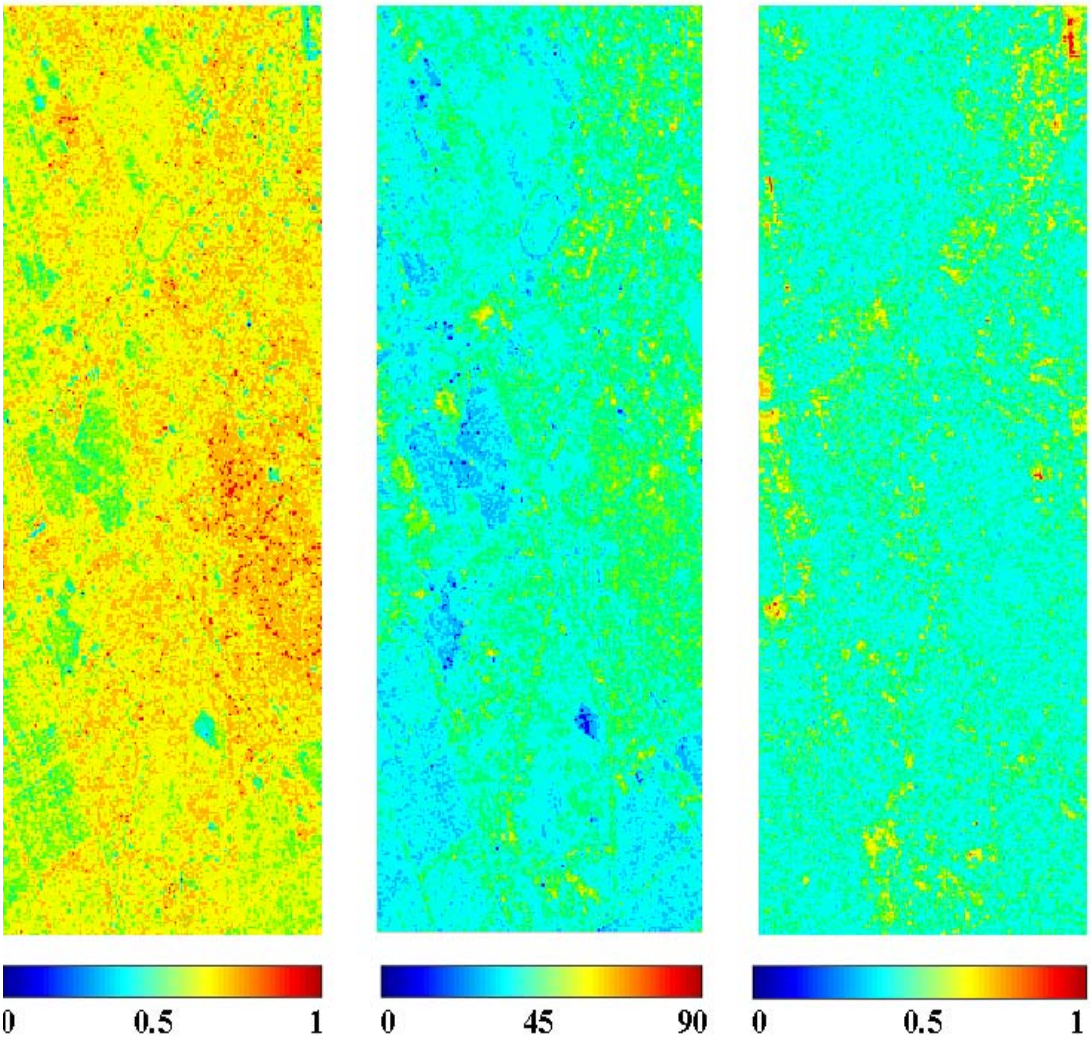


Figure 19 : Images d'entropie, d'angle $\overline{\alpha}$ et d'anisotropie calculées à partir de données RAMSES en bande X.

2.5.3 Classification des données polarimétriques

Ce paragraphe est consacré à la classification polarimétrique des données RAMSES qui consiste en une segmentation déterministe des données polarimétriques selon les paramètres H, $\overline{\alpha}$ et A présentés dans le paragraphe 2.4.2. Le but de cette classification est d'évaluer le potentiel de ces paramètres polarimétrique à discriminer les différentes classes d'occupation du sol présentes sur notre site d'étude. La classification des données est un processus visant à partager un ensemble d'éléments en plusieurs groupes. La segmentation est effectuée de façon à ce que les classes résultantes soient composées d'éléments présentant des

propriétés communes qui mènent à une interprétation de leur nature. Nous allons détailler deux types de classification :

A- La classification Entropie/angle $\overline{\alpha}$

La classification H/$\overline{\alpha}$ repose sur l'hypothèse qu'il existe toujours un mécanisme moyen de rétrodiffusion présent dans chaque cellule de résolution à analyser. Pour celà, l'utilisation des théorèmes de décomposition semble tout à fait justifiée pour pouvoir fournir cette information moyenne, et permettre une interprétation basée sur des contraintes physiques de recevabilité de l'information. La figure 20 montre que toutes nos classes sont concentrées à faible et moyenne entropies (H entre 0.1 et 0.85). Cependant, les zones agricoles (champs de blé, vergers, et sols nus) sont toutes concentrées dans la zone 5 qui représente une entropie moyenne et une réflexion de surface à cause de la courte longueur d'onde de la bande X.

En utilisant la classification (H/$\overline{\alpha}$), on peut séparer cinq zones principales qui correspondent à des comportements de diffusion différents :

1- Zone 6

Dièdres et maisons individuelles : Cette zone correspond à une faible entropie (entre 0.2 et 0.35) et à des fortes valeurs de $\overline{\alpha}$ (entre 50° et 78°).

2- Zone 8

Trièdres : Cette zone correspond à une faible entropie (entre 0.08 et 0.12) et à des faibles valeurs de $\overline{\alpha}$ (entre 10° et 15°).

3- Zone 3

Bâtiments hauts : Cette zone correspond à des entropies moyennes avec des diffusions multiples et des fortes valeurs de $\overline{\alpha}$ (entre 50° et 60°). L'entropie varie entre 0.5 et 0.7.

4- Zone 4

Bâtiments bas et forêt : Cette zone est caractérisée par une entropie moyenne (entre 0.55 et 0.85) et une réflexion de volume avec des valeurs de $\overline{\alpha}$ entre 40° et 47°. Il est très difficile de distinguer entre ces deux classes dans le plan H/$\overline{\alpha}$.

5- Zone 5

Champs de blé, vergers, pelouse, sols nus et routes : Cette zone est caractérisée par une entropie moyenne (entre 0.54 et 0.8) et faibles valeurs de $\overline{\alpha}$ (entre 22° et 40°). Pour les parcelles de blé, pelouse et arbres fruitiers, la réflexion de surface est le mécanisme de diffusion dominant. Il existe également un second mécanisme de diffusion, la réflexion de volume, qui résulte par exemple de l'interaction avec la végétation, mais il est moins important que la réflexion de surface. L'entropie moyenne des parcelles de blé est probablement due à la faible pénétration du signal radar à travers la végétation.

Dans les zones 1 et 2, nous avons trouvé essentiellement des zones agricoles et des zones forestières.

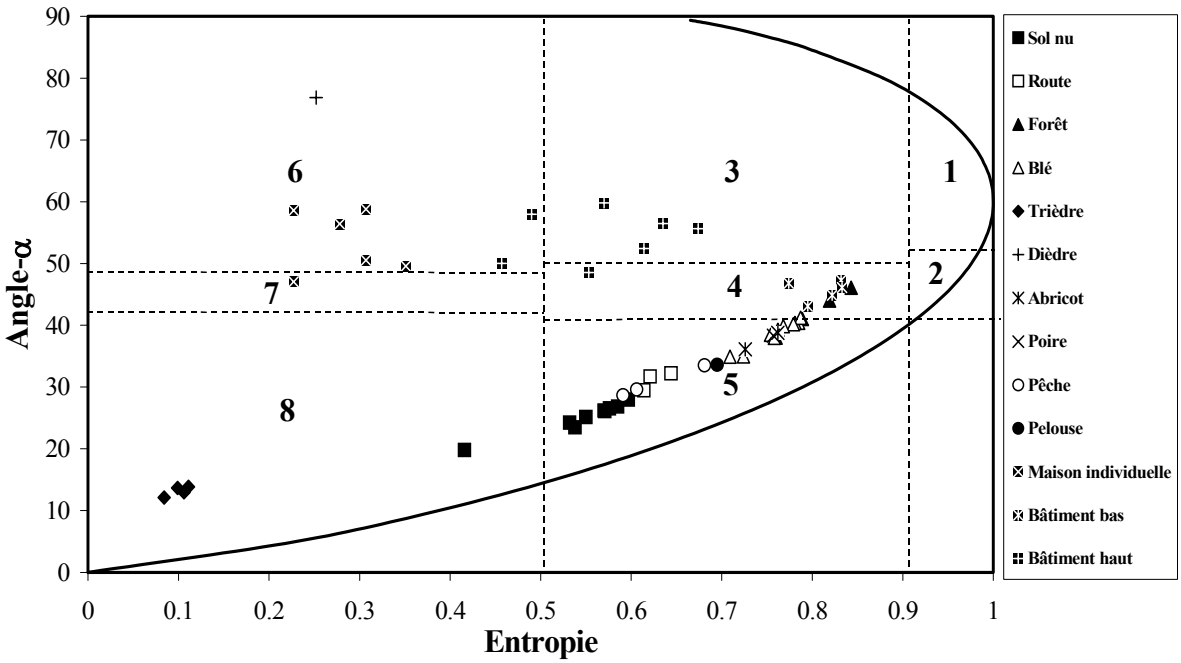


Figure 20 : Le plan (H/$\overline{\alpha}$) et la distribution des différentes classes présentes sur notre site d'étude.

B- La classification H/A

L'observation simultanée de H et A permet de caractériser totalement le spectre des pseudo probabilités. D'après Ferro–Famil et Pottier (2001), l'introduction de l'anisotropie augmente la discrimination entre les différentes classes observées.

Dans notre étude, l'anisotropie n'est pas du tout un paramètre de discrimination entre les différentes classes à cause de la courte longueur d'onde de la bande X. Les résultats obtenus montrent que l'anisotropie est la même pour les routes, les sols nus, les arbres fruitiers, les forêts, les champs de blé, les pelouses et les bâtiments bas ($0.3 < A < 0.4$). Pour les autres classes (trièdres, dièdres, maisons individuelles et bâtiments hauts), l'anisotropie est supérieur à 0.5 (fig. 21).

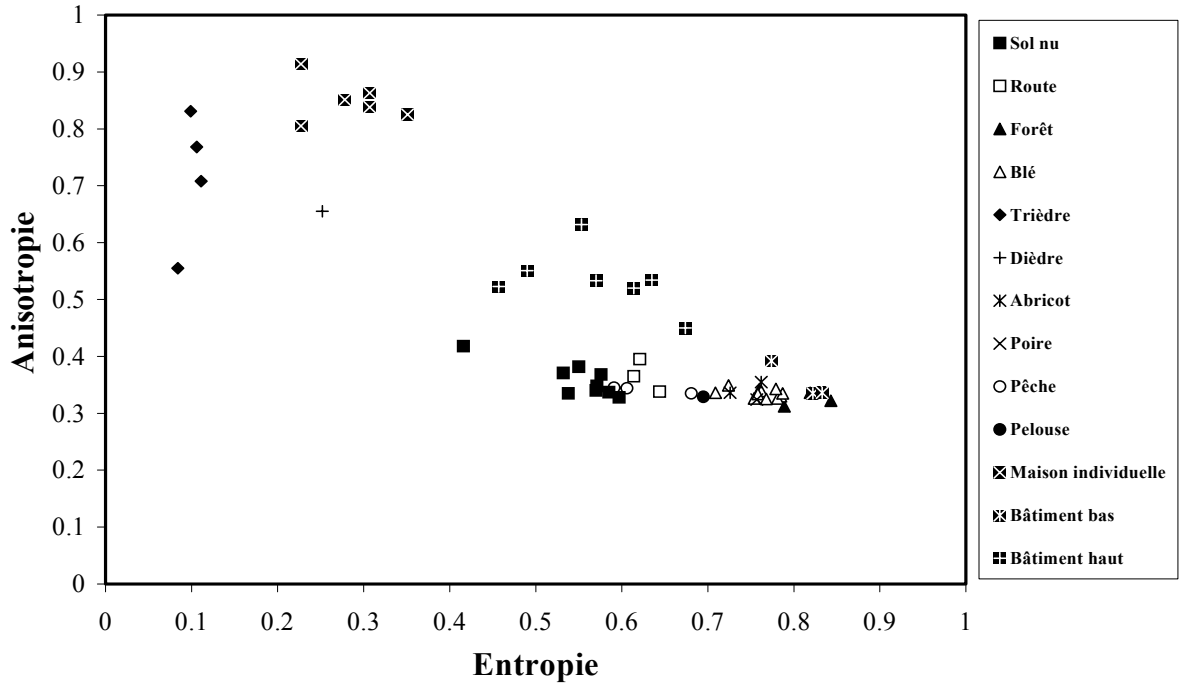


Figure 21 : Le plan H/A des différentes classes présentes sur notre site d'étude.

2.5.4 Schéma de classification : arbre de décision

Le comportement du signal radar qui a été détaillé en paragraphe 2.5.2 montre certaines difficultés pour cartographier les différentes classes en bande X. Par exemple, les zones agricoles et les zones forestières sont difficiles à séparer en utilisant les polarisations HH, HV, et VV. De même, en utilisant les rapports des polarisations, la plupart des classes sont difficiles à discriminer sauf pour les dièdres et les maisons individuelles (cf. fig. 15 et 16).

Basé sur différents sites d'entraînement, un modèle d'arbre de décision peut être utilisé pour classifier les différentes classes en combinant les différents paramètres du signal radar polarimétrique (Shi et al., 1994 ; Hess et al., 1995 ; Baghdadi et al.,

2001). Les coefficients de rétrodiffusion, les rapports de polarisation HV/HH, HV/VV, et VV/HH, les coefficients de corrélation, l'entropie, l'anisotropie et l'angle $\overline{\alpha}$ sont les variables d'entrées dans le modèle d'arbre de décision. Pour réduire l'ambiguïté entre les différentes classes lors du processus de classification, voici un exemple des paramètres que l'on peut utiliser en les appliquant dans l'ordre :

- Trièdres : peuvent être séparés en utilisant la polarisation VV (forte valeur), les rapports HV/VV (faible valeur), le coefficient de corrélation entre VV et HH (forte valeur), l'entropie (faible valeur), ou l'angle $\overline{\alpha}$ (très faible valeur).

- Le dièdre : peut être séparé en utilisant les coefficients de corrélation entre HV et HH, et entre HV et VV (forte valeur), ou l'angle $\overline{\alpha}$ (forte valeur).

- Maisons individuelles : peuvent être séparées grâce aux rapports HV/HH et HV/VV (faible valeur), à l'entropie (faible valeur), ou à l'anisotropie (forte valeur).

- Bâtiments hauts : peuvent être discriminés facilement en utilisant les polarisations HH (valeur moyenne), HV (forte valeur), ou l'anisotropie (valeur moyenne).

- Bâtiments bas : seule la polarisation HV permet de les identifier.

- Sols nus : on peut les classifier grâce à l'entropie (valeur moyenne), à l'angle $\overline{\alpha}$ (entre 20° et 30°), ou au coefficient de corrélation entre VV et HH (forte valeur).

- Routes : seule la polarisation HV (faible valeur) peut les séparer.

- Forêts : nous pouvons les discriminer en utilisant le plan H/$\overline{\alpha}$ (zone 4), ou le rapport HV/HH.

- Arbres fruitiers, champs de blé et pelouses : ils sont difficiles à discriminer car la confusion entre les classes est très grande.

La figure 22 représente un exemple d'arbre de décision.

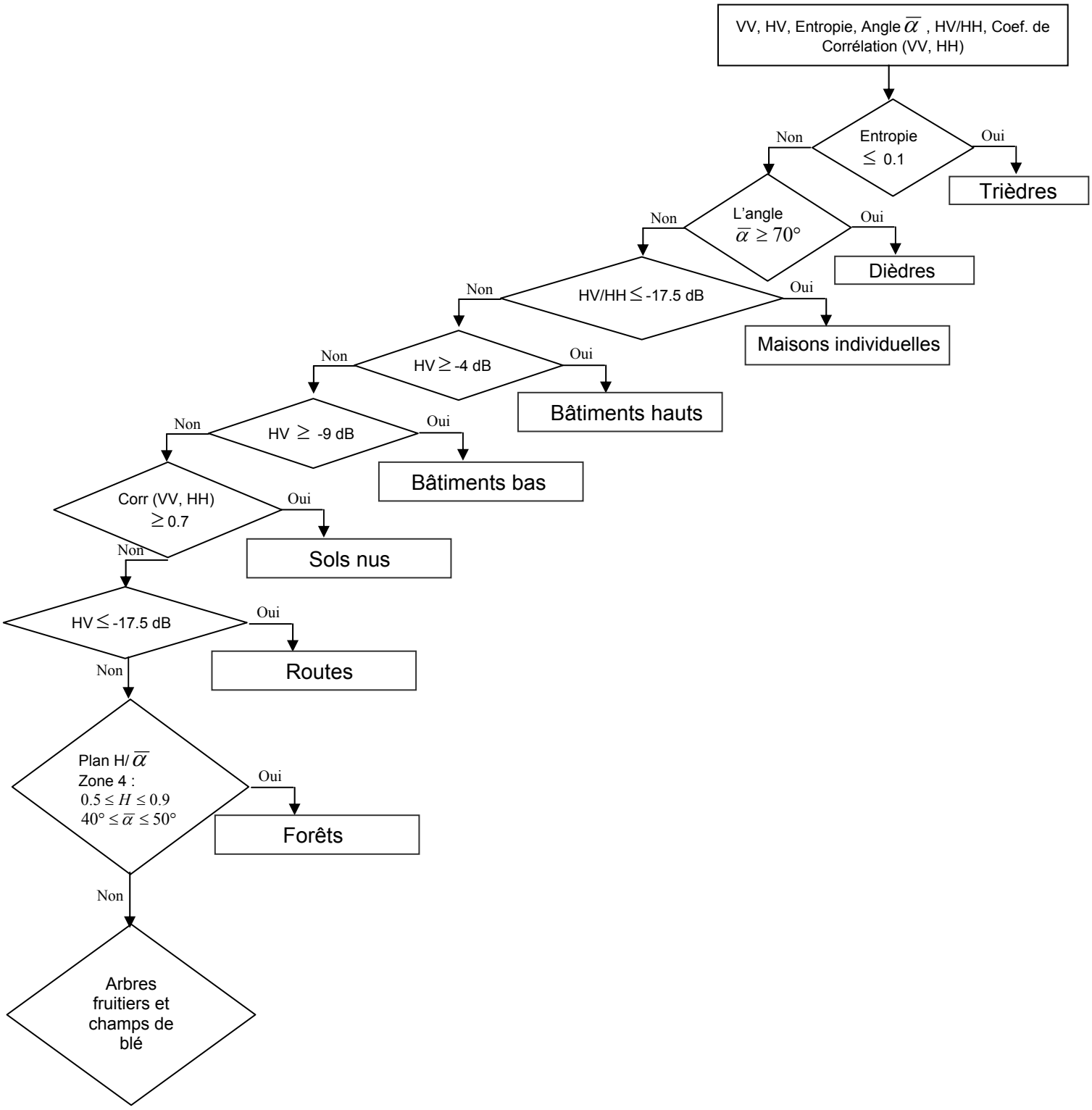


Figure 22 : Un exemple d'arbre de décision.

2.5.5 Comportement du signal radar en fonction de la rugosité de surface

Le potentiel de la bande X pour la caractérisation de la rugosité de surface des sols nus a été analysé. Cinq parcelles témoin (R1, R2, R3, R4, et R5) ont été

documentées en terme de rugosité et d'humidité de surface. Pour chaque parcelle, nous avons calculé le coefficient de rétrodiffusion moyen. L'écart type des hauteurs (rms) utilisé pour caractériser la rugosité de surface a été calculé à partir de la fonction de corrélation moyenne établie grâce aux profils mesurés dans les directions parallèle et perpendiculaire aux rangs.

Le coefficient de rétrodiffusion a été représenté en fonction du rms pour chacune des polarisations radar sans distinction d'humidité (fig. 23). Le coefficient de rétrodiffusion diminue d'environ 8 dB en polarisations HH et VV, et d'environ 10 dB en polarisation HV entre les deux parcelles R4 et R5 (rms de 0.85 et 0.80 cm, respectivement). Cette diminution du coefficient de rétrodiffusion peut être due à l'augmentation de l'angle d'incidence et de la longueur de corrélation, et à la diminution de l'humidité (tab. 3). Cette diminution peut être également due au passage de la fonction d'autocorrélation de la forme exponentielle pour la parcelle R4 (récemment labourée) à la forme gaussienne pour la parcelle R5 (labourée plusieurs mois avant) à cause de la pluie.

Parcelle	rms (cm)	Humidité (%)	Angle d'incidence (°)	Longueur de corrélation (cm)	HH (dB)	HV (dB)	VV (dB)
R1	2.40	15.7	26.1	5.51	-1.20	-10.3	-0.84
R2	1.64	20	26.3	4.43	-0.65	-10.3	-0.31
R3	1.28	21	26.5	3.34	-0.34	-10.1	-0.21
R4	0.85	22.2	26.6	3.04	0.11	-10.2	0.33
R5	0.80	8.6	31.7	6.42	-8.01	-20.5	-7.70

Tableau 3 : Caractéristiques des cinq parcelles témoins de sol nu (coefficients de rétrodiffusion et mesures terrain).

- Effet de l'angle d'incidence

La relation entre le signal radar et l'angle d'incidence est donnée approximativement par la fonction $f(\theta) = \cos^{\alpha}\theta$ (Ulaby et al., 1982 ; Shi et al., 1994 ; Baghdadi et al., 2001). L'angle d'incidence sur notre image RAMSES varie entre 13° et 36°. Dans le but de diminuer l'effet de l'angle d'incidence sur le signal radar, nous avons normalisé le coefficient de rétrodiffusion en utilisant la fonction $f(\theta)$ qui représente la dépendance angulaire moyenne. Le coefficient de rétrodiffusion normalisé $\sigma_n^{\,0}$ est défini par l'équation suivante :

$$\sigma_n^{\,0} = \frac{\sigma^0(\theta_i)}{f(\theta_i)} \qquad (17)$$

$\sigma^0(\theta_i)$ est le coefficient de rétrodiffusion pour un angle d'incidence θ_i.

Le paramètre α dépend du mécanisme de rétrodiffusion dominant et des paramètres du capteur (Shi et al.,1994). En général, Pour une fréquence radar donnée, le paramètre α est calculé pour chaque type de surface et chaque polarisation. Ensuite, le paramètre α moyen est calculé pour chaque polarisation en calculant la moyenne des α obtenus pour toutes les classes. Cependant, pour notre image, seuls les champs de blé sont présents à des angles d'incidence différents. De ce fait, pour diminuer la dépendance angulaire du signal radar, le paramètre α a été calculé à partir des champs de blé. La fonction $f(\theta)$ obtenue pour les différentes polarisations est donnée en tableau 4.

HH	HV	VV
$\cos^{7.37}\theta$	$\cos^{6.47}\theta$	$\cos^{11.34}\theta$

Tableau 4 : Dépendance angulaire du signal radar pour les différents polarisations.

Toutes nos classes témoins correspondent à des angles d'incidence entre 26° et 32°. Cette variation dans l'angle d'incidence peut causer des variations dans le signal rétrodiffusé d'environ 1.9 dB en polarisation HH, 1.6 dB en polarisation HV, et 2.9 dB en polarisation VV. La différence d'incidence entre les parcelles R4 et R5 peut causer une diminution du signal radar d'environ 1.6 dB en polarisation HH, 1.4 dB en polarisation HV, et 2.4 dB en polarisation VV. Ceci suppose que le comportement angulaire du signal radar est le même pour les sols nus et les champs de blé, ce qui reste à vérifier.

- Effet de l'humidité du sol et de la longueur de corrélation

Comme mentionné dans la littérature, une augmentation de l'humidité de surface de 5% produit en moyenne une augmentation du coefficient de rétrodiffusion d'environ 1 dB pour des configurations radar en bande C, polarisation HH ou VV, et à des angles d'incidence inférieurs à 20° (Ulaby et al., 1978 ; Beaudoin et al., 1990 ; Le Toan et al., 1994 ; Boisvert et al., 1995). Ainsi, la diminution du coefficient de rétrodiffusion

causée seulement par la diminution de l'humidité entre les deux parcelles de sols nus R4 et R5 (environ 14%) est d'environ 3 dB.

La parcelle R5 a été travaillée plusieurs mois avant la parcelle R4 et a donc reçue une quantité de pluie beaucoup plus importante. En effet, la nature limoneuse du sol induit une forte capacité à l'évolution de l'état structural de surface. Sous l'effet de la pluie, cette caractéristique a pour conséquence une évolution rapide des états de surface mais également la formation d'une croûte de battance (Boiffin et al., 1988 ; Le Bissonnais et Singer, 1992). Cette croûte de battance observée sur la parcelle R5 conduit à une augmentation de la longueur de corrélation (L) de la parcelle R5 qui est plus élevée que pour la parcelle R4 (cf. tab. 3). L'augmentation de la longueur de corrélation peut causer une diminution dans le signal radar d'environ 3.5 dB en polarisation HH, 5.9 dB en polarisation HV et 2.6 dB en polarisation VV ($\sigma^0(R4) - \sigma^0(R5) -$ effet de l'incidence – effet de l'humidité). Il est donc possible d'observer la dégradation du sol causée par la présence d'une croûte de battance et de distinguer les parcelles fraîchement labouré (R1 à R4 en comparaison avec la parcelle R5).

- Influence du rms sur le signal radar

Les résultats obtenus montrent que le coefficient de rétrodiffusion est presque constant quand l'écart type des hauteurs (rms) augmente de 0.85 à 2.4 (R1 à R4) (fig. 23). Avec le rapport de polarisation, on observe une très faible augmentation du signal radar avec la rugosité. La magnitude du coefficient de corrélation est indépendante du rms. La discrimination entre les classes de rugosité des sols nus (R1 à R5) est difficile en utilisant les plans H/$\overline{\alpha}$ et H/A (figures 20, 21 et 24). La figure 24 montre que l'entropie et l'angle $\overline{\alpha}$ augmentent très légèrement avec l'écart type des hauteur (rms). Par contre, l'anisotropie diminue très légèrement avec rms. En conclusion, les paramètres polarimétriques ne permettent pas non plus de discriminer entre les différentes valeurs des rugosités.

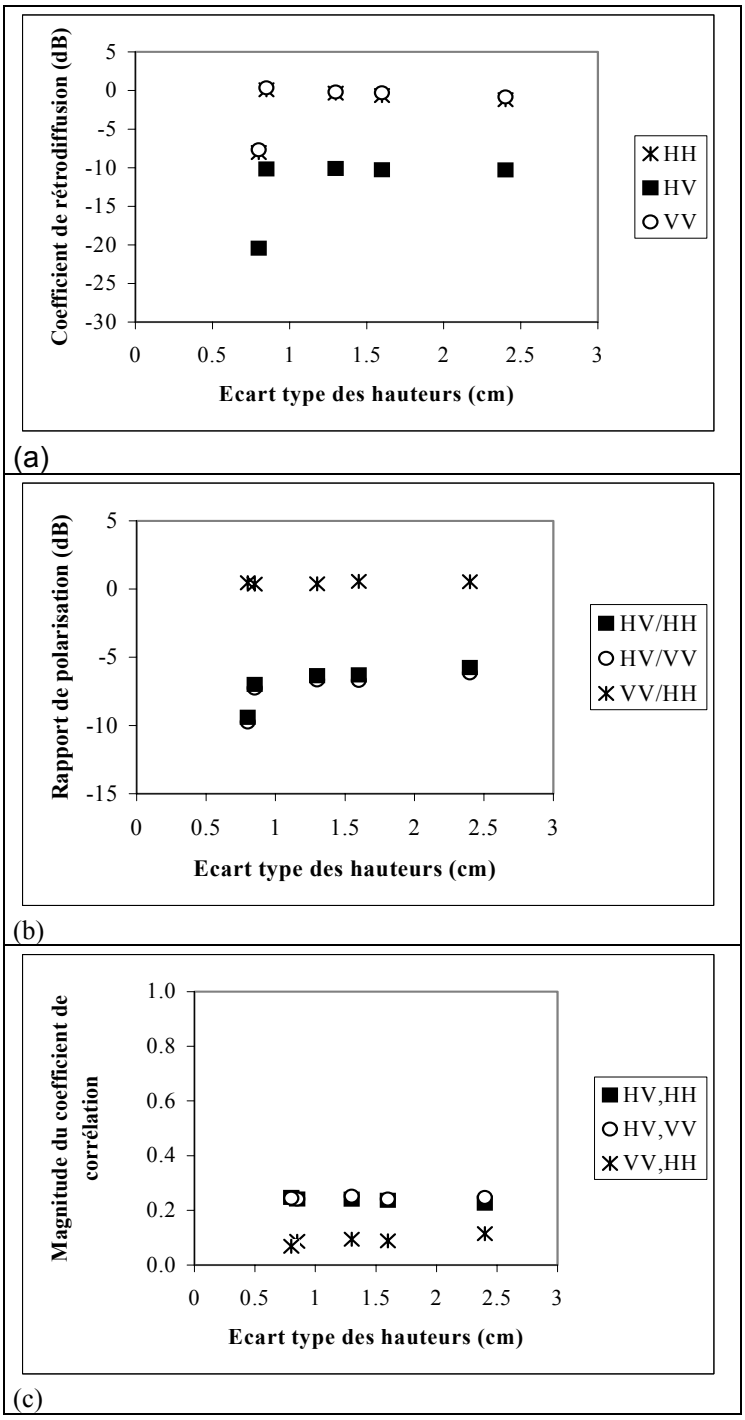


Figure 23 : Variations des coefficients de rétrodiffusion, des rapports de polarisation, des coefficients de corrélation en fonction de la rugosité du surface.

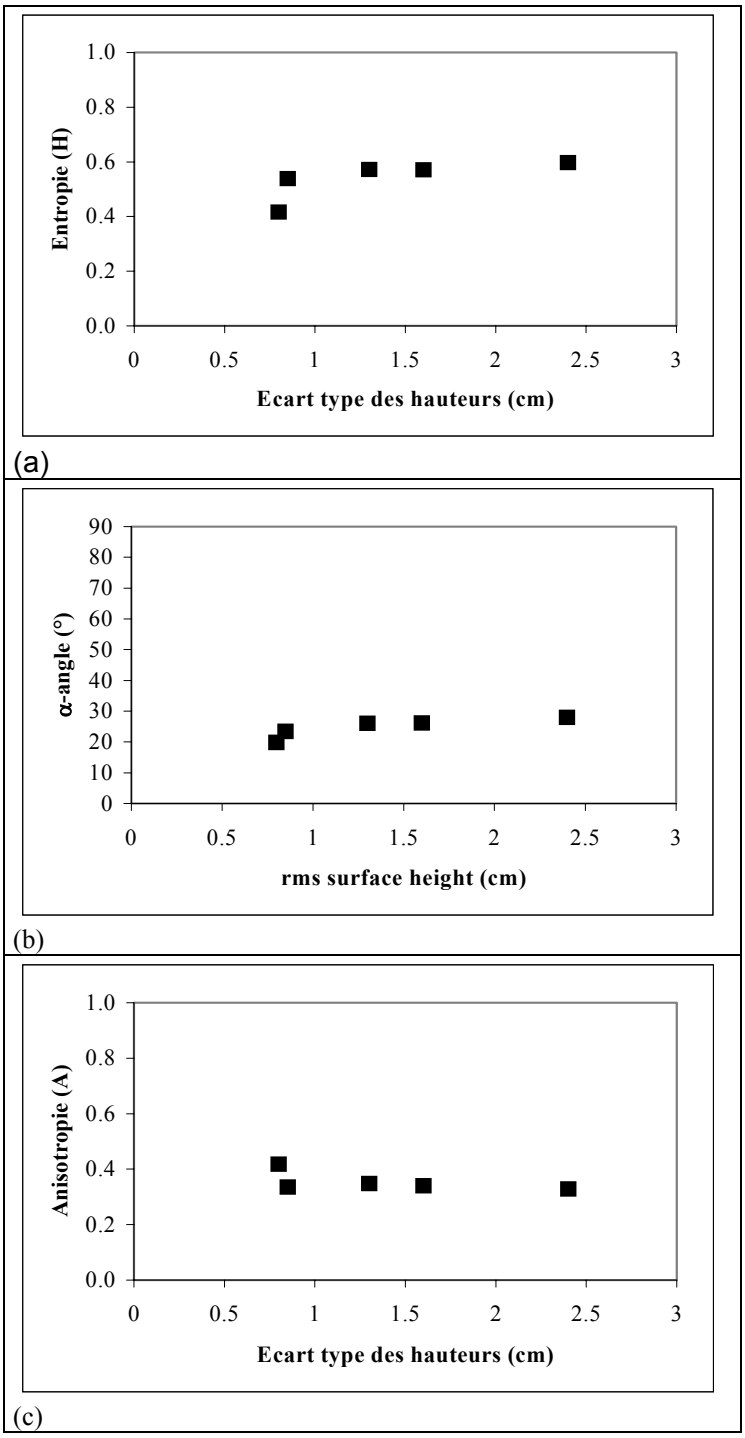


Figure 24 : Variations des trois paramètres polarimétriques en fonction de la rugosité du surface.

2.6 Conclusion

Le potentiel des données radar polarimétriques en bande X a été étudié en conditions expérimentales. Les coefficients de rétrodiffusion acquis à différentes polarisations, les rapports de polarisation, les coefficients de corrélation et les trois paramètres polarimétriques principaux (l'entropie, l'anisotropie et l'angle $\overline{\alpha}$) ont été testés. La sensibilité du signal radar à la rugosité de surface a été évaluée sur des parcelles agricoles nues. Nous avons observé une faible corrélation entre le signal radar et la rugosité de surface des sols nus. Le coefficient de rétrodiffusion est presque le même quand l'écart type des hauteurs (rms) augmente de 0.85 à 2.4 cm. C'est également le cas des autres paramètres et indices utilisés. En effet, le signal radar sature rapidement avec la rugosité de surface quand la longueur d'onde est faible. Toutefois, il est possible d'identifier la dégradation de sol causée par la présence d'une croûte de battance et distinguer ainsi les parcelles qui ont été fraîchement labourées.

Dans une perspective de la cartographie de l'occupation du sol, la bande X montre des résultats peu convaincants pour la discrimination entre les classes présentes sur notre site d'étude : sols nus, champs de blé, arbres fruitiers, forêt, bâtiments, et routes. Certaines classes comme les champs de blé et les arbres fruitiers sont difficiles à séparer. L'entropie et l'angle $\overline{\alpha}$ montrent que nos classes d'occupation du sol sont regroupées en cinq zones qui correspondent à des caractéristiques de rétrodiffusion spécifiques. L'introduction de l'anisotropie ne permet pas d'améliorer la séparation entre les différentes classes. Les résultats de cette étude montrent que les trois paramètres polarimétriques (H, $\overline{\alpha}$ et A) n'améliorent pas le potentiel de séparation entre les classes obtenues par les paramètres standards tels que les coefficients de rétrodiffusion, les rapports de polarisation et les coefficients de corrélation.

Sachant que la cartographie de la rugosité de surface est meilleure à forte incidence radar (Ulaby et al., 1986 ; Fung and Chen, 1992 ; Baghdadi et al., 2002a et 2003), il serait nécessaire dans le futur d'analyser des images acquises à forte incidence radar pour conclure objectivement sur le potentiel de la bande X à cartographier la rugosité de surface.

Un article a été publié sur cette thématique :

Baghdadi N., Holah N., Dubois-Fernandez P., Prévot L., Hosford S., Chanzy A., Dupuis X. and Zribi M., 2004. Discrimination potential of X-band polarimetric SAR data. International Journal of Remote Sensing, vol. 25, no. 22, pp. 4933-4943.

Chapitre 3 : Apport du capteur ASAR d'ENVISAT en bande C pour la caractérisation des états de surface

3.1 Objectifs

La première génération des capteurs radar possèdait une seule polarisation (exemple, ERS-1/2 avec la polarisation VV et RADARSAT-1 avec la polarisation HH). Depuis mars 2002, le radar ASAR d'ENVISAT fournit des images avec deux polarisations simultanément (HH et HV ; HH et VV ; ou VV et VH) et permet des configurations d'acquisition multiples avec une large gamme d'angles d'incidence (15° à 45°) et de résolutions spatiales (30, 150 et 1000 m) (Torres et al., 1999). Dans ce chapitre, nous allons analyser l'aspect multi–polarisation d'ASAR. Il s'agit d'étudier l'influence des différents paramètres de surface sur le signal radar en s'intéressant, plus particulièrement, à la relation entre le signal radar et la rugosité et l'humidité de sols nus en milieu agricole. Il s'agit de déterminer les configurations radar les plus sensibles à ces deux paramètres. On s'intéresse aux sols nus puisque c'est sur ce type de sol que le ruissellement est en général le plus important.

Les objectifs de ce chapitre se résument en trois points :

1- Analyser le comportement du signal ASAR en fonction de l'humidité et de la rugosité de surface du sol en étudiant l'influence de la polarisation et de l'incidence radar.

2- Déterminer la configuration optimale d'angle d'incidence et de polarisation pour une meilleure estimation de la rugosité et de l'humidité de surface.

3- Etudier l'apport de la combinaison de plusieurs polarisations et d'angles d'incidence pour une meilleure caractérisation des états de surface (humidité et rugosité).

3.2 Le capteur ASAR d'Envisat

Le satellite ENVISAT a été mis sur orbite avec succès dans la nuit du 28 février au 1er mars 2002 par l'Agence Spatiale Européenne (ESA). C'est un satellite d'observation de la terre placé en orbite polaire, appelé à fournir des mesures de

l'atmosphère, de l'océan, de la terre et de la glace au cours des cinq prochaines années au moins. Le satellite ENVISAT est équipé de plusieurs capteurs qui ont tous des fonctions différentes. Le spectromètre MERIS avec une résolution spatiale de 300 m (Medium Resolution Imaging Spectrometer) permet entre autres d'observer la couleur des océans, de fournir les caractéristiques biophysiques et la composition chimique des eaux côtières pour l'évaluation des concentrations en phytoplancton, de détecter les pollutions marines, de mesurer certains paramètres des surfaces continentales relatifs à l'état du couvert végétal (cartographie de la végétation, gestion des forêts). Le capteur GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars) a pour fonction l'observation de la concentration d'ozone dans l'atmosphère. Quand au capteur AATSR (Advanced Along-Track Scanning Radiometer), il est utilisé pour la mesure de la température des surfaces océaniques (études sur le réchauffement climatique). L'altimètre radar RA-2 (Radar Altimeter) mesure les altitudes avec une précision de 4.5 m. Le RA-2 fournit des mesures hebdomadaires à l'échelle du globe du niveau des océans, mais aussi des mesures instantanées de la hauteur des vagues et de la vitesse du vent.

Ce satellite est également équipé d'un imageur radar appelé ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) pour observer la surface terrestre (fig. 25). Son développement a été fait dans la continuité des satellites ERS1 et ERS2. Le capteur ASAR d'ENVISAT est un système "avancé" car il est équipé d'un nouveau système d'antenne (constituée de 20 plaques, chacun peut être configuré et orienté indépendamment) qui offre des acquisitions dans différents modes. Cette antenne permet de sélectionner différentes fauchées, d'une largeur de 100 à 400 km. Le radar ASAR fonctionne en bande C avec une fréquence de 5.331 GHz et une longueur d'onde de 5.66 cm. Il fournit des images avec des angles d'incidence allant de 15° à 45°, et deux polarisations simultanément (HH et HV ; HH et VV ; ou VV et VH). Il y a cinq modes d'acquisition (fig. 26). Le mode des images ASAR utilisé dans cette étude est « Alternating polarisation mode » (APM).

1- Image mode (IM) :

Ce mode fournit des images avec une résolution spatiale de 30 m, et de polarisation HH ou VV. Il contient sept fauchées et une gamme d'angles d'incidence entre 15° et 45° (tab. 5). La largueur de la fauchée est entre 56 km et 100 km.

Fauchée	Largueur de la fauchée (km)	Angle minimum de visée (°)	Angle maximum de visée (°)
IS1	108.4 -109.0	14.1 -14.4	22.2 - 22.3
IS2	107.1 -107.7	18.4 -18.7	26.1 - 26.2
IS3	83.9 - 84.3	25.6 - 25.9	31.1 - 31.3
IS4	90.1 - 90.6	30.6 - 30.9	36.1 - 36.2
IS5	65.7 - 66.0	35.5 - 35.8	39.2 - 39.4
IS6	72.3 - 72.7	38.8 - 39.1	42.6 - 42.8
IS7	57.8 – 58.0	42.2 – 42.6	45.1 - 45.3

Tableau 5 : Les septs fauchées et l'angle d'incidence correspondant pour le Image Mode d'ASAR.

2- Alternating polarisation mode (APM) :

Ce mode est identique au mode précédent (IM) mais il peut fournir simultanément des images avec deux polarisations : HH et VV ou HH et HV ou VV et VH.

3- Wide swath mode (WSM) :

Ce mode fournit des images avec une résolution spatiale de 150 m et en polarisation HH ou VV. La largeur du faisceau est de 405 km.

4- Global monitoring mode (GM) :

Ce mode est identique au mode (WSM) mais avec une résolution spatiale de 1 km.

5- Wave mode (WM) :

Ce mode fournit des images avec une résolution spatiale d'environ 30 m et en polarisation HH ou VV. La largeur du faisceau est de 5 km x 5 km.

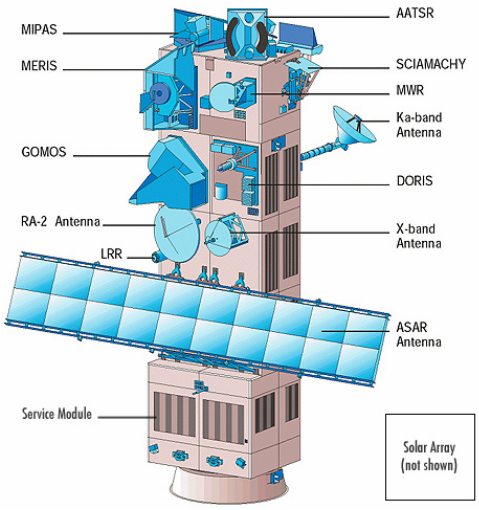


Figure 25 : Le satellite Envisat

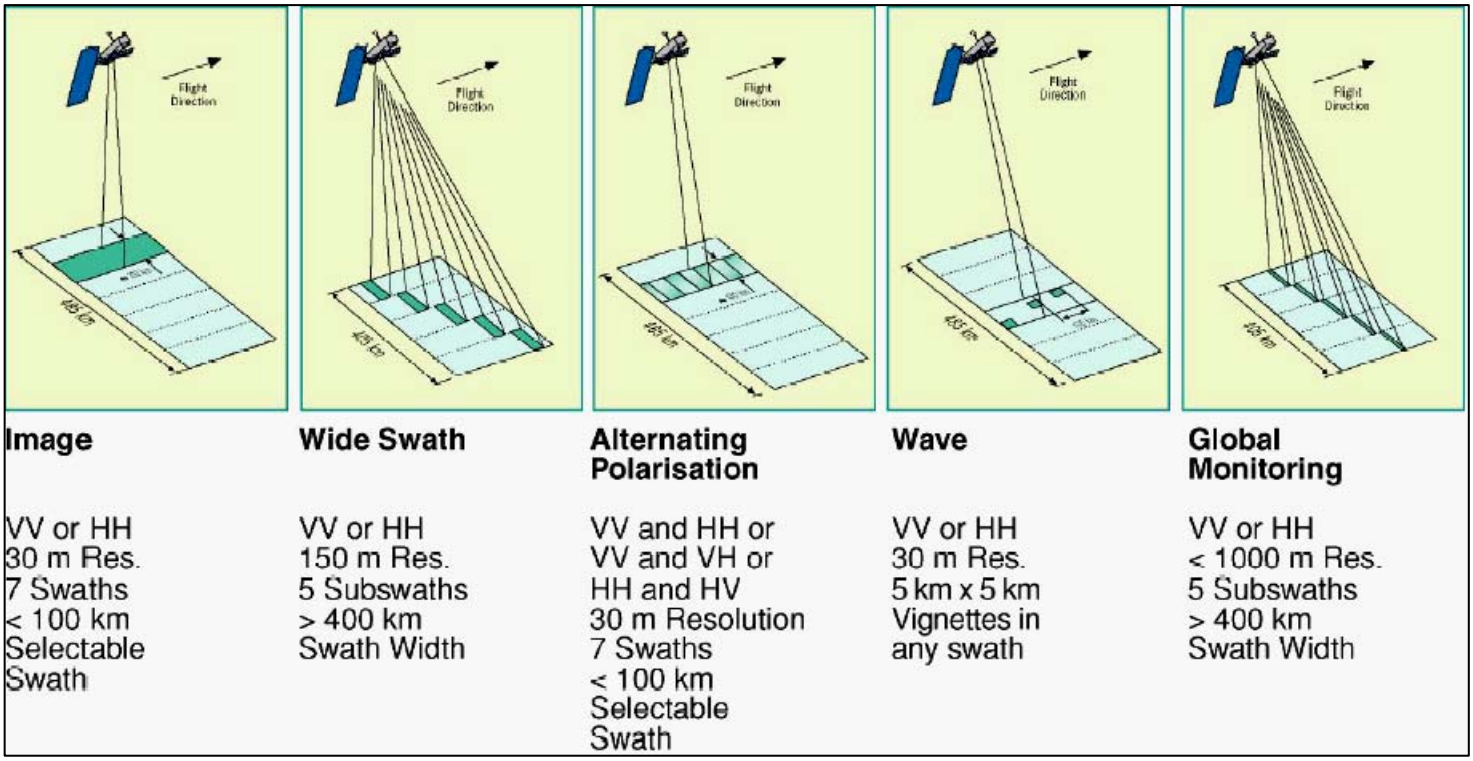


Figure 26 : Mode d'opération d'ASAR (source : http://earth.esa.int/envisat).

3.3 Base de données

3.3.1 Description des sites d'étude

Le premier site d'étude est situé à Villamblain près d'Orléans au centre de la France (latitude 48° 00` N et longitude 01° 34` E), tandis que le deuxième est localisé dans le bassin du Touch près de Toulouse au sud de la France (latitude 43° 27` N et longitude 01° 02` E) (fig. 27).

Le site expérimental de Villamblain appartient à la région agricole de la « petite Beauce ». Il est situé à la limite occidentale du département du Loiret, prés de la commune de Villamblain, entre les villes d'Orléans et Châteaudun. Les sols du secteur sont principalement des sols bruns calciques à calcaires (CPCS,1967). Le site du Touch se trouve dans le département de Haute-Garonne où il fait partie de la région de midi-pyrénées. Le bassin versant du Touch s'étend de la commune de Lilhac en Haute-Garonne en amont à la commune de Blagnac en Haute-Garonne en aval.

En petite Beauce, le calcaire aquitanien est recouvert par une formation superficielle quaternaire limono-argileuse d'épaisseur variable dans laquelle la teneur en argile

est voisine de 30% et la fraction limon est d'environ 60% (Macaire,1971). La fraction argile est essentiellement constituée de minéraux de type smectite et secondairement de type kaolinite et illite. Quant à la fraction limon, elle est essentiellement constituée de quartz et secondairement de feldspaths (Ould Mohamed, 1995). Le paysage présente une morphologie très légèrement ondulée. L'altitude dans le secteur d'étude varie entre 118 et 137 m, avec des pentes dépassant très rarement 2%. Le site d'étude est caractérisé par une activité agricole intensive avec très peu de reliefs.

Le site du Touch est composé de 55% de limon, 21% d'argile et 24% de sable (CRAMP, 1995). Au Nord-Est du bassin versant, on retrouve essentiellement des limons sur alluvions de quaternaire. Sur une bande Nord-Sud au centre du bassin, la formation majoritaire est composée de colluvions argilo-sableuses à argilo-graveleuses. Le paysage présente une morphologie plus ondulée que la région de la petite Beauce. L'altitude dans le secteur d'étude varie entre 135 et 377 m avec une moyenne de 245 m. Le relief dans le site du Touch est plus marqué que la petite Beauce et les pentes peuvent atteindre 30%. Les parcelles de référence utilisées ont été choisies sur des terrains plats ou faiblement ondulés.

Les sites de Villamblain et Touch présentent plusieurs types de travaux agricoles : labours, anciens chantier de récoltes, semis de blé et de maïs.



Figure 27 : Location géographique des deux sites d'étude.

3.3.2 Données ASAR

Seize images ASAR/ENVISAT ont été acquises, dans le cadre du projet PNTS et ESA, sur les deux sites d'étude du 09 février 2003 au 20 avril 2004 en polarisations HH, HV, et VV et avec des angles d'incidence entre 20° et 43°. Le mode d'opération des images ASAR est « Alternating polarisation mode » (APM) avec une résolution spatiale de 30 m. Quatorze images ont été acquises à Villamblain et 2 images seulement ont été acquises sur le bassin du Touch. La résolution spatiale des images ASAR est d'environ 30 m et la taille de pixel est de 12.5 m. Le tableau 6 contient les caractéristiques des images ASAR (date, polarisation et incidence) et SPOT utilisées. De même, on y trouve une synthèse des mesures d'humidité, de la densité apparente et de la rugosité de surface réalisées sur des parcelles de sol nu. Les images SPOT nous ont permis d'identifier facilement les parcelles des sols nus, et de géoréférencer les images radar.

3.3.3 Mesures terrain effectuées

Des mesures d'humidité, de densité apparente et de rugosité ont été effectuées sur une vingtaine de parcelles (labour et semi de blé) qui ont été choisies sur les deux sites d'étude avec différents niveaux de rugosité (fig. 28). Les mesures de densité apparente permettront de calculer la teneur en eau volumique du sol (équation 20). Les mesures terrain ont été faites simultanément aux acquisitions radar. La période d'acquisition des données était particulièrement importante pour cette étude. Elle a été logiquement choisie en hiver et en automne, à l'époque de l'année où le ruissellement excessif se manifeste le plus intensément. En effet, cette époque de l'année se situe pendant les labours de l'hiver, lorsqu'un maximum de superficie est à nu et se trouve donc ainsi exposé aux précipitations abondantes de saison. Les états de surface présents sur les sites d'étude étaient alors des semis de blé, des labours ou d'anciens chantiers de récoltes.

Malgré l'importance de la densité du sol sur le signal radar rétrodiffusé, le comportement du signal en fonction de la densité ne sera pas analysé à cause de la faible variabilité de cette dernière sur nos sites d'étude (de 0.86 à 1.34 sur Villamblain et de 1.05 à 1.66 sur le bassin du Touch).

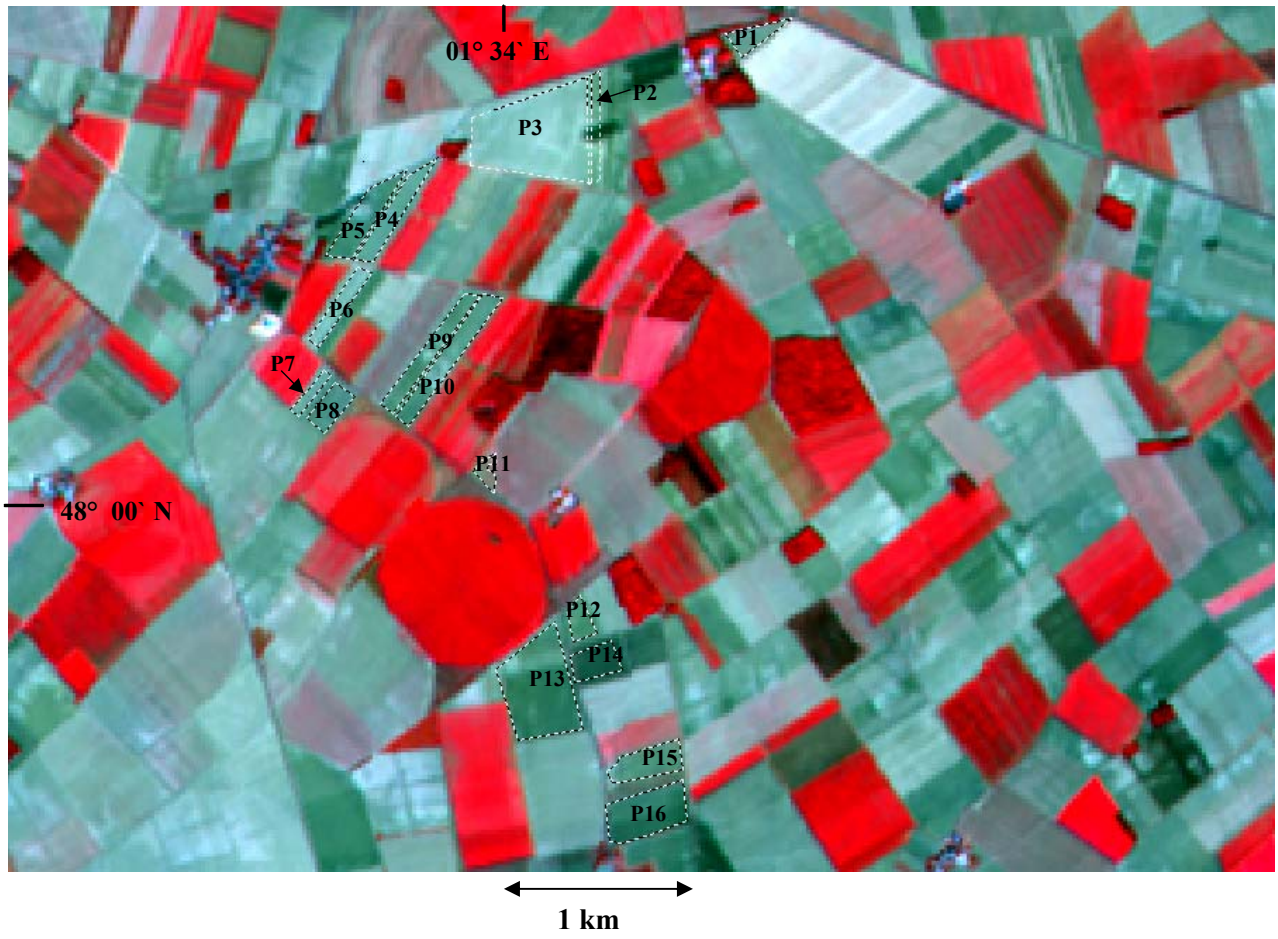


Figure 28 : Parcelles de référence choisies sur le site d'étude de Villamblain, superposés à l'image SPOT 4 de 04 septembre 2003 (Rouge : B3, vert : B2, Bleu : B1).

Date	Site	Mode d'acquisition et angle d'incidence	Polarisation	Humidité (%) [min - moy - max]	Densité apparente [min - max]	Rugosité (cm) [min - max]	Date des mesures de rugosité	Date des mesures d'humidité
09/02/03	Villamblain	IS5 – 37°	HH et HV	[25.3 - 27.8 - 30.8]	[0.86 – 0.94]	[0.74 – 3.13]	5 et 12/02/03	09/02/03
23/09/03	Villamblain	IS6 – 40°	HH et HV	[8.8 - 16.3 - 21.8]	[0.94 – 1.28]	[0.65 – 1.89]	23 et 26/09/03	23/09/03
26/09/03	Villamblain	IS4 – 34°	HH et HV	[5.4 - 6.7 - 10.6]	[0.94 – 1.28]	[0.65 – 2.21]	23 et 26/09/03	26/09/03
29/09/03	Villamblain	IS2 – 24°	HH et HV	[5.4 - 6.7 - 10.6]	[0.94 – 1.28]	[0.65 – 2.21]		26/09/03
02/10/03	Villamblain	IS1 – 20°	HH et HV	[14.3 - 18.2 - 21.9]	[0.94 – 1.28]	[0.65 – 2.21]		02/10/03
09/10/03	Villamblain	IS7 – 43°	HH et HV	[17.7 - 24.2 - 32.5]	[0.94 – 1.28]	[0.66 – 1.79]	09/10/03	09/10/03
15/10/03	Villamblain	IS1 – 20°	HH et HV	[12.1 - 21.2 - 30.7]	[0.94 – 1.28]	[0.66 – 1.79]		15/10/03
03/11/03	Villamblain	IS2 – 24°	HH et VV	[25.5 - 31.5 - 35.5]	[0.94 – 1.19]	[0.87 – 3.22]	03/11/03	03/11/03
09/11/03	Villamblain	IS5 – 37°	HH et VV	[18.9 - 26.1 - 31.3]	[0.94 – 1.19]	[0.87 – 2.60]		07/11/03
25/11/03	Villamblain	IS4 – 34°	HH et HV	[25.1 - 31.6 - 37.2]	[0.94 – 1.19]	[0.84 – 2.60]		28/11/03
02/12/03	Villamblain	IS6 – 40°	HH	[28.2 - 32.3 - 36.1]	[0.94 – 1.17]	[0.84 – 2.40]		02/12/03
08/12/03	Villamblain	IS2 – 24°	HH	[19.7 - 25.6 - 34.1]	[0.94 – 1.17]	[0.84 – 2.40]		08/12/03
14/12/03	Villamblain	IS5 – 37°	HH	[22.5 - 28.6 - 35.1]	[0.94 – 1.17]	[0.84 – 2.40]	11/12/03	11/12/03
13/03/04	Touch	IS7 – 43°	HH et HV	[34.4 - 42.3 - 47.3]	[1.19 – 1.66]	[0.50 – 3.56]	12/03/04	13/03/04
17/04/04	Touch	IS7 – 43°	HH et VV	[32.7 - 39.0 - 46.5]	[1.05 – 1.65]	[0.77 – 3.52]	16/04/04	17/04/04
20/04/04	Villamblain	IS6 – 40°	HH et HV	[24.0 - 29.1 - 33.5]	[1.11 – 1.34]	[0.78 – 1.27]	21/04/04	20/04/04
04/09/03	Villamblain	SPOT4	-	-	-	-	-	-
09/03/03	Villamblain	SPOT5	-	-	-	-	-	-
05/04/03	Touch	SPOT5	-	-	-	-	-	-

Tableau 6 : Caractéristiques des images radar et optique utilisées ainsi que les mesures d'humidité, de densité apparente et de rugosité réalisées.

3.3.3.1 Mesures d'humidité

Les mesures d'humidité ont été réalisées en utilisant la méthode gravimétrique (cf. chapitre 1). Nos mesures d'humidité ont été réalisées très souvent simultanément aux acquisitions radar afin d'obtenir une caractérisation précise de l'humidité et en évitant les risques de pluie ou de dessèchement de la surface. Les mesures d'humidité par gravimétrie ont été effectuées sur les 5 premiers centimètres du sol (de l'ordre de la longueur d'onde radar) puisque la profondeur de pénétration du signal radar pour des sols argileux est faible en bande C (Bruckler et al., 1988 ; Quesney, 1999). Dix échantillons ont été prélevés sur place pour chaque parcelle puis analysés à l'INRA d'Orléans (Institut National de Recherche Agronomique). Grâce à ces échantillons, nous avons calculé la teneur en eau pondérale moyenne (W_p) pour chaque parcelle témoin.

3.3.3.2 Mesures de densité apparente

La densité apparente (D_a) est définie par le rapport entre le poids de la terre sèche et le volume du cylindre utilisé. Trois mesures de densité apparente ont été effectuées pour chaque parcelle témoin en utilisant des grands cylindres (volume de 500 cm^3 et hauteur de 9 cm). Les résultats d'analyse montrent que la densité apparente varie entre 0.86 et 1.66 avec un écart type de 0.06. Les valeurs les plus faibles correspondent aux parcelles fraîchement labourées et les valeurs les plus élevé correspondent aux parcelles non labourées. La teneur en eau volumique du sol (m_v) est ensuite calculée en multipliant la teneur en eau pondérale (W_p) par la densité apparente du sol (D_a) :

$$m_v(\%) = D_a W_P(\%) \tag{18}$$

Les résultats montrent que la teneur en eau volumique du sol varie entre 5.4% et 47.3% avec un écart type de 1.7% (cf. tab. 6).

3.3.3.3 Mesures de rugosité

Lors de nos campagnes terrain, des mesures de rugosité ont été effectuées sur toutes les parcelles témoins (une vingtaine). Ces parcelles, choisies comme étant

des sols nus, étaient principalement des surfaces d'ensemencement de blé à faible densité de végétation (inférieure à 10 % de la surface), des labours ou d'anciens chantiers de récolte. Les mesures de rugosité ont été réalisées à l'aide d'un rugosimètre (ou profilomètre) à aiguilles (de 2 m de long avec un pas d'échantillonnage de 1 cm). La rugosité pour une parcelle donnée est caractérisée par 5 profils suivant la direction du travail du sol (parallèle aux sillons) et 5 mesures perpendiculaires à cette direction.

Les paramètres de surface rms et L sont ensuite calculés à partir de la fonction d'autocorrélation moyenne des 10 profils de rugosité. Cette phase est réalisée après numérisation des profils, en utilisant un programme écrit sous Matlab. Les valeurs de rms relevées varient de 0.5 à 3.56 cm (cf. tab 6). Les valeurs les plus faibles correspondent à des parcelles de semis de blé et les valeurs les plus élevée correspondent à des parcelles fraîchement labourées.

Le tableau 7 montre une fiche contenant les renseignements recueillis lors de nos mesures terrain. En plus de nos mesures d'humidité, de rugosité et de densité apparente, nous avons noté pour chaque parcelle les caractéristiques du sol, comme par exemple le taux d'encroûtement de la surface, le pourcentage de végétation verte (CVV) et de végétation sèche (CVS), la direction de rangs, etc. Ces renseignements ont permis d'enrichir notre base de données avec des précisions particulièrement utiles.

Parcelle	Date	Etat de sol	Rugosité	Taux de végétation
P1	05/02/2003	labour	Très peu d'orientation - Rugueuse	0% CVV et CVS
P2	05/02/2003	labour	Pas d'orientation Rugueuse	0% CVV et CVS
P3	05/02/2003	semi	10% de cailloux - Lisse	0% CVV et CVS
P4	05/02/2003	semi	Lisse	0% CVV et CVS
P5	05/02/2003	semi	20% de cailloux - Lisse	0% CVV et CVS
P6	05/02/2003	semi	Moyennement rugueuse	0% CVV et CVS
P6bis	05/02/2003	labour	Rugueuse	0% CVV et CVS
P7	05/02/2003	semi	10 -20% de cailloux - Lisse	
P8	05/02/2003	labour	20-30% de cailloux Moyennement rugueuse	0% CVV et CVS
P9	05/02/2003	labour	20% de cailloux - Rugueuse	0% CVV et CVS
P10	12/02/2003	semi	Lisse < 0,5 cm - 1	0% CVV et CVS
P11	12/02/2003	semi	Entre 0,5 et 1 cm - Lisse	0% CVV et CVS
P12	12/02/2003	labour	Moyennement rugueuse	0% CVV et CVS
P13	12/02/2003	semi	Rugueuse	0% CVV et CVS
P14	12/02/2003	labour	Entre 2 et 3 cm - Rugueuse	0% CVV et CVS
P15	12/02/2003	labour	Moyennement rugueuse	0% CVV et CVS
P16	12/02/2003	labour	Moyennement rugueuse	0% CVV et CVS
P17	12/02/2003	labour	Moyennement rugueuse	0% CVV et CVS
P18	12/02/2003	labour	Moyennement rugueuse	0% CVV et CVS
P19	12/02/2003	semi	Lisse	0% CVV et CVS
P20	12/02/2003	semi	Lisse	0% CVV et CVS
P21	12/02/2003	semi	Lisse	0% CVV et CVS
P22	12/02/2003	labour	Entre 2 et 3 cm - Rugueuse	0% CVV et CVS
P23	12/02/2003	semi	Entre 0 et 0,5 cm - Lisse	0% CVV et CVS

Tableau 7 : Commentaires terrain lors de la campagne de février 2003 sur Villamblain.

3.4 Traitements des images ASAR

La plupart des images radar ont été acquises en polarisations HH et HV. Trois images seulement ont été acquises en polarisations HH et VV. Les images radar nécessitent plusieurs pré-traitements avant de pouvoir être exploitables.

3.4.1 Pré-traitements effectués sur les images ASAR

Avant de pouvoir utiliser l'information radiométrique des images radar, il a fallu au préalable procéder à différents pré-traitements. Cette étape consiste, d'une part à calibrer les images ASAR pour transformer les valeurs numériques (DN) des images en des coefficients de rétrodiffusion (σ^0 en dB), et d'autre part à géoréferencer les images ASAR.

3.4.1.1 Calibration radiométrique des images ASAR

Cette opération permet de calculer le coefficient de rétrodiffusion (σ^0) à partir des valeurs numériques des images. Au moment des traitements des images ASAR, le logiciel (best W- Basic Envisat and ERS, SAR Toolbox) développé par l'ESA (Agence Spatiale Européenne, http://envisat.esa.int/) pour traiter les images ASAR ne permettait pas de calibrer les images ASAR. De ce fait, nous avons programmé la calibration radiométrique des images ASAR à partir de commandes du logiciel de traitement d'images Erdas/Imagine.

Les paramètres d'entrée de cette procédure de calibration sont : la largeur de l'image (N), l'angle d'incidence (θ), la constante de calibration (K) et l'image elle-même. En sortie, nous avons l'image ASAR calibrée et l'image d'incidence correspondante.

Le coefficient de rétrodiffusion est défini comme suit :

$$\sigma^0(\theta) = \frac{DN^2 \sin\theta}{K} \tag{19}$$

où DN est la valeur numérique de chaque pixel (Digital Number). La constante de calibration (K) dépend de l'angle d'incidence et du mode d'acquisition.

Le tableau 8 montre les valeurs de K en fonction des différentes configurations (IS1 à IS7) du alternating polarisation mode.

Dans le fichier header de l'image, nous trouvons la largeur de l'image, la constante de calibration, et l'angle d'incidence pour seulement 11 pixels. Pour calculer l'angle d'incidence (θ_i) en tout pixel de l'image (i), nous effectuons une interpolation linaire (fig. 29) :

$$\theta_i = Ai + B \tag{20}$$

où A et B sont des coefficients à calculer.

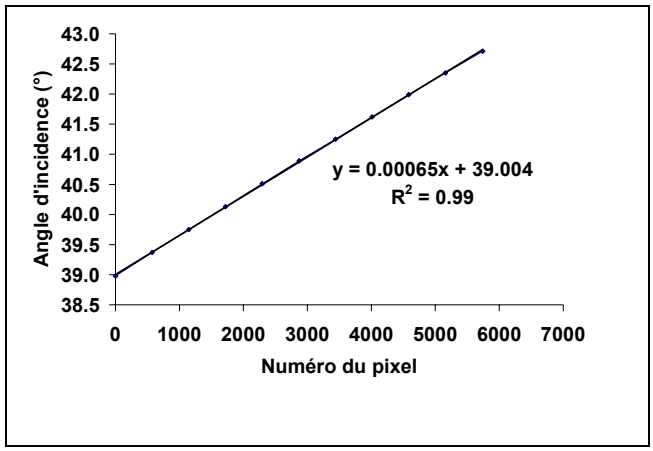


Figure 29 : Angle d'incidence en fonction du numéro du pixel pour une image ASAR acquise le 23 septembre 2003 en mode IS6 et en polarisations HH et HV.

Pour calibrer l'image ASAR, il est nécessaire de replacer l'image dans sa géométrie d'acquisition. En mode descendant, l'image est inversée droite-gauche car le premier pixel de l'image acquise correspond au dernier de la scène (cf. fig. 30). En mode ascendant, l'image acquise a subi une inversion haut-bas mais le numéro des pixels dans la direction de visée du capteur n'a pas changé.

Le coefficient de rétrodiffusion (σ^0) s'écrit donc comme suit :

$$\sigma^0 = \frac{DN^2 \sin(A(N - i + 1) + B)}{K} \text{ : mode descendant} \tag{21}$$

$$\sigma^0 = \frac{DN^2 \sin(Ai + B)}{K} \text{ : mode ascendant} \tag{22}$$

Où N est la largeur de l'image, i le numéro du pixel, et K le coefficient de calibration de l'image.

Le coefficient de rétrodiffusion est ensuite exprimé en décibels grâce à la formule :

$$\sigma^0{}_{dB} = 10 \log_{10} \sigma^0 \tag{23}$$

Ce coefficient subit ensuite un changement d'échelle permettant une sauvegarde de l'image en 16 bits non signés au lieu de 32 bits signés (espace disque 2 fois plus petit) :

$$\sigma^{0c}{}_{dB} = 10\sigma^{0}{}_{dB} + 400 \quad (24)$$

L'image d'incidence subit elle aussi un changement d'échelle permettant sa sauvegarde en 8 bits :

$$\theta^{c}{}_{\deg} = 5 * \theta_{\deg} - 50 \quad (25)$$

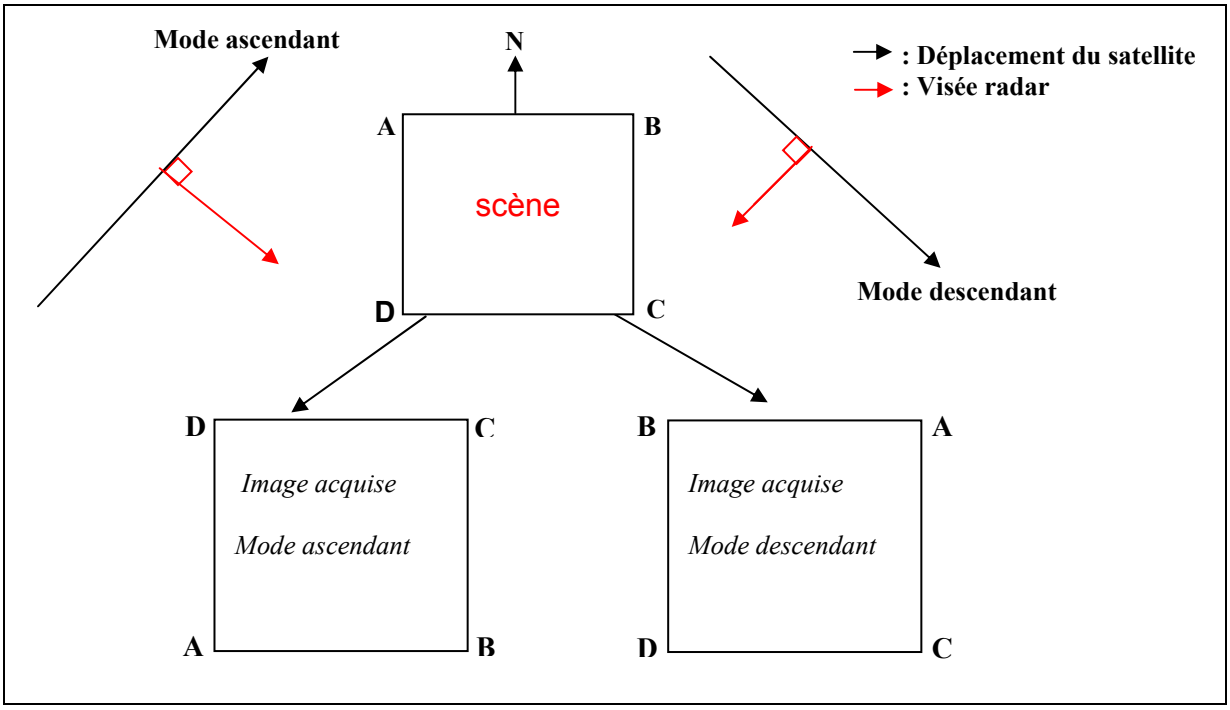


Figure 30 : Géométrie d'acquisition ASAR.

Configuration	K
IS1	426351.3750
IS2	543250.31250
IS3	675599.7500
IS4	714772.2500
IS5	2535128.7500
IS6	944449.8750
IS7	1130383.8750

Tableau 8 : Les constantes de calibration des images ASAR traitées sur nos sites d'étude en alternating polarisation mode.

Voici le diagramme de calibration des images ASAR (fig. 31) :

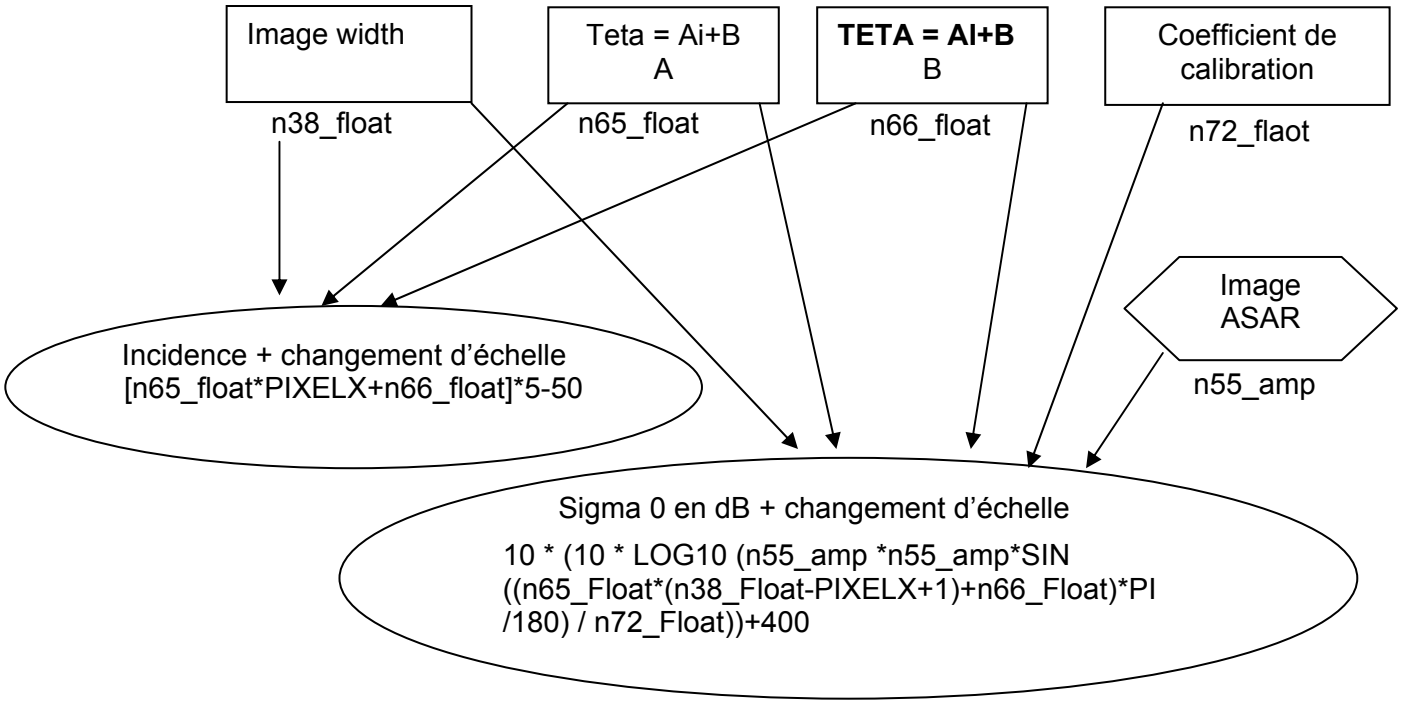


Figure 31 : Diagramme de calibration des images ASAR programmé sous modeler dans Erdas/Imagine .

3.4.1.2 Correction géométrique

Le géoréfrencement des images est une étape indispensable avant tout traitement. La méthode employée repose sur l'utilisation des points d'amer. Ce sont des points de contrôle, GCP « Ground Control Points », visibles sur l'image radar dont les coordonnées exactes sont connues (GPS, carte topographique, etc.) ou bien qui sont également repérables sur une image déjà géoréférencée (radar, optique, ou carte topographique).

Nous avons référencé les images ASAR en utilisant des cartes IGN au 1 : 25,000 qui couvrent la zone d'étude en projection Lambert 2 étendue. Une quarantaine de points d'amer a été repérée. Les points ont été choisis bien répartis sur l'ensemble des zones d'étude afin de permettre une correction de bonne qualité. La précision de géoréfrencement est d'environ 20 m. La figure 32 montre une image ASAR et une image SPOT géoréférencées.

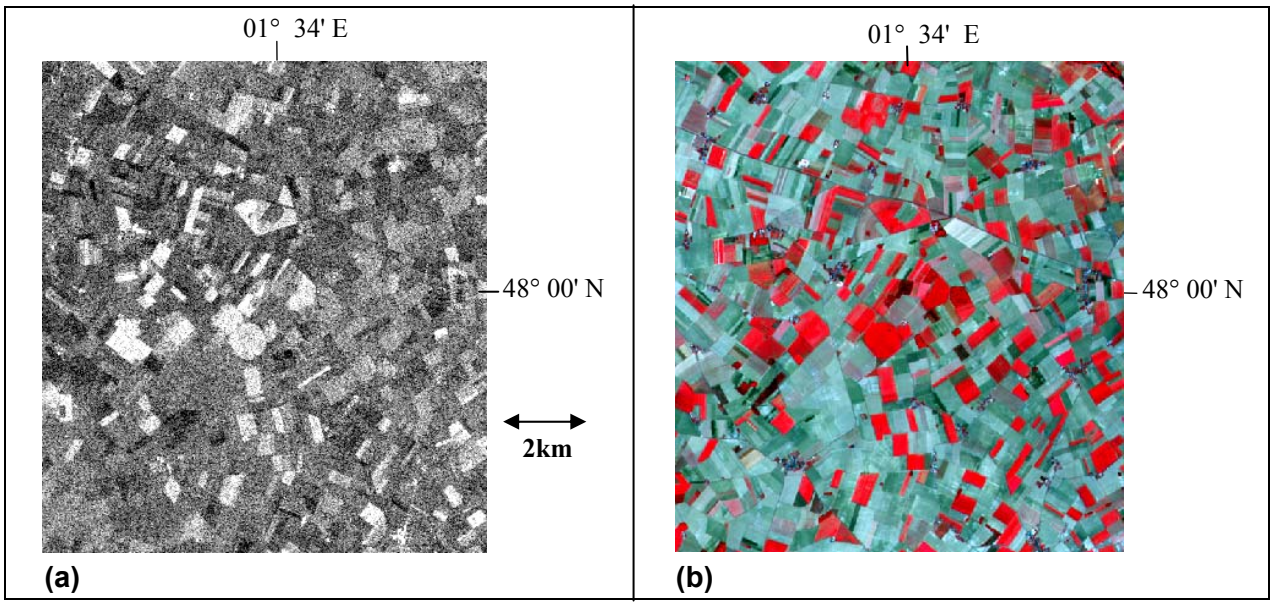


Figure 32 : Image ASAR géoréférencée, acquise le 23 septembre 2003 en polarisation HH et pour un angle d'incidence de 40° (a), et image SPOT géoréférencée acquise le 04 septembre 2003 (b) (rouge : 600-700 nm, vert : 500-600 nm et bleu : 400-500 nm).

3.4.1.3 Digitalisation des parcelles témoins et calcul des statistiques

Afin d'étudier le comportement du coefficient de rétrodiffusion en fonction de la rugosité et de l'humidité de surface du sol, il est nécessaire de calculer pour chaque parcelle le coefficient de rétrodiffusion moyen. De ce fait, nous avons digitalisé les parcelles témoins sous forme de polygones avec le logiciel Erdas/Imagine. Des points GPS ont été prélevés pour connaître la limite de chaque parcelle témoin. Pour tenir compte de l'erreur de géoréfrencement des images ASAR, nous avons exclu deux pixels des bordures des parcelles. Ensuite, nous avons calculé pour chaque image ASAR et chaque parcelle témoin, les statistiques sur le coefficient de rétrodiffusion (moyenne et écart type).

Les statistiques permettent d'étudier le comportement du signal radar en fonction des paramètres du capteur : polarisation et angle d'incidence. Cette analyse du comportement du signal radar en fonction des paramètres d'acquisition du satellite et des paramètres physiques du milieu nous ont permis de réaliser une première estimation du potentiel de discrimination de la rugosité et de l'humidité. Le tableau 9 montre un exemple des statistiques obtenues sur le coefficient de rétrodiffusion pour l'image de 09 février 2003.

Parcelle	Etat du sol	Humidité (%)		Rugosité rms (cm)	Coefficient de rétrodiffusion (dB)					
		m	s		m (HH)	s (HH)	m (HV)	s (HV)	m (HH/HV)	s (HH/HV)
P1	Sol nu	26.4	0.8	2.7	-6.4	2.5	-15.4	2.5	11.6	3.7
P2	Sol nu	26.1	1.0	3.1	-9.4	4.6	-14.6	2.7	11.8	5.8
P3	Semi de blé	29.2	2.8	1.0	-7.1	2.7	-16.8	2.6	13.0	5.2
P4	Semi de blé	30.0	1.0	1.1	-9.8	3.1	-18.5	2.9	12.5	4.6
P5	Semi de blé	29.7	0.7	0.7	-8.2	3.1	-17.0	2.8	11.9	4.9
P6	Semi de blé	29.2	1.0	0.9	-6.4	2.4	-16.4	2.6	11.8	4.2
P6-b	Sol nu	26.2	1.2	2.7	-6.1	3.1	-15.2	2.4	11.6	4.0
P7	Semi de blé	30.4	1.0	0.8	-9.3	2.6	-18.2	2.6	11.8	3.9
P8	Sol nu	27.1	1.8	1.6	-6.4	2.6	-15.0	2.9	12.1	4.2
P9	Sol nu	26.8	0.8	2.1	-8.4	2.4	-16.4	2.8	11.6	3.8
P11	Semi de blé	29.1	0.7	1.1	-7.5	2.4	-16.2	2.6	12.8	5.4
P12	Sol nu	25.3	0.9	2.0	-6.3	2.6	-14.4	2.4	11.3	4.4
P13	Semi de blé	29.4	1.1	2.4	-8.9	2.7	-16.2	2.9	11.4	4.5
P14	Sol nu	26.0	1.8	2.4	-5.5	2.7	-13.7	2.3	12.3	7.5
P15	Sol nu	26.3	0.8	2.0	-6.0	2.7	-15.4	2.5	12.6	4.3
P16	Sol nu	26.4	1.0	1.9	-6.1	2.6	-15.5	2.6	13.1	7.2
P17	Sol nu	25.8	0.6	2.2	-7.3	2.6	-16.0	2.9	13.1	4.8
P18	Sol nu	26.6	0.9	2.0	-7.1	2.8	-15.4	3.0	12.2	5.6
P19	Semi de blé	27.9	0.7	1.0	-8.3	2.4	-16.6	2.8	13.1	4.9
P20	Semi de blé	29.8	1.5	1.0	-8.8	2.6	-18.2	2.4	11.4	3.4
P21	Semi de blé	30.8	2.1	1.2	7.5	2.7	-15.9	2.8	11.7	4.1
P22	Sol nu	26.1	0.8	2.5	-6.5	2.5	-15.4	2.5	11.9	4.0
P23	Semi de blé	28.0	1.1	1.0	-8.5	2.6	-16.8	2.5	11.2	3.8

Tableau 9 : Exemple des statistiques obtenues sur l'image du 09 février 2003 (m : moyenne, s : écart type).

3.5 Interprétation des données

3.5.1 Comportement du signal radar en fonction de l'humidité

Le comportement du coefficient de rétrodiffusion (σ^0) a été étudié en fonction de l'humidité du sol pour les polarisations HH, HV et VV, et pour des incidences allant de 20° à 43°. Le coefficient de rétrodiffusion est mis en correspondance avec l'humidité quelle que soit la rugosité (rms) (fig. 33). Pour une date donnée, les résultats ne montrent pas de relation claire entre le signal radar et l'humidité du sol à cause de la faible variation d'humidité (<10%). En effet, l'humidité est assez homogène pour une date donnée et sa variation à l'intérieur des sites d'étude est trop faible pour induire des variations sur le coefficient de rétrodiffusion. La variabilité de σ^0 semble à priori être due essentiellement à l'influence des autres paramètres comme la rugosité par exemple.

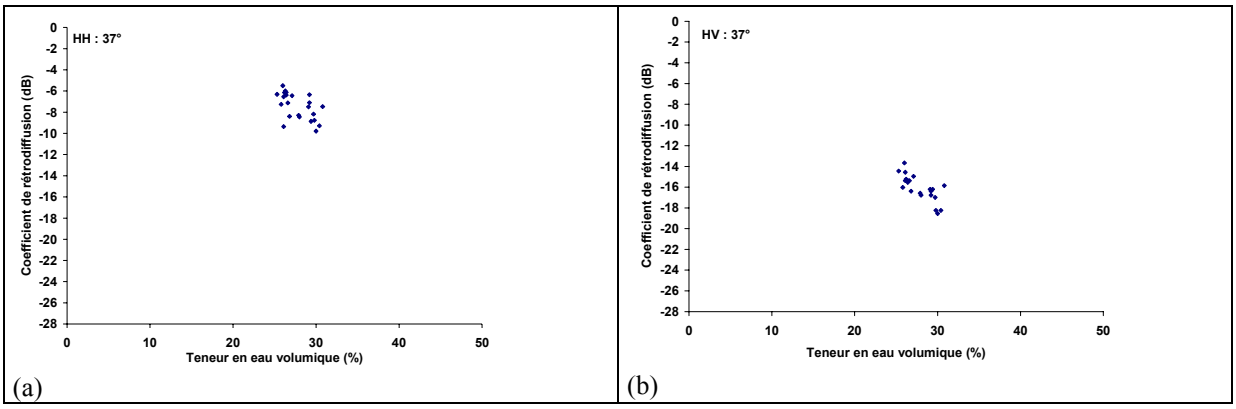


Figure 33 : Exemple de la dépendance entre le coefficient de rétrodiffusion et l'humidité de surface pour l'image ASAR du 09 février 2003 (incidence de 37°) : polarisation HH (a) et polarisation HV (b).

A cause de la faible variation d'humidité pour une date donnée, nous avons regroupé les images ASAR en trois groupes suivant l'angle d'incidence : (1) petits angles d'incidence : 20°-24°, (2) angles d'incidence moyens : 34°-37° et (3) grands angles d'incidence : 40°-43°. Pour chaque groupe d'incidence, une relation linéaire entre le coefficient de rétrodiffusion en polarisations HH et HV et la teneur en eau volumique du sol a été obtenue (fig. 34). Pour la polarisation VV, aucune relation n'a été établie entre le signal radar et l'humidité car on dispose seulement de trois images ASAR en polarisation VV (24°-43°) avec une gamme d'humidité pour chaque groupe d'incidence très restreinte (10% seulement).

Les résultats montrent que le coefficient de rétrodiffusion en polarisations HH et HV augmente avec la teneur en eau volumique du sol pour des humidités entre 5% et 30-35%. Pour les faibles incidences (20°-24°), la sensibilité du signal radar à l'humidité du sol est plus grande en polarisation HH qu'en polarisation HV (0.18 dB/% et 0.02 dB/%, respectivement).

Pour la polarisation HH, la pente augmente légèrement de 0.18 dB/% à 0.22 dB/% quand l'angle d'incidence augmente de 20°-24° à 34°-37° (fig. 34a et 34b) et ensuite, elle diminue à 0.12 dB/% pour des incidences de 40°-43° (fig. 34c). Cette légère augmentation de la pente à 34°-37° est probablement due au manque de points de mesure pour des humidité entre 5% et 20%. En effet, Ulaby et al. (1978) ont trouvé que la pente décroît légèrement quand l'incidence augmente de 20° à 30° (0.25 dB /% à 20° et 0.22 dB/% à 30°). En polarisation HV, nous observons une

augmentation significative de la pente quand on passe des petites incidences aux incidences moyennes : de 0.02 dB/% à 0.17 dB/% (fig. 34d et 34e). Pour les grandes incidences, la sensibilité du signal radar à l'humidité de surface est du même ordre de grandeur en polarisations HH et HV (de l'ordre de 0.11 dB/%) (fig. 34c et 34f).

Pour des sols très humides (>30-35%), les résultats montrent que le signal radar n'augmente plus avec l'humidité (fig. 34b, c, e, et f). Ce résultat a été largement observé dans la littérature (Dobson et Ulaby, 1981 ; Bruckler et al., 1988 ; Chanzy, 1993).

Geng et al. (1996) ont rapporté que la sensibilité du signal radar à l'humidité du sol, en bande C avec un angle d'incidence de 55°, est plus forte en polarisation HH qu'en polarisation HV. D'autres études ont trouvé que la sensibilité du signal radar à l'humidité du sol est plus faible en polarisation HH qu'en polarisation HV pour des incidences entre 20° et 30° (Ulaby et al., 1978 ; Hirosawa et al., 1978,1980 ; Le Toan, 1982 ; Kobayashi et Hirosawa, 1984). Enfin, Beaudoin et al. (1990) et Geng et al. (1996) ont monté que le signal radar est légèrement plus sensible à l'humidité en polarisation VV qu'en polarisation HH.

Nous avons observé une forte dispersion des points de mesure pour les fortes incidences (2.24 pour HH 40°-43° contre 1.37 pour HH 20°-24°). Cette dispersion est due à la forte influence de la rugosité de surface sur le signal radar (fig. 34c et 34f). En effet, à forte incidence, le signal radar est plus sensible à la rugosité qu'à l'humidité du sol (Ulaby et al., 1986 ; Fung and Chen, 1992 ; Baghdadi et al., 2002a and 2003).

On peut conclure que l'estimation de l'humidité du sol est optimale à petites et moyennes incidences (20°-24° et 34°-37°) avec un minimum d'influence de la rugosité de surface sur le signal radar et que la polarisation HH est meilleure que la polarisation HV. D'après des études antérieures, les configurations radar optimales devraient correspondre à des angles d'incidence entre 10° et 20° (Ulaby et al., 1978 ; Wang et al., 1983 ; Autret et al., 1989 ; Bertuzzi et al., 1992 ; Boisvert et al., 1995). Selon la littérature, une augmentation de l'humidité de surface de 5 % produit en moyenne une augmentation du coefficient de rétrodiffusion d'environ 1 dB pour des

configurations radar en bande C, polarisation HH ou VV, et à des angles d'incidence inférieurs à 20° (Ulaby et al., 1978 ; Le Toan et al., 1994 ; Boisvert et al., 1995 ; Zribi et al., 2002 ; Le Hégarat et al., 2002). Nos résultats montrent que la sensibilité du signal radar à l'humidité de surface est du même ordre de grandeur que ce qui a été dans la littérature (fig. 34 a).

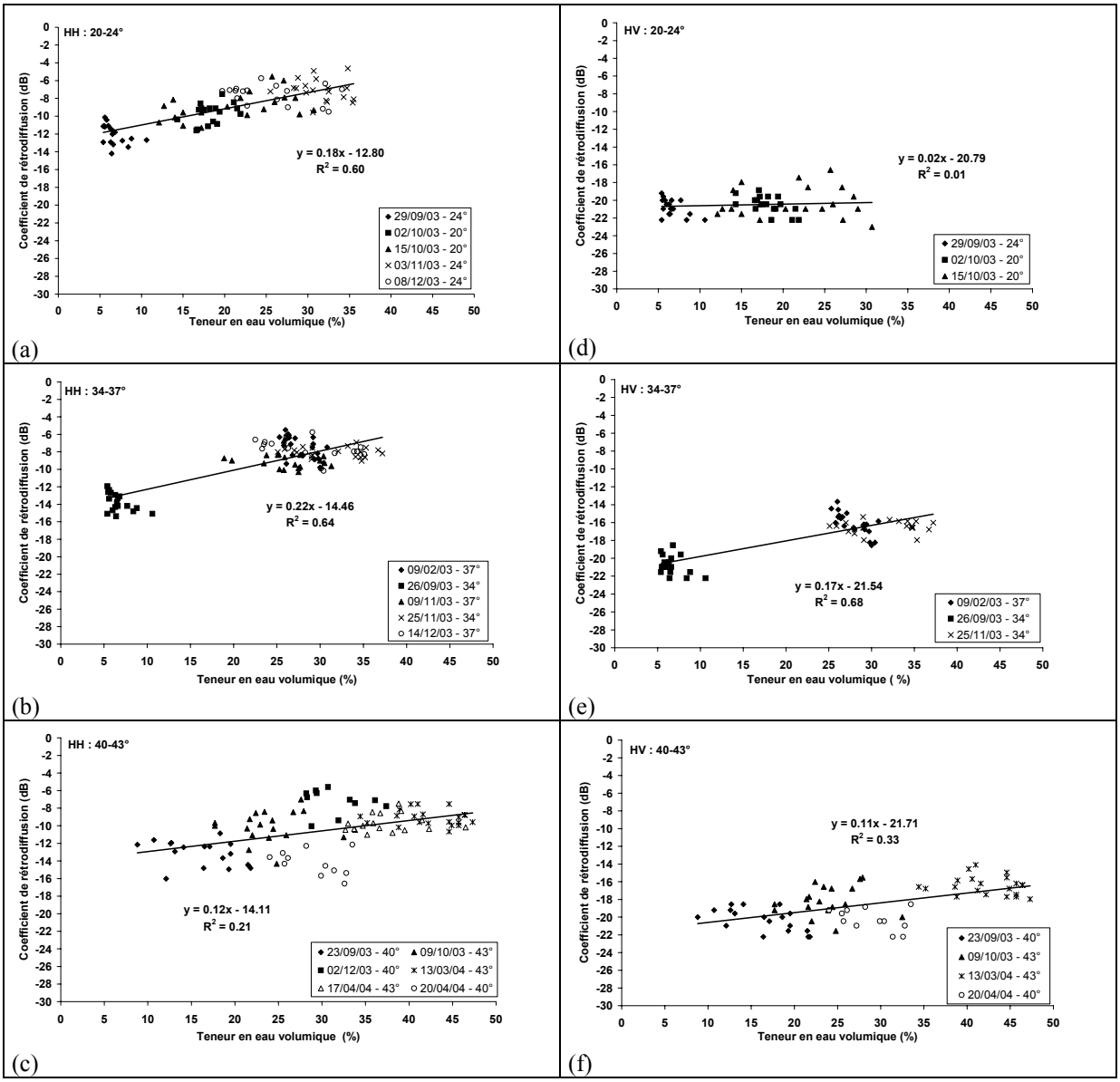


Figure 34 : Relations entre le coefficient de rétrodiffusion en polarisations HH et HV et la teneur en eau volumique du sol : (a) HH: 20°-24°, (b) HH: 34°-37°, (c) HH: 40°- 43°, (d) HV: 20°-24°, (e) HV: 34°-37°, et (f) HV: 40°- 43°. Seules les données du 13 mars et 17 avril 2004 ont été acquises sur le site du Touch.

Le rapport de polarisation HH/HV a également été calculé en fonction de l'humidité du sol pour les trois groupes d'incidence (fig. 35). Nous observons une relation

linéaire entre le signal radar et l'humidité du sol. La sensibilité du signal radar diminue avec l'angle d'incidence. La pente diminue de 0.17 dB/% à -0.01 dB/% quand l'angle d'incidence augmente de 20°-24° à 40°-43°. A forts angles d'incidence (40°-43°), le rapport de polarisation devient indépendant de l'humidité du sol. On peut conclure que le rapport de polarisation n'apporte rien de plus par rapport à la polarisation HH seule pour la caractérisation de l'humidité du sol (la pente de la relation linaire est plus faible).

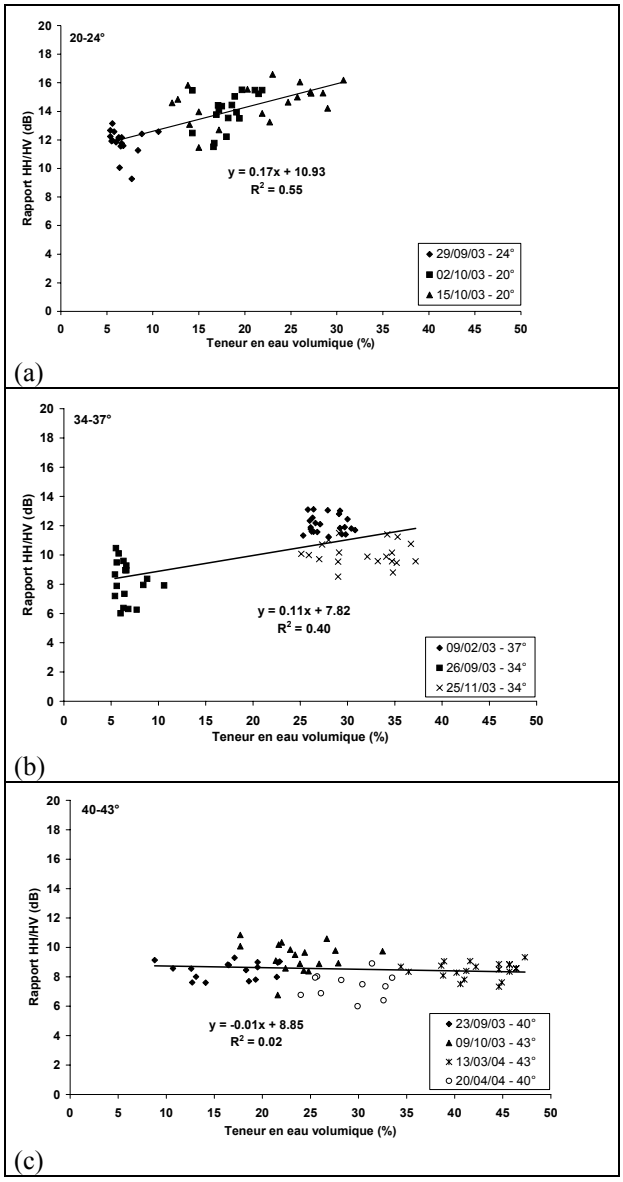


Figure 35 : Relations entre le rapport de polarisation HH/HV et la teneur en eau volumique du sol : (a): 20°-24°, (b): 34°-37°, et (c): 40°-43°.

3.5.2 Comportement du signal radar en fonction de la rugosité

Afin d'analyser le comportement du signal ASAR en fonction de la rugosité de surface, le coefficient de rétrodiffusion a été représenté en fonction de la rugosité pour chacune des polarisations radar sans distinction de l'humidité du sol (fig. 36). Pour chaque parcelle témoin, nous avons utilisé le coefficient de rétrodiffusion moyen. L'écart type des hauteurs (rms) utilisé dans cette étude a été calculé à partir de la fonction d'autocorrélation moyenne établie grâce aux profils mesurés dans les directions parallèle et perpendiculaire aux sillons. La visée du radar n'était pas systématiquement parallèle ou perpendiculaire aux rangs des parcelles et de ce fait, le capteur radar percevait une rugosité intermédiaire aux rugosités propres à chaque direction.

Les résultats montrent que le coefficient de rétrodiffusion en polarisations HH et HV augmente avec la rugosité de surface. La dynamique du signal radar (différence entre σ^0 à fortes rugosités et σ^0 à faibles rugosités), qui est du même ordre de grandeur pour les polarisations HH et HV, est faible pour des rms allant de 0.5 cm à 3.56 cm : environ 1 dB pour les angles d'incidence entre 20°-24°, 2 dB pour les incidences entre 34°-37°, et 3 dB pour les incidences entre 40°-43° (fig. 36). On peut conclure que le signal radar est plus sensible à la rugosité de surface à fortes incidences (Ulaby et al., 1986 ; Fung and Chen, 1992 ; Baghdadi et al., 2002a and 2003).

En polarisation VV, le coefficient de rétrodiffusion est faiblement dépendant de la rugosité de surface quelle que soit l'angle d'incidence (24°, 37° ou 43°) (fig. 36g). De ce fait, les polarisations HH et HV sont plus sensibles à la rugosité de surface que la polarisation VV. Plusieurs études ont reportées des résultats similaires (Fung, 1994 ; Geng et al., 1996 ; Baghdadi et al., 2003).

Pour les deux dates où les sols étaient très humides (13 mars et 17 avril 2004) avec des teneurs en eau volumique supérieures à 30-35%, les résultats montrent que le coefficient de rétrodiffusion en polarisations HH, HV et VV devient indépendant de la rugosité de surface (fig. 36e, f, g). Ulaby et al. (1978) ont observé pour une incidence de 10° une faible dépendance entre le signal radar en polarisation HH et la rugosité

de surface pour des sols humidités (34 - 40%). Pour une incidence de 20°, les résultats montraient un signal qui augmente avec la rugosité de surface.

Avec la polarisation HV et pour des faibles incidences (20°-24°), les résultats montrent une faible corrélation entre le signal radar et la rugosité de surface. En effet, à faible incidence, le signal radar est influencé par plusieurs paramètres en plus de la rugosité et de l'humidité, comme par exemple l'effet des sillons et la topographie. C'est pour cette raison que la corrélation entre le signal en polarisation HV et la rugosité est faible. De plus, le signal radar semble indépendant de l'humidité du sol (fig. 36b). En effet, le signal radar des différentes images ASAR est du même ordre de grandeur quelle que soit l'humidité du sol.

Pour les incidences moyennes (34°-37°), avec les polarisations HH et HV, le signal radar est plus sensible à l'humidité du sol qu'à la rugosité (fig. 36c et 36d). En effet, les données sont distribuées selon deux tendances, la première correspond à la date où l'humidité est faible (26/09/2003, d'environ 7%), et la seconde regroupe les autres dates définies avec des humidités élevées (entre 25% et 35%).

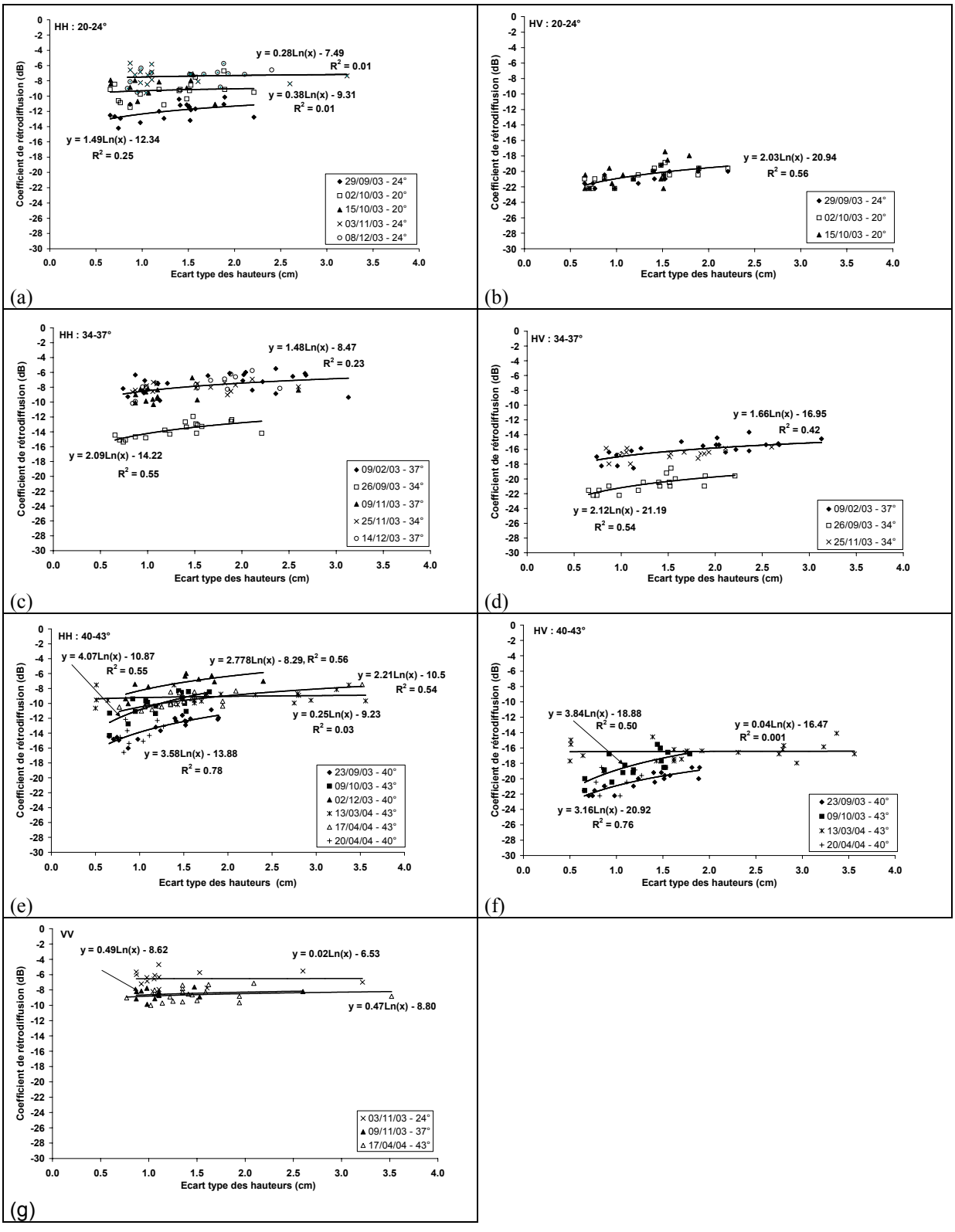


Figure 36 : Variations de coefficient de rétrodiffusion en polarisations HH, HV et VV en fonction de la rugosité pour trois groupes d'angles d'incidence : (a) HH: 20°-24°, (b) HV: 20°-24°, (c) HH: 34°- 37°, (d) HV: 34°-37°, (e) HH: 40°-43°, (f) HV: 40°- 43° et (g) VV : 20°-43°. Seules les données du 13 mars et 17 avril 2004 ont été acquises sur le site du Touch.

Les rapports de polarisation HH/HV ont été calculés en fonction de la rugosité de surface pour les trois groupes d'incidence (fig. 37). Les résultats ne montrent aucune dépendance entre le signal radar et la rugosité de surface quel que soit l'angle d'incidence. On observe une diminution du rapport de polarisation avec l'angle d'incidence. On constate également une plus forte dispersion des points de mesure à faibles et moyennes incidences (influence de l'humidité du sol sur le signal radar est plus grande) qu'aux fortes incidences.

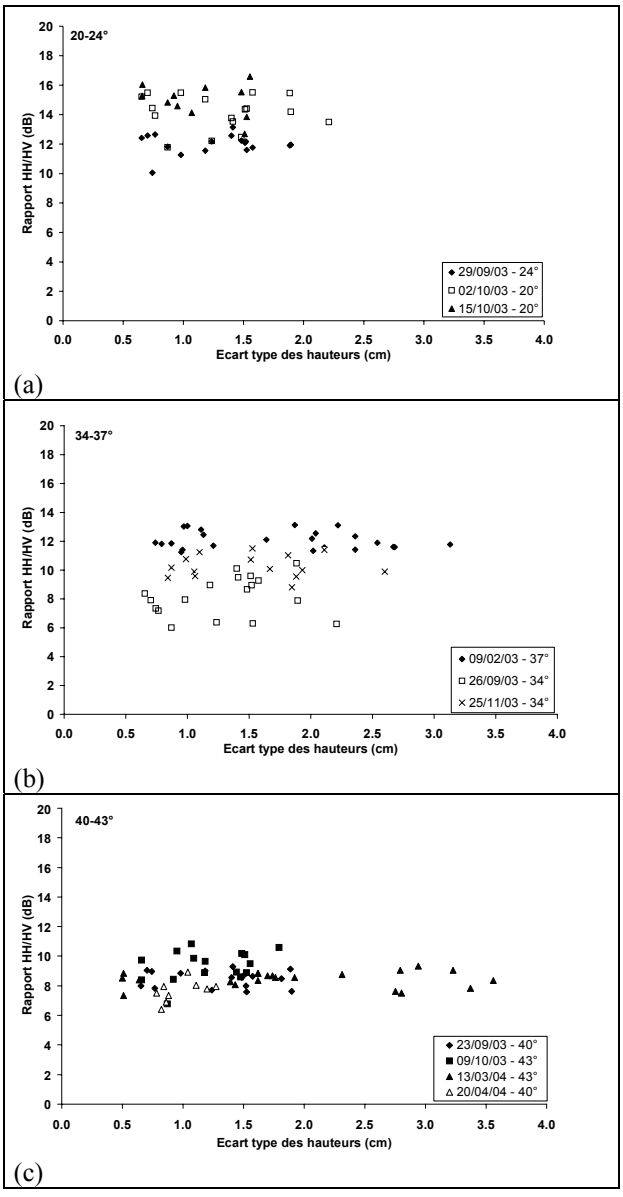


Figure 37 : Relations entre le rapport de polarisation HH/HV et la rugosité : (a): 20°-24°, (b): 34°-37°, et (c): 40°-43°.

3.5.3 Comportement du rapport des coefficients de rétrodiffusion acquis à deux incidences

Le rapport des coefficients de rétrodiffusion acquis à deux différentes incidences (une faible et une élevée) et avec la même polarisation a été étudié pour analyser sa dépendance par rapport à l'humidité et à la rugosité de surface. Comme le capteur ASAR ne permet pas de fournir simultanément des données à deux incidences différentes, nous avons utilisé les images acquises à des dates très proches (moins de 10 jours) et pour lesquelles les conditions de rugosité et d'humidité ont très peu changé. Aucune correction n'a été effectuée sur les coefficients de rétrodiffusion pour tenir compte de la faible variation en humidité et rugosité de la surface du sol entre les deux dates d'acquisition. Seules, les parcelles témoins qui ont des variations de teneur en eau volumique entre les deux dates d'acquisition inférieures à 5% ont été utilisées.

Les figures 38 et 39 représentent les rapports des coefficients de rétrodiffusion HH_{pi}/HH_{gi} et HV_{pi}/HV_{gi} (pi : petite incidence ; gi : grande incidence) en fonction de la rugosité et de l'humidité du sol. Les résultats montrent que ces rapports diminuent avec l'augmentation de la rugosité de surface. Cependant, on peut noter que la sensibilité du rapport des coefficients de rétrodiffusion HV_{pi}/HV_{gi} à la rugosité de surface est plus faible que le rapport HH_{pi}/HH_{gi}.

Les résultats montrent également que les rapports HH_{pi}/HH_{gi} et HV_{pi}/HV_{gi} sont indépendants de l'humidité du sol (fig. 39). Ces conclusions sont en accord avec les travaux de Autret et al. (1989), Oh et al. (1992), Zribi et al. (2002) et Srivastava et al. (2003).

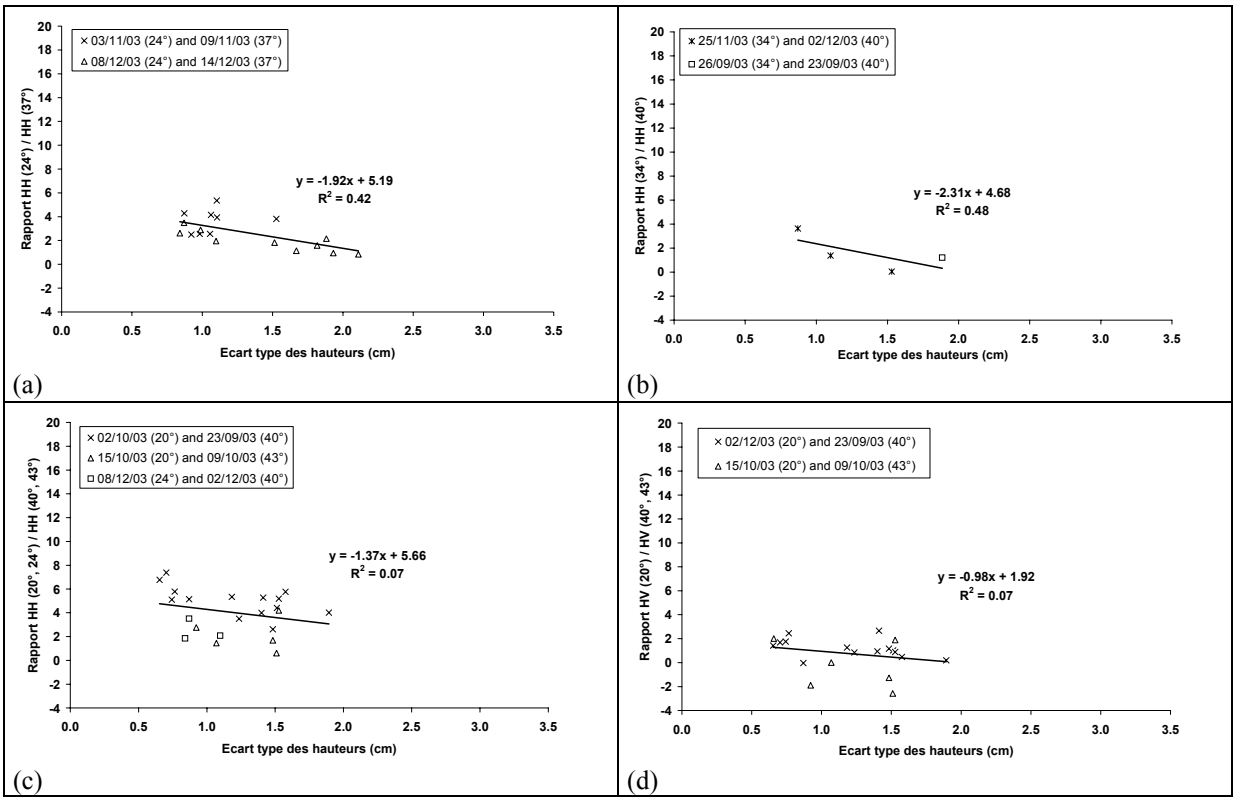


Figure 38: Relations entre les rapports des coefficients de rétrodiffusion, HH_{pi}/ HH_{gi} et HV_{pi} / HV_{gi}, et la rugosité.

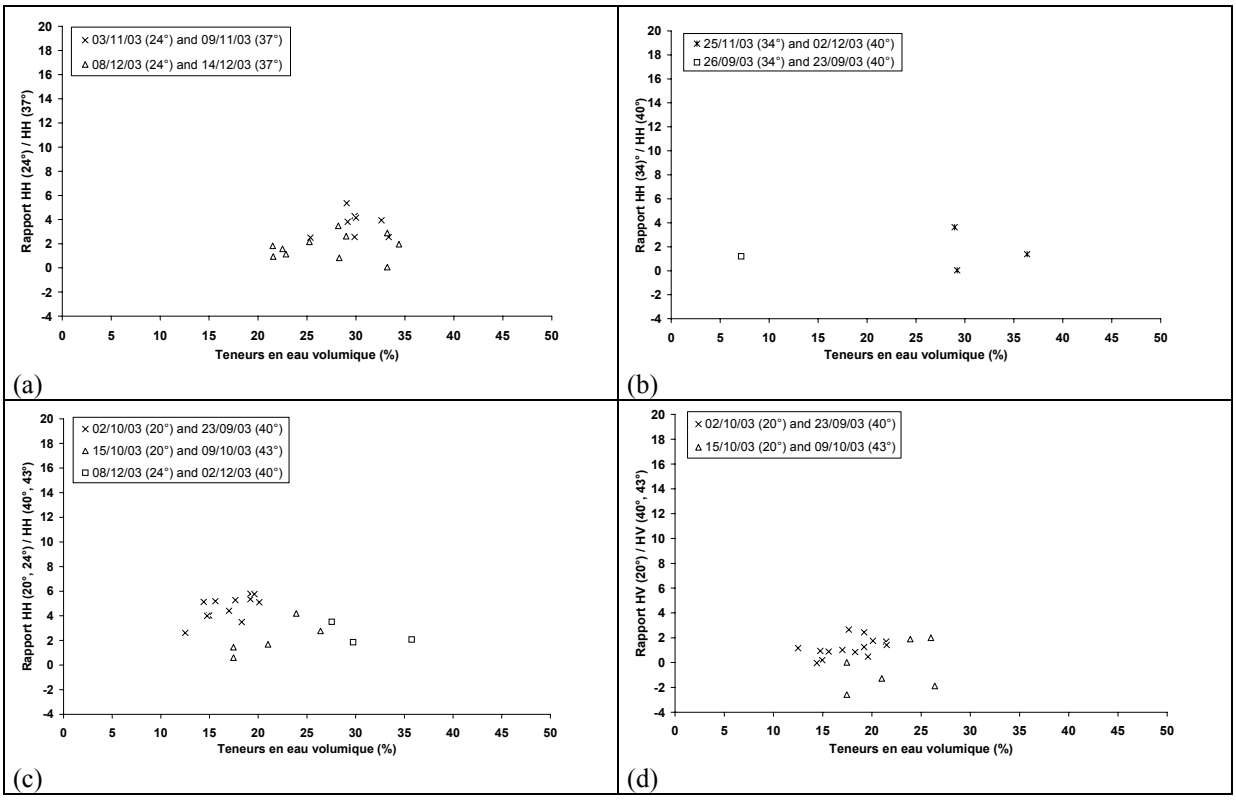


Figure 39: Relations entre les rapports des coefficients de rétrodiffusion, HH_{pi}/ HH_{gi} et HV_{pi} / HV_{gi}, et la teneur en eau volumique du sol.

3.6 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'étudier le comportement de signal radar ASAR en fonction de l'humidité et de la rugosité de surface des sols nus en milieu agricole. Les acquisitions radar ont été effectuées par le système ASAR (bande C, fréquence de 5.3 GHz et longueur d'onde de 5.66 cm) du 09 février 2003 au 20 avril 2004, en polarisations HH, HV et VV, avec des angles d'incidence de 20° à 43°. Nous avons travaillé sur deux sites d'étude, le premier est situé à Villamblain près d'Orléans et le deuxième au bassin de Touch près de Toulouse. Des mesures d'humidité, de densité apparente et de rugosité ont été effectuées simultanément aux acquisitions radar. Les images ASAR ont été calibrées radiométriques et géoréférencées en utilisant des cartes IGN, des points GPS et des images SPOT.

On peut noter que le coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH est plus sensible à l'humidité du sol qu'en polarisation HV. L'estimation de l'humidité du sol en utilisant les images ASAR en bande C, est optimale à petites et moyennes incidences (20°-24° et 34°-37°) avec un minimum d'influence de la rugosité de surface. Pour des sols très humides (teneur en eau volumique supérieur à 30-35%), le signal radar devient constant avec l'augmentation de l'humidité du sol pour les deux polarisations (HH et HV). Ce travail est en accord avec la littérature.

Pour les polarisations HH et HV, la sensibilité du signal radar (σ^0) à la rugosité de surface augmente avec l'angle d'incidence mais la différence entre les σ^0 des fortes rugosités et les σ^0 des faibles rugosités est faible pour des rms allant de 0.5 cm à 3.56 cm (3 dB pour un angle d'incidence de 43°).

Les résultats montrent que les polarisations HH et HV sont plus sensibles à la rugosité de surface que la polarisation VV. Le coefficient de rétrodiffusion en polarisation VV est faiblement dépendant de la rugosité de surface quelle que soit l'humidité.

A angles d'incidence élevées (40°-43°), les images ASAR sont mieux adaptées pour discriminer entre les différentes classes de rugosité avec un minimum d'influence de l'humidité du sol. La sensibilité du signal ASAR à la rugosité de surface en milieu agricole permettrait de cartographier les sols nus en deux ou trois classes de

rugosité (lisse, moyennement rugueuse et rugueuse). Quand les sols sont très humides (teneur en eau volumique supérieur à 30-35%), le coefficient de rétrodiffusion devient indépendant de la rugosité de surface en polarisations HH et HV.

Les résultats montrent que le rapport de polarisation HH/HV est faiblement dépendant de la rugosité de surface quel que soit l'angle d'incidence. De même, nous avons observé une relation linéaire entre le rapport de polarisation HH/HV et l'humidité du sol. La pente de cette relation diminue avec l'incidence. A forte angle d'incidence (40°-43°), le rapport de polarisation devient indépendant de l'humidité du sol. Cependant, les rapports des coefficients de rétrodiffusion HH_{pi}/HH_{gi} et HV_{pi}/HV_{gi} diminuent avec la rugosité de surface et ils sont indépendant de l'humidité du sol (pi : petite incidence ; gi : grande incidence).

L'utilisation de deux polarisations (HH et HV, par exemple) au lieu d'une seule (HH ou HV) ne permet pas d'améliorer l'extraction des paramètres de surface (humidité et rugosité). Contrairement à l'utilisation conjointe de données ASAR à petites et à grandes incidences qui pourrait améliorer l'estimation des paramètres de surface. Cependant, le capteur ASAR ne permet pas d'acquérir simultanément des images à petites et à grandes incidences. En comparaison au capteur RADARSAT-1, les résultats de ce chapitre laissent supposer que le nouveau capteur ASAR n'apporte pas d'importantes améliorations sur l'estimation des paramètres de surface (rugosité et humidité).

Etant données que peu d'images ASAR acquises simultanément en polarisations VV et VH ont été analysées dans le cadre de cette étude, d'autres images ASAR en polarisations VV et VH seront nécessaires pour mieux analyser le comportement du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité et de la rugosité de surface. De nombreuses études menées essentiellement par l'équipe de Ulaby ont analysé le comportement du signal radar issu de scatteromètres en fonction des paramètres de surface. Ces études ont été réalisées pour une grande gamme de longueur d'onde, d'incidence, de rugosité, et d'humidité de surface. Cependant, il est nécessaire de valider les résultats de ces études sur des données satellitaires car les résultats obtenus par les scatteromètres et les capteurs spatiaux ne sont pas toujours les mêmes.

Un article a été publié sur ce travail :

Holah N., Baghdadi N., Zribi M., Bruand A., and King C., 2005. Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. Remote Sensing of Environment, vol. 96, no. 1, pp. 78-86.

Chapitre 4 : Modélisation du signal radar

4.1 Introduction

Les modèles de rétrodiffusion radar permettent de simuler le coefficient de rétrodiffusion d'une surface donnée à partir des caractéristiques physiques du sol et pour une configuration radar donnée. Plusieurs modèles de rétrodiffusion ont été développés récemment. Parmi eux, on trouve des modèles physiques et des modèles empiriques. Le but de ces modèles est de restituer aussi fidèlement que possible un coefficient de rétrodiffusion radar semblable à celui acquis par un capteur radar.

4.1.1 Modèles physiques

Ces modèles sont fondés sur l'utilisation des modèles théoriques basés sur des modèles électromagnétiques de diffusion. Ils fournissent des relations qui sont valides pour les différents paramètres du sol (rugosité et humidité) quels que soient les paramètres radar (polarisation, incidence, longueur d'onde). Parmi les modèles les plus connus, on trouve :

- Le modèle de petites perturbations SPM (Small Perturbation Model) : Ce modèle a été développé par Rice et al. (1951). Il est appliqué sur des surfaces lisses et souvent utilisé en bande L (Remond, 1997). Pour cette fréquence, une grande partie des surfaces naturelles offrent des valeurs de krms et kL dans son domaine de validité (Engman et al., 1987). En bande C, seules les surfaces de faibles rms et de faibles longueurs de corrélation peuvent être modélisées avec ce modèle (k = nombre d'onde = $2\pi / \lambda \cong 1.11$ cm^{-1} en bande C avec λ = longueur d'onde).

- Le modèle GOM (Geometric Optics Model) : Ce modèle s'applique à des surfaces très rugueuses. Il est basé sur l'approximation de Kirchhoff. L'approximation suppose qu'en chaque point de la surface, l'interaction de l'onde est identique à celle avec un plan infini, localement tangent à la surface (Ulaby et al., 1982). L'approximation utilisée ne tient compte que de la diffusion dans la direction spéculaire. Enfin, le calcul du coefficient de rétrodiffusion est uniquement une fonction de l'écart type des pentes de la surface et ne dépend pas de la forme de la fonction d'autocorrélation (Remond, 1997).

- Le modèle POM (Physical Optics Model) : Ce modèle est utilisé pour des surfaces moyennement rugueuses (Beckmann and Spizzichino, 1987). On est dans le domaine où l'on a une diffusion de l'onde incidente dans la direction spéculaire ainsi que dans les autres directions. Ce modèle est basé sur l'approximation de Kirchhoff. Les formulations vectorielles de la méthode de Kirchoff sont développées de manière à obtenir, après restriction, des équations scalaires plus facilement utilisables.

- Le modèle IEM (Integral Equation Model) : Il est développé par Fung et Chen en 1992 (Fung and Chen, 1992). Ce modèle est le mieux adapté puisque son domaine de validité recouvre des gammes des rugosités communes aux surface agricoles (krms $\leq$ 3, où k nombre d'onde = $2\pi/\lambda \cong 1.11$ cm^{-1} en bande C avec λ = longueur d'onde). Il permet d'accéder à une valeur du coefficient de rétrodiffusion (σ^0) à partir des caractéristiques du capteur (angle d'incidence, polarisation et longueur d'onde) et de celles de la surface (constant diélectrique du milieu, rugosité de surface, fonction d'autocorrélation).

Des méthodes numérique telles que la méthode des moments (Harrington, 1968 ; Morgan, 1990) et la méthode des différences finies (FDTD) (Kunz et al., 1993) sont parfois utilisées pour calculer la rétrodiffusion radar sur des cibles naturelles. La méthode FDTD est peu utilisée pour des sols agricoles car elle ne permet pas pour l'instant de simuler correctement le coefficient de rétrodiffusion radar (passage champ proche / champ lointain, prise en compte du lobe d'antenne, …).

4.1.2 Modèles empiriques ou semi-empiriques

Ils couvrent des gammes de validité beaucoup plus importantes que celles des modèles physiques. Les plus connus sont les modèles de Oh (Oh et al., 1992 ; 1994 ; 2002 et 2004) et de Dubois (Dubois et al., 1995). Le modèle de Oh lie les rapports de polarisations HH/VV et HV/VV à l'humidité et à la rugosité du sol. Ces rapports dépendent de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde. Quant au modèle de Dubois, il lie les coefficients de rétrodiffusion en polarisations HH et VV à l'humidité et à la rugosité du sol. Ces modèles sont parfois difficiles à appliquer sur un autre site que celui sur lequel ils ont été testés et appliqués. En général, ils sont valides pour des conditions de sol spéciales, ce qui peut limiter leurs utilisations.

4.2 Revue bibliographique

Différentes études ont montré une certaine inadéquation entre le coefficient de rétrodiffusion fourni par le modèle IEM et celui mesuré par les différents capteurs radar : ERS, RADARSAT, SIR-C/X, ERASME, RENE, etc. Cette inadéquation qui peut atteindre plusieurs décibels augmente avec l'angle d'incidence (Rakotoarivony et al., 1996 ; Boisvert et al., 1997 ; Mattia et al., 1997 ; Zribi et al., 1997 ; Wang et al., 1997 ; Baghdadi et al., 2002b and 2004).

Rakotoarivony et al. (1996) et Zribi et al. (1997) ont montré que le modèle IEM reproduit mieux le coefficient de rétrodiffusion radar (σ^0) en bande C sur des surfaces lisses que sur des surfaces rugueuses. Sur des surfaces lisses, le modèle IEM sur-estime le signal radar d'environ 2 dB. Cette sur-estimation augmente légèrement avec l'angle d'incidence. Pour des surfaces rugueuses, la différence entre les simulations IEM et les mesures radar peut atteindre 10 dB pour des incidences élevées (> 50°). Le modèle de Oh de 1994 (Oh et al., 1994) a également été testé. Les résultats montrent une sous-estimation du signal radar d'environ 3 dB pour des surfaces lisses et 5 dB pour des surfaces rugueuses (bande C). Cette sous-estimation ne montre pas une sensibilité significative avec l'angle d'incidence.

Boisvert et al. (1997) ont testé les modèles de Oh et al. (1992) et de Dubois et al. (1995). Ils ont trouvé que le modèle de Oh sous-estime toujours le coefficient de rétrodiffusion d'environ 3 dB quelque soit l'angle d'incidence entre 15° et 50°, et que le biais augmente avec la longueur d'onde (les bandes Ku, C, et L ont été utilisées). Le modèle IEM fournit l'estimation la plus précise du coefficient de rétrodiffusion mais il est sensible aux configurations radar et à la rugosité de surface. En bande C, le modèle IEM fournit la meilleure corrélation entre les σ^0 simulés à partir d'IEM et ceux mesurés sur des surfaces rugueuses avec un faible influence de l'angle d'incidence. Quant aux autres surfaces, la précision du modèle IEM diminue quand l'angle d'incidence augmente au delà de 30°. La comparaison des deux modèles (Oh et IEM) a montré que les données simulées par le modèle IEM sont plus proches des données mesurées.

Wang et al. (1997) ont montré que les simulations à partir du modèle de Oh (Oh et al., 1992) ne sont pas en bon accord avec les données mesurées. Le modèle de Oh

sous-estime les données mesurées. Les auteurs de cette étude montrent que les valeurs de $\sigma°_{HV}$ mesurées à partir du capteur SIR-C ou par scattéromètre sont en général plus élevées d'environ 3 à 4 dB de celles rapportées par Oh et al. (1992). Les résultats obtenus à partir du modèle de Dubois montre une bon accord entre les données mesurées et simulées.

Matia et al. (1997) ont montré que les simulations basées sur le modèle IEM sur-estiment les données expérimentales d'environ 3 dB en bandes C et L.

Baghdadi et al. (2004) ont montré que les simulations du modèle IEM sont fortement dépendantes de la fonction d'autocorrélation utilisée. L'inadéquation entre les données simulées et celles mesurées augmente avec l'angle d'incidence. En utilisant une fonction d'autocorrélation fractale, le biais est d'environ 1.4 dB pour la configuration C-VV-23° et de 5 dB pour la configuration C-HH-47°. L'écart type des erreurs est du même ordre de grandeur quelque soit l'angle d'incidence radar (entre 2.7 dB et 3.6 dB en bande C).

4.3 Objectifs

Le modèle de rétrodiffusion que nous allons tester dans cette partie est le modèle IEM. C'est un des modèles les plus utilisés dans les procédures d'inversion du signal radar pour l'estimation de l'humidité et de la rugosité du sol. Dans ce modèle, le sol est caractérisé par la constante diélectrique (dépend de l'humidité et de la composition du sol), l'écart type des hauteurs (rms), la forme de la fonction d'autocorrélation, et la longueur de corrélation (L). Le modèle tient compte aussi des paramètres du capteur tel que l'angle d'incidence (θ), la polarisation (pp), et la fréquence radar (f).

La description de la rugosité de surface des sols agricoles nus est basée sur trois paramètres : l'écart type des hauteurs, la longueur de corrélation et la fonction d'autocorrélation. La fonction d'autocorrélation est usuellement ajustée par une fonction exponentielle ou gaussienne alors que plusieurs travaux ont montré la grande variabilité du coefficient de rétrodiffusion avec la forme de la fonction d'autocorrélation (Altesse et al., 1996 ; Baghdadi et al., 2004). De plus, la mesure de la longueur de corrélation (L) est instable sur les sols agricoles. Les variations de la longueur de corrélation peuvent donc introduire de larges erreurs au niveau du signal

radar modélisé (Oh and Kay, 1998 ; Baghdadi et al., 2000). De récentes études ont montré que les paramètres de rugosité estimés par le biais des mesures terrain sont très sensibles à la longueur du profil de rugosité (Oh et Kay, 1998 ; Baghdadi et al., 2000). Baghdadi et al. (2000) ont montré que la longueur de corrélation augmente avec la longueur du profil. Oh et Kay (1998) ont montré grâce à des simulations que les mesures de la longueur de corrélation sont peu fiables en utilisant des profilomètres conventionnels de 1 ou 2 m de long (écart type supérieure à 50%), alors que la précision associée au rms est de l'ordre de 15%.

Baghdadi et al. (2002b et 2004) ont montré les limites de fonctionnement du modèle IEM quelle que soit la configuration du capteur radar et quelle que soit la fonction d'autocorrélation utilisée. Cette étude a été réalisée à partir de six campagnes de mesures effectuées en France : Orgeval 94-95, Alpilles 97, et Pays de Caux 94-98-99, et deux campagnes réalisées au Canada (province du Québec): Brochet 99 et Châteauguay 99. Une grande base de données composée d'images radar acquises par les capteurs ERS, RADARSAT, SIR-C, X-SAR et ERASME (polarisations HH et VV, angle d'incidence entre 23° et 57°) et de données terrain de rugosité et d'humidité a été utilisée. La différence entre les données simulées et les données mesurées a montré l'existence d'un fort biais qui dépend de l'angle d'incidence. L'inadéquation entre le modèle IEM et le signal radar est supposée être liée à l'incertitude des mesures de la longueur de corrélation, et/ou au modèle lui-même. Une calibration empirique du modèle IEM basée sur cette large base de données expérimentale a ensuite été proposée. Cette calibration avait pour but de permettre la bonne adéquation entre les données simulées par le modèle IEM et les données fournies par le radar. L'approche de calibration consistait à remplacer la longueur de corrélation mesurée par un paramètre de calibration (Lopt) pour que les simulations du modèle soient en bon accord avec les mesures radar. Le paramètre Lopt intègre la vraie valeur de la longueur de corrélation ainsi que les imperfections du modèle IEM. Les résultats ont montré que le paramètre de calibration est dépendant de la rugosité de surface et des paramètres instrumentaux (angle d'incidence, polarisation et longueur d'onde). Ces études ont permis de conclure que le modèle IEM ne décrit pas proprement la dépendance angulaire. La calibration proposée a permis d'une part d'améliorer les simulations IEM et d'autre part de réduire les paramètres qui

caractérisent le sol à l'intérieur du modèle IEM ; on passe de trois paramètres (rms, L, m_v) à deux paramètres (rms et m_v).

Les objectifs de ce chapitre sont de :

1- tester le modèle IEM en comparant le coefficient de rétrodiffusion mesuré à partir des images ASAR et celui estimé par le modèle IEM.

2- valider la robustesse de la calibration empirique proposée par Baghdadi et al. (2004) en comparant le coefficient de rétrodiffusion mesuré à partir des images ASAR et celui estimé par le modèle IEM calibré.

3- généraliser le paramètre de calibration, qui dépend de la rugosité de surface, de l'angle d'incidence (20° à 50°), et de la polarisation (HH et VV). Seules les polarisations HH et VV seront utilisées.

4.4 Présentation du modèle IEM

Pour des sols nus en milieu agricole, l'expression du coefficient de rétrodiffusion du modèle IEM est donnée par Fung and Chen (1992) :

$$\begin{aligned}\sigma^{\circ}_{pp} &= \frac{k^2}{2}\left|f_{pp}\right|^2 e^{-4rms^2k^2\cos^2\theta}\sum_{n=1}^{+\infty}\frac{(4rms^2k^2\cos^2\theta)^n}{n!}W^{(n)}(2k\sin\theta,0)\\ &+\frac{k^2}{2}Re(f_{pp}^{*}F_{pp})\,e^{-3rms^2k^2\cos^2\theta}\sum_{n=1}^{+\infty}\frac{(4rms^2k^2\cos^2\theta)^n}{n!}W^{(n)}(2k\sin\theta,0)\\ &+\frac{k^2}{8}\left|F_{pp}\right|^2 e^{-2rms^2k^2\cos^2\theta}\sum_{n=1}^{+\infty}\frac{(rms^2k^2\cos^2\theta)^n}{n!}W^{(n)}(2k\sin\theta,0)\end{aligned} \quad (26)$$

avec :

$$f_{hh} = \frac{-2R_h}{\cos\theta} \quad (27)$$

$$f_{vv} = \frac{2R_v}{\cos\theta} \quad (28)$$

$$F_{hh} = 2\frac{\sin^2\theta}{\cos\theta}\left[4R_h - \left(1-\frac{1}{\varepsilon_r}\right)(1+R_h)^2\right] \quad (29)$$

$$F_{vv} = 2\frac{\sin^2\theta}{\cos\theta}\left[\left(1-\frac{\varepsilon_r\cos^2\theta}{\mu_r\varepsilon_r-\sin^2\theta}\right)(1-R_v)^2+\left(1-\frac{1}{\varepsilon_r}\right)(1+R_v)^2\right] \quad (30)$$

$R_h = \dfrac{\cos\theta-\sqrt{\varepsilon_r\left(1-\sin^2\theta\right)}}{\cos\theta+\sqrt{\varepsilon_r\left(1-\sin^2\theta\right)}}$: coefficient de Fresnel pour la polarisation horizontale

$R_v = \dfrac{\cos\theta-\sqrt{\dfrac{1}{\varepsilon_r}\left(1-\sin^2\theta\right)}}{\cos\theta+\sqrt{\dfrac{1}{\varepsilon_r}\left(1-\sin^2\theta\right)}}$: coefficient de Fresnel pour la polarisation verticale

$$W^n(a,b) = \frac{1}{2\pi}\iint \rho^n(x,y)\,e^{-i(ax+by)}dxdy \quad (31)$$

ε_r : constante diélectrique

μ_r : permittivité

θ : angle d'incidence

k : nombre d'onde

rms : écart type des hauteurs de la surface

pp : polarisation de l'onde incidente et de l'onde rétrodiffusée = HH ou VV ; H pour horizontale et V pour verticale

Re : partie réelle d'un nombre complexe

f_{pp}^* : le conjugué du nombre complexe f_{pp}

$\rho(x,y)$ est la fonction d'autocorrélation de la surface. Elle a une forme exponentielle dans le cas des surfaces à faible rugosité et gaussienne pour des surfaces aux fortes rugosités. Une fonction d'autocorrélation de type fractale a été proposée par Zribi (1998) pour une meilleure caractérisation de la fonction d'autocorrélation expérimentale des sols nus en milieu agricole.

La figure 40 illustre les paramètres d'entrée du modèle IEM nécessaires à la simulation du coefficient de rétrodiffusion (σ^0) pour une parcelle donnée. De cette

manière, une valeur de σ^0 simulé est obtenue pour chacune des parcelles et pour chaque configuration radar.

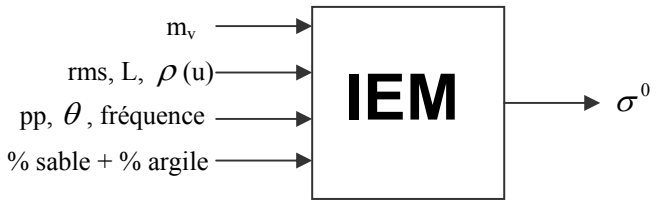


Figure 40 : Paramètres d'entrée du modèle IEM. m_v : humidité, rms : écart type, L : longueur de corrélation, ρ (u) : fonction d'autocorrélation, pp : polarisation HH ou VV, θ : angle d'incidence, σ^0 : coefficient de rétrodiffusion.

4.5 Comportement du modèle IEM

4.5.1 Comparaison entre données mesurées et données simulées

Le modèle de rétrodiffusion IEM permet de simuler, pour une configuration radar donnée, le coefficient de rétrodiffusion (σ^0) d'une surface à partir de ses caractéristiques physiques. Des simulations de σ^0 ont été faites à partir de la base de données ASAR (tabl. 6, chapitre 3). Les simulations ont été réalisées en utilisant la fonction d'autocorrélation fractale (Zribi, 1998). En effet, Baghdadi et al. (2004) ont montré que cette fonction donnait les meilleurs résultats du modèle IEM. Ensuite, nous avons comparé les σ^0 simulés à partir d'IEM et ceux mesurés à partir des images ASAR (fig. 41).

Le tableau 10 contient les paramètres statistiques nécessaires à l'évaluation de la qualité des simulations IEM : la moyenne et l'écart type de la différence entre σ^0 simulés par IEM et σ^0 mesurés par le capteur ASAR.

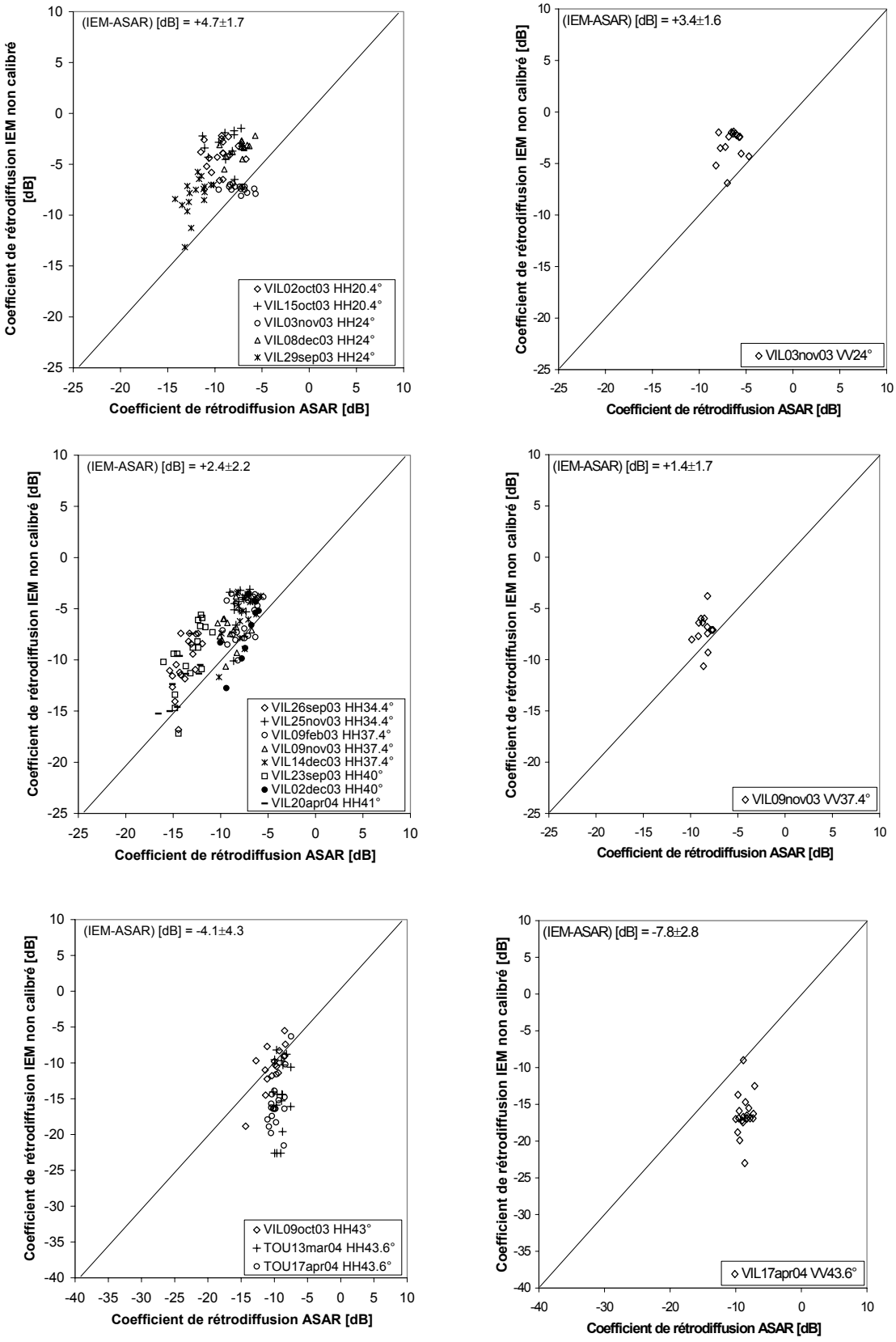


Figure 41 : Comparaison entre le coefficient de rétrodiffusion simulé à partir du modèle IEM et celui mesuré à partir des images ASAR. La fonction d'autocorrélation utilisée est de type fractale. VIL : Villamblain et TOU : Touch.

HH-20.4°/ 24°		HH-34.4°/ 37.4°/ 40°/41°		HH-43°/ 43.6°		VV-24°		VV-37.4°		VV-43.6°	
M (IEM- ASAR)	SD	M (IEM- ASAR)	SD	M (IEM- ASAR)	SD	M (IEM- ASAR)	SD	M (IEM- ASAR)	SD	M (IEM- ASAR)	SD
4.7	1.7	2.4	2.2	-4.1	4.3	3.4	1.6	1.4	1.7	-7.8	2.8

Tableau 10 : Résultats des simulations du coefficient de rétrodiffusion. Le modèle IEM est appliqué à toute la base de données ASAR avec la fonction d'autocorrélation fractale. M : la moyenne de la différence entre IEM et ASAR, SD : l'écart type. Les valeurs sont en dB.

Les résultats obtenus montrent que le biais varie entre 4.7 dB pour HH-20.4°/ 24° et –4.1 dB pour HH-43°/43.6°, et entre 3.4 dB pour VV-24° et –7.8 dB pour VV-43.6°. Le modèle IEM sur-estime le coefficient de rétrodiffusion pour les incidences entre 20.4° et 41° et le sous-estime pour les incidences entre 43° et 43.6° pour les deux polarisations HH et VV.

L'écart type de la différence entre les σ^0 simulés et les σ^0 mesurés s'avère plus élevé pour la polarisation HH que pour la polarisation VV. A titre d'exemple, l'écart type est de 4.3 dB pour HH-43°/43.6° et de 2.8 dB pour VV-43.6°. L'écart type des erreurs augmente avec l'augmentation de l'angle d'incidence : on passe de 1.7 dB pour HH-20.4°/24° à 4.3 dB pour HH-43°/43.6°, et de 1.6 dB pour VV-24° à 2.8 dB pour VV-43.6°.

A partir des résultats obtenus (moyenne et écart type, tab.10), on constate que le modèle IEM fournit des résultats très éloignés des données radar. Le coefficient de rétrodiffusion simulé par le modèle est différent de celui mesuré par le radar quelle que soit la configuration radar. Ce résultat montre que le modèle IEM présente des défauts qui induisent une inadéquation manifeste avec la réalité. Le paragraphe suivant présente la calibration semi-empirique du modèle IEM proposée par Baghdadi et al. (2004) en replaçant la longueur de corrélation mesurée par un paramètre de calibration optimal dans le but d'obtenir une meilleure adéquation entre le modèle et les données radar.

4.6 Calibration empirique du modèle IEM

Il existe plusieurs hypothèses pour expliquer la divergence entre le modèle IEM et les données ASAR. L'inadéquation constatée pourrait être directement liée à l'incertitude des mesures de la longueur de corrélation et/ou au modèle lui-même (Baghdadi et al., 2002b et 2004). Les autres paramètres d'entrée du modèle IEM comme par exemple le *rms*, l'humidité du sol et l'angle d'incidence sont des paramètres relativement précis.

La figure 42 représente le comportement du modèle IEM en fonction de la longueur de corrélation pour une parcelle donnée. Cette figure montre que pour un coefficient de rétrodiffusion mesuré par le radar, deux solutions sont possibles pour le paramètre L (Lopt1 et Lopt2) qui garantissent au modèle IEM une bonne adéquation avec le σ^0 radar. Ces paramètres de calibration dépendent de la rugosité de surface, de l'angle d'incidence, de la polarisation et de la fréquence radar. Baghdadi et al. (2004) ont constaté deux tendances pour le paramètre Lopt1 : la première correspond aux faibles valeurs de rms et se caractérise par Lopt1 constant. La seconde tendance qui est définie pour des rms plus élevées peut être décrite par un comportement de type puissance pour les trois fonctions d'autocorrélation testées (exponentielle, gaussienne, fractale) :

$$\text{Lopt1}(\text{rms},\theta,\text{pp}) = \alpha\ \text{rms}^{\beta} \qquad (32)$$

Concernant le paramètre Lopt2, Baghdadi et al. (2004) ont constaté une seule tendance avec rms quelque soit la configuration radar et la forme de la fonction d'autocorrélation. Cette tendance est décrite par un comportement de type puissance pour les deux fonctions d'autocorrélation exponentielle et fractale :

$$\text{Lopt2}(\text{rms},\theta,\text{pp}) = \alpha\ \text{rms}^{\beta} \qquad (33)$$

et par un comportement linéaire pour la fonction d'autocorrélation gaussienne :

$$\text{Lopt2} = \alpha.\text{rms}+\beta \qquad (34)$$

Cependant, Baghdadi et al. (2004) ont trouvé que le Lopt2 (la valeur la plus élevée) permet un meilleur comportement physique du coefficient de rétrodiffusion (σ^0) en

fonction de la rugosité (σ^0 augmente avec rms pour une humidité donnée). Les résultats obtenus par Baghdadi et al. (2004) montrent que le biais entre le modèle IEM et les données radar a fortement diminué après la calibration pour devenir inférieur à 1 dB quelle que soit la configuration radar. D'autre part, l'écart type des erreurs observé avant calibration a été considérablement réduit avec la version d'IEM calibré. Les résultats obtenus avec la fonction de corrélation gaussienne apparaissent légèrement moins bons que ceux issus des fonctions de corrélation exponentielle et fractale. Le tableau 11 contient les coefficients α et β du paramètre Lopt2 obtenus pour des configurations radar en bande C dans l'étude de Baghdadi et al. (2004) en utilisant la fonction d'autocorrélation fractale.

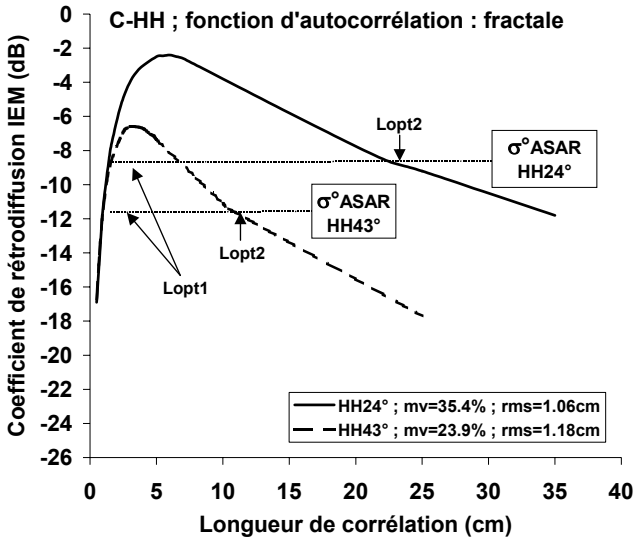


Figure 42 : Coefficient de rétrodiffusion simulé par le modèle IEM en fonction de la longueur de corrélation.

Configurations radar (bande C)	α	β
HH-21°	33.53	1.3605
HH-24°/25°/26°	16.78	1.4533
HH-35°/39°/40°	10.62	1.3955
HH-45°/47°/47.5°/47.7°	7.98	1.4150
VV-23°/24°	16.79	1.2525

Tableau 11 : Les coefficients α et β de la relation entre le paramètre de calibration (Lopt2) et le rms d'après Baghdadi et al. (2004) (en bande C) : Lopt2 (rms,θ,pp) = α rms$^{\beta}$. θ est l'angle d'incidence, et pp la polarisation.

La calibration semi-empirique proposée par Baghdadi et al. (2004) devrait être extrapolable à des bases de données non utilisées dans le processus de calibration.

4.7 Validation du modèle IEM

Afin d'évaluer la robustesse de la calibration du modèle IEM proposée par Baghdadi et al. (2004), seules les images ASAR ayant les mêmes configurations radar ou un angle d'incidence peu différent ont été utilisées (tabl. 12). Rappelons que la base de données ASAR n'a pas été utilisée dans la phase de calibration. Des simulations ont été effectuées, pour chaque configuration radar, en utilisant le modèle IEM calibré par Baghdadi et al. (2004). La longueur de corrélation mesurée a été remplacée par le paramètre de calibration Lopt2 (tab. 11). Les résultats des simulations sont représentés en figure 43.

ASAR (Touch et Villamblain)	2003 et 2004	HH-20°,24°,34°,37°,40°,41°,43°,44° VV-24°,37°,44°
Baghdadi *et al.,* 2004	1994 à 1999	HH-21°,24°,25°,26°,35°,39°,40°,45°,47°,48° VV-23°,24°

Tableau 12 : Description des bases de données.

La moyenne et l'écart type de la différence entre σ^0 simulé par le modèle IEM et σ^0 mesuré avant et après la calibration de Baghdadi et al. (2004) sont présentés dans le tableau 13. La validation de la version calibrée du modèle IEM n'a pas été réalisée pour les configurations VV-37.4° et VV-43.6° puisque les relations Lopt2 ne sont pas disponibles pour ces deux configurations radar.

	Avant calibration		*IEM calibré d'après Baghdadi et al., 2004*	
	(IEM-ASAR) [dB]		*(IEM-ASAR) [dB]*	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
HH-20.4°,24°	+4.7	1.7	-0.5	1.6
HH-34.4°,37.4°,40°,41°	+2.4	2.2	-1.3	2.0
HH-43°,43.6°	-4.1	4.3	-0.5	1.0
VV-24°	+3.4	1.6	-0.6	1.1
VV-37.4°	+1.4	1.7	-	-
VV-43.6°	-7.8	2.8	-	-

Tableau 13 : Comparaison entre les résultats obtenus avec le modèle IEM avant et après calibration de Baghdadi et al. (2004). Le paramètre de calibration est défini en tableau 11. Ces statistiques ont été obtenues à partir des données ASAR. La fonction d'autocorrélation fractale a été utilisée.

Après calibration, le biais obtenu entre le modèle IEM et les données radar a fortement diminué pour devenir inférieur ou égal à 1.3 dB quelle que soit la configuration radar utilisée. A titre d'exemple, le biais passe de 4.7 dB à –0.5 dB pour HH-20.4°/24°, de 3.4 dB à –0.6 dB pour VV-24°, et de 2.4 dB à -1.3 dB pour HH-34.4°,37.4°,40°,41°.

L'écart type des erreurs observées avant calibration est du même ordre de grandeur que celui obtenu avec la version IEM calibré sauf pour les configurations HH-43°/43.6° où il a été considérablement réduit (1 dB après calibration contre 4.3 dB avant calibration). Pour les autres configurations, l'écart type des erreurs varie de 1.1 dB à 2.0 dB en utilisant le modèle calibré (cf. tab. 13).

En conclusion, ces résultats montrent que la calibration empirique proposée par Baghdadi et al. (2004) est robuste car elle permet un bon accord entre le coefficient de rétrodiffusion estimé par le modèle IEM et celui mesuré par ASAR. Rappelons que la base de données utilisée dans cette étude (ASAR) a été acquise sur des sites d'études différents de ceux pour lesquels le modèle IEM a été empiriquement calibré.

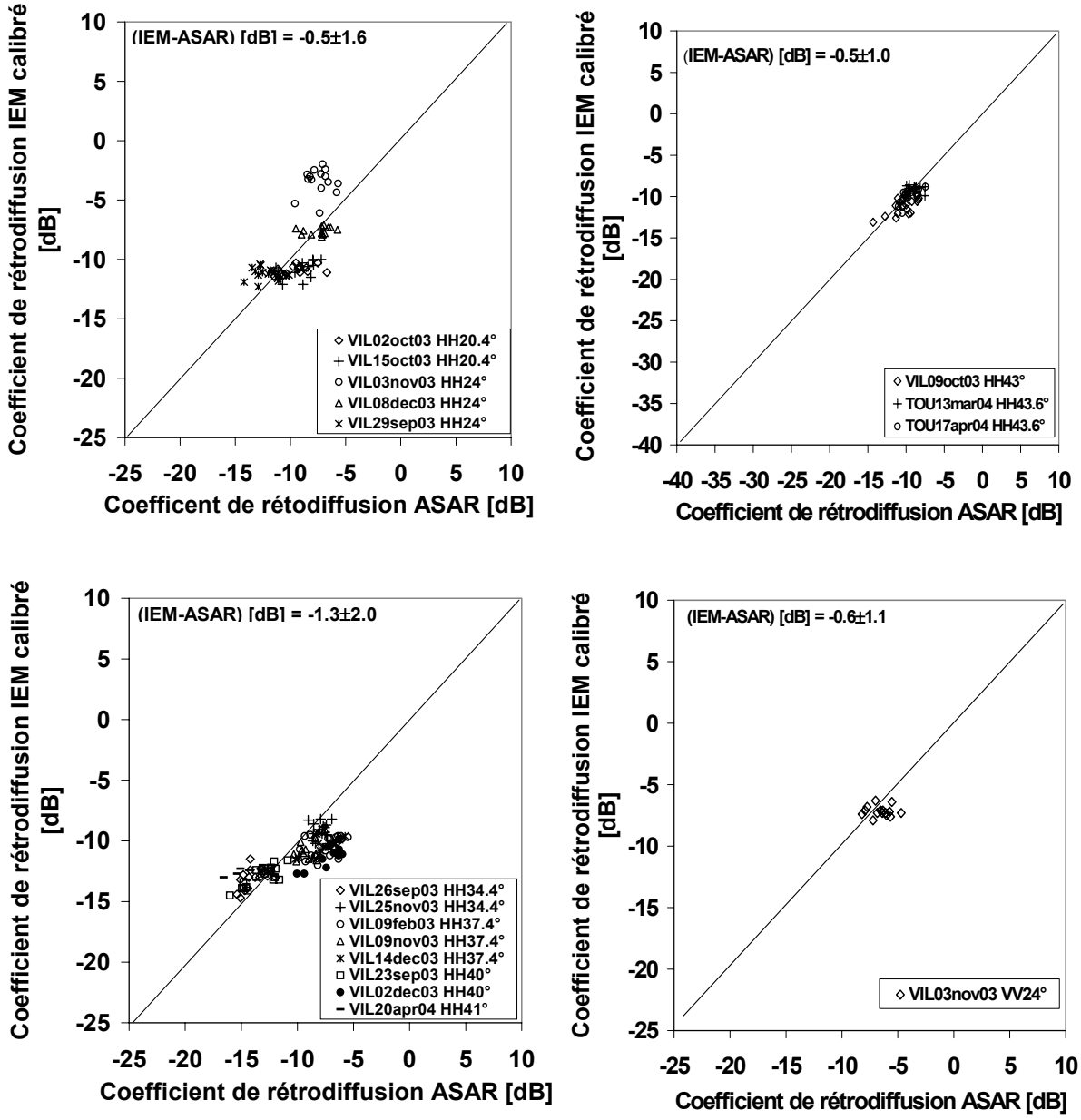


Figure 43 : Comparaison entre le coefficient de rétrodiffusion simulé à partir du modèle IEM calibré (en utilisant Lopt2 de Baghdadi et al., 2004) et celui mesuré à partir des images ASAR.

4.8 Généralisation du paramètre de calibration

L'objectif de ce paragraphe est d'étendre la calibration du modèle IEM pour qu'elle soit applicable à toutes les configurations radar en bande C, pour des incidences entre 20° et 50° et des polarisations HH et VV. L'utilisation des données ASAR acquises sur les deux sites d'étude de Villamblain et du Touch nous a permis d'affiner le paramètre de calibration pour des configurations radar déjà utilisées par Baghdadi et al. (2004), et de proposer un paramètre de calibration pour les nouvelles configurations.

Le paramètre de calibration Lopt2 a été calculé pour chaque configuration radar. La figure 44 montre la relation entre le paramètre de calibration et la rugosité de surface pour les différentes configurations radar en bande C. Cette figure montre les résultats obtenus par Baghdadi et al. (2004) et les nouveaux résultats obtenus à partir de la base de données ASAR. La figure 45 montre les fonctions Lopt2 pour toutes les configurations radar. On constate que le paramètre de calibration Lopt2 est fortement dépendant de l'angle d'incidence. Il diminue quand l'incidence augmente. De plus, le paramètre de calibration est très variable pour les faibles incidences. Par exemple, Lopt2 est très différent pour les configurations HH-20°/21° et HH-24°/25°/26°, et il est du même ordre de grandeur pour les configurations HH-34° à HH-41° (fig. 44a, b et c et fig. 45). Concernant l'effet de la polarisation, on remarque que le Lopt2 obtenu en polarisation VV est toujours inférieur à celui obtenu en polarisation HH quel que soit l'angle d'incidence (fig. 45).

Les nouvelles relations obtenues entre le paramètre de calibration Lopt2 et le rms (fig. 44) sont peu différentes de celles obtenues par Baghdadi et al. (2004) à l'exception de la configuration HH-20.4°/21° (cf. tab.11). Pour cette configuration, la relation entre Lopt2 et le rms a été calculée dans l'étude de Baghdadi et al. (2004) seulement à partir de parcelles ayant des rms supérieurs à 2.5 cm.

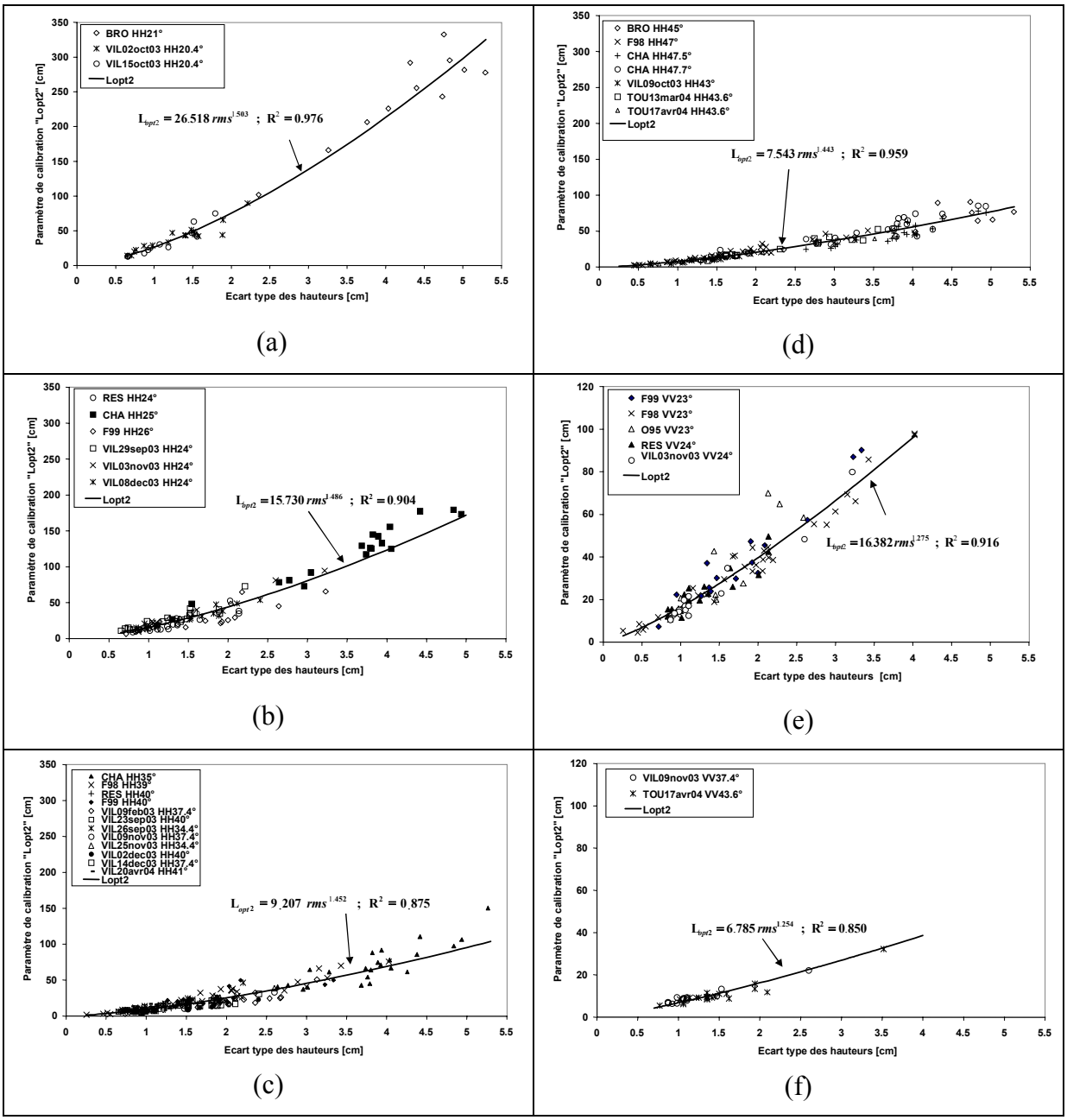


Figure 44 : Le paramètre de calibration Lopt2 en fonction du rms pour des configurations radar en bande C, polarisations HH et VV, angles d'incidence entre 20.4° et 47.7°. Les données ASAR (Villamblain et Touch) ont été utilisées pour compléter la base de données utilisées par Baghdadi et al. (2004).

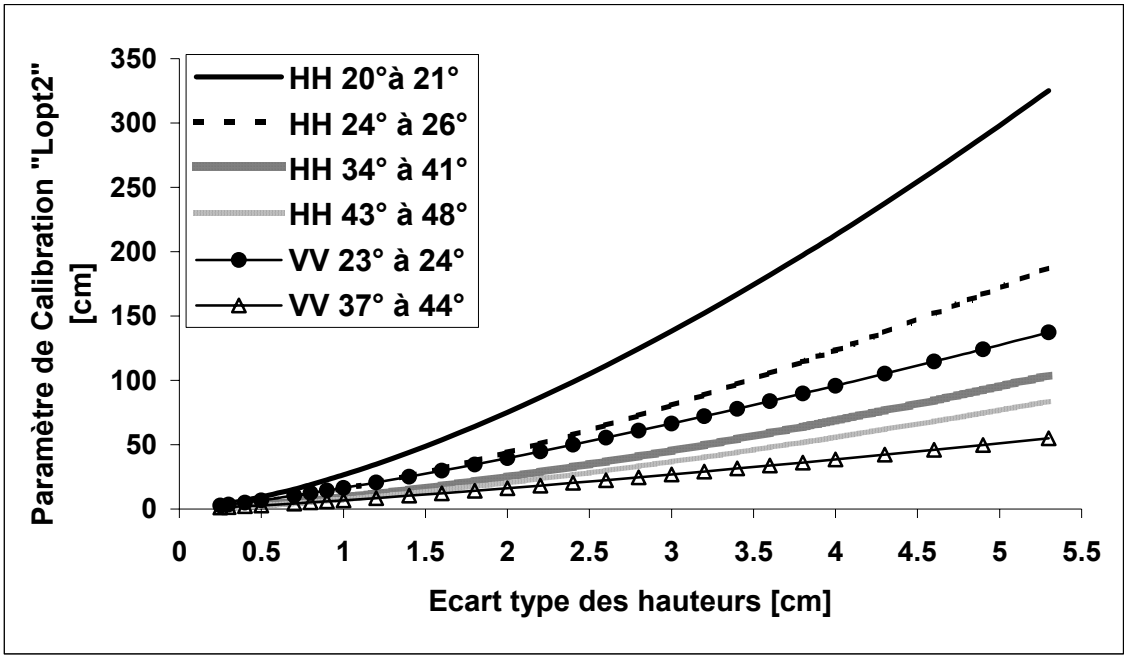


Figure 45 : Le paramètre de calibration Lopt2 de la figure 44 en fonction de rms pour des configurations radar en bande C, polarisations HH et VV, angles d'incidence entre 20.4° et 47.7°.

Ensuite, nous avons généralisé le paramètre de calibration en fonction du rms, de l'angle d'incidence et de la polarisation. Les paramètres de calibration illustrés en figure 44 nous ont permis de tracer les coefficients α et β de l'équation (33) en fonction de l'angle d'incidence pour les polarisations HH et VV (fig. 46). L'angle d'incidence correspondant à chaque configuration radar est égal à la moyenne des incidences groupées pour chaque configuration. A titre d'exemple, pour les configurations HH-24°/25°/26°, l'incidence moyenne est égale à 25°. La figure 46 montre que les coefficients α et β de l'équation (33) peuvent être décrits comme suit :

$$\alpha_{pp} = \delta(\sin\theta)^{u} \tag{35}$$

et

$$\beta_{pp} = \eta\theta + \xi \tag{36}$$

En appliquant l'équation (35), le paramètre de calibration a la forme suivante :

$$Lopt2\,(rms, \theta, pp) = \delta\,(\sin\theta)^{\mu}\ rms^{(\eta\theta+\xi)} \tag{37}$$

où pp est la polarisation (HH ou VV). A cause du manque de données en polarisation VV, nous avons supposé que les relations entre les coefficients α et β, et l'angle d'incidence, sont de la même forme pour les deux polarisations HH et VV. Les résultats montrent que les coefficients δ et ξ dépendent de la polarisation. Quant aux coefficients μ et η, ils sont indépendants de la polarisation : δ_{HH} = 4.026 (R^2 = 0.99), δ_{VV} = 3.289, $\mu_{HH} = \mu_{VV}$ = -1.744, $\eta_{HH} = \eta_{VV}$ = -0.0025, ξ_{HH} = 1.551 (R^2 = 0.98), et ξ_{VV} = 1.222 (cf. fig. 46).

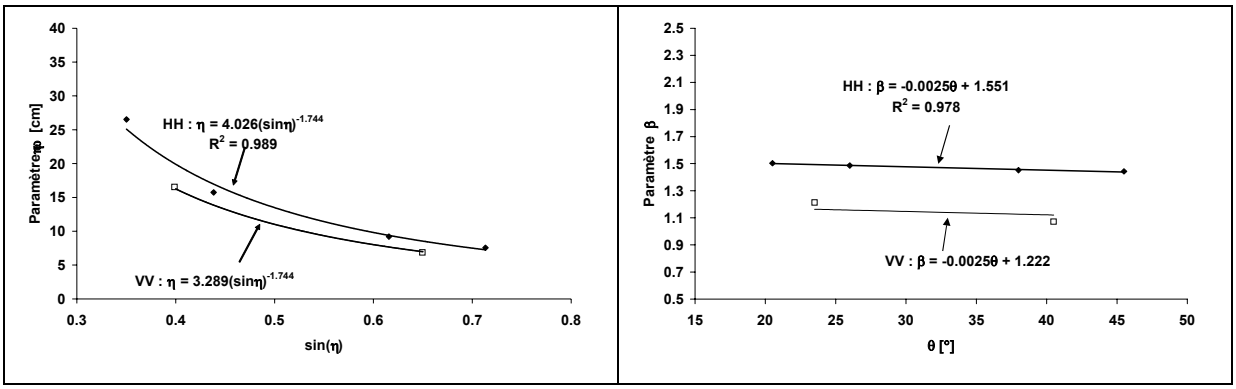


Figure 46 : Les coefficients α et β de la relation Lopt2 = αrms^{β} en fonction de l'angle d'incidence (θ) pour les polarisations HH et VV.

Pour estimer l'erreur due à la généralisation du paramètre de calibration, nous avons simulé le coefficient de rétrodiffusion à partir du modèle IEM calibré en utilisant le paramètre de calibration calculé à partir de l'équation (37). Les deux bases de données (ASAR et celle de Baghdadi et al. (2004)) ont été utilisées. La figure 47 présente les résultats obtenus par le modèle IEM avant la calibration de Baghdadi (en utilisant la longueur de corrélation mesurée) et celle après généralisation du paramètre de calibration (Lopt2). Ces résultats montrent que le biais et l'écart type des erreurs ont diminué pour toutes les configurations radar. Nous observons une faible différence entre les simulations obtenues par le modèle calibré et les données mesurées à partir des images radar (inférieur à 1 dB) avec un écart type de moins de 2 dB (tab. 14). La généralisation du paramètre de calibration permet donc des simulations adéquates du coefficient de rétrodiffusion radar.

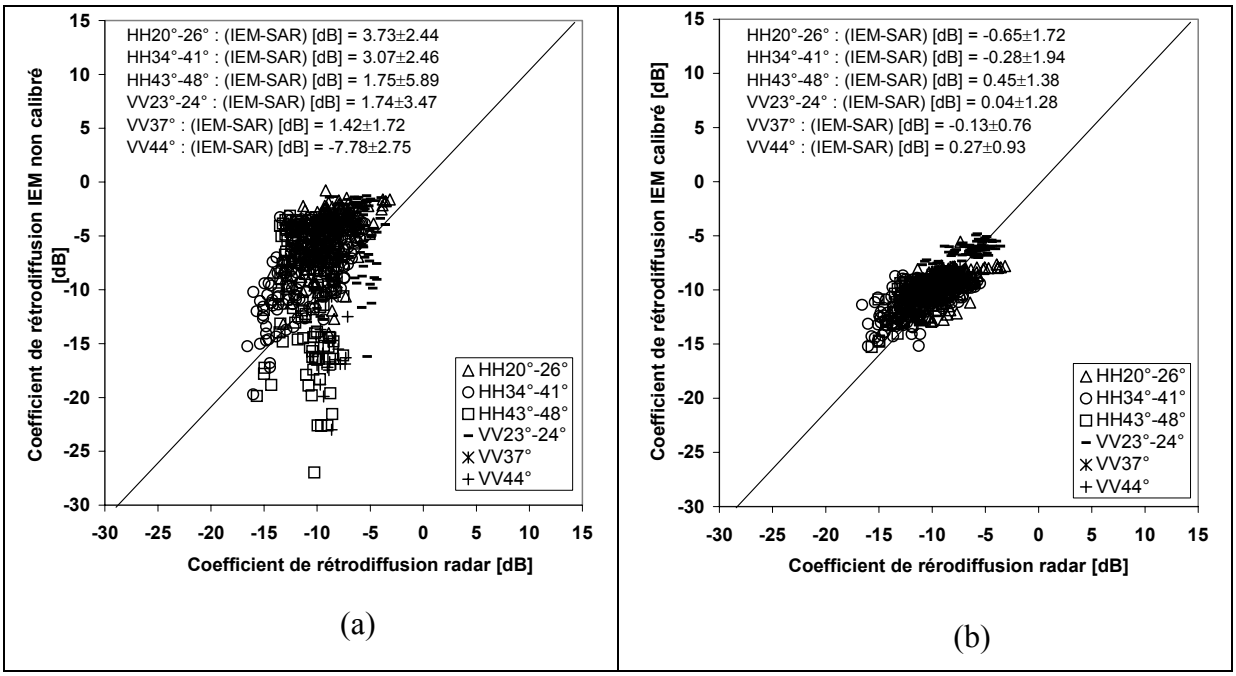


Figure 47 : Influence de la généralisation du paramètre de calibration Lopt2 sur les simulations IEM : (a) comparaison entre σ^0 IEM utilisant L mesurée et σ^0 radar, (b) comparaison entre σ^0 IEM utilisant Lopt2 donné par l'équation (37) et σ^0 radar. La base de données de Baghdadi et al. (2004) et celle d'ASAR ont été utilisées.

	Avant calibration		*IEM après généralisation du paramètre de calibration Lopt2*	
	(IEM-RADAR) [dB]		*(IEM-RADAR) [dB]*	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
HH-20°/26°	+3.73	2.44	-0.65	1.72
HH-34°/41°	+3.07	2.46	-0.28	1.94
HH-43°/48°	+1.75	5.89	0.45	1.38
VV-23°/24°	+1.74	3.47	0.04	1.28
VV-37°	+1.42	1.72	-0.13	0.76
VV-44°	-7.78	2.75	0.27	0.93

Tableau 14 : Comparaison entre les résultats obtenus avec le modèle IEM avant la calibration et après la généralisation du paramètre de calibration. Les données radar utilisées correspondent à la base utilisée par Baghdadi et al. (2004) ainsi qu'à celle acquise par le capteur ASAR.

4.9 Conclusion

La modélisation du signal radar passe nécessairement par une bonne description de la surface du sol et par un modèle de rétrodiffusion adéquat qui soit capable de reproduire un coefficient de rétrodiffusion similaire à celui mesuré par les capteurs radar. Le modèle qui a été utilisé au cours de cette étude est le modèle IEM en raison de son adaptation aux surfaces agricoles (larges gammes des rugosités). Cependant, le modèle IEM présente de défauts non négligeables puisqu'il ne restitue pas fidèlement le coefficient de rétrodiffusion mesuré par les capteurs radar. L'inadéquation observée peut être liée à l'incertitude des mesures de la longueur de corrélation et au modèle lui-même.

Pour corriger les imperfections de ce modèle, une calibration semi-empirique a été proposée par Baghdadi et al. (2004) en replaçant la longueur de corrélation (L) par un paramètre de calibration optimal (Lopt) pour obtenir une meilleure adéquation entre le modèle et les données radar. Le paramètre de calibration a été trouvé dépendant de la rugosité de surface, de l'angle d'incidence et de la polarisation. Cette calibration a été évaluée pour déterminer sa robustesse en utilisant les données obtenues à partir du capteur ASAR sur d'autres sites d'études. Les résultats montrent que cette calibration permet d'améliorer sensiblement le fonctionnement du modèle IEM quelle que soit la configuration radar utilisée (réduction du biais).

Avec cette méthode de calibration, les sols nus en zones agricoles sont caractérisés par deux paramètres de surface (*rms* et humidité de sol) au lieu de trois initialement (*rms*, humidité, et longueur de corrélation). L'utilisation d'une nouvelle base de données obtenue par le capteur ASAR et acquise sur des nouveaux sites d'étude a montré que le paramètre de calibration obtenu par Baghdadi et al. (2004) est robuste et stable. Cette nouvelle base de données nous a permis d'affiner les relations obtenues par Baghdadi et al. (2004) entre le paramètre de calibration et le *rms* et d'élargir le domaine d'utilisation de cette calibration à des nouvelles configurations radar en bande C.

Une généralisation du paramètre de calibration a été effectuée en utilisant l'ensemble des bases de données dans le but de rendre cette calibration du modèle IEM applicable aux données SAR en bande C, polarisations HH et VV et pour des

incidences entre 20° et 50°. Les résultats obtenus sont pertinents, ce qui permet d'envisager une utilisation opérationnelle de la version calibrée du modèle IEM. En effet, cette version calibrée d'IEM pourra ainsi être utilisée dans les processus d'inversion des données radar (ERS, RADARSAT, ASAR, etc.) pour extraire l'humidité et la rugosité de surface des parcelles de sols nus en milieu agricole.

Un article est en cours d'évaluation sur ce projet :

Baghdadi N., Holah N., and Zribi M., 2005. Calibration of the Integral Equation Model for SAR data in C-band and HH and VV polarizations. International Journal of Remote Sensing, in press.

Chapitre 5 : Estimation de l'humidité et de la rugosité du sol à partir des données ASAR

5.1 Estimation de l'humidité en utilisant des Modèles d'inversion empiriques du signal radar

5.1.1 Introduction

L'humidité et la rugosité du sol jouent un rôle important dans diverses applications comme par exemple en hydrologie, agronomie, agriculture, et dans la prédiction du risque (ruissellement, érosion par exemple). De nombreuses études ont été réalisées sur des sols nus en milieu agricole pour étudier le comportement du signal radar en fonction de l'humidité et de la rugosité de surface. Plusieurs études ont montré le potentiel des capteurs radar à retrouver l'humidité et la rugosité du sol (e.g. Ulaby et al., 1978 ; Le Toan, 1982 ; Dobson and Ulaby, 1986 ; Bruckler et al., 1988 ; Oh et al., 1992 ; Fung and Chen, 1992 ; Dubois et al., 1995 ; Quesney et al., 2000 ; Le Hégarat et al., 2002 ; Baghdadi et al., 2002c ; Zribi et al., 2002 ; Srivastava et al., 2003 ; Oh, 2004). Avec le lancement des satellites en bande C (5.3 GHz), comme ERS-1/2 (polarisation VV et incidence de 23°) et RADARSAT-1 (polarisation HH et incidence entre 20° et 50°), l'utilisation des données ROS pour retrouver les paramètres des surfaces est devenu commun. Le lancement du capteur ASAR sur le satellite ENVISAT (2002) devrait améliorer la possibilité de retrouver les paramètres de surface grâce à son mode multi-polarisation et sa gamme d'incidence qui varient entre 15° et 45°.

Pour inverser le signal radar en terme de rugosité et d'humidité, il est indispensable de disposer d'un modèle de rétrodiffusion capable de reproduire le signal radar réel quelles que soient la rugosité de surface et l'humidité du sol, ou de disposer d'une grande base de données expérimentales reliant le coefficient de rétrodiffusion aux paramètres du sol (rugosité, humidité,…) et aux paramètres instrumentaux du capteur (incidence, polarisation, longueur d'onde). Cependant, la fabrication d'une base de données expérimentales représentative de toutes les conditions physiques possibles du sol en utilisant différentes configurations radar est très difficile, ce qui rend l'utilisation des modèles physiques et empiriques très frèquentes dans les procédures d'inversion.

Les modèles de rétrodiffusion permettent de simuler, pour une configuration radar donnée, le coefficient de rétrodiffusion d'une surface à partir de ses caractéristiques physiques (Fung and Chen, 1992 ; Oh et al., 1992 ;1994 ; 2002 et 2004 ; Dubois et al., 1995). Ces modèles sont souvent utilisés pour l'estimation des paramètres de surface (humidité et rugosité). L'inversion de ces modèles est particulièrement intéressante car les paramètres physiques de la surface (humidité et rugosité) peuvent être retrouvés par ce procédé à partir d'images radar et en limitant les mesures de terrain.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser, à partir d'approches d'inversion empiriques du signal radar, la précision de l'estimation de l'humidité du sol à partir des images ASAR acquises avec différentes incidences et en polarisations HH et HV (cf. tab. 6). Ensuite, il s'agit d'étudier l'amélioration apportée sur l'estimation de l'humidité du sol en utilisant l'aspect multi-polarisation et multi-incidence. Ce travail permettra de retrouver la meilleure configuration radar pour une estimation optimale de l'humidité du sol. Nous avons utilisé dans ce chapitre la base de données ASAR qui a été détaillée dans la troisième chapitre (chapitre 3, tab. 6).

5.1.2 Modèles d'inversion empiriques du signal radar

5.1.2.1 Concept

Dans le cadre de cette thèse, seuls les modèles empiriques ont été utilisés pour retrouver l'humidité du sol. Pour retrouver l'humidité, il a été nécessaire d'établir des relations entre le coefficient de rétrodiffusion et l'humidité du sol sans distinction de la rugosité de surface. Des données ASAR (bande C) acquises en différentes configurations de polarisations (HH, HV) et d'angles d'incidence (20°-43°) ont été utilisées. La base de données collectée sur les deux sites d'étude de Villamblain et du Touch a été utilisée (cf. chapitre 3). Elle regroupe des mesures d'humidité, de rugosité et des coefficients de rétrodiffusion ASAR.

Les résultats du troisième chapitre ont montré que le coefficient de rétrodiffusion est plus sensible à l'humidité du sol en polarisation HH, à angles d'incidence faibles et intermédiaires (0.18 dB/% pour 20°-24°, 0.22 dB/% pour 34°-37° et 0.12 dB/% pour

40°-43°, cf. fig. 34). La sensibilité du rapport de polarisation HH/HV à l'humidité du sol diminue avec l'angle d'incidence. Le rapport HH/HV n'apporte pas d'amélioration sur la dynamique du signal par rapport aux coefficients de rétrodiffusion en polarisations HH et HV seules. Dans cette partie de la thèse, nous allons tester l'aspect multi-polarisation et multi-incidence d'ASAR pour une meilleure estimation de l'humidité du sol. Comme on ne peut pas disposer des images ASAR avec deux incidences simultanément, nous avons utilisé les images ASAR acquises à des angles d'incidence différents mais à deux dates très proches (inférieure à 10 jours) avec des conditions d'humidité et de rugosité qui ont très peu changé. Le tableau 15 représente les données ASAR disponibles pour la procédure d'inversion. Aucune correction n'a été effectuée sur le coefficient de rétrodiffusion pour tenir compte de la faible variation de l'humidité et de la rugosité du sol entre les deux dates d'acquisitions. Seules, les parcelles témoins qui ont une variation en teneur en eau volumique entre les deux dates d'acquisitions inférieure à 5% ont été utilisées.

Incidence	Polarisation	Nombre de couplet ($\sigma°$, *mv*)
20°-24°	HH	92
20°-24°	HV	56
34°-37°	HH	98
34°-37°	HV	61
40°-43°	HH	103
40°-43°	HV	70

Tableau 15 : Données ASAR disponibles pour la procédure d'inversion.

Des approches semi-empiriques seront utilisées pour estimer l'humidité du sol à partir du coefficient de rétrodiffusion (σ^0). Quatre cas ont été utilisés dans le cadre de cette étude :

- Images ASAR acquises à une date, avec une seule polarisation (HH ou HV), et une seule incidence (20°-24° ou 34°-37° ou 40°-43°).
- Images ASAR acquises à une date, avec deux polarisations (HH et HV), et une seule incidence (20°-24°ou 34°-37°ou 40°-43°).
- Images ASAR acquises à deux dates, avec une polarisation (HH ou HV), et deux incidences (20°-24°, 34°-37°, 40°-43°).

- Images ASAR acquises à deux dates, avec deux polarisations (HH et HV), et deux incidences (20°-24°et 40°-43°).

Nous avons divisé la base de données ASAR en deux parties égales : une partie pour la calibration et une partie utilisée pour la validation. Tout d'abord, des relations empiriques entre le coefficient de rétrodiffusion et l'humidité du sol ont été établies (phase de calibration). Ensuite, la procédure d'inversion a été appliquée pour estimer l'humidité du sol. La validité de cette procédure a été vérifiée en comparant les résultats de la procédure d'inversion (humidité estimée) aux données mesurées (humidité mesurée). Dans les deux derniers cas (aspect multi-incidence et multi-polarisation), la base de données était restreinte. De ce fait, nous avons utilisé toute la base de données dans la phase de calibration.

Le coefficient de rétrodiffusion (en décibels) pour un sol nu peut s'écrire de la façon suivante (cf. fig. 34) :

$$\sigma^0_{dB} = \alpha\, mv + \beta \tag{38}$$

Cette relation simple ignore la rugosité de surface. Pour une fréquence radar donnée, le coefficient α est dépendant de la polarisation et de l'angle d'incidence. La polarisation HV a une valeur de α plus petite que celle en polarisation HH. Le coefficient β est contrôlé par la polarisation, l'angle d'incidence et la rugosité. Les résultats précédents nous ont montré que β était plus élevé pour la polarisation HH que pour la polarisation HV.

Pour prendre en considération la rugosité de surface, le coefficient de rétrodiffusion σ^0 (en décibels) s'écrit comme la somme de deux fonctions : la première décrit la dépendance du signal radar à l'humidité du sol (linéaire, f), et la deuxième met en évidence la dépendance entre le signal radar et la rugosité de surface (exponentielle, g) :

$$\sigma^0_{dB} = f(mv,\theta,mn,\lambda)_{dB} + g(rms,\theta,mn,\lambda)_{dB} = \alpha\, mv + be^{-krms} + \gamma \tag{39}$$

Où θ est l'angle d'incidence, mn la polarisation, et k le nombre d'onde ($\cong$ 1.11 cm^{-1} pour ASAR).

5.1.2.2 Modèles empiriques pour l'estimation de l'humidité

Pour les quatre configurations ASAR à étudier, nous avons défini des modèles de rétrodiffusion empiriques dans le but d'estimer l'humidité du sol :

- Cas 1 (une polarisation et une incidence) : A partir de l'équation (38), une relation linéaire a été observée entre le signal radar et l'humidité du sol. Le modèle peut s'écrire de la façon suivante :

$$mv = a\sigma^0_{mn}(\theta) + c \tag{40}$$

mn = HH ou HV, et θ (l'angle d'incidence) = 20°-24° ou 34°-37° ou 40°-43°.

A partir des mesures d'humidité (mv) et des données ASAR (σ^0), nous avons retrouvés les paramètres a et c.

- Cas 2 (2 polarisations et une incidence) : A partir de l'équation (39), on peut tester l'aspect multi-polarisation d'ASAR comme suit (on remplace le e^{-krms} de $\sigma^0{}_{HH}$ dans l'équation de $\sigma^0{}_{HV}$) :

$$mv = a\sigma^0_{HH}(\theta) + c\sigma^0_{HV}(\theta) + d \tag{41}$$

A partir des mesures d'humidité (mv) et des données ASAR ($\sigma^0{}_{HH}$ et $\sigma^0{}_{HV}$), les paramètres a, c et d peuvent être retrouvés.

En utilisant le rapport de polarisation HH/HV, l'équation s'écrit comme suit (à partir de l'équation (39)) :

$$mv = a\sigma^0{}_{mn}(\theta) + c\left(\frac{\sigma^0_{HH}(\theta)}{\sigma^0_{HV}(\theta)}\right) + d \tag{42}$$

mn = HH ou HV, et θ = 20°-24° ou 34°-37° ou 40°-43°.

- Cas 3 (une polarisation et 2 incidences) : Un modèle basé sur l'utilisation de l'aspect multi-incidence (une faible : 20°-24° et une forte : 40°-43°) avec une seule polarisation (HH ou HV) a été proposé. A partir de l'équation (39) on peut écrire l'équation suivante (on remplace le e^{-krms} de σ^0 (θ_{faible}) dans l'équation de $\sigma^0(\theta_{forte})$) :

$$\langle mv \rangle = a\sigma^0_{mn}(\theta_{faible}) + c\sigma^0_{mn}(\theta_{forte}) + d \quad (43)$$

où $\langle mv \rangle$ est l'humidité moyenne (car les deux images sont acquises à deux dates différentes mais avec des conditions stables), mn = HH ou HV, θ_{faible} = 20°-24°, et θ_{forte} = 34°-37° ou 40°-43°.

Plusieurs études ont utilisé le rapport $\sigma^0_{HH}(20°)/\sigma^0_{HH}(40°)$ dans la formulation de la procédure d'inversion à cause de la sensibilité maximale de ce rapport à la rugosité de surface (e.g. Zribi et al., 2002 ; Srivastava et al., 2003) :

$$\langle mv \rangle = a\sigma^0_{mn}(\theta_{faible} \ or \ \theta_{forte}) + c\left(\frac{\sigma^0_{mn}(\theta_{faible})}{\sigma^0_{mn}(\theta_{forte})}\right)_{dB} + d \quad (44)$$

mn = HH ou HV, θ_{faible} = 20°-24°, et θ_{forte} = 34°-37° ou 40°-43°.

Cette dernière équation a été obtenue en combinant le σ° décrit par l'équation 39, et le rapport des σ^0 à faible et à forte incidence qui suit une fonction exponentielle avec la rugosité de surface (Zribi et al., 2002 ; Srivastava et al., 2003).

- Cas 4 (2 polarisations et 2 incidences) : Pour tester l'aspect multi-polarisation (HH et HV) et multi-incidence (une faible : 20°-24° et une forte : 40°-43°), on résoud le système d'équations établi à partir de l'équation (39) :

$$\begin{cases} \sigma^0_{HH}(20°) = a_1\, mv + c_1 e^{-krms} + d_1 \\ \sigma^0_{HV}(20°) = a_2\, mv + c_2 e^{-krms} + d_2 \\ \sigma^0_{HH}(40°) = a_3\, mv + c_3 e^{-krms} + d_3 \\ \sigma^0_{HV}(40°) = a_4\, mv + c_4 e^{-krms} + d_4 \end{cases} \quad (45)$$

Ce système d'équations permet d'estimer l'humidité moyenne des deux dates d'acquisition ASAR.

Les différentes relations de calibration définies par les équations 40 à 45 ont été établies à partir de la base de données de calibration en utilisant la méthode des moindres carrés (tab. 16).

Données ASAR	Modèles de régression
20°-24°,HH	$mv=+3.34\sigma°+51.21$
34°-37°,HH	$mv=+2.80\sigma°+50.40$
40°-43°,HH	$mv=+2.14\sigma°+53.47$
20°-24°,HV	Faible dépendance entre $\sigma°_{HV}$ et mv
34°-37°,HV	$mv=+4.33\sigma°+98.79$
40°-43°,HV	$mv=+2.77\sigma°+80.30$
20°-24°,HH,HV	$mv=+3.46\sigma°_{HH}-1.27\sigma°_{HV}+25.24$
34°-37°,HH,HV	$mv=+0.74\sigma°_{HH}+3.42\sigma°_{HV}+89.95$
40°-43°,HH,HV	$mv=-0.10\sigma°_{HH}+2.88\sigma°_{HV}+81.10$
20°-24°,HH/HV	$mv=+3.27(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})-27.77$
34°-37°,HH/HV	$mv=+3.36(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})-11.44$
40°-43°,HH/HV	Faible dépendance entre $\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV}$ et mv
20°-24°,HH,HH/HV	$mv=+1.85\sigma°_{HH}+1.64(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})+12.74$
20°-24°,HV,HH/HV	$mv=+0.87\sigma°_{HV}+3.33(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})-10.93$
34°-37°,HH,HH/HV	$mv=+4.31\sigma°_{HH}-1.93(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})+83.81$
34°-37°,HV,HH/HV	$mv=+4.45\sigma°_{HV}-0.22(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})+103.05$
40°-43°,HH,HH/HV	$mv=+2.84\sigma°_{HH}-2.78(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})+84.37$
40°-43°,HV,HH/HV	$mv=+2.79\sigma°_{HV}-0.36(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})+83.66$
20°-24°,34°-37°,HH	$mv=+14.96-0.45\sigma°_{HH-20}-1.21\sigma°_{HH-37}$ $mv=+11.40-1.83\sigma°_{HH-20}+1.42(\sigma°_{HH-20}/\sigma°_{HH-37})$ $mv=+16.85-1.42\sigma°_{HH-37}-0.15(\sigma°_{HH-20}/\sigma°_{HH-37})$
20°-24°,40°-43°,HH	$mv=+51.57+2.37\sigma°_{HH-20}+0.82\sigma°_{HH-40}$ $mv=+53.09+3.20\sigma°_{HH-20}-0.91(\sigma°_{HH-20}/\sigma°_{HH-40})$ $mv=+46.78+3.04\sigma°_{HH-40}+2.31(\sigma°_{HH-20}/\sigma°_{HH-40})$
20°-24°,40°-43°,HV	$mv=+2.26-1.05\sigma°_{HV-20}+0.26\sigma°_{HV-40}$ $mv=+11.89-0.33\sigma°_{HV-20}-0.05(\sigma°_{HV-20}/\sigma°_{HV-40})$ $mv=+22.94+0.22\sigma°_{HV-40}+0.05(\sigma°_{HV-20}/\sigma°_{HV-40})$
20°-24°,40°-43°,HH,HV	$\begin{cases}\sigma^0_{HH}(20°)=0.18\,mv-4.04e^{-krms}-11.68\\ \sigma^0_{HV}(20°)=0.04\,mv-6.32e^{-krms}-19.50\\ \sigma^0_{HH}(40°)=0.11\,mv-7.55e^{-krms}-12.21\\ \sigma^0_{HV}(40°)=0.11\,mv-5.03e^{-krms}-20.46\end{cases}$

Tableau 16 : Modèles de régression entre le coefficients de rétrodiffusion des images ASAR et la teneur en eau volumique du sol. Les coefficients de rétrodiffusion et les rapports de polarisations sont en dB.

5.1.3 Résultats et discussions

Le paramètre d'entrée de la procédure d'inversion est le coefficient de rétrodiffusion (σ^0) calculé pour chaque parcelle. La précision de l'inversion du signal radar pour estimer l'humidité a été évaluée en utilisant des indices statistiques (Willmott, 1992) : biais (la moyenne de la différence), écart type, MAE (Mean Absolute Error, erreur absolue moyenne), et RMSE (Root Mean Square Error, erreur quadratique moyenne). Les deux derniers paramètres sont définis comme suit :

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|Pi - Oi\right| \tag{46}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Pi - Oi)^2} \tag{47}$$

Où P_i représente l'humidité estimée, O_i l'humidité mesurée et N le nombre de données. MAE et RMSE sont exprimés en (%).

Le tableau 17 représente les statistiques de l'estimation de l'humidité du sol *(mv)* pour les quatre cas utilisés dans le cadre de cette étude. Rappelant que pour les deux derniers cas (deux dates avec une polarisation et deux incidences, et deux dates avec deux polarisations et deux incidences), peu de données étaient disponibles et de ce fait, nous avons utilisé toute la base de données dans la phase de calibration.

Les résultats obtenus dans la phase de validation pour le cas d'une polarisation et d'une incidence, montre un RMSE sur l'estimation de l'humidité d'environ 6% pour HH et pour les incidences 20°-24° et 34°-37°. Pour la polarisation HV avec une incidence de 34°-37°, les résultats sont légèrement moins bons (RMSE d'environ 7%). Par contre, les polarisations HH et HV à forts angles d'incidence (40°-43°) donnent des mauvais résultats avec un RMSE d'environ 9% entre l'humidité estimée et celle mesurée. Cette valeur élevée du RMSE (9%) est due à la forte influence de la rugosité de surface sur le signal radar à forts angles d'incidence. Il est donc préférable d'utiliser les images radar à faibles et moyennes incidences pour estimer l'humidité du sol.

Pour le cas des données ASAR acquises en une date avec deux polarisations et une incidence, les résultats montrent que le RMSE est de l'ordre de 6% pour les incidences de 20°-24° et 34°-37° et de l'ordre de 9% pour les incidences 40°-43°. On peut conclure que l'utilisation de l'aspect multi-polarisation avec deux polarisations n'a pas amélioré les résultats en comparaison au cas où une seule polarisation est utilisée. En effet, l'amélioration est inférieure à 1%.

L'estimation de l'humidité a été améliorée d'environ 2% en utilisant l'aspect multi-incidence. Le RMSE est de l'ordre de 3.5% dans le cas où sont utilisées des images ASAR acquises avec deux incidences et une polarisation. Enfin, pour le cas où des images ASAR sont acquises avec deux incidences et deux polarisations, les résultats ne montrent aucune amélioration dans l'estimation de l'humidité en comparaison avec le cas précédent où une seule polarisation est utilisée. En effet, le RMSE est presque du même ordre de grandeur (environ 3.8%).

Données ASAR	La phase de calibration Teneur en eau volumique (*mv*)					La phase de validation Teneur en eau volumique (*mv*)				
	Nombre de points	Biais (%)	MAE (%)	Ecart type (%)	RMSE (%)	Nombre de points	Biais (%)	MAE (%)	Ecart type (%)	RMSE (%)
20°,HH	46	0	4.8	6.0	6.0	46	0.9	4.7	6.0	6.0
37°,HH	49	0	4.9	5.9	5.8	49	0.4	4.9	5.7	5.7
40°,HH	52	0	6.9	8.4	8.4	51	-0.2	8.3	9.7	9.6
20°,HV	28	ND	ND	ND	ND	28	ND	ND	ND	ND
37°,HV	31	0	4.5	5.5	5.4	30	-0.2	5.8	7.2	7.0
40°,HV	35	0.1	7.4	8.7	8.6	35	0.6	7.6	9.3	9.1
20°,HH,HV	28	0	3.5	4.6	4.5	28	1.3	4.1	5.5	5.5
37°,HH,HV	31	-0.3	4.5	5.4	5.4	30	-0.4	5.3	6.5	6.4
40°,HH,HV	35	0	7.4	8.7	8.6	35	0.5	7.5	9.2	9.1
20°,HH/HV	28	0	4.1	4.9	4.8	28	1.8	3.9	5.0	5.2
37°,HH/HV	31	0	7.5	9.3	9.2	30	0.5	5.9	7.7	7.6
40°,HH/HV	35	ND	ND	ND	ND	35	ND	ND	ND	ND
20°,HH,HH/HV	28	0	3.6	4.5	4.5	28	1.3	4.0	5.2	5.3
20°,HV,HH/HV	28	0	3.9	4.8	4.7	28	1.5	4.0	5.0	5.2
37°,HH,HH/HV	31	-0.1	4.5	5.4	5.3	30	0.3	4.6	5.6	5.5
37°,HV,HH/HV	31	0	4.5	5.5	5.4	30	-0.2	5.9	7.3	7.2
40°,HH,HH/HV	35	0	7.3	8.6	8.5	35	0.4	7.6	9.3	9.1
40°,HV,HH/HV	35	0	7.4	8.7	8.6	35	0.5	7.5	9.2	9.1
20°,37°,HH	19	0 0 0	3.0 2.9 3.0	3.7 3.6 3.7	3.6 3.5 3.6	NV	NV	NV	NV	NV
20°,40°,HH	21	0 0 0	3.7 3.7 3.9	4.4 4.3 4.5	4.3 4.2 4.4	NV	NV	NV	NV	NV
20°,40°,HV	18	0 0 0	2.8 2.9 3.0	3.9 3.8 3.8	3.7 3.7 3.7	NV	NV	NV	NV	NV
20°,40°,HH,HV	17	-0.4	3.4	3.9	3.8	NV	NV	NV	NV	NV

Tableau 17 : Statistiques sur l'estimation de l'humidité du sol *(mv)* en utilisant différentes configurations ASAR. "ND": pas de dépendance entre le coefficient de rétrodiffusion et l'humidité du sol. "NV": pas de données pour la phase de validation de la procédure d'inversion.

Les figures 48, 49 et 50 comparent la teneur en eau volumique estimée avec celle mesurée. Chaque point sur les figures représente l'humidité moyenne sur une parcelle témoin. Dans le cas d'une polarisation et d'une incidence (fig. 48a et 48b), les résultats montrent un bon accord entre l'humidité estimée à partir du modèle d'inversion et celle mesurée sur le terrain. Pour les petites et moyennes incidences, Le RMSE est d'environ 6%. A forte incidence, les résultats sont moins bons avec un RMSE d'environ 9.6% (fig. 48c). Ce mauvais résultat s'explique par la forte influence de la rugosité de surface sur le signal radar à forte incidence.

En polarisation HV (fig. 48d et 48e), la dispersion des points est plus importante qu'en polarisation HH. On peut conclure que la polarisation HH est meilleure que la polarisation HV pour l'estimation de l'humidité et qu'à petites et moyennes incidences, l'estimation de l'humidité est optimale avec un minimum d'influence de la rugosité de surface.

La figure 49 (une incidence et deux polarisations) montre que l'aspect multi-polarisation n'a pas amélioré sensiblement la précision sur l'estimation de l'humidité. Elle confirme l'intérêt des données ASAR à faible et moyenne incidences (20°-24° et 34°-37°) en comparaison avec les données à forte incidence (40°-43°).

La figure 50 (cas d'une polarisation et deux incidences, et de deux polarisations et deux incidences) montre un bon accord entre l'humidité estimée et celle mesurée. Le RMSE est d'environ 3.5% pour les deux cas. On peut dire que l'aspect multi-incidence améliore sensiblement la précision de l'estimation de l'humidité du sol ce qui n'est pas le cas de l'aspect multi-polarisation.

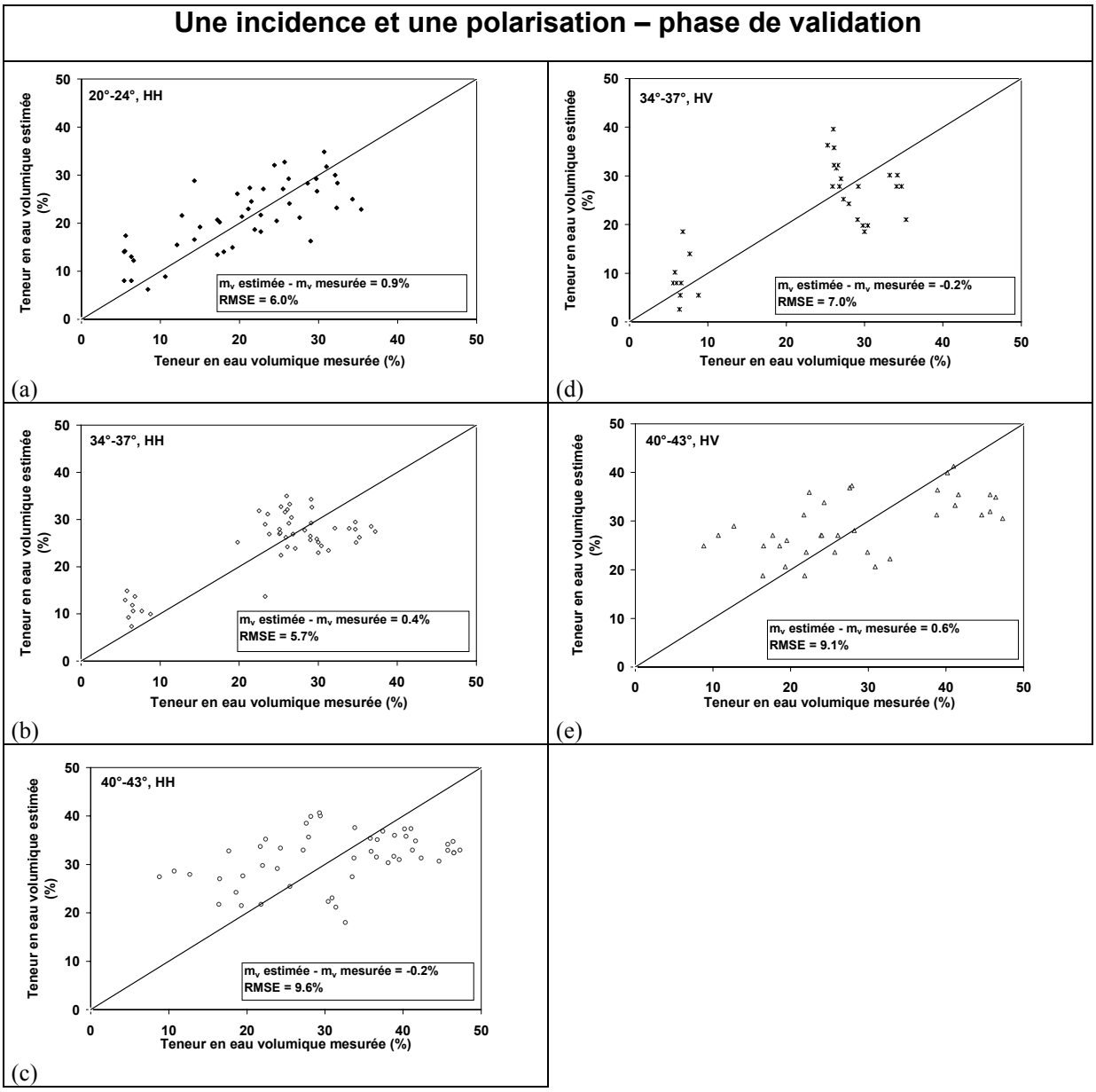


Figure 48 : Comparaison entre les valeurs estimées de l'humidité du sol (*mv)* et celles mesurées en utilisant une incidence et une polarisation. Les différents paramètres statistiques décrivant la qualité de l'inversion sont illustrés dans le tableau 16.

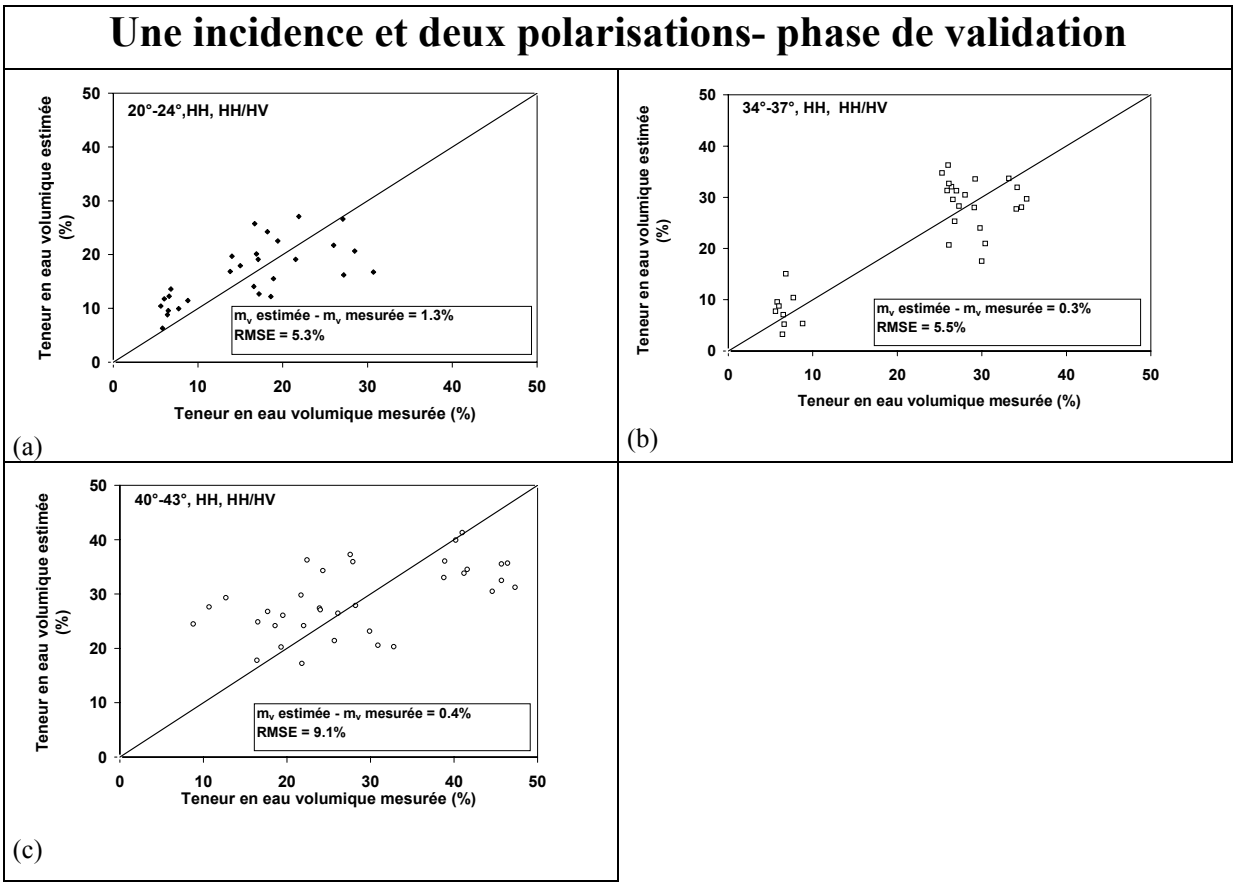


Figure 49 : Comparaison entre les valeurs estimées de l'humidité du sol (*mv)* et celles mesurées en utilisant une incidence et deux polarisations. Les différents paramètres statistiques décrivant la qualité de l'inversion sont illustrés dans le tableau 16.

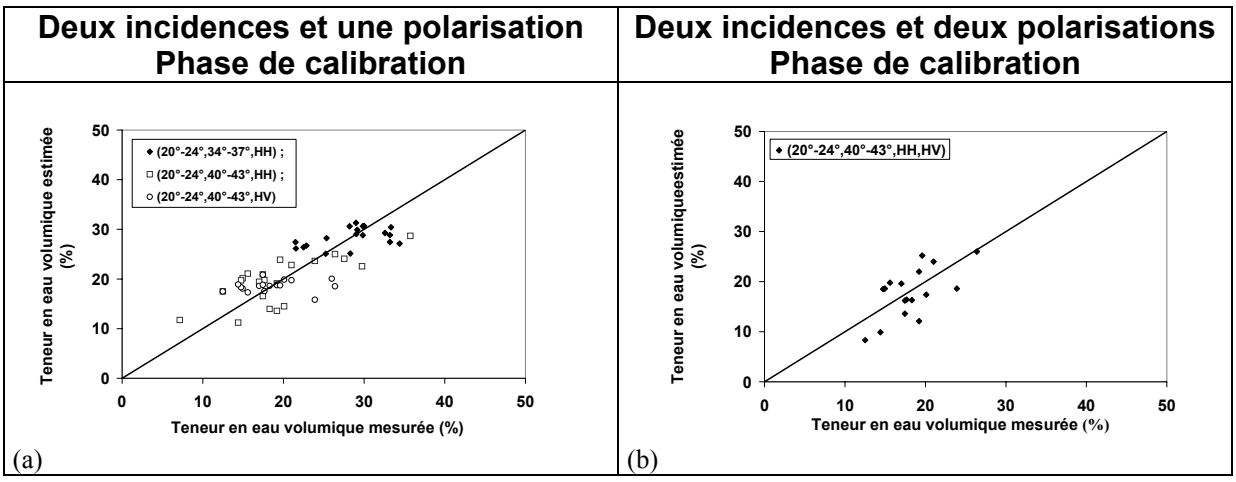


Figure 50 : Comparaison entre les valeurs estimées de l'humidité du sol (*mv)* et celles mesurées en utilisant d'une part deux incidences et une polarisation (a), et d'autre part, deux incidences et deux polarisations (b). Les différents paramètres statistiques décrivant la qualité de l'inversion sont illustrés dans le tableau 16.

5.2 Cartographie de la rugosité de surface des sols nus

5.2.1 Introduction

La capacité du radar à décrire la rugosité de surface dépend de ses configurations d'acquisition (angle d'incidence, polarisation, longueur d'onde). Elles déterminent la dynamique du signal radar (σ^0) en fonction de la rugosité de surface. L'étude du comportement du coefficient de rétrodiffusion σ^0 en fonction des paramètres de surface (cf. chapitre 3) montre que le signal radar dépend essentiellement de la rugosité et de l'humidité du sol. Le signal radar était d'avantage sensible à la rugosité de surface avec les polarisations HH et HV et à forts angles d'incidence (cf. fig. 36). Baghdadi et al. (2002a) ont utilisé des données radar pour estimer la rugosité de surface des sols nus en milieu agricole. Des images de type RADARSAT et ERS ont été utilisées avec plusieurs angles d'incidence (23°, 39° et 47°). Les résultats obtenus ont montré le fort potentiel de l'imagerie RADARSAT à forte angle d'incidence (47°) pour la cartographie de la rugosité de surface. Trois classes de rugosité ont pu être définie : surfaces lisses (rms < 1 cm), surfaces moyennement rugueuses (1 cm $\leq$ rms $\leq$ 2 cm) et surfaces rugueuses (rms > 2 cm).

5.2.2 Méthodologie

Notre objectif est de cartographier la rugosité des sols nus à partir des données radar. La rugosité (*rms*) est en effet un paramètre qui conditionne le potentiel ruisselant d'une surface et doit, de ce fait, être pris en compte dans les modèles de ruissellement. Etant donné que la différence entre les σ^0 des parcelles à faibles rugosités et les σ^0 des parcelles à fortes rugosités est faible (cf. fig. 36), l'estimation des valeurs de *rms* pour chaque pixel ou à l'échelle d'une parcelle n'est pas possible. Nous proposons donc de cartographier les classes de rugosité, comme suggéré par Baghdadi et al. (2002a). Sur nos sites d'étude, il y a essentiellement des zones agricoles correspondant à des labours, d'anciens chantier de récoltes, et de semis de blé et de maïs.

Pour cartographier les sols nus sur le site de Villamblain, nous avons utilisé une image SPOT 4 acquise le 04 septembre 2003. Une classification de l'occupation du sol a été effectuée en trois classes (végétation, sols nus 1 et 2) en utilisant l'indice de

végétation NDVI normalisé (Normalised Difference Vegetation Index, valeurs entre 0 et 255). Le terme « végétation» correspond à des surfaces agricoles couvertes par les jeunes pousses avec des valeurs de NDVI supérieur à 100. Les sols nus sont des terrains agricoles avec plus ou moins de végétation. Les sols nus 1 caractérisent les sols nus avec peu de végétation abandonnée avec des valeurs de NDVI entre 50 et 100, et les sols nus 2 correspondent aux sols nus sans végétation avec des valeurs de NDVI inférieures à 50 (fig. 53b). Un filtre 3x3 de type majority a ensuite été appliqué à l'image classifiée dans le but d'éliminer les points isolés.

La cartographie de la rugosité de surface sera d'autant plus facile que la dynamique de σ^0 en fonction de la rugosité de surface sera forte. Etant donné que la forte dynamique du signal radar en fonction de la rugosité est observée avec des configurations radar à fortes incidences (3 dB à 40°-43°contre 1 dB à 20°-24°, cf. fig. 36), nous avons choisi l'image radar acquise le 23 septembre 2003 (polarisation HH, incidence de 40°) pour effectuer cette cartographie. La classification de la rugosité a été réalisée en deux classes : surfaces lisses et surfaces rugueuses. Les deux classes de rugosité choisies sont définies comme suit :

- surfaces lisses : rms < 1 cm
- surfaces rugueuses : rms > 1 cm

Ces classes correspondent, au mieux, au comportement du coefficient de rétrodiffusion en fonction de la rugosité de surface. Cette opération nécessite dans un premier temps la détermination des seuils de σ^0 correspondants à chaque classe de rugosité en s'appuyant sur la relation semi-empirique établie entre le signal radar et la rugosité observée précédemment (chapitre 3). Les seuils sont déterminés comme suit :

- si la valeur du pixel (dB) $\leq$ Seuil (dB), alors la surface est lisse ;
- si la valeur du pixel (dB) > Seuil (dB), alors la surface est rugueuse.

Afin de déterminer la valeur du seuil, les parcelles sont réparties dans les deux classes selon la valeur de leur rms. Le coefficient de rétrodiffusion est ensuite tracé en fonction des deux classes de rugosité (fig. 51). La répartition des points selon

chaque classe permet alors de définir le seuil recherché. La valeur du seuil a été calculée de la façon suivante (tab. 18) :

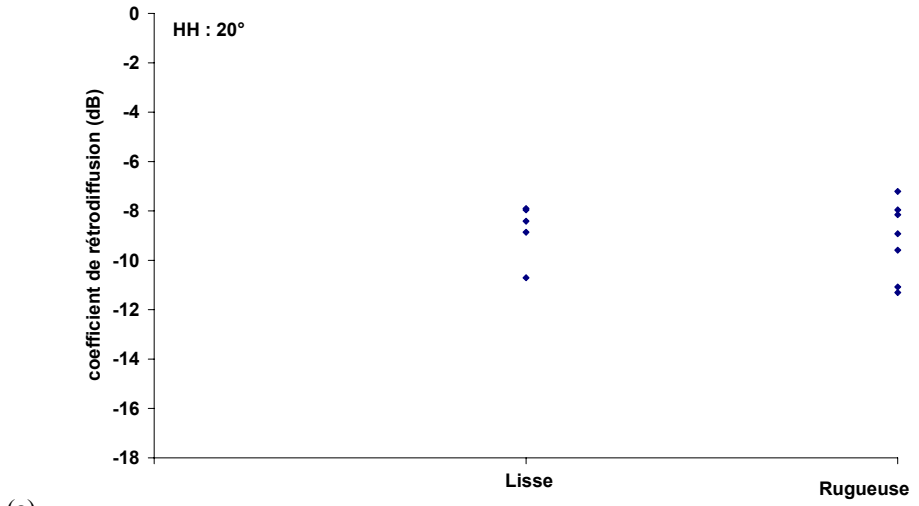
Seuil = [Borne supérieure de la classe lisse + Borne inférieure de la classe rugueuse]/2

	ASAR-HH-20°	ASAR-HH-34°	ASAR-HH-40°
Seuil	——	-14.2	-14.3

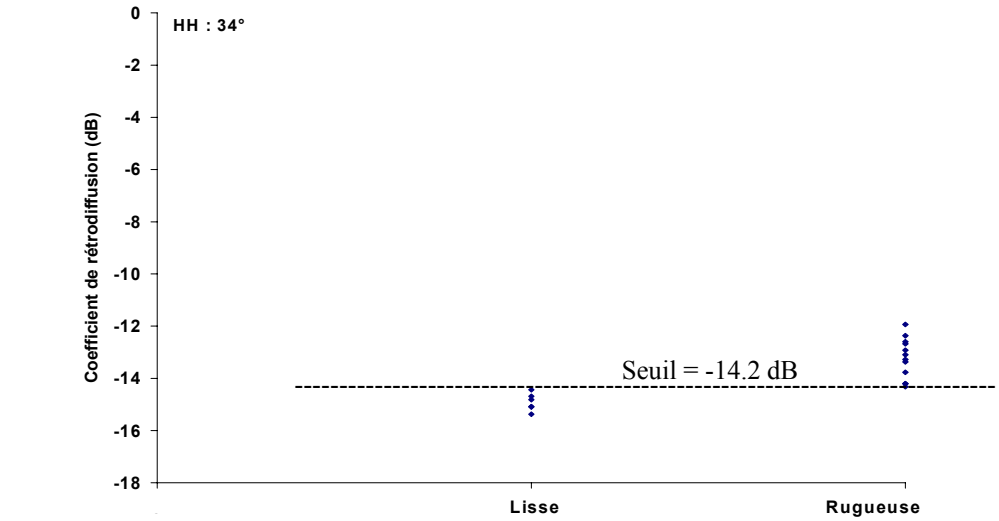
Tableau 18 : Valeurs du seuil pour trois images acquises à trois angles d'incidences : 20°, 34° et 40°.

La figure 51 et le tableau 18 montrent que la différence entre les valeurs de σ^0 des parcelles lisses et celles des parcelles rugueuses est très faible (< 1 dB) pour les faibles incidences (20°-24°). Elle devient importante pour les moyennes incidences (34°-37°), et atteint son maximum pour les incidences de 40°-43°.

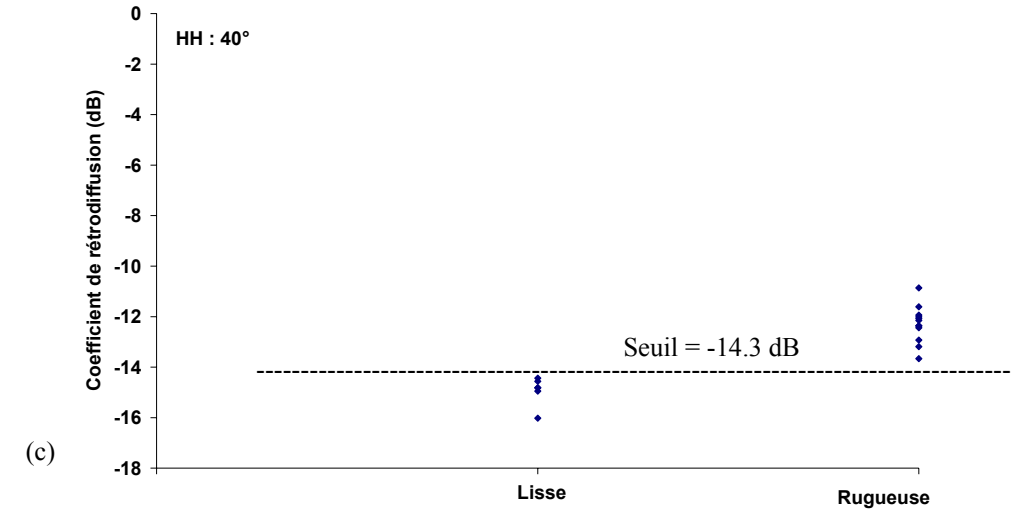
La classification de la rugosité de surface a ensuite été effectuée en utilisant l'image ASAR acquise le 23 septembre 2003 à 40° d'incidence. Cette classification a été réalisée en utilisant d'une part la carte de l'occupation du sol obtenue à partir de l'image SPOT 4, et d'autre part l'image radar. L'image SPOT 4 nous a permis de distinguer 3 classes d'occupation de sol. Ce sont seulement les sols nus qui seront classifiées en deux classes de rugosité, puisque le risque de ruissellement est surtout important sur ce type de sols. La classification de la rugosité de surface est décrite par la figure 52. Comme pour la classification de l'occupation du sol à partir de SPOT4, un filtre 3x3 de type majority a été appliqué à la classification obtenue (fig. 53).



(a)



(b)



(c)

Figure 51 : Coefficients de rétrodiffusion en fonction des deux classes de rugosité. Définition du seuil pour trois images : HH-20 (a), HH-34° (b), et HH-40° (c).

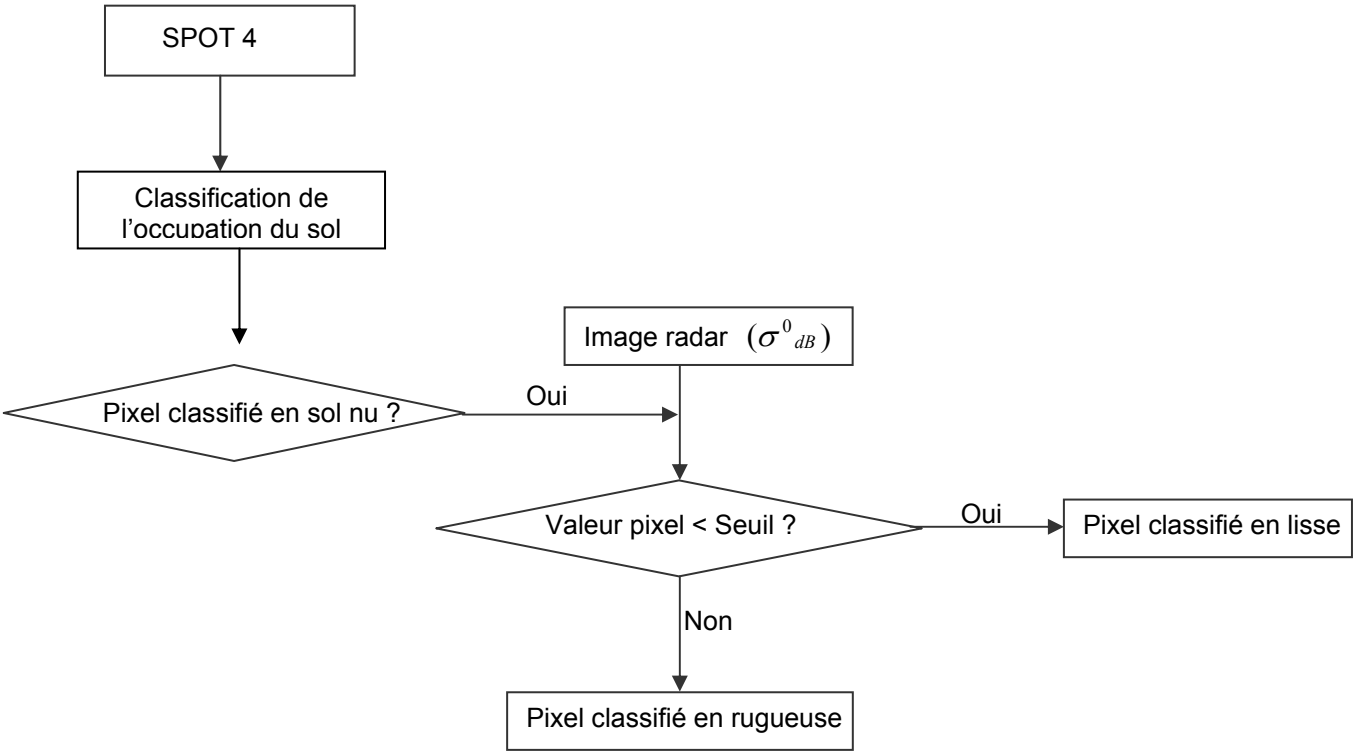


Figure 52 : Principe de la classification de la rugosité de surface des sols nus.

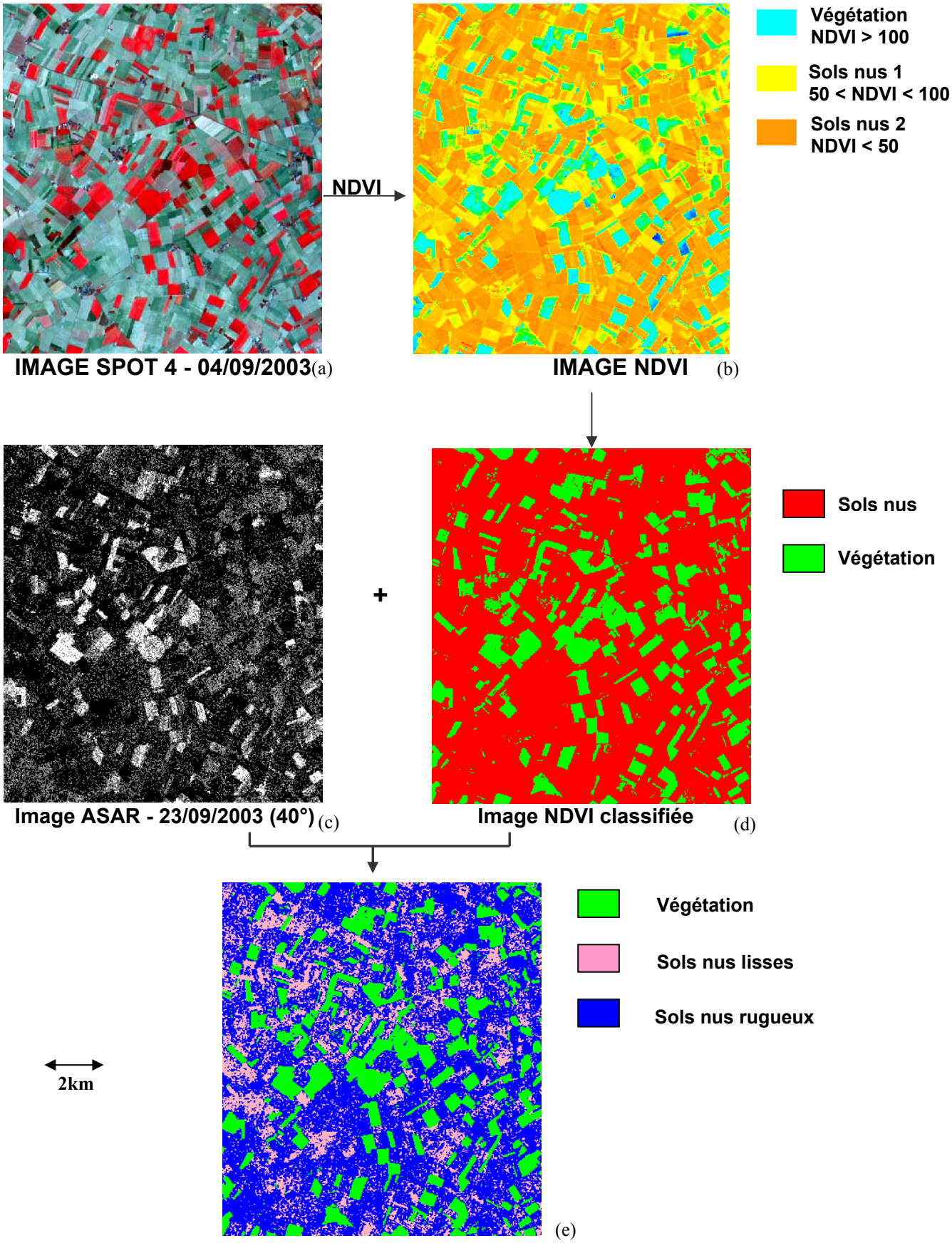


Figure 53 : Principe de cartographie de la rugosité de surface des sols nus en deux classes à partir des données ASAR et SPOT. Le point central de la zone (Villamblain) a pour coordonnées : 01° 34' E et 48° 00' N.

5.2.3 Validation

Afin d'évaluer les résultats de la classification (fig. 53e), nous avons calculé la matrice de confusion. Le principe est de comptabiliser pour chaque classe le nombre de pixels bien classifiés en s'appuyant sur les pixels bénéficiant d'une réalité terrain, c'est-à-dire des pixels correspondant aux parcelles caractérisées par une mesure de la rugosité.

Pour la date d'acquisition de l'image ASAR du 23 septembre 2003, 17 parcelles ont été documentées : 6 lisses (*rms* <1 cm) et 11 rugueuses (*rms* > 1 cm). Le tableau 19 montre, pour les parcelles de la vérité terrain, le nombre de pixels bien classifiés en lisses ou en rugueux ainsi que les pixels qui ont été mal classifiés. La matrice de confusion obtenue à partir de l'image classifiée de rugosité est illustrée en tableau 20.

On constate que la classification de la catégorie lisse est performante avec 84.1% de pixels bien classés et que la précision de la classification pour le catégorie rugueuse est de l'ordre de 69.3%. La précision moyenne est d'environ 77%. La figure 54 montre quelque exemples qualitatifs de la classification.

Parcelles	Nombre de pixels total	Pixels classifiés en lisses	Pixels classifiés en rugueux
P2 (Lisse)	190	164 (86.3%)	26 (13.7%)
P4 (Lisse)	253	219 (86.6%)	34 (13.4%)
P7 (Lisse)	64	57 (89.1%)	7 (10.9%)
P9 (Lisse)	283	223 (78.8%)	60 (21.2%)
P14 (Lisse)	184	150 (81.5%)	34 (18.5%)
P17 (Lisse)	88	80 (90.9%)	8 (9.1%)
Total (Lisse)	**1062**	**893 (84.1%)**	**169 (15.9%)**
P1 (Rugueuse)	73	8 (11%)	65 (89%)
P3 (Rugueuse)	284	125 (44%)	159 (56%)
P5 (Rugueuse)	153	45 (29.4%)	108 (70.6%)
P6 (Rugueuse)	150	64 (42.7%)	86 (57.3%)
P8 (Rugueuse)	381	113 (29.7%)	268 (70.3%)
P10 (Rugueuse)	69	19 (27.5%)	50 (72.5%)
P11 (Rugueuse)	107	30 (28%)	77 (72%)
P12 (Rugueuse)	766	196 (25.6%)	570 (74.4%)
P13 (Rugueuse)	260	107 (41.2%)	153 (58.8%)
P15 (Rugueuse)	426	101 (23.7%)	325 (76.3%)
P16 (Rugueuse)	194	71 (36.6%)	123 (63.4%)
Total (Rugueuse)	**2863**	**879 (30.7%)**	**1984 (69.3%)**

Tableau 19 : Résultats de la classification des sols nus pour les 17 parcelles documentées au moment de l'acquisition de l'images ASAR du 23 septembre 2003 (HH-40°).

		Rugosité terrain	
		Lisse	**Rugueuse**
Rugosité issue de la classification	Lisse	**84.1%**	30.7%
	Rugueuse	15.9%	**69.3%**
	Total	100%	100%

Tableau 20 : Matrice de confusion obtenue sur l'image classifiée du 23 septembre 2003 (HH-40°).

Nombre de pixels : 3925
Nombre de pixels bien classés : 2877

Précision totale : 73.3%
Précision moyenne : 76.7%

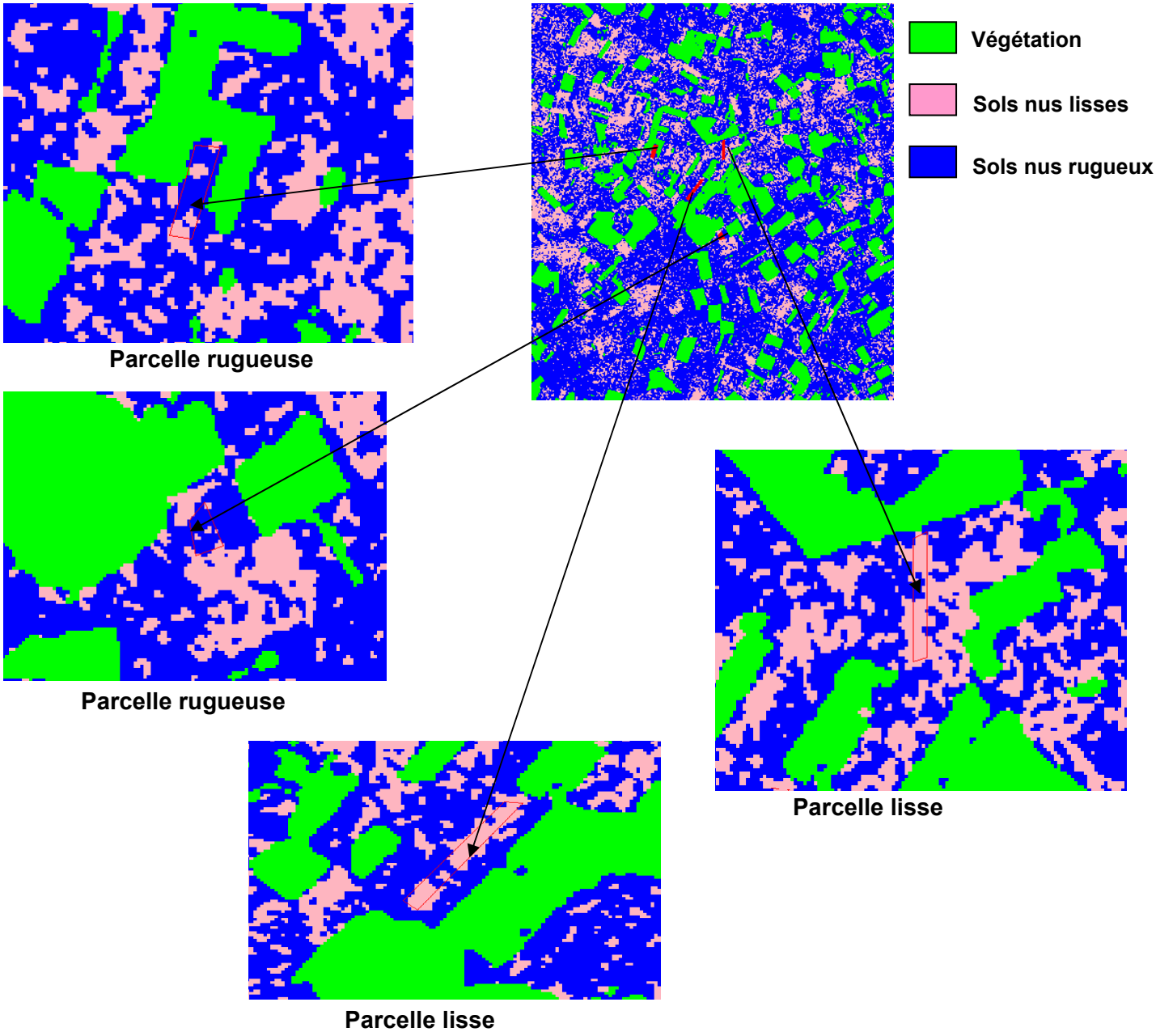


Figure 54 : Exemples de parcelles lisses et rugueuses obtenues sur l'image classifiée.

5.3 Conclusion

Cette étude a permis d'examiner la potentiel des images ASAR pour l'estimation de l'humidité et de la rugosité du sol en zones agricoles. Seuls les sols nus ont été considérés dans cette étude. La base de données utilisée est celle des données ASAR (chapitre 3). En ce concerne l'humidité, des approches empiriques d'inversion ont été utilisées dans le but d'évaluer la précision de l'estimation de l'humidité du sol en utilisant l'aspect multi-polarisation et multi-incidence du capteur ASAR. Les résultats obtenus se résument comme suit :

- Pour les données ASAR avec une polarisation et une incidence, le résultat de l'inversion est meilleur pour la polarisation HH et les faibles et moyennes incidences (20°-24° et 34°-37°). Le RMSE sur l'humidité estimée est d'environ 6% pour la polarisation HH à faibles et moyennes incidences et d'environ 7% pour la polarisation HV à moyennes incidences. Les résultats sont moins bons pour des incidences élevés (40°-43°) à cause de l'influence de la rugosité de surface sur le signal radar (environ 9%). En effet, le coefficient de rétrodiffusion est plus sensible à la rugosité qu'à l'humidité à forts angles d'incidence.

- L'estimation de l'humidité n'a pas été améliorée en utilisant deux polarisations (HH et HV). Les résultats de l'inversion qui utilisent deux polarisations sont meilleurs d'au plus 1% par rapport à ceux obtenus avec une seule polarisation. L'aspect multi-polarisation d'ASAR n'offre donc pas de gros avantages en comparaison avec l'utilisation de capteurs fonctionnant avec une seule polarisation et permettant d'acquérir d'images en mode multi-incidence comme c'est le cas de RADARSAT-1 par exemple.

- Une bonne corrélation a été obtenue entre l'humidité estimée et celle mesurée quand deux angles d'incidence ont été utilisés (un faible et un élevé). Le RMSE obtenu est de l'ordre de 3.5%.

Les résultats apparaissent prometteurs pour le développement d'un algorithme simple de cartographie de l'humidité du sol à partir des images ASAR. Il est donc possible d'observer les changements multi-temporels de l'humidité du sol. Cependant, les relations empiriques obtenues entre l'humidité du sol et les données

ASAR ont besoin d'être calibrées avant leur applications sur d'autres sites d'étude. Il reste à tester la polarisation VV avec les différents angles d'incidence pour finaliser cette expertise sur l'extraction de l'humidité du sol à partir des images ASAR.

Pour la rugosité de surface, le comportement du signal radar en fonction de la rugosité montre qu'il est éventuellement possible de cartographier la rugosité de surface des sols nus si des images radar sont acquises à fortes incidences ($\geq$ 40°). Sachant que la différence entre le coefficient de rétrodiffusion des parcelles à faibles rugosités et celui des parcelles à fortes rugosités est faible, nous avons effectué une classification de la rugosité de surface selon deux classes (lisse et rugueuse). La classification de l'occupation du sol a été effectuée à partir d'une image SPOT4. Trois classes d'occupation du sol ont été obtenues dont deux classes de sols nus. Ensuite, en utilisant l'image radar acquise le 23 septembre 2003 en polarisation HH avec un angle d'incidence de 40°, nous avons procédé à une classification de la rugosité en deux classes après avoir déterminé le seuil en σ^0 de chaque classe de rugosité. Le résultat de la cartographie montre que la précision moyenne de la classification est d'environ 77%. L'avantage de la cartographie de la rugosité de surface des sols nus à partir des images radar à fortes incidences est de fournir une cartographie des zones à forte capacité de production de ruissellement avec une bonne précision. La classification de la rugosité permet de hiérarchiser les sols nus selon leur potentiel de ruissellement et ainsi d'identifier les zones prioritaires dans la mise en place de mesures de protection.

Un article est en cours d'évaluation sur ce projet :
Baghdadi N., Holah N., and Zribi M., 2005. Soil moisture estimation using multi-incidence and multi-polarization ASAR SAR data. International Journal of Remote Sensing, in press.

Conclusion générale et perspectives

L'état de la surface du sol et en particulier via la rugosité et l'humidité exerce une influence fondamentale sur la répartition de la pluie entre infiltration, rétention superficielle et ruissellement et il a un rôle essentiel dans les processus hydrologiques de surface. La caractérisation et la prise en compte de ces conditions de surface constituent actuellement un enjeu important pour la modélisation à base physique des processus d'entrée de l'eau dans le sol, de ruissellement et d'érosion. Cette thèse avait pour premier objectif d'évaluer le potentiel des nouveaux capteurs radars pour la cartographie des états de surface en identifiant les configurations radars (polarisation et angle d'incidence) les plus favorables à la description de la rugosité et de l'humidité du sol. Le second objectif consistait à améliorer la modélisation du signal radar, et à développer des procédures d'inversion pour la cartographie des paramètres de surface du sol.

Ce travail s'est appuyé sur des bases de données constituées d'images RAMSES polarimétriques en bande X acquises sur un site d'étude près d'Avignon, et d'images ASAR multi-polarisation (bande C) acquises sur un site d'étude à Villamblain près d'Orléans et sur le bassin du Touch près de Toulouse.

- Données RAMSES bande X :

L'intérêt du capteur radar polarimétrique RAMSES en bande X pour la caractérisation de l'état de la surface du sol a été étudié. Notre but était d'examiner le potentiel des données polarimétriques à discriminer d'une part les différentes classes d'occupation du sol et d'autre part les différentes rugosités observées sur des parcelles de sol nu. Le potentiel des paramètres polarimétriques (entropie, anisotropie et angle $\overline{\alpha}$) a été examiné. Les résultats obtenus montrent une faible corrélation entre le signal radar et la rugosité du sol, ce qui rend impossible la cartographie de la rugosité de surface. Cependant, il est possible d'observer la dégradation du sol causée par la présence d'une croûte de battance et de distinguer les parcelles fraîchement labourées. L'angle d'incidence utilisé dans cette étude est relativement faible (entre 25° et 36°), ce qui n'est pas optimum pour la caractérisation de la rugosité (besoin d'une forte incidence). Ainsi, avant de conclure sur le potentiel de la bande X, il sera nécessaire de tester cette bande avec des angles d'incidence élevées. Les résultats montrent

également un faible potentiel de la bande X pour la discrimination des différentes classes d'occupation du sol. En effet, il est difficile par exemple de distinguer les sols nus des sols cultivés (blé, vergers, …). Les paramètres polarimétriques n'ont pas permis une amélioration de la séparation entre les différentes classes par comparaison aux résultats obtenus avec les paramètres classiques tels que les coefficients de rétrodiffusion, les rapports de polarisation et les coefficients de corrélation.

- Données ASAR bande C :

L'apport du capteur ASAR d'ENVISAT pour la caractérisation des paramètres de surface (humidité et rugosité) a ensuite été étudié. L'objectif était d'analyser l'information multi-polarisation et multi-incidence du capteur ASAR en couplage avec des mesures au sol. Pendant le passage du satellite, plusieurs campagnes terrain ont été réalisées sur les deux sites de Villamblain et du Touch pour mesurer la rugosité et l'humidité du sol sur de nombreuses parcelles agricoles nues. Le comportement du signal radar a été étudié en fonction de la polarisation et de l'angle d'incidence pour évaluer le potentiel de cartographie de la rugosité et de l'humidité du sol.

- <u>Pour atteindre l'humidité :</u>

- Les résultats obtenus indiquent que le signal radar est plus sensible à l'humidité du sol en polarisation HH.

- La configuration optimale pour une meilleure estimation de l'humidité du sol, avec une influence minimale de la rugosité de surface, est l'utilisation des images ASAR à petites et moyennes incidences.

- Le signal radar augmente linéairement avec l'humidité du sol mais quand ce dernier devient très humide (teneur en eau volumique > 35%), le signal n'augmente plus avec l'humidité et commence même à décroître.

- <u>Pour atteindre la rugosité :</u>

- Les résultats montrent que les polarisations HH et HV sont plus sensibles à la rugosité de surface que la polarisation VV.

- La configuration optimale pour une meilleure estimation de la rugosité de surface, avec une influence minimale de l'humidité du sol, est l'utilisation des images ASAR à fortes incidences.

Dans cette étude, nous avons observé une faible dynamique du signal radar (σ^0) en fonction de la rugosité du sol. En effet, la différence entre σ^0 à fortes rugosités et σ^0 à faibles rugosités est d'environ 1 dB pour une incidence de 24°, 2 dB pour 37° et 3 dB pour 43°. Baghdadi et al., (2002a) avaient trouvé une différence plus importante entre le signal radar des parcelles lisses et celui des parcelles rugueuses, mais ce résultat a été obtenu avec une incidence plus importante (47° contre 43° dans notre cas). De plus, le signal radar ne dépend plus de la rugosité de surface quand le sol est très humide (> 35%).

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de la multi-incidence d'ASAR (une faible et une élevée) permet d'améliorer la caractérisation des paramètres de surface. L'utilisation de l'aspect multi-polarisation d'ASAR (HH et HV, par exemple) ne permet pas d'améliorer la caractérisation des paramètres de surface (humidité et rugosité) par comparaison aux résultats obtenus avec une seule polarisation (HH, HV ou VV). Une même conclusion a été obtenue par Sahebi et al., (2002) dans le cadre d'une étude basée sur des simulations numériques (modèles physiques et empiriques).

Les résultats obtenus montrent également que le rapport de polarisation HH/HV est faiblement dépendant de la rugosité de surface quel que soit l'angle d'incidence. De même, nous avons observé que ce rapport de polarisation augmente avec l'humidité du sol à petites et à moyennes incidences. La sensibilité du signal radar à l'humidité diminue avec l'angle d'incidence. A forte incidence (40°-43°), le rapport de polarisation devient indépendant de l'humidité du sol. On peut conclure que le rapport de polarisation HH/HV n'améliore pas la caractérisation de l'humidité du sol par rapport à l'utilisation de la polarisation HH seule. Nous avons observé que les rapports des coefficients de rétrodiffusion HH_{pi}/HH_{gi} et HV_{pi}/HV_{gi} diminuent avec la rugosité de surface et ils sont indépendants de l'humidité du sol. L'utilisation combinée d'images acquises simultanément à deux incidences différentes n'est pas possible avec les capteurs actuelles ou avec ceux prévus prochainement

(RADARSAT-2 et ALOS par exemple). Cependant, l'utilisation conjointe de deux capteurs est à envisager (ASAR et RADARSAT par exemple) pour obtenir simultanément deux images à deux incidences.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons également testé le modèle de rétrodiffusion radar IEM. Ce modèle physique a été choisi car il est le plus utilisé par la communauté scientifique, et son domaine de validité couvre une large gamme de rugosités commune aux surfaces agricoles. Cependant, des nombreuses études ont montré une faible corrélation entre les données issues des images radar et les simulations IEM. Une calibration semi-empirique a été proposée par Baghdadi et al. (2004) pour corriger les défauts du modèle, en remplaçant la longueur de corrélation L (le paramètre le moins précis et le plus difficile à mesurer) par un paramètre de calibration dans le but de mieux reproduire le coefficient de rétrodiffusion radar. Les résultats obtenus ont montré que le paramètre de calibration est dépendant de la rugosité (rms), de l'angle d'incidence et de la polarisation (seule HH et VV ont été utilisées). Mon travail a consisté à étendre le champ de validité de cette calibration semi-empirique. Les résultats obtenus montrent que cette calibration permet d'améliorer sensiblement le fonctionnement du modèle IEM quelle que soit la configuration radar et le site d'étude. La robustesse de cette nouvelle version du modèle IEM a été démontrée grâce à sa validation sur d'autres sites d'étude que ceux sur lesquels il a été calibré. Cette calibration présente l'avantage de caractériser les sols nus par deux paramètres de surface (rms et m_v) au lieu de trois initialement (rms, L et m_v). L'utilisation de nos données ASAR a permis d'affiner les relations obtenues par Baghdadi et al. (2004) entre le paramètre de calibration et la rugosité de surface, et d'étendre le domaine d'utilisation de cette calibration à des nouvelles configurations radar. Enfin, une généralisation du paramètre de calibration a été proposée pour étendre l'applicabilité du modèle IEM calibré à un domaine élargi des données radar (bande C, polarisation HH et VV et incidence entre 20° et 50°). Cette dernière version pourra être utilisée dans les procédures d'inversion des données radar pour une meilleure estimation de l'humidité et de la rugosité du sol.

Pour estimer l'humidité du sol, nous avons utilisé des procédures d'inversion empiriques pour inverser le signal ASAR. Le but de cette partie est d'identifier la configuration radar optimale pour une meilleure estimation de l'humidité du sol.

L'amélioration apportée à l'estimation de l'humidité grâce à l'utilisation de l'aspect multi-polarisation et multi-incidence d'ASAR a été examinée. Les résultats obtenus montrent que pour des données ASAR avec une polarisation et une incidence, l'algorithme d'inversion est meilleur pour la polarisation HH à petites et moyennes incidences (RMSE de 6%). Les résultats sont moins bons à fortes incidences (RMSE d'environ 9%) à cause de la forte influence de la rugosité de surface sur le signal radar. L'aspect multi-polarisation d'ASAR n'améliore pas l'estimation de l'humidité par rapport à l'utilisation d'une seule polarisation (amélioration inférieure à 1%). Les résultats montrent que seul l'aspect multi-incidences permet une nette amélioration de l'estimation de l'humidité (d'environ 2%). En effet, le RMSE passe de 6% pour HH à 20° à 3.5% pour HH à 20° et 37°. Les résultats obtenus sont encourageants pour le développement d'un algorithme simple de cartographie de l'humidité du sol à partir des images ASAR. Cependant, il est souhaitable de valider la procédure d'inversion sur d'autres sites d'étude et en utilisant d'autres configurations radar (avec la polarisation VV). Concernant la cartographie de la rugosité de surface, il a été possible de classifier les sols nus en seulement deux classes : surfaces lisses et surfaces rugueuses.

- Perspectives

D'une façon générale, le travail effectué au cours de cette thèse confirme la capacité des images radar pour atteindre des paramètres de surface du sol. Des images ASAR acquises à d'autres incidences et polarisations seront utiles pour mieux analyser le comportement du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité et de la rugosité de surface. Les résultats obtenus encouragent à poursuivre les recherches dans ce domaine en analysant les performances des prochains capteurs radars ALOS en bande L (prévu fin 2005) et RADARSAT-2 en bande C (prévu début 2006). Ces deux capteurs vont ouvrir des nouvelles perspectives grâce à l'aspect polarimétrique de RADARSAT-2 et à l'utilisation de la bande L par ALOS (multi-polarisation). En effet, la bande L est prometteuse pour la caractérisation du sol et du couvert végétal. Une étape de tests préliminaires pourrait être engagée avec le capteur RAMSES en bandes L et P.

En perspective, nous pouvons proposer deux axes pour élargir le champ des recherches. L'une en « amont », pour explorer davantage les possibilités théoriques de décrire la rétrodiffusion de surface et de les confronter aux mesures réelles issues de capteurs satellitaires. L'autre en « aval », pour favoriser l'insertion des informations issues des radars en entrée des modèles de ruissellement.

- En amont : La calibration semi-empirique de modèle IEM proposé par Baghdadi et al. (2004) a été appliquée avec succès sur des données radar ASAR en polarisations HH et VV seulement. En perspective, il serait intéressant de tester le modèle IEM en polarisations croisées (HV et VH) et de voir si la calibration empirique est possible à étendre au cas des polarisations croisées (HV et VH). De même, la généralisation du paramètre de calibration du modèle IEM, proposée dans le quatrième chapitre de cette thèse, mérité d'être davantage validée sur d'autres sites d'étude pour confirmer son indépendance des sites d'étude et des capteurs utilisés.

- En aval : L'amélioration de la description de la surface du sol est une étape très importante avant la prise en compte des paramètres du sol dans les modèles de ruissellement et d'érosion comme le modèle STREAM « Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management », par exemple dont les liens ont déjà été abordés précédemment. Une cartographie opérationnelle des paramètres du sol (rugosité et humidité) permettrai de hiérarchiser les sols nus selon leur potentiel de ruissellement et ainsi d'identifier les zones prioritaires dans la mise en place de mesures de protection.

Liste des figures

Fig. 1: Modes ascendant et descendant d'une orbite héliosynchrone ……..13

Fig. 2 : Distorsion due à l'échelle oblique ……...18

Fig. 3 : Le repliement (foreshortening)…….……19

Fig. 4 : Le repliement (layover)……20

Fig. 5 : Zones d'ombre sur une image radar…….20

Fig. 6 : Domaine des hyperfréquences ……24

Fig. 7 : Définition de l'angle d'incidence radar ……...25

Fig. 8 : Profil de rugosité réalisé par un profilomètre à aiguille dans la direction parallèle aux sillons sur le site de Villamblain ……..26

Fig. 9 : Un profil de rugosité avant et après filtrage…….…..…..30

Fig. 10 : Réflexion du signal radar en fonction de la rugosité de surface…….31

Fig. 11: Location géographique du site d'étude près d'Avignon……..38

Fig. 12 : Segment de l'image RAMSES polarimétrique en bande X (HH en rouge , HV en vert et VV en bleu) ……...39

Fig. 13 : Parcelles témoins documentées sur la photo-aérienne de l'IGN ……...42

Fig. 14 : Plan (H/$\overline{\alpha}$) segmenté en huit régions qui correspondent à des caractéristiques de rétrodiffusion spécifiques……..48

Fig. 15 : Comportement des coefficients de rétrodiffusion issus des données RAMSES polarimétrique en bande X en fonction des différentes classes……52

Fig. 16 : Comportement des rapports de polarisation issus des données RAMSES polarimétrique en bande X en fonction des différentes classes……53

Fig. 17 : Comportement des magnitudes des coefficients de corrélation issus des données RAMSES polarimétrique en bande X en fonction des différentes classes……...54

Fig. 18 : Comportement de l'entropie (H), de l'angle $\overline{\alpha}$, et de l'anisotropie (A) calculés à partir des données RAMSES polarimétrique en bande X en fonction des différentes classes.55

Fig. 19 : Images d'entropie, d'angle $\overline{\alpha}$ et d'anisotropie calculées à partir des données RAMSES en bande X ……..56

Fig. 20 : Le plan (H/$\overline{\alpha}$) et la distribution des différentes classes présentes sur notre site d'étude……...……58

Fig. 21 : Le plan H/A des différentes classes présentes sur notre site d'étude …….59

Fig. 22 : Un exemple d'arbre de décision……..61

Fig. 23 : Variations des coefficients de rétrodiffusion, des rapports de polarisation, des coefficients de corrélation en fonction de la rugosité du surface……..65

Fig. 24 : Variations des trois paramètres polarimétriques en fonction de la rugosité du surface ……...66

Fig. 25 : Le satellite Envisat …….71

Fig. 26 : Mode d'opération d'ASAR……....72

Fig. 27 : Location géographique des deux sites d'étude..…….73

Fig. 28 : Parcelles de référence choisies sur le site d'étude de Villamblain, superposés à l'image SPOT 4 de 04 septembre 2003 ……...75

Fig. 29 : Angle d'incidence en fonction du numéro du pixel pour une image ASAR acquise le 23 septembre 2003 en mode IS6 et en polarisation HH et HV…….80

Fig. 30 : Géométrie d'acquisition ASAR……..81

Fig. 31 : Diagramme de calibration des images ASAR programmé sous modeler dans Erdas/ Imagine…….82

Fig. 32 : Image ASAR géoréférencée, acquise le 23 septembre 2003 en polarisation HH et pour un angle d'incidence de 40° (a), et image SPOT géoréférencée acquise le 04 septembre 2003 (b)…….83

Fig. 33 : Exemple de la dépendance entre le coefficient de rétrodiffusion et l'humidité de surface pour l'image ASAR de 09 février 2003 (incidence de 37°) : polarisation HH (a) et polarisation HV (b) ……..85

Fig. 34 : Relations entre le coefficient de rétrodiffusion en polarisations HH et HV et la teneur en eau volumique du sol ……..87

Fig. 35 : Relations entre le rapport de polarisation HH/HV et la teneur en eau volumique du sol ……....88

Fig. 36 : Variations de coefficient de rétrodiffusion en polarisations HH, HV et VV en fonction de la rugosité pour trois groupes d'angles d'incidence..……91

Fig. 37 : Relations entre le rapport de polarisation HH/HV et la rugosité……92

Fig. 38 : Relations entre les rapports des coefficients de rétrodiffusion, HH_{pi}/HH_{gi} et HV_{pi}/HV_{gi} , et la rugosité……94

Fig. 39 : Relations entre les rapports des coefficients de rétrodiffusion, HH_{pi}/HH_{gi} et HV_{pi}/HV_{gi}, et la teneur en eau volumique du sol……...94

Fig. 40 : Paramètres d'entrée du modèle IEM……...105

Fig. 41 : Comparaison entre le coefficient de rétrodiffusion simulé à partir du modèle IEM et celui mesuré à partir des images ASAR……..106

Fig. 42 : Coefficient de rétrodiffusion simulé par le modèle IEM en fonction de la longueur de corrélation ……...……...109

Fig. 43 : Comparaison entre le coefficient de rétrodiffusion simulé à partir du modèle IEM calibré (en utilisant Lopt2 de Baghdadi et al., 2004) et celui mesuré à partir des images ASAR……..112

Fig. 44 : Le paramètre de calibration Lopt2 en fonction du rms pour des configurations radar en bande C, polarisation HH et VV, angles d'incidence entre 20.4° et 47.7°……114

Fig. 45 : Le paramètre de calibration Lopt2 en fonction du rms pour des configurations radar en bande C, polarisation HH et VV, angles d'incidence entre 20.4° et 47.7°……115

Fig. 46 : Les coefficients α et β de la relation Lopt2 = $\alpha\,\mathrm{rms}^{\beta}$ en fonction de l'angle d'incidence pour les polarisation HH et VV……...116

Fig. 47 : Influence de la généralisation du paramètre de calibration Lopt2 sur les simulations IEM…….117

Fig. 48 : Comparaison entre les valeurs estimées de l'humidité du sol (*mv)* et celles mesurées en utilisant une incidence et une polarisation…….131

Fig. 49 : Comparaison entre les valeurs estimées de l'humidité du sol (*mv)* et celles mesurées en utilisant une incidence et deux polarisations……..132

Fig. 50 : Comparaison entre les valeurs estimées de l'humidité du sol (*mv)* et celles mesurées en utilisant d'une part deux incidences et une polarisation (a), et d'autre part, deux incidences et deux polarisations (b)……..132

Fig. 51 : Coefficients de rétrodiffusion en fonction des deux classes de rugosité, définition du seuil pour trois images : HH-20° (a), HH- 34° (b), et HH-40° (c)……..136

Fig. 52 : Principe de la classification de la rugosité de surface des sols nus …….137

Fig. 53 : Principe de cartographie de la rugosité de surface des sols nus en deux classes à partir des données ASAR et SPOT…….138

Fig. 54 : Exemples de parcelles lisses et rugueuses obtenues sur l'image classifiée……..141

Liste des tableaux

Tabl. 1 : Les bandes fréquentielles utilisées par le système RAMSES……37

Tabl. 2 : Vérité terrain sur nos parcelles témoins……..41

Tabl. 3 : Caractéristiques des cinq parcelles témoins de sol nu (coefficient de rétrodiffusion et mesures terrain) ……62

Tabl. 4 : Dépendance angulaire du signal radar pour les différentes polarisations……..….63

Tabl. 5 : Les septs fauchées et l'angle d'incidence correspondant pour le Image Mode d'ASAR…….. ..71

Tabl. 6 : Caractéristiques des images radar et optique utilisées ainsi que les mesures de l'humidité, de densité apparente et de rugosité réalisées…….75

Tabl. 7 : Commentaires terrain lors de la campagne de février 2003 sur Villamblain….……78

Tabl. 8 : Les constantes de calibration des images ASAR traitées sur nos sites d'étude en alternating polarisation mode……81

Tabl. 9 : Exemples des statistiques obtenues sur l'image du 09 février 2003……..84

Tabl. 10 : Résultats des simulations du coefficient de rétrodiffusion ……...…….107

Tabl. 11 : Les coefficients α et β de la relation entre le paramètre de calibration Lopt2 et le rms d'après Baghdadi et al. (2004)…….109

Tabl. 12 : Description des bases de données……...110

Tabl. 13 : Comparaison entre les résultats obtenus avec le modèle IEM avant et après calibration de Baghdadi et al. (2004) ……111

Tabl. 14 : Comparaison entre les résultats obtenus avec le modèle IEM avant la calibration et après la généralisation du paramètre de calibration……117

Tabl. 15 : Données ASAR disponibles pour la procédure d'inversion…….……..122

Tabl. 16 : Modèles de régression entre le coefficient de rétrodiffusion des images ASAR et la teneur en eau volumique du sol……..126

Tabl. 17 : Statistiques sur l'estimation de l'humidité de sol *(mv)* en utilisant différentes configurations ASAR……..129

Tabl. 18 : Valeurs du seuil pour trois images acquises à trois angles d'incidences : 20°, 34°, et 40°……...135

Tabl. 19 : Résultats de la classification des sols nus pour les 17 parcelles documentées au moment de l'acquisition de l'image ASAR du 23 septembre 2003 (HH- 40°)……..140

Tabl. 20 : Matrice de confusion obtenue sur l'image classifiée du 23 septembre 2003 (HH-40°)……..140

Référence

Altese E., Bolognani O., and Mancini M., 1996. Retieving soil moisture over bare soil from ERS1 synthetic aperture radar data : Sensitivity analysis based on a theoretical surface scattering model and field data. Water Ressources Research, vol. 32, no. 3, pp. 653-661.

Autret M., Bernard R., and Vidal- Madjar D., 1989. Theoretical study of the sensitivity of microwave backscattering coefficient to the soil surface parametres. International Journal of Remote Sensing, vol. 10, no. 1, pp. 171-179.

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

Baghdadi N., Bernier M., Gauthier R., and Neeson I., 2001. Evaluation of C band SAR data for wetlands mapping. International Journal of Remote Sensing, vol. 22, no. 1, pp. 71-88.

Baghdadi N., King C., Bourguignon A., and Remond A., 2002a. Potential of ERS and RADARSAT data for surface roughness monitoring over bare agricultural fields. International Journal of Remote Sensing, vol. 23, no. 17, pp. 3427-3442.

Baghdadi N., King C., Chanzy A., and Wingneron J.P., 2002b. An empirical calibration of IEM model based on SAR data and measurements of soil moisture and surface roughness over bare soils. International Journal of Remote Sensing, vol. 23, no. 20, pp. 4325-4340.

Baghdadi N., Gaultier S., and King C., 2002c. Retrieving surface roughness and soil moisture from SAR data using neural network. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 28, no. 5, pp. 701-711.

Baghdadi N., Bonnifait L., King C., and Bourguignon A., 2003. 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.

Baghdadi N., Gherboudj I., Zribi M., Sahebi M., Bonn F., and King C., 2004. Semi-empirical calibration of the IEM backscattering model using radar images and moisture and roughness field measurements. International Journal of Remote Sensing, vol. 25, no. 18, pp. 3593-3623.

Beauchemin M., Thomson K., and Edwards G., 1996. Optimization of the Gamma-Gamma Map filter for SAR image clutters. International Journal of Remote Sensing, vol. 17, no. 5, pp. 1063-1067.

Beaudoin A., Gwyn Q.H.J., and Le Toan T., 1990. SAR observation and modelling of the C-band backscatter variability due to multi-scale geometry and soil moisture. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, no. 5, pp. 886-894.

Beckmann P., and Spizzichino A., 1963. The scattering of electromagnetic waves from rough surface. Pergammon Press, New York.

Beckmann P., and Spizzichino A., 1987. The scattering of electromagnetic waves from rough surface. Artech House Inc, 2nd edition.

Bernard R., Martin P., Thony J.L., Vauclin M., and Vidal- Madjar D., 1982. C-band radar for determining surface soil moisture. Remote Sensing of Environement, vol. 12, pp. 189-200.

Bertuzzi P., and Chanzy A., 1992. The use of a microwave backscatter model for retrieving soil moisture over bare soil. International journal of Remote sensing, vol. 13, no. 14, pp. 2653-2668.

Boiffin J., Papy F., and Eimberck M., 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré: I. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. Agronomie, vol. 8, pp. 663-673.

Boisvert J.B., Pultz T.J., Brown R.J., and Brisco B., 1995. Potential of synthetic aperture radar for large scale soil moisture monitoring: A review. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 22, no. 1, pp. 1-13.

Boisvert J.B., Gwyn Q.H.J., Chanzy A., Major A., Brisco B., and Brown R., 1997. Effect of surface soil moisture gradients on modelling radar backscattering from bare fields. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, no. 1, pp. 153-170.

Borgeaud M., Attema E., Salgado-Gispert G., Bellini A., Noll J., 1995. Analysis of bare soil surface roughness parameters with ERS-1 SAR data. Symposium on the extraction of bio and geophysical parameters from SAR data for land applications, Toulouse, France, October, 1995, pp. 307-316

Boutry J.M., 1998. Image quality parameters of a high resolution experimental SAR. 3rd NATO/IRIS Joint Symposium Quebec (Canada), October 19-23.

Brown C.E., Fingas M.F., and Bayer W.C., 1999. The Future of the Convair 580 SAR Facility. Proceedings of the Fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, vol. 1, pp. I-463-I-469.

Bruckler L., Wittono H., and Stengel P., 1988. Near surface moisture estimation from microwave measurements. Remote Sensing of Environment, vol. 26, pp. 101-121.

Brun C., Bernard R., and Vidal Madjar D., 1990. Mapping saturated areas with a helicopter borne C band scatterometer. Water Resources Research, vol. 26, no. 5, pp. 945-955.

Bruyant J.P.,2000. ONERA experimental airborne SAR facility (RAMSES) core system. 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar, Munchen (Germany), May 23-25.

Chanzy A., 1993. Basic soil surface characteristics derived from active microwaves remote sensing. Remote Sensing Reviews, vol. 7, pp. 303-319.

Chanzy A., King C., Prévot L., Remond A., Wigneron J.P., Calcagno P., Zribi M., and Desprtas J.F., 1998. Comparaison of ERS and multi-angle RADARSAT measurements on bare soils : First results. Second International Workshop on Retrieval of Bio-& Geo-physical parameters from SAR Data for Land Applications. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, pp. 471-477.

Chanzy A., Molineaux B., and Zribi M., 2003. Influence of roughness frequency components on radar backscattering : consequences on roughness sampling. IGARSS'03,Toulouse, Juillet 2003.

Christensen E.L., 1996. EMISAR: C- and L-band Polarimetric and Interferometric SAR. Proceedings of IGARSS'96, Lincoln, Nebraska, 27-31 May, pp. 1629-1632.

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

Cloude S.R., and Pottier E., 1997. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, no. 1, pp. 68-78.

CPCS, 1967 – Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. Classification des sols. Grignon (France), Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 87 pp.

CRAMP (Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées), (1995). Les grandes ensembles morpho-pédologiques de la région Midi-Pyrénées.

Curlander J. C., 1982. Location of Spaceborne SAR imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-20, no. 3, pp. 359-364.

Desnos Y.L., and Matteini V., 1993. Review on structure detection and speckle filtering on ERS-1 images. Earsel Advances in Remote Sensing, vol. 2, no. 2-VI, pp. 52-65.

Dipak R., Paudyal D., and Aschbacher J., 1993. Evaluation and performance tests of selected SAR speckle filters. International Symposium (Operationalization of Remote Sensing), 19-23 April 1993, ITC Enschede, The Netherlands.

Dobson M.C., and Ulaby F.T., 1981. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture : Part III- Soil tension. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 19, pp. 51-61.

Dobson M.C., and Ulaby F.T., 1986. Active microwave soil moisture research. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-24, no. 1, pp. 23-36.

Dubois P. C., Van Zyl J., and Engman T., 1995. Measuring soil moisture with imaging radars. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 33, pp. 877-895.

Dubois-Fernandez P., Ruault du Plessis O., Vaizan B., Dupuis X., Cantalloube H., Coulombeix C., Titin-Schnaider C., Dreuillet P., Boutry J. M., Canny J. P., Peyret J., Martineau P., Chanteclerc M., and Bruyant J. P., 2002. The ONERA RAMSES SAR system. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS02, Toronto, Canada, 24-28 June 2002 (Piscataway, NJ : IEEE), CDRom.

Duchaufour P., 1995. Pédologie : sol, végétation, environnement, ed Masson, 4ème édition.

Elachi C., Roth L.E., and Schaber G.G., 1984. Spaceborne radar subsurface imaging in hyperarid regions. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-22, pp. 383-388.

Engman E.T., Wang J.R., 1987. Evaluating roughness models of radar backscatter. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-25, no. 6, pp. 709-713.

Fellner-Feldegg H., 1969. The measurement of dielectrics in the time domain. Journal of physics and chemics, vol. 73, no. 3, pp. 616-623.

Ferro-Famil L., and Pottier E., 2001. Classification de données SAR multifréquences polarimétriques. Annals Télécommunications, vol. 56, no. 9-10, pp. 510-522.

Francis C.R., 1992. The Height Calibration of the ERS- 1 Radar Altimeter, Proceedings of vol. I, pp 381-393, Cannes, 4-6 November.

Frost V.S., Stiles J.P., Shanmugan K.S., and Holtzmann J.C., 1982. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. IEEE Transactions on Pattern Analyses and Machine Intelligence, PAMI-4, pp. 157-166.

Fung A.K., and Chen K.S., 1992. Dependence of the surface backscattering coefficients on roughness, frequency and polarization states. International Journal of Remote Sensing, vol. 13, pp. 1663-1680.

Fung A.K, 1994. Microwave scattering and emission models and their applications, Artech House, Inc., Boston, London, 573 pages.

Geng H., Gwyn Q.H.J., Brisco B., Boivert J., and Brown R.J., 1996. Mapping of soil moisture from C-band radar images. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 22, no.1, pp. 117-126

Govers G., Takken I., Helming K., 2000. Soil roughness and overland flow, Agronomie, vol. 20, pp. 131-146.

Grandjean J., Paillou Ph., Dubois P., August-Bernex T., Baghdadi N., and Achaché J., 2001. Subsurface structures detection by combining L-band polarimetric SAR and GPR data: example of the Pyla dune (France). IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, no. 6, pp. 1245-1257.

Greidanus, H.S.F., and Otten, M.P.G., 2002. Coastal Imagery from the polarimetric airborne SAR PHARUS, Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24th Canadian symposium on remote sensing, June 24-28, Toronto, Canada (IGARSS 2002).

Hamazaki T., 1997. Overview of the Advanced Land Observing Satellite (ALOS), IAEA Seminar on "Safeguards: Sources and Applications of Open Source Information", Vienna, Austria.

Harrington R.F., 1968. Field computation by moment method. IEEE PRESS, Series on Electromagnetic Waves.

Hess L.L., Melack J. M., Filoso S., and Wang Y., 1995. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 33, pp. 896-903.

Hirosawa H., Komiyama S., and Matsuzaka Y., 1978. Cross-polarized radar backscatter from moist soil. Remote Sensing of Environment, vol. 7, pp. 211-217.

Hirosawa H., Komiyama S., and Matsuzaka Y., 1980. Active microwave remote sensing by using circular polarization. Proceeding 31st Congress Int. Astronautical Federation, IAF-80-B-97, Tokyo, 21-28 September, Pergamon Press.

King D., and Le Bissonnais Y., 1992. Rôle des sols et des pratiques culturelles dans l'infiltration et l'écoulement des eaux . Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. C. R. Acad. FR. vol.78, no. 6, pp. 91-105.

Kobayashi T., and Hirosawa H.,1984. Measurements of radar backscatter from rough soil surface by using linear and circular polarization, International Symposium Microwave signatures in remote sensing, URSI Commission F, Toulouse, France, 16-20 January.

Kunz K.S., and Luebbers R.J., 1993. The finite time domain for electromagnetics. CRC Press, 496 pp.

Le Bissonnais Y., 1990. Experimental study and modelling of soil surface crusting processes. In Bryan R.B. (réd.). Soil erosion – experiments and models. Catena, Suppl., vol.17, pp. 13-28.

Le Bissonnais Y., and Singer M.J., 1992. Crusting, Runoff and erosion Response to Soil Water Content and Successive Rainfalls. Soil Science Society American Journal, vol. 56, pp. 1898-1903.

Le Coz D., Dupas J., du Plessis O., 1998. Development status of the ONERA airborne SAR facilities (RAMSES). EUSAR'98, Friedrichshafen (Germany), May 25-27.

Lee J.S., 1980. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. IEEE Transactions on Pattern Analyses and Machine Intelligence, PAMI-2, pp. 165-168.

Le Hégarat Mascle S., Zribi M., Alem F., Weisse A., and Loumagne C., 2002. Soil moisture estimation from ERS/SAR data: toward an operational methodology. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 12, pp. 2647-2658.

Le Toan T., 1982. Active microwave signatures of soil and crops. Significant results of three years of experiment. Proceeding of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 82, held in Munich, F.R. Germany, on 1-4 june 1982 (New York : IEEE), pp. 3.1-3.5

Le Toan T., Merdas M., Smacchia P., Souyris J.C., Beaudoin A., Nagid Y., and Lichtenegger J., 1994. Soil moisture monitoring using ERS-1. 2nd ERS-1 Symposium ESA, Hambourg, pp. 883-888.

Lopes A., Nezry E., Touzi R., and Laur H., 1993. Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, no. 9, pp. 1735-1758.

Lozet J., and Mathieu C., 1986. Dictionnaire des sciences du sol, ed Lavoisier, pp. 42 et 186.

Macaire J.M., 1971. Etude sédimentologique des formations superficielles sur le tracé de l'autoroute A10 entre Artenay et Meung/ Loire. Thèse 3e cycle Université d'Orléans, 104 pp.

Mattia F., Souyris J.C., Le Toan T., Casarano D., Posa F., and Borgeaud M., 1997. On the surface roughness characterization for SAR data analysis. In proceeding IGARSS97, vol. 99, pp. 997-999.

Mazzega P., and Houry S., 1989. An experiment to invert Seasat altimetry for the Mediterranean and Black Sea mean surfaces, Journal of Geophysics, vol. 96, pp. 259-272.

Mc Naim H., Van der Sanden J.J., Brown R.J., and Ellis J., 2000. The potential of RADARSAT-2 for crop mapping and assessing crop condition. Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Lake Buena Vista, Florida, 10-12 January, vol. 2, pp. 81-88

Moller D., Lou Y., Chu A., and Miller T. 2001. Review of AIRSAR operation system performance. IGARSS 2001, AIRSAR pacrim conferance and workshop, Sydney, Australia.

Moreira A., Fiedler H., Hajnsek I., Hounam D., Krieger G., Papathanassiou K., and Werner M., 2005. Feasibility analyses of pol-inSAR applications with a terraSAR-X tandem mission. PolinSAR, the 2nd international workshop on applications of polarimetric interferometry. Frascati, Italy, ESA-ESREN, 17-21 january.

Morgan M.A., 1990. Principales of finite methods in electromagnetic scattering. PIER2, Editor: Morgan M A, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, U.S.A.

Narasimha Rao P.V., Vidyadhar M.S.R.R., Malleswara Rao T.CH., and Venkataratnam L., 1995. An adaptive filter for speckle suppression in synthetic aperture radar images. International journal of Remote sensing, vol. 16, no. 5, pp. 877-889.

Nezry E., Lopes A., and Touzi R., 1991. Detection of structural and textural features for SAR images filtering. Proc. IGARSS'91, Espoo, vol. 4, pp. 2169-2172, Washington.

Nezry E., Leysen M., DeGrandi G., 1995. Speckle and Scene Spatial Estimators for SAR Image Filtering and Texture Analysis. Proceedings of SPIE, vol. 2584, pp. 110-120.

NSDA : National Space Development Agency of Japan, Earth Observation Research Center, 1999. Global Forest Monitoring and SAR Interferometry. JERS-1 Science Program'99 - PI Reports.

Oh Y., Sarabandi K., and Ulaby F.T., 1992. 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.

Oh Y., Sarabandi K., and Ulaby F.T., 1994. An inversion algorithm for retrieving soil moisture and surface roughness from polarimetric radar observation. IGARSS94, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, California, August, 8-12.

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

Oh Y., Sarabandi K., and Ulaby F.T., 2002. Semi-empirical model of the ensemble-averaged differential Mueller matrix for microwave backscattering from bare soil surfaces. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 6, pp. 1348-1355.

Oh Y., 2004. 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.

Ould Mohamed S., 1995. Etude du fonctionnement hydrique hivernal d'un sol limono-argileux de Petite Beauce. Application d'un modèle d'infiltration et incidence sur le lessivage du nitrate. Thèse de l'Université d'Orléans,184 pp.

Paillou Ph., Dreuillet Ph., and the PYLA'01 team, 2002. The Pyla 2001 experiment: Flying the new RAMSES P-band facility, AIRSAR Earth Science and Application Workshop, Pasadena, USA, March 2002.

Polidori L., 1997. Cartographie radar. Gordon and breach science publishers, vol. 2, 287 pp.

Preiss M., Gray D.A., and Stacy N., 2002. Estimating Scene Coherence in a Change Detection Experiment using the DSTO Ingara SAR". Proceedings of EUSAR 2002 – Fourth European Conference on Synthetic Aperture Radar, 4-6 June, Cologne, Germany, pp. 225-228.

Quesney A., 1999. Assimilation de mesures d'humidité de surface dans un modèle hydrologique conceptuel global. Apport de la télédétection radar ERS/SAR. Thèse de doctorat à l'université de Paris 7.

Quesney A., Le Hégarat-Mascle S., Taconet O., Vidal-Madjar D., Wigneron J.P., Loumogne C., and Normand M., 2000. Estimation of watershed soil moisture index from ERS/SAR data. Remote Sensing of Environment, vol. 72, pp. 290-303.

Rakotoarivony L., 1995. Validation de modèles de diffusion électromagnétique: Comparaison entre simulations et mesures radar héliporté sur des surfaces agricoles de sol nu. Thèse de doctorat, Université de Caen, 175 pp.

Rakotoarivony L., Taconet O., Vidal Madjar D., Bellemain P., and Benallègue M., 1996. Radar backscattering over agricultural bare soils. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, vol. 10, no. 2, pp. 187-209.

Remond A., 1997. Image SAR: potentialités d'extraction d'un paramètre physique du ruissellement, la rugosité (modélisation et expérimentation). Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Pub. BRGM no 261, Orléans, 254 pp.

Rice S.O., 1951. Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces. Comm. Pure Appl. Math, vol. 4, pp. 352-378.

Rum G., 2003. COSMO-SkyMed : Mission definition and main applications and products. POLinSAR2003, workshop on Applications of SAR polarimetry and polarimetric interferometry, ESA-ESRIN, Frascati, Italy, 14-16 January.

Sahebi M.R., Angles J., and Bonn F., 2002. A comparison of multi-polarization and multi-angular approaches for estimating bare soil surface roughness from spaceborne radar data. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 28, pp. 641-652.

Schaber G.G., McCauley J.F., Breed C.S., and Olhoeft G.R., 1986. Shuttle imaging radar: Physical controls on signal penetration and subsurface scattering in the Eastern Sahara. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. GE-24, pp. 603-623.

Schaber G.G., McCauley J.F., and Breed C.S., 1997. The use of multifrequency and polarimetric SIR-C/X –SAR data in geologic studies of Bir Safsaf, Egypt, Remote Sensing of Environment, vol. 59, pp. 337-363.

Scheuchl B., Caves R.G., Cumming I.G., and Staples G., 2001. H/A/alpha-based Classification of Sea Ice Using SAR Polarimetry. In Proceedings of the 23rd Canadian Symposium on Remote Sensing, Quebec City, August 21-24.

Schmugge T., Wilheit T., Webster W., and Gloerson P., 1976. Remote sensing of soil moisture with microwave radiometers-II, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 20771. NASA Technical Note TN-D-8321.

Schreier G., Kosmann D., and Roth A., 1993. The D-PAF ERS-1 SAR Geocoding System GEOS, chapter in geocoding: Data and System, ed. G. Schreier, Herbert Wichmann Verlag GmbH.

Shi J., Dozier J., and Rott H., 1994. Snow mapping in Alpine regions with Synthetic Aperture Radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 32, pp. 152-158.

Shi J., Chen K.S., Jackson Q. Li., T.J, O'Neill P.E, and Tsang L., 2002. A parameterized surface reflectivity model and estimation of bare surface soil moisture with L band radiometer. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 12, pp. 2674-2686.

Sicard D., 1996. RAMSES airborne SAR development, status and experiments. Proceedings of EUSAR'96, Königswinter (Germany), March 26-28.

Singhroy V.R., Saint-Jean R., 1999. Effects of relief on the selection of RADARSAT-1 incidence angle for geological applications. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 25, no. 3, pp. 211-217.

Skou N., Christensen E.L, Woelders K.W., Dall J., Granholm J., and Madsen S.N., 1997. Status of EMISAR: The Danish Airborne Polarimetric & Interferometric SAR System.

Proceeding of the Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Copenhagen, July 7-10, pp. II-157

Srivastava H.S., Patel P., Manchanda M.L., and Adiga S., 2003. Use of multiincidence angle of radarsat-1 SAR data to incorporate the effect of surface roughness in soil moisture estimation. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 41, no. 7, pp. 1638-1640.

Tighe M.L., 2000. Topographic line map production using high resolution airborne interferometric SAR. IAPRS, vol. XXXIII, Amsterdam, 16-23 July.

Torres R., Buck C., Guijarro J., Suchail J.L., and Schonenberg A., 1999. The Envisat ASAR instrument verification and characterisation. ESA, COES SAR workshop, 2-29 October, SP450.

Touzi R., and Lopes A., 1994. The principle of speckle filtering in polarimetric SAR imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 32, no. 5, pp. 1110-1114.

Tukey J.W., 1971. Exploratory Data Analysis, Addison-Wesley, Reading, Mass.

Ulaby F.T., Batlivala P.P., and Dobson M.C., 1978. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture, Part 1, Bare soil. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 16, pp. 286-295.

Ulaby F.T., Moore R.K., and Fung A.K., 1982. Microwave remote sensing active and passive. vol. 2, Radar remote sensing and surface scattering and emission theory (New York : Adison-Wisley).

Ulaby F.T., Moore R.K., et Fung A.K., 1986. Microwave Remote Sensing Active and Passive., vol. 3, Eds. Artech House, inc.

Ulbrichet A., and Reigber A., 1998. Airborne repeat interferometry with DLR's expermintal SAR (ESAR): first results. Proceeding of EUSAR98, Friedrichshafen, Germany.

Walker J.P., Willgoose G.R., and Kalma J.D., 2004. In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. Journal of Hydrology, vol. 293, pp. 85-99.

Wang J.R, O'Neill PE., Jackson T., and Engman E.T., 1983. Multifrequency measurements of the effects of soil moisture, soil texture, and surface roughness. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 21, pp. 44-51.

Wang J.R., Hsu A., Shi J.C., O'Neill P.E., and Engman E.T., 1997. A comparison of soil moisture retrieval models using SIR-C measurements over the little Washita river watershed. Remote Sensing of Environment, vol. 59, pp. 308-320.

Werninghaus R., and Zerfowshi I., 2003. The terrasar-X mission. Proceeding of ASAR conference, Montreal, Canada.

Willmott C.J., and Feddema J.J., 1992. A More Rational Climatic Moisture Index. Professional Geographer, vol. 44, no. 1, pp. 84-88.

Wilson R.G., 1971. Methods of measuring soil moisture. Technical manual series, the Secretariat, Canadian National Commission for the International Hydrological Decade, Ottawa, Canada, 20 pp.

Winebrenner D.P., Tsang L., Wen B., and West R., 1989. Sea-ice characterization measurements needed for testing of microwave remote sensing models. IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 14, no. 2, pp. 149-158.

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

Zribi M., 1998. Développement de nouvelles méthodes de modélisation de la rugosité pour la rétrodiffusion hyperfréquence de la surface du sol. Thèse de doctorat à l'université de Toulouse, pp. 14-15.

Zribi M., and Dechambre M., 2002. A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from C-band radar data. Remote Sensing of Environment, vol. 84, pp. 42-52.

Zribi M., Le Hegarat Mascle S., and Taconet O., 2003. Derivation of wild vegetation cover density in semi-arid regions : ERS2/SAR evaluation. International journal of Remote sensing, vol. 24, no. 6, pp. 1335-1352.

Zobeck T.M., and Onstad C.A., 1987. Tillage and rainfall effects on random roughness: a review. Soil & Tillage Research, vol. 9, pp. 1-20.

(Best W- Basic Envisat and ERS, SAR Toolbox, ESA (Agence Spatiale Européenne) (http://envisat.esa.int/)

Annexe

Valorisations scientifiques :

Articles :

1. Baghdadi N., **Holah N.,** Dubois P., Prévot L., Hosford S., Chanzy A., Dupuis X., and Zribi M., 2004. Discrimination potential of X-band polarimetric SAR data. International Journal of Remote Sensing, vol. 25, no. 22, pp. 4933-4943.

2. **Holah N.,** Baghdadi N., Zribi M., Bruand A., and King C., 2005. Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. Remote Sensing of Environnement, vol. 96, no. 1, pp. 78-86.

3. Baghdadi N., **Holah N.,** Zribi M., 2005. Calibration of the Integral Equation Model for SAR data in C-band and HH and VV polarizations. International Journal of Remote Sensing, in press.

4. Baghdadi N., **Holah N.,** Zribi M., 2005. Soil moisture estimation using multi-incidence and multi-polarization ASAR SAR data. International Journal of Remote Sensing, in press.

5. Zribi M., Baghdadi N., **Holah N.,** Fafin O., and Guérin C., 2004. Evaluation of a rough soil surface description with ASAR-ENVISAT radar data. Remote Sensing of Environnement, vol. 95, pp. 67-76.

6. Zribi M., Baghdadi N., **Holah N.,** and Fafin O., 2005. Surface Soil Moisture Estimation from mutli-incidence angle ASAR-ENVISAT data. International Journal of Remote Sensing, in press.

Communications

1. **Holah N.,** Baghdadi N., Zribi M., Bruand A., and King C., 2004. Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. EUSAR 2004, 25-27 May 2004, ULM, Germany.

2. Baghdadi N., **Holah N.,** Dubois P., Prévot L., Hosford S., Chanzy A., Dupuis X., and Zribi M., 2004. Analysis of X-band polarimetric SAR data for the derivation of the surface roughness over bare agricultural fields. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS 2004)*, Istanbul, Turquie, Juillet 12-23, 2004.

3. Zribi M., Baghdadi N., **Holah N.,** Fafin O., and Guérin C., 2004. Colloque ESA (ERS/ENVISAT Symposium), 5-12 september 2004, Austria.

4. Zribi M., **Holah N.,** and Baghdadi N., 2004. Retrieving of surface moisture and roughness for agricultural soil surfaces with ASAR-ENVISAT data. ENVISAT Symposium, Salzburg, Austria, September 6-10, 2004.

5. Zribi M., **Holah N.,** and Baghdadi N., 2004. Potential of ASAR-ENVISAT data for the estimation of surface moisture and roughness at field scale. International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2004 (*IGARSS 2004)*, Alasca, USA, Septembre 20-24, 2004.

6. Baghdadi N., Zribi M., et **Holah N.,** 2005. Estimation de l'humidité du sol à partir d'images ASAR multi-incidence et multi-polarisation. Ateliers d'Expérimentation et d'Instrumentation (AEI 2005), *8-9 février, Toulouse*.

7. Zribi M., Baghdadi N., and **Holah N**., 2005. General methodology for surface moisture estimation from multi-incidence radar data: application with ASAR-ENVISAT. 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, Saint Petersburg, Russia, June 20-24, 2005.

8. Baghdadi N., Zribi M., and **Holah N**., 2005. A calibration of the IEM model based on SAR data. International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2005 (*IGARSS 2005)*, Seoul, Korea, July 25-29, 2005.

Baghdadi N., Holah N., Dubois-Fernandez P., Prévot L., Hosford S., Chanzy A., Dupuis X. and Zribi M., 2004. Discrimination potential of X-band polarimetric SAR data. International Journal of Remote Sensing, vol. 25, no. 22, pp. 4933-4943.

Discrimination potential of X-band polarimetric SAR data

Nicolas Baghdadi[1], Noha Holah[1,2], Pascale Dubois-Fernandez[3], Laurent Prévot[4], Steven Hosford[1] André Chanzy[4], Xavier Dupuis[3], and Mehrez Zribi[5]

[1] French Geological Survey (BRGM), Service Aménagement et Risques Naturels
3 avenue C. Guillemin, B.P. 6009, 45060 Orléans cedex 2, France

[2] Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO)
Université d'Orléans, Géosciences B.P. 6759
45067 Orléans cedex 2, France

[3] ONERA, Base Aérienne 701, 13661 Salon AIR cedex, France

[4] INRA, Unité Climat Sol et Environnement, Domaine St Paul
84914 Avignon cedex 9, France

[5] CETP/CNRS, 10/12, avenue de l'Europe, 78140 Velizy, France

ABSTRACT

In anticipation of X-band polarimetric SAR data from future sensors, we investigated the potential of fully polarimetric data in X-band to discriminate the principal classes present in a study site near Avignon in France. Decomposition and analysis techniques have been applied to a data set acquired by the ONERA airborne RAMSES SAR. Results show that X-band provides some discrimination capability. The polarimetric parameters, *entropy* and $\overline{\alpha}$ *-angle*, show clearly that these classes' signatures are grouped in five clusters corresponding to physical scattering characteristics. The introduction of the parameter *anisotropy* does not increase our ability to distinguish between different classes whose clusters are in the same entropy/$\overline{\alpha}$ -angle zone. The correlation observed between the radar signal and the surface roughness over bare soils is very low.

Keywords: Polarimetric SAR, X-band, Surface roughness

1. INTRODUCTION

A polarimetric SAR (Synthetic Aperture Radar) system measures the complete complex scattering matrix [**S**] of a medium with quad polarizations. This matrix is made up of the complex scattering coefficients S_{pq}, where p is the transmitting polarization and q the receiving polarization (p , $q = H$ (Horizontal) or V (Vertical)). The polarimetric information of a target can be represented by a scattering coherency matrix [**T**] which can be calculated directly from the complex scattering vector as follows (Cloude and Pottier, 1996):

$$\langle [\mathbf{T}] \rangle = \left\langle \mathbf{k_p} \cdot \mathbf{k_p}^{*\mathrm{T}} \right\rangle \quad (1)$$

with

$$\mathbf{k_p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{pmatrix} \tag{2}$$

where $\mathbf{k_p}$ is the target vector of [**S**], the superscripts *, ^{T} and <.> denote respectively the complex conjugate, the matrix transpose, and spatial averaging over a group of neighbouring pixels using a sliding window. Coherency matrices are frequently processed for speckle reduction by averaging the pixels in a 5x5 window.

Landcover classification using a fully polarimetric SAR image is one of the most important applications of radar polarimetry in remote sensing. However, the majority of studies have been conducted using polarimetric data in P, L and C bands. In this letter, we have applied polarimetric processing techniques to SAR data in order to evaluate the potential of X-band. The overall objective of this study is to evaluate fully polarimetric information by analysing the separability between the different classes present on the study site and thus derive the parameters that are of most use in their classification.

2. POLARIMETRIC SAR DATA DECOMPOSITION

Cloude and Pottier (1996) have proposed a polarimetric decomposition theorem based on the eigenvalue/eigenvector decomposition of the coherency matrix into elementary mechanisms (i.e. single, double and volume scattering) in order to identify the global mean scattering mechanism. The matrix [**T**] can be decomposed into its eigenvector basis using the following equation:

$$\langle [\mathbf{T}] \rangle = \sum_{i=1}^{3} \lambda_i \, \mathbf{V_i} \, \mathbf{V}_i^{*T} \tag{3}$$

where λ_i are the three eigenvalues of <[**T**]>, real and non-negative $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$. $\mathbf{V}_\mathrm{i}$ are the related orthogonal unitary eigenvectors. The eigenvectors are parameterised using 4 angular variables leading to an interpretation of the scattering phenomenon:

$$\mathbf{V}_i = \left[\cos\alpha_i \, , \sin\alpha_i \cos\beta_i \, e^{j\delta_i} \, , \sin\alpha_i \sin\beta_i \, e^{j\gamma_i} \right]^T \tag{4}$$

where α_i , β_i , δ_i , and γ_i represent a set of four independent parameters characterising the fully polarised backscattered field.

Using eigenvectors and eigenvalues, three main parameters are used to characterise the results of this decomposition: entropy (H), $\overline{\alpha}$ -angle, and anisotropy (A). The entropy H is defined from the logarithmic sum of eigenvalues of <[**T**]> and represents the random behaviour of the global scattering:

$$H = -\sum_{i=1}^{3} P_i \cdot \log_3(P_i) \quad , \quad 0 \le H \le 1 \tag{5}$$

where P_i are the normalised eigenvalues :

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^{3} \lambda_j} \tag{6}$$

The entropy H is a measure of randomness of the scattering mechanisms. Low entropy (H~0) indicates a single scattering mechanism (isotropic scattering) while high entropy (H~1) indicates a totally random mixture of scattering mechanisms with equal probability and hence a depolarizing target.

The parameter $\overline{\alpha}$ represents the mean dominant scattering mechanism and is calculated from the eigenvectors and eigenvalues of <[**T**]>:

$$\overline{\alpha} = \sum_{i=1}^{3} \alpha_i P_i \tag{7}$$

where α_i are the scattering mechanisms represented by the three eigenvectors. $\overline{\alpha}$ =0° indicates surface scattering, $\overline{\alpha}$ =45° volume scattering, and $\overline{\alpha}$ =90° double bounce scattering from metallic surfaces (dihedral scatter).

The anisotropy A indicates the distribution of the two less significant eigenvalues:

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad , \quad 0 \le A \le 1 \tag{8}$$

where λ_2 and λ_3 are the two lowest eigenvalues.

It becomes 0 if both scattering mechanisms are of an equal proportion while values of A>0 indicates increasing amounts of anisotropic scattering.

3. DATA SET

Fully polarimetric X-band radar data were acquired by the airborne RAMSES SAR (multi-spectral airborne for signature study) (Dubois et al., 2002) of the French Aerospace Research

Center (ONERA) on March 20, 2002 over a study site near Avignon (southern France, long. 4°53' E and lat. 43°55' N). An image of about 1.8 km wide and 5.2 km long was acquired with incidence angles ranging from 13° to 36°. The slant-range resolution and the azimuth resolution were 0.66 and 0.64 m, respectively. A segment of the SAR image used in this study is shown in Figure 1.

The study site consists mainly of agricultural landscape. It includes agricultural areas, forest stands, houses, buildings, and roads. The agricultural areas are composed mainly of bare soils and wheat fields, but include orchards of various fruit trees, among them peach, pear and apricot. The forest area present in the image is mainly covered with pine and shrubs. The buildings can be considered to be of three distinct types: houses, low building (1 - 2 floors) and high building (3 floors or more). In general, the buildings are characterised by their flat roofs (mostly composed of gravel or tar). During the SAR survey, four trihedrals and one dihedral corner reflectors were deployed to facilitate image calibration.

During the SAR survey, ground photographs and field surveys were conducted to facilitate the identification of different surface types and to measure the characteristics of the agricultural areas. The ground measurements were carried out on wheat fields and on bare soils. Measurements of soil roughness were carried out on five bare soil fields (R1 to R5) using 2 m long needle profilometers with 1 cm sampling intervals. Ten roughness profiles were established for each training field. From these measurements, the root mean square (*rms*) surface heights were calculated. The soil moisture (*mv*) at field scale was assumed to be equal to the mean value estimated from 15 samples (per field) collected from the top 1 cm of soil using the gravimetric method. At the time of the image acquisition, the fields R1 to R4 were freshly tilled whereas R5 had been tilled several months before. The soil is composed of about 53.0% loam, 31.6% clay and 15.4% sand. Canopy measurements (ten samples per field) were also collected and processed for eleven wheat fields to provide the leaf area index and the canopy height. The main characteristics of the ground measurements are summarized in Table 1.

4. DATA ANALYSIS

4.1. Image interpretation

A photo-interpretation of the composite image presented in Figure 1 shows that the difference in backscatter is pronounced between certain surface types. The bright signature is attributed to multiple bounce scattering (presence of buildings, houses, dihedral and trihedrals). Roads,

on the other hand, are very smooth surfaces, and thus appear in a very dark tone on the image. Forests, wheat and fruit trees would seem to have very similar signatures on the imagery. Similarly, it is impossible to distinguish the various roughness states of the areas of bare soil which have a *rms* surface height between 0.85 and 2.4 cm (fields R1, R2, R3 and R4).

4.2. Signature study

Image analysis was carried out to study the behaviour of the principal surface types on the study site (bare soil fields with varying surface roughness, wheat fields, orchards, forest areas, buildings, houses and roads) and to investigate the polarimetric parameters extracted from SAR data in order to discriminate the observed classes. The parameters chosen correspond to parameters frequently used in the literature: backscattering coefficients, copolarization and depolarization ratios, magnitude of the correlation coefficients, entropy, $\overline{\alpha}$-angle, and anisotropy. For each surface type, several training sites based on field observations were selected. Statistical analysis of various parameters for various targets are shown in Figure 2. Each point plotted represents the parameter mean value for a given training site (e.g. a field).

Results show that the backscattering coefficients are ineffective in discriminating the different classes. We observe a low separation between the areas of vegetation (forest, wheat, …) for all polarizations, a large separation between different building types especially in HV polarization, and a moderate separation between bare soils and the other natural classes in HH and VV polarizations. Roads can be differentiated easily from other surface types using the HV polarization.

The copolarization and depolarization ratios show low separability between classes. Only the house class can be extracted without ambiguity using depolarization ratios. However, the polarization ratios HV/HH and VV/HH show high discrimination between forest and wheat. Bare soils and roads are clearly distinguishable from the other classes in using the ratio HV/VV but are not themselves separable.

Concerning the degree of coherence between different polarizations, results show that the correlation parameter between copolar and cross polar is low for natural areas and the potential for discrimination between different classes is low. The correlation parameter between HH and VV provides high separability between bare soils and the other classes.

Concerning the interpretation of polarimetric parameters (entropy, $\overline{\alpha}$-angle and anisotropy), Cloude and Pottier (1997) have proposed a division of the entropy and $\overline{\alpha}$-angle plane into

eight zones of different scattering behaviour, in order to separate the data into basic scattering mechanisms:

Zone 1: High entropy multiple scattering
Zone 2: High entropy volume scattering
Zone 3: Medium entropy multiple scattering
Zone 4: Medium entropy volume scattering
Zone 5: Medium entropy surface scattering
Zone 6: Low entropy multiple scattering
Zone 7: Low entropy volume scattering
Zone 8: Low entropy surface scattering

Figure 3a shows the distribution of airborne RAMSES data in the $H/\overline{\alpha}$ plane with the valid region for coherency matrix data shown with a dotted line. The distribution of $H/\overline{\alpha}$ values shows that the distribution is concentrated at low to medium entropy. Also, we observe overlapping of the polarimetric parameters within the $H/\overline{\alpha}$ plane for different classes. The analysis of entropy and $\overline{\alpha}$ -angle enable us to discriminate five principal clusters:

- Houses and dihedral: low entropy multiple scattering (double bounce scattering) and high values for the $\overline{\alpha}$ -angle (zone 6).
- Trihedrals: low entropy surface scattering and low values for the $\overline{\alpha}$ -angle (zone 8).
- High building: medium entropy multiple scattering and high values for $\overline{\alpha}$ (zone 3).
- Low building and forest: medium entropy volume scattering and medium values for $\overline{\alpha}$ (zone 4). It is impossible to distinguish between these two classes in the $H/\overline{\alpha}$ plane.
- Wheat fields, lawns, orchards, bare soils and roads: medium entropy and low values for $\overline{\alpha}$ (zone 5). For wheat fields, lawns and orchards, surface scattering is the dominant process at X-band. However, a second scattering process resulting from the interaction with the vegetation layer (volume scattering) is present but contributes much less to the signal. The medium entropy observed for wheat, for example, is most probably due to the weak penetration of the radar wave through the vegetation canopy in X-band. Over roads and bare soils mainly surface scattering appears.

In addition to these five main clusters, targets occurring in zones 1 and 2 correspond for the most part to vegetation and forest stands.

Ferro-Famil and Pottier (2001) noted that the introduction of anisotropy information increases the discrimination between targets. Each area in the $H/\overline{\alpha}$ plane is thus divided into two classes according to the pixel's anisotropy value being greater than 0.5 or less than 0.5. For our targets, anisotropy is not a discriminating parameter at X-band. Its value is approximately the same for bare soils, roads, orchards, forest, lawn, wheat and low building ($0.3<A<0.4$, cf.

Figure 3b). For the other targets (trihedral, dihedral, house and high building), the anisotropy is greater than 0.5.

The results obtained in this study are in agreement with the results obtained by Ferro-Famil and Pottier (2001). They demonstrated that in P-band, it is possible to separate the tree parcels in 3 categories; small, moderate and old trees. The results obtained in L-band indicated that different types of trees couldn't be separated precisely. In C-band no discrimination between different tree ages is possible.

This signature study demonstrates the effectiveness of polarimetric X-band for mapping specific classes. A decision tree model can be used to classify the scene by combining the different parameters of the radar signal. The classification rules can be determined easily from training data. The following list proposes the parameters to be used in such a classification process (not exhaustive). By applying these parameters in order, ambiguity between classes is reduced:

- Trihedral: VV or HV/VV or Entropy.
- Dihedral: correlation coefficient between cross and copolar or $\overline{\alpha}$ -angle.
- House: depolarization ratios or Entropy or Anisotropy.
- High building: HH or HV or Anisotropy.
- Low building: HV.
- Bare soils: Entropy or $\overline{\alpha}$ -angle or magnitude of correlation coefficient VV,HH.
- Roads: HV.
- Forest: $H/\overline{\alpha}$ plane (zone 4).
- Orchards, wheat and lawn: difficult to classify as the confusion between the classes will be large.

4.3. Relationship between surface conditions and the radar signal

For bare soils, the backscattering coefficients decrease by about 8dB in HH and VV and 10dB in HV between the two bare soil fields R4 and R5 (*rms* surface height of 0.85 and 0.80cm, respectively ; Figure 4a). This decrease is due to the increase of both incidence angle and correlation length, and the decrease of soil moisture (cf. Table 1).

- ***Influence of incidence angle***

The relationship between the radar signal and the incidence angle is given approximately by the function $\cos^{\alpha}\theta$ (Baghdadi et al., 2000). The parameter α is dependent on the dominant scattering mechanism and sensor parameters. In general, for a radar frequency given, the

parameter α is calculated for each surface type and each polarization. Next, the mean α is computed for each polarization by calculating the mean of α for all classes. However, for our image, only the wheat field class is present at different incidence angles. Because of this, we have used the parameter α estimated from the wheat field class data to reduce the angular dependence of the radar signal. In Table 2 the angular dependence is listed for various polarizations. Our training sites of various classes are located between incidence angles of 26° and 32°. This variation in the incidence angle could potentially cause variations in signal power of up to 1.9dB in the HH polarization, 1.6dB in the HV polarization, and 2.9dB in the VV polarization.

- ***Influence of soil moisture and correlation length***

The difference in incidence angle between the two bare soil fields R4 and R5 (*rms* of 0.85 and 0.80cm, respectively) could cause a decrease in the radar signal of about 1.6dB in the HH polarization, 1.4dB in the HV polarization, and 2.4dB in the VV polarization. As mentioned in the literature, an increase in the surface moisture of about 5% leads to an increase of the retrodiffusion coefficient of approximately 1dB when the incidence angle is smaller than 20° (Le Toan et al., 1993). Thus, the decrease in the radar signal caused only by the decrease in soil moisture (about 14%) is approximately 3dB. The slaking crust observed in the field R5 (high correlation length comparatively to the field R4) increases the specular scattering and leads to a decrease of the radar signal of 3.4dB for the HH polarization, 5.6dB for the HV polarization, and 2.6dB for the VV polarization. It is thus possible to track the surface degradation due to the slaking process and to distinguish the freshly tilled fields (R1 to R4 as compared to R5).

- ***Influence of rms surface height***

The *rms* surface height has little influence on the radar signal which remains virtually constant when the *rms* surface height increases from 0.85cm to 2.4cm (R1 to R4). We observe that the copolarization ratio reduces significantly the dependence of the radar signal on the *rms* surface height (Figure 4b). For the depolarization ratios, we observe a very weak relationship between the radar signal and the roughness parameter. As for the correlation coefficients, these were found to be much less dependent on the *rms* (Figure 4c). Discrimination between the bare soils surface roughness in the $H/\overline{\alpha}$ and H/A planes is not possible (Figures 3, 4d, 4e and 4f), however, the parameters H and $\overline{\alpha}$ increase slightly with

the *rm*s surface height. As for the anisotropy, we observe the opposite behaviour, this parameter decreases with *rms* surface height. In conclusion, the polarimetric parameters do not provide discrimination between the roughness states.

5. CONCLUSIONS

The potential of polarimetric SAR data at X-band has been tested with data acquired with the ONERA's RAMSES system over an area of Avignon in Southern France. The polarimetric measurements provide a more complete description of targets than is possible with a single-channel radar system. Results obtained show moderate discrimination between classes at X-band. Certain classes, wheat, lawn and orchards, for example, are difficult to classify. The correlation between the radar signal at X-band acquired at an incidence angle of approximately 26° and surface roughness over bare soils is very low. However, it is possible to observe surface degradation due to the slaking process and to distinguish freshly tilled fields.

The entropy and $\overline{\alpha}$ -angle plane indicate clearly that the class signatures are grouped in five main clusters. The introduction of the anisotropy parameter does not allow discrimination between different classes whose cluster centres are in the same zone of the entropy/$\overline{\alpha}$ plane.

These results suggests that for a more complete analysis, X-band data at a high incidence angle must be studied.

Acknowledgements

This work was supported by the French Geological Survey (BRGM), French Aerospace Research Centre (ONERA), French Centre for the Study of Earth and Planet Environments (CETP), French Agronomic Research Institute (INRA) and the National Remote Sensing Program (PNTS).

References

BAGHDADI N., BERNIER M., GAUTHIER R., and NEESON I., 2000, Evaluation of C-band SAR data for wetlands mapping. *International Journal of Remote Sensing,* **22**(1), 71-88.

CLOUDE S.R. and POTTIER E., 1996, A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **34** (2), 498-518.

CLOUDE S.R. and POTTIER E., 1997, An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **35** (1), 68-78.

DUBOIS-FERNANDEZ P., RUAULT DU PLESSIS O., VAIZAN B., DUPUIS X., CANTALLOUBE H., COULOMBEIX C., TITIN-SCHNAIDER C., DREUILLET P., BOUTRY J.

M., CANNY J. P., PEYRET J., MARTINEAU P., CHANTECLERC M., and BRUYANT J. P., 2002, The ONERA RAMSES SAR system, *IGARSS02*, Toronto, Canada.

FERRO-FAMIL L., and POTTIER E., 2001, Classification de données SAR multifréquences polarimétriques. *Annals Télécommunications,* **56** (9-10), 510-522.

LE TOAN T., MERDAS M., SMACCHIA P., SOUYRIS J.C., BEAUDOIN A., NAGID Y., and LICHTENEGGER J., 1993, Soil moisture monitoring using ERS-1. *2nd ERS-1 Symposium ESA, Hamburg, 883-888.*

FIGURES

Figure 1: Segment of the X-band RAMSES image acquired over a study site near Avignon in southern France. HH, HV and VV are respectively coded in red, green and blue. The incidence angles range from 25° on the left side of the image to 36° at the right side.

Figure 2: Behaviour of different parameters of the radar signal calculated from X-band polarimetric SAR data as a function of various cover types. The x-axis corresponds to class.

Figure 3: Entropy/$\overline{\alpha}$ -angle and entropy/anisotropy scatterplots for training sites of various surface types. Each point represents the mean value of a training field. The standard deviation (s.d.) of entropy is <0.1 except for houses and high buildings where the s.d. is around 0.15. For $\overline{\alpha}$ -angle, the s.d. is about 10 for houses and high buildings, while for the other classes, the s.d. is <6. The standard deviation of anisotropy is always < 0.1.

Figure 4: Variation of backscattering coefficients, copolarization and depolarization ratios, correlation coefficients and polarimetric parameters (entropy, $\overline{\alpha}$ -angle and anisotropy) as a function of *rms* surface height.

TABLES

Field ID	Surface condition	Incidence angle (°)	Soil moisture 0-1 cm (%)	*rms* surface height (cm)	Correlation length (cm)	Canopy height (m)	Leaf Area Index (m^2/m^2)
R1	Ploughed	26.1	15.7	2.40±0.20	5.51±1.65	0	0
R2	Ploughed	26.3	20.0	1.64±0.20	4.43±1.21	0	0
R3	Ploughed	26.5	21.0	1.28±0.15	3.34±0.64	0	0
R4	Ploughed	26.6	22.2	0.85±0.15	3.04±0.98	0	0
R5	Ploughed	31.7	8.6	0.80±0.22	6.42±1.99	0	0
B01, B02, B03, B04, B05, B06, B07, B08, B11, B13, B14	Wheat	26.6 to 31.9	-	-	-	0.36±0.06	1.81±0.75

Table 1 : Ground measurements for the Avignon study site collected in March 2002.

HH	CROSS	VV
$Cos^{7.3717}\theta$	$Cos^{6.4728}\theta$	$Cos^{11.34}\theta$

Table 2: The angular dependence of radar signal at different polarizations.

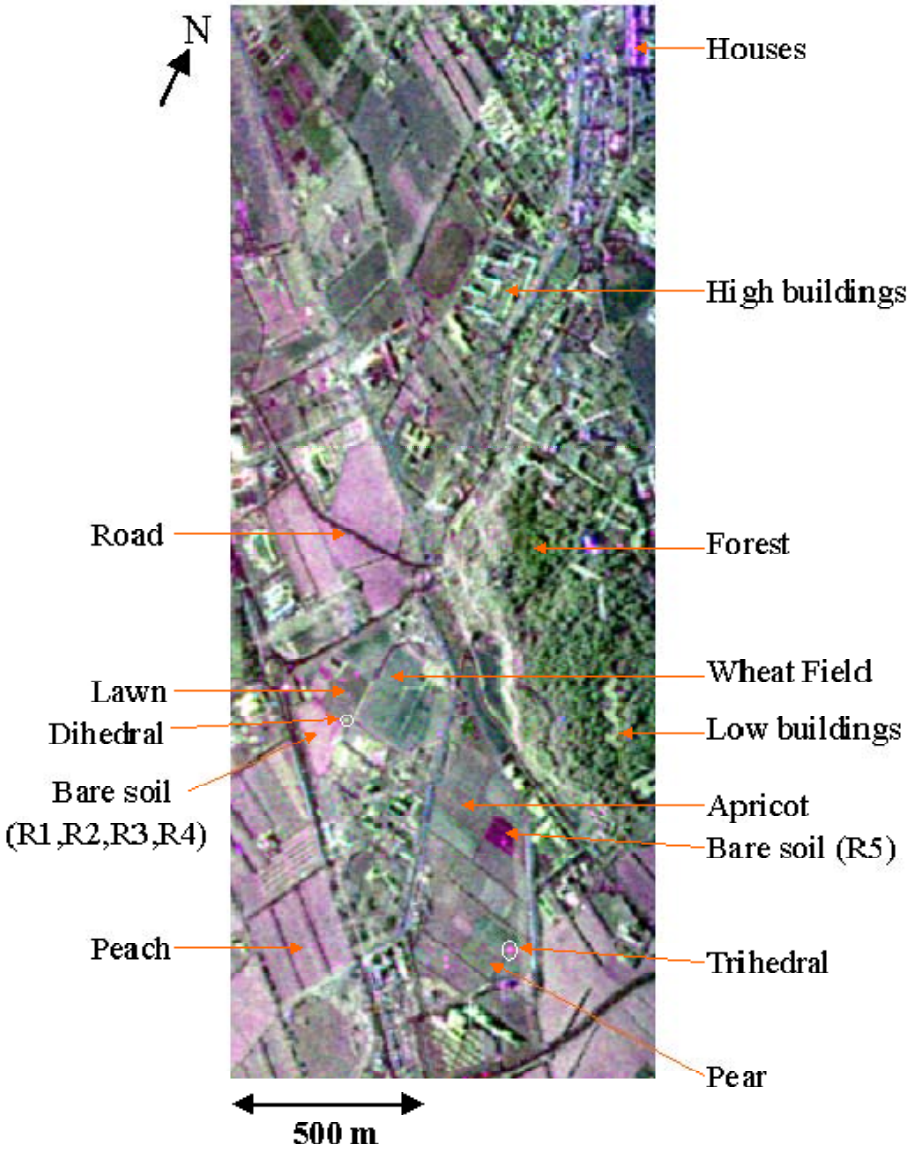

N
Houses
High buildings
Road
Forest
Wheat Field
Lawn
Dihedral
Low buildings
Bare soil
(R1,R2,R3,R4)
Apricot
Bare soil (R5)
Peach
Trihedral
Pear
500 m

Figure 1

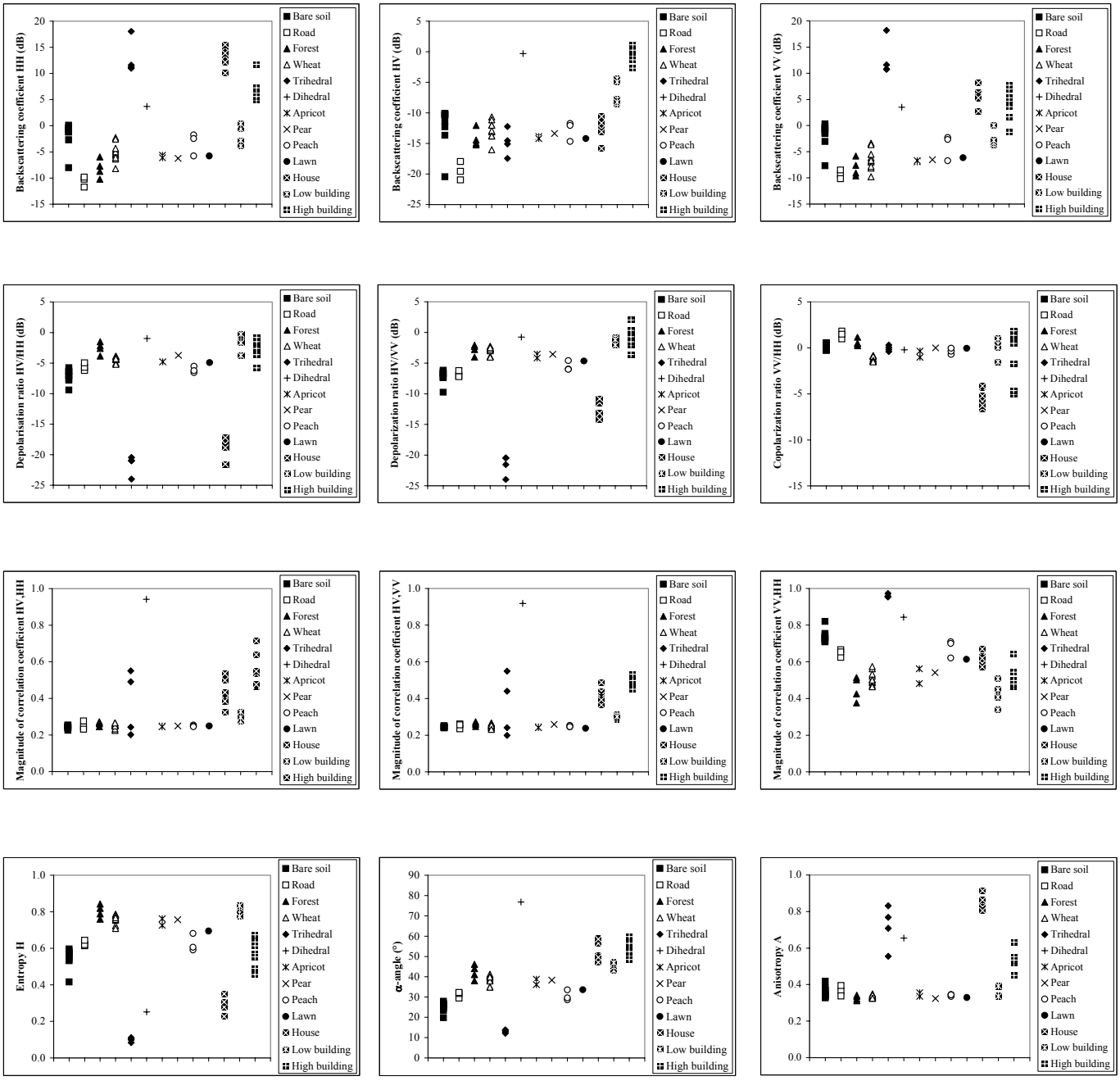
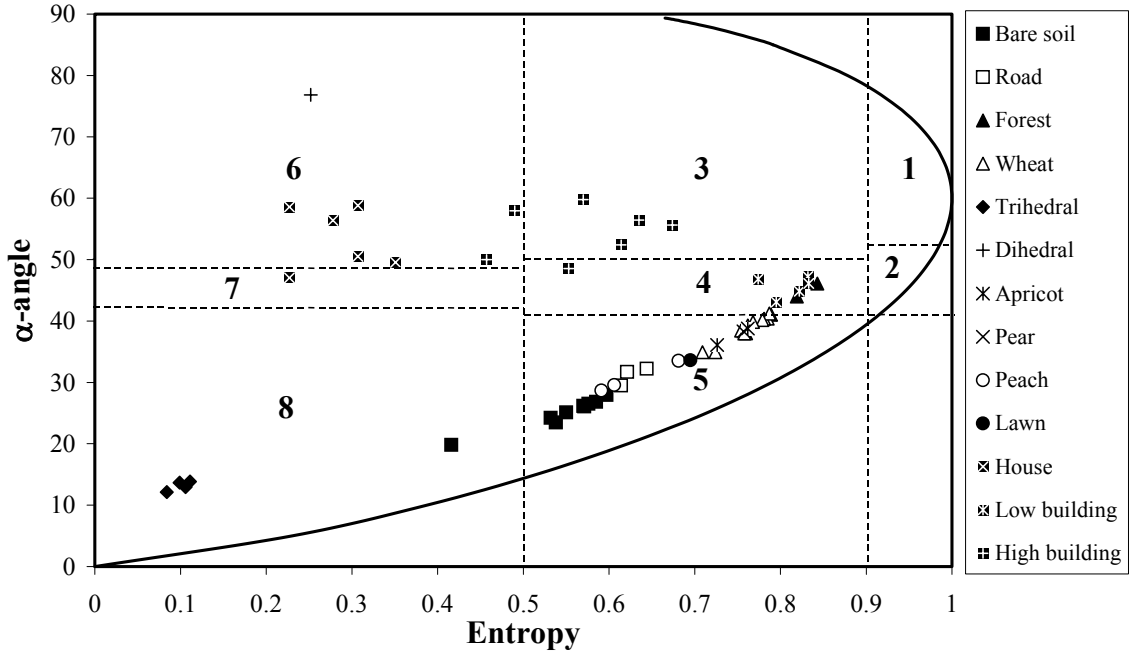
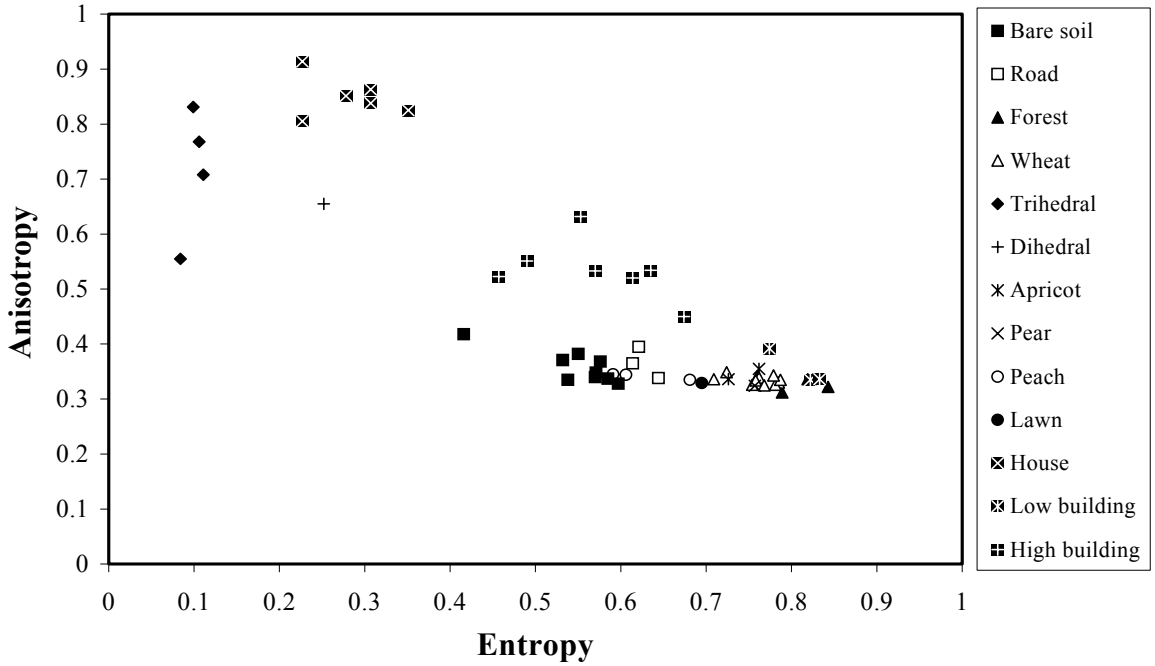

Backscattering coefficient HH (dB)
Backscattering coefficient HV (dB)
Backscattering coefficient VV (dB)
Depolarisation ratio HV/HH (dB)
Depolarization ratio HV/VV (dB)
Copolarization ratio VV/HH (dB)
Magnitude of correlation coefficient HV,HH
Magnitude of correlation coefficient HV,VV
Magnitude of correlation coefficient VV,HH
Entropy H
α-angle (°)
Anisotropy A
Bare soil
Road
Forest
Wheat
Trihedral
Dihedral
Apricot
Pear
Peach
Lawn
House
Low building
High building

Figure 2


α-angle
Entropy
1
2
3
4
5
6
7
8
Bare soil
Road
Forest
Wheat
Trihedral
Dihedral
Apricot
Pear
Peach
Lawn
House
Low building
High building

(a)


Anisotropy
Entropy
Bare soil
Road
Forest
Wheat
Trihedral
Dihedral
Apricot
Pear
Peach
Lawn
House
Low building
High building

(b)

Figure 3

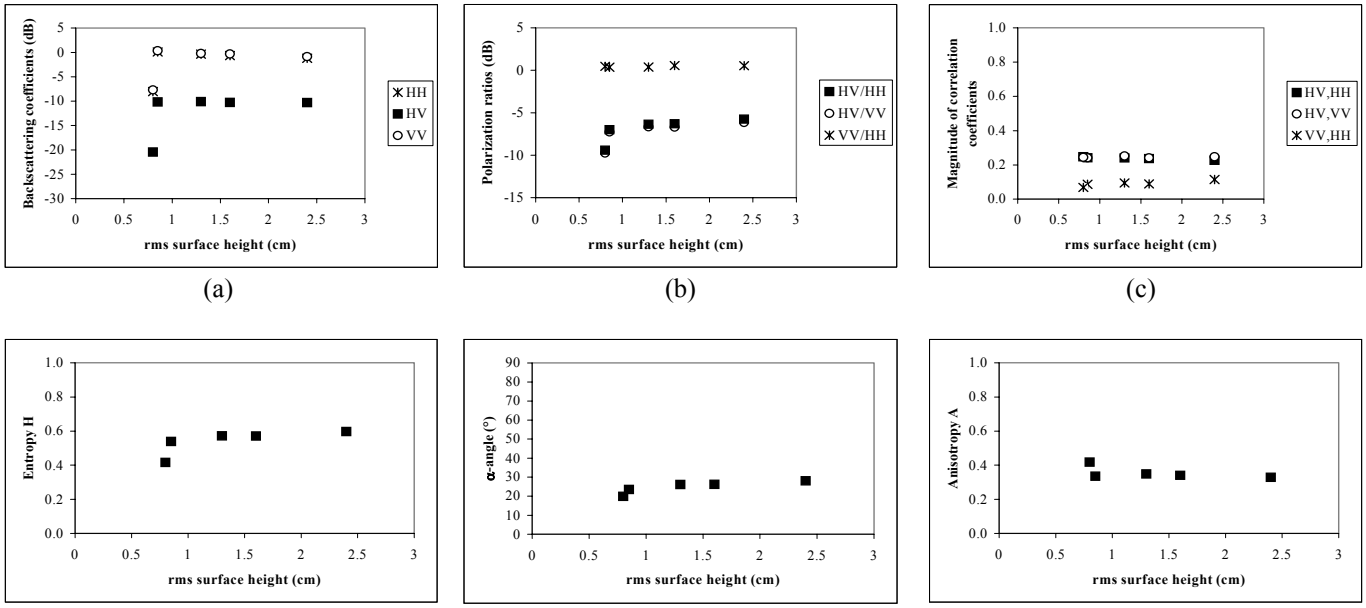

Backscattering coefficients (dB)
rms surface height (cm)
HH
HV
VV
(a)
Polarization ratios (dB)
rms surface height (cm)
HV/HH
HV/VV
VV/HH
(b)
Magnitude of correlation coefficients
rms surface height (cm)
HV,HH
HV,VV
VV,HH
(c)
Entropy H
rms surface height (cm)
(d)
α-angle (°)
rms surface height (cm)
(e)
Anisotropy A
rms surface height (cm)
(f)

Figure 4

Holah N., Baghdadi N., Zribi M., Bruand A., and King C., 2005. Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. Remote Sensing of Environment, vol. 96, no. 1, pp. 78-86.

Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields

N. HOLAH[1,2], N. BAGHDADI[1], M. ZRIBI[3], A. BRUAND[4], and C. KING[1]

[1] Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)
Service Aménagement et Risques Naturels
3 avenue C. Guillemin, B.P. 6009, 45060 Orléans cedex 2, France
n.holah@brgm.fr

[2] Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO)
Université d'Orléans, Géosciences B.P. 6759
45067 Orléans cedex 2, France

[3] CETP/CNRS, 10/12, avenue de l'Europe, 78140 Velizy, France

Abstract

The objective of this investigation is to analyze the sensitivity of ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) data to soil surface parameters (surface roughness and soil moisture) over bare fields, at various polarizations (HH, HV, and VV) and incidence angles (20° to 43°). The relationships between backscattering coefficients and soil parameters were examined by means of sixty ASAR images and several field campaigns. We have found that HH and HV polarizations are more sensitive than VV polarization to surface roughness. The results also show that the radar signal is more sensitive to surface roughness at high incidence angle (43°). However, the dynamics of the radar signal as a function of soil roughness are weak for root mean square (*rms)* surface heights between 0.5 cm and 3.56 cm (only 3 dB for HH polarization and 43° incidence angle). The estimation of soil moisture is optimal at low and medium incidence angles (20° to 37°). The backscattering coefficient is more sensitive to volumetric soil moisture in HH polarization than in HV polarization. In fact, the results show that the depolarization ratio $\sigma^0{}_{HH} / \sigma^0{}_{HV}$ is weakly dependent on the roughness condition, whatever the radar incidence. On the other hand, we observe a linear relationship between the ratio $\sigma^0{}_{HH} / \sigma^0{}_{HV}$ and the soil moisture. The backscattering coefficient ratio between a low and a high incidence angle decreases with the *rms* surface height, and minimizes the effect of the soil moisture.

Keywords: *Soil moisture, Soil surface roughness, ASAR images.*

1. Introduction

The use of Synthetic Aperture Radar (SAR) data to retrieve soil moisture and surface roughness parameters is of considerable importance in many domains, including agriculture, hydrology, and meteorology. SAR data based on a single configuration, such as ERS-1/2 (European Remote Sensing) with VV polarization and a 23° incidence angle, and RADARSAT-1 with HH polarization and incidence angles ranging from 20° to 50°, have been used for retrieving both soil moisture and surface roughness (e.g. Dobson and Ulaby, 1986; Ulaby *et al.*, 1986; Oh *et al.*, 1992; Fung, 1994; Dubois *et al.*, 1995; Baghdadi *et al.*, 2002a; Le Hégarat *et al.*, 2002; Zribi *et al.*, 2002; Srivastava *et al.*, 2003).

The radar signal, which depends on various radar parameters (incidence angle, frequency, and polarization), is also correlated, for bare soils, with soil surface roughness and moisture content. Monitoring the evolution of surface roughness is a way of estimating erosion risk, particularly in agricultural areas. Experimental results and studies using simulation models have shown that the radar signal is more sensitive to surface roughness at high incidence angles than at low incidence angles (e.g. Ulaby *et al.*, 1986; Fung *et al.*, 1992; Baghdadi *et al.*, 2002b). Geng *et al.* (1996) and Baghdadi *et al.* (2003) found that HH polarization is slightly more sensitive than VV polarization to soil surface roughness.

Surface soil moisture plays a crucial role in the continental water cycle, more specifically on the distribution of precipitation between surface runoff and infiltration. Bruckler et al. (1988) based on experimental measurements on a clay loam soil and a wave propagation model, found that in the case of C-band, HH polarization, and a 15° incidence angle, the penetration depth of the radar signal decreases from about 5 cm with a soil moisture content of 10%, to 1 cm with a soil moisture content of 30%. The potential of SAR for detecting changes in surface soil moisture conditions has been demonstrated in the past (e.g. Ulaby *et al.*, 1986; Dobson and Ulaby, 1986; Le Toan, 1982; Fung, 1994; Dubois *et al.*, 1995; Geng *et al.*, 1996; Le Hégarat *et al.*, 2002). Beaudoin et al. (1990) and Geng et al. (1996) reported that for soil moistures lower than 30-35%, the backscattering sensitivity is slightly higher for VV polarization than for HH polarization . However, the estimation of soil moisture using C–band is optimal at low incidence angles (10°-20°), with a minimum influence of soil surface roughness (Ulaby et al., 1978).

This paper investigates the sensitivity of the ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) signal to soil surface parameters (soil roughness and soil moisture) at various polarizations (HH, HV, VV) and incidence angles (20° to 43°). ASAR operating in the C-band (5.33 GHz) allows the acquisition of images in dual-polarization mode (two simultaneous polarizations selected from the four polarizations HH, HV, VH, and VV). In this study we also analyze the sensitivity of the depolarization ratio $\sigma^0{}_{HH} / \sigma^0{}_{HV}$ and the radar signal ratio at low and high incidence angles according to soil surface parameters.

2. Data Set

2.1. Experimental sites and ASAR data

Sixty ASAR/ENVISAT images were acquired for several dates and different polarizations (HH, HV, and VV) with incidence angles between 20° and 43°, over two study sites (Figure 1 and Table 1). The first study site is located at Villamblain in central France (latitude 48° 00` N, longitude 01° 34` E), the second is located in the Touch catchment basin in southern France, near Toulouse (latitude 43° 27.5` N, longitude 01° 02` E). These sites are characterized by large agricultural fields with homogenous soils composed of about 60% loam, 30% clay, and 10% sand for the first site (Macaire, 1971), and about 55% loam, 21% clay, and 24% sand for the second (CRAMP, 1995). The spatial resolution and the pixel spacing of ASAR images are about 30m x 30m and 12.5m x 12.5 m, respectively. Absolute calibration of the ASAR images was carried out to transform the radar signal (a digital number) into a backscattering coefficient (σ^0). All images were georeferenced using topographic maps with a root mean square error of the control points of about 20 m. The registration error of the ASAR images is taken into account by selecting areas of interest (AOI) within each training site and removing 2 pixels relative to the limits defined by the GPS control points. Most of the ASAR images were acquired in HH and HV polarizations; only three images were acquired in VV polarization.

2.2. Experimental measurements

Simultaneously with the radar measurements, ground truth measurements of soil roughness, moisture content, and bulk density were carried out on several bare soil training sites. The number of training sites ranged from 17 to 23 for each campaign. Gravimetric soil moisture samples were collected randomly: about 10 samples per field were taken at 0-5 cm depths. The gravimetric soil moisture content was calculated by drying the samples at 105° C for 24 hours. The volumetric soil moisture (m_v) was then obtained by multiplying the gravimetric

soil moisture by the bulk density. Three bulk density measurements were carried out for each training site using cylindrical samples of 500 cm^3 volume and 9 cm depth. The volumetric soil moisture is obtained from:

$$m_v = \left[\frac{w_{wet} - w_{dry}}{w_{dry}} \right] p_b$$

where w_{wet} and w_{dry} are the wet and dry sample weights, respectively, and p_b is the dry soil bulk density. The soil moisture measurements used in this study were measured within ± 2 hours of the radar acquisition for most of the ASAR overpasses. The soil moisture contents range from 5.4 to 47.3% with a standard deviation of about 1.7%; the bulk densities range from 0.86 to 1.66 with a standard deviation of about 0.06. The lower values of bulk density correspond to recently tilled fields and the high values to untilled fields.

Soil roughness measurements were carried out using a pin-profiler (2 m long, 1 cm sampling interval). Ten roughness profiles were established for each training site, in two directions: parallel and perpendicular to the row direction (5 for each). It is usually assumed that the statistical properties of surface roughness conditions may be summarized using only two parameters: the root mean square (*rms)* surface height and the correlation length (*L*). The rms surface height represents the vertical variations of the surface roughness whereas the correlation length is defined as the displacement for which the autocorrelation function of the profile is equal to 1/e, Ulaby et al., (1982). After digitising the profile photographs, the *rms* surface height and correlation length were calculated for each training site using the mean of the ten autocorrelation functions. Soil surface roughness measurements were carried out for each date on which an ASAR image was acquired, except when no roughness change was observed. As the correlation length is the least accurate parameter and also the most difficult to measure, we decided not to use it in this study. Based on simulations, Oh and Kay (1998) showed that correlation length measurements are unreliable when conventional profilometers of 1 or 2 m long are used (error over 50%), whereas the accuracy associated with the rms is of the order of 15%.

The *rms* values, which depend on the type of agricultural activity, fluctuate in this study between 0.5 cm and 3.56 cm, with the lower values mainly corresponding to sown fields and the higher values to recently ploughed fields. The contours of training sites were determined

using GPS points and SPOT images acquired in 2003. The mean backscattering coefficient (σ^0) was then calculated for each training site using all the pixels within the training site.

3. Results and discussion

3.1. Relationship between backscattering coefficient and surface roughness

In order to analyze the behavior of the ASAR signal as a function of the surface roughness, the backscattering coefficient (σ^0) was plotted for all data, independent of soil moisture. We have classified the ASAR images into three groups of incidence angle: (1) low incidence angle: 20° - 24°, (2) medium incidence angle: 34° - 37°, and (3) high incidence angle: 40°-43°. For each group, Figure 2 shows the relationship between the backscattering coefficient and the *rms* surface height for HH, HV, and VV polarizations.

The results show that the backscattering coefficient for HH and HV polarizations increases with the *rms* surface height. The radar signal is more sensitive to surface roughness at high incidence angles, as suggested by Baghdadi *et al.* (2002b). The dynamics of the radar signal, which are the same for HH and HV polarizations, are weak for *rms* between 0.5 and 3.56 cm: about 1 dB for incidence angles between 20° and 24°, 2 dB for incidence angles between 34° and 37°, and 3 dB for incidence angles between 40° and 43°.

In VV polarization, the backscattering coefficient is weakly dependent on the *rms* surface height whatever the incidence angle (24°, 37°, and 43°: Fig. 2g). The results show that the HH and HV polarizations are more sensitive than the VV polarization to surface roughness. Many studies have reported similar results (e.g. Fung, 1994; Baghdadi *et al.*, 2003; Geng et al. 1996). Under very wet conditions, at soil moistures greater than 35% (13 March and 17 April 2004), the backscattering coefficient becomes almost independent of the surface roughness for all polarizations (Figs. 2c, 2f, and 2g).

With HV polarization and low incidence angles (20°-24°), the results show a weak correlation between radar signal and surface roughness (Fig. 2d). In practice, the backscattering coefficients for ASAR images acquired at different dates are similar in magnitude for all soil moisture levels.

Figure 3 presents the values of the depolarization ratio $\sigma^0{}_{HH} / \sigma^0{}_{HV}$ in terms of the *rms* surface height for the three groups of incidence angle. This ratio shows no significant

dependence on the roughness condition, whatever the radar incidence. The ratio $\sigma^0_{HH} / \sigma^0_{HV}$ decreases with the incidence angle.

3.2. Relationship between backscattering coefficient and soil moisture

The backscattering coefficient was plotted as a function of soil moisture for all data, whatever the *rms* surface height. For each group of incidence angles, Figure 4 shows a linear relationship between the soil moisture and the backscattering coefficient in HH and HV polarizations. In VV polarization, owing to the lower range of moisture content (only 10%) for each group of incidence angles, no relationship could be established between the radar signal and the soil moisture.

In fact, the backscattering coefficient increases with the volumetric soil moisture for values between 5% and 35%. For an incidence angle of 20°-24°, the sensitivity of the radar signal to soil moisture is higher in HH polarization than in HV polarization (0.18dB/% and 0.02dB/%, respectively). The results show that in HH polarization, sensitivity increases slightly when the incidence angle rises from 20°-24° to 34°-37° (from 0.18 to 0.22), and decreases to 0.12 for incidence angles of 40°- 43°. In HV polarization, sensitivity increases significantly from 20°-24° to 34°-37° (0.02dB/% and 0.17dB/%). For an incidence angle of 40°-43°, the difference in sensitivity between HH and HV polarizations is minor (of the order of 10%).

Geng et al., (1996) reported that the slope of the regression between the radar signal, in C-band and for an incidence angle of 55°, and the soil moisture is higher for HH polarization than for HV polarization. Other studies found that the sensitivity of the radar signal to soil moisture is lower in HH polarization than in HV polarization for an incidence angle between 20° and 30° (e.g. Ulaby *et al.*, 1978; Hirosawa *et al.* (1978, 1980); Le Toan, 1982; Kobayashi and Hirosawa, 1984).

For very wet soils (soil moisture greater than 35%), the radar signal does not seem to increase linearly with the soil moisture (Figs. 4b, 4c, 4e, and 4f). In fact, the backscattering coefficient remains constant with increasing volumetric soil moistures. This result has been observed in many studies (e.g. Dobson and Ulaby, 1981; Bruckler *et al.*, 1988; Chanzy, 1993).

We observe a higher dispersion of measurement points for the ASAR data at high incidence angles (40° - 43°): this dispersion is due to the strong influence of the surface roughness

parameter (Figs. 4c and 4f). We conclude that the estimation of volumetric soil moisture is better at low and medium incidence angles, with a minimum influence of soil surface roughness, than at high incidence angles.

Figure 5 presents the ratio $\sigma^0_{HH} / \sigma^0_{HV}$ in terms of the volumetric soil moisture for the three groups of incidence angles. We observe a linear relationship between the radar signal and the volumetric soil moisture. The sensitivity of the signal decreases with the incidence angle, while at high incidence angles (40° - 43°) the ratio becomes almost independent of the volumetric soil moisture (Fig. 5c).

3.3. Behavior of the signal ratio at two incidence angles

The comparison of ASAR images acquired at two different incidence angles (low and high) and with the same polarization has been studied to analyze the dependence of the backscattering coefficient ratios (in dB) on soil moisture and *rms* surface height. However, with the ASAR sensor, it is not possible to obtain images with two incidence angles simultaneously. Therefore the only images used were those acquired on closely spaced dates (less than 10 days apart) and exhibiting the same roughness conditions and soil moistures. No corrections were applied to the backscattering coefficients to take into account the small variations in soil moisture and surface roughness that occurred between the two dates of acquisition. Only training sites having a soil moisture variation of less than 5% between the two dates of acquisition were used. Figures 6 and 7 present the backscattering coefficient ratios $HH_{low\text{-}incidence}$ / $HH_{high\text{-}incidence}$ and $HV_{low\text{-}incidence}$ / $HV_{high\text{-}incidence}$ for *rms* surface height and volumetric soil moisture respectively. The results show that the backscattering coefficient ratio $HH_{low\text{-}incidence}$ / $HH_{high\text{-}incidence}$ decreases with the *rms* surface height. Similarly, the backscattering coefficient ratio $HV_{low\text{-}incidence}$ / $HV_{high\text{-}incidence}$ seems to decrease with the *rms* surface height. We note that the sensitivity of the ratio $HV_{low\text{-}incidence}$ / $HV_{high\text{-}incidence}$ for *rms* surface height is lower than that of the ratio $HH_{low\text{-}incidence}$ / $HH_{high\text{-}incidence.}$ On the other hand, the ratios $HH_{low\text{-}incidence}$ / $HH_{high\text{-}incidence}$ and $HV_{low\text{-}incidence}$ / $HV_{high\text{-}incidence}$ are independent of the soil moisture. These conclusions are in accordance with the work of Autret *et al.* (1989), Oh *et al.* (1992), Zribi *et al.* (2002), and Srivastava *et al.* (2003).

4. Conclusions and further work

The objective of this study was to analyze the behavior of ASAR signal as a function of surface roughness and soil moisture over bare fields. For HH and HV polarizations, the sensitivity of the backscattering coefficient to surface roughness increases with the incidence angle but the difference between the backscattering coefficient for low and high surface heights is minor. For VV polarization, the backscattering coefficient is weakly dependent on the *rms* surface height. The results show that HH and HV polarizations are more sensitive than VV polarization to surface roughness. The high-incidence angle (40°- 43°) ASAR images are the most suitable for discriminating between the various roughness conditions, with a minimum influence of soil moisture. However, the sensitivity of the ASAR signal to surface roughness in an agricultural setting would enable the mapping of bare soils according to two or three roughness classes (smooth, moderate and rough surfaces). When the soil becomes very wet (soil moisture greater than 35%) the backscattering coefficient becomes independent of the surface roughness for both HH and HV polarizations.

We note that the backscattering coefficient with HH polarization is more sensitive to soil moisture than with HV polarization. The mapping of soil moisture using the ASAR data will be optimal at low and medium incidence angles (20°-24° and 34°- 37°), with a minimum influence of roughness parameters, in contrast with high incidence angles (40°- 43°). For very wet soil, the radar signal remains constant with increasing volumetric soil moisture for HH and HV polarizations.

The results indicate that the depolarization ratio $\sigma^0{}_{HH} / \sigma^0{}_{HV}$ is weakly dependent on the roughness condition, whatever the radar incidence. On the other hand, we observe a linear relationship between the ratio $\sigma^0{}_{HH} / \sigma^0{}_{HV}$ and the volumetric soil moisture. The slope of this relationship decreases with the incidence angle. However, at high incidence angles (40° - 43°), the ratio becomes independent of the soil moisture. Furthermore, the ratios $HH_{low\text{-}incidence}$ / $HH_{high\text{-}incidence}$ and $HV_{low\text{-}incidence}$ / $HV_{high\text{-}incidence}$ decrease with *rms* surface height and are independent of soil moisture. The combined use of HH and HV polarizations instead of one alone would not help in acquiring surface parameters, although SAR data at low and high incidence angles would be useful for estimating soil parameters. However, it is not possible to acquire ASAR images with both low and high incidence angles simultaneously.

Other ASAR images at different incidence angles and in VV polarization are required to better analyze the behavior of the backscattering coefficient as a function of surface roughness and soil moisture.

Acknowledgements

This work was jointly financed by the BRGM (French Geological Survey), the PNTS (French Remote Sensing Program), and the PNRH (French Hydrological Program, RIDES project). The authors would like to thank the European Space Agency (ESA) for providing the ASAR images free of charge through ENVISAT/ASAR project No. 351. The SPOT images were acquired through the CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) ISIS program . The authors would also like to thank Steven Hosford, Odile Duval, Olivier Cerdan, Monique Dechambre, Catherine Ottlé, and Christine Guérin for their logistic support during the field campaigns.

References

Autret, M., Bernard, R., and Vidal-Madjar, D., (1989). Theoretical study of the sensitivity of the microwave backscattering to the soil surface parameters. International Journal of Remote Sensing, Vol. 10, No. 1, pp. 171-179.

Baghdadi, N., Gaultier, S., and King, C., (2002a). Retrieving surface roughness and soil moisture from synthetic aperture radar (SAR) data using neural networks. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 28, No. 5, pp. 701-711.

Baghdadi, N., King, C., Bourguignon, A., and Remond, A., (2002b). Potential of ERS and Radarsat data for surface roughness monitoring over bare agricultural fields: application to catchments in Northern France. International Journal of Remote Sensing, Vol. 23, No. 17, pp. 3427-3442.

Baghdadi, N., Bonnifait, L., King, C., and Bourguignon, A., (2003). 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.

Beaudoin, A., Gwyn, Q.H.J., and Le Toan, T., (1990). SAR observation and modelling of the C-band backscatter variability due to multi-scale geometry and soil moisture. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, No. 5, pp. 886-894.

Bruckler, L., Wittono, H., and Stengel, P., (1988). Near surface moisture estimation from microwave measurements. Remote Sensing of Environment, Vol. 26, pp. 101-121.

Chanzy, A. 1993. Basic soil surface characteristics derived from active microwave remote sensing. Remote Sensing Reviews, Vol. 7, pp. 303-319.

CRAMP (Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées), (1995). Les grandes ensembles morpho-pédologiques de la région Midi-Pyrénées.

Dobson, M. C., and Ulaby, F. T. (1981). Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture: Part III- Soil tension. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 19, pp. 51-61.

Dobson, M. C., and Ulaby, F. T., (1986). Active microwave soil moisture research. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 24, No. 1, pp. 23-36.

Dubois, P., Van, Zyl, J.J., and Engman, T., (1995). Measuring of soil moisture with imaging radars. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 33, pp. 915-926.

Fung, A. K., and Chan, K.S., (1992). Dependence of the surface backscattering coefficients on roughness, frequency and polarization states. International Journal of Remote Sensing, Vol. 13, pp. 1663-1680.

Fung, A. K., (1994). Microwave scattering and emission models and their applications. Artech House, Inc., Boston, London, 573 pages.

Geng, H., Gwyn, Q.H.J., Brisco, B., Boivert, J., and Brown, R.J., (1996). Mapping of soil moisture from C-band radar images. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 22, No.1, pp. 117-126

Hirosawa, H., Komiyama, S., and Matsuzaka, Y., (1978). Cross-polarized radar backscatter from moist soil. Remote Sensing of Environment, Vol. 7, pp. 211-217.

Hirosawa, H., Komiyama, S., and Matsuzaka, Y., (1980). Active microwave remote sensing by using circular polarization. Proc. 31st Congress Int. Astronautical Federation, IAF-80-B-97, Tokyo, 21-28 September, Pergamon Press.

Kobayashi, T., and Hirosawa, H., (1984). Measurements of radar backscatter from rough soil surface by using linear and circular polarization, Int. Symp. Microwave Signatures in Remote Sensing, URSI Commission F, Toulouse, France, 16-20 January.

Le Hégarat, S., Zribi, M., Alem, F., Weisse, A., and Loumagne, C., (2002). Soil moisture estimation from ERS/SAR data: toward an operational methodology. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 40, No. 12, pp. 2647-2658.

Le Toan, T., (1982). Active microwave signatures of soil and crops. Significant results of three years of experiments. Proceeding of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 82, held in Munich, F.R. Germany, on 1-4 June 1982 (New York: IEEE), pp. 25-32.

Macaire J.M., (1971). Etude sédimentologique des formations superficielles sue le tracé de l'autoroute A10 entre Artenay et Meung/Loire. Thèse 3e cycle Université d'Orléans, 104 pp.

Oh, Y., Sarabandi, K., and Ulaby, F. T., (1992). An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 30, pp. 370-381.

Oh, Y., and Kay, Y., (1998). Condition for precise measurements of soil surface roughness. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No. 2, pp. 691-695.

Srivastava, H., S., Patel, P., Manchanda, M., L., and Adiga, S., (2003). Use of multiincidence angle of radarsat-1 SAR data to incorporate the effect of surface roughness in soil moisture estimation. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 41, No. 7, pp. 1638-1640.

Ulaby, F. T., Baltivala, P. B., and Dobson, M. C., (1978). Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture: Part 1 – Bare soil. IEEE, Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. GE-16, No. 4, pp. 286-295.

Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K., (1982). Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol. 2, Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory (New York : Addison-Wesley), pp. 822-825.

Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K., (1986). Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Volume Scattering and Emission Theory- Advanced Systems and Applications, Vol. 3, Dedham, Massachusetts: Artech House, Inc., 1098 pages.

Zribi, M., and Dechambre, D., (2002). A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from C-band radar data. Remote Sensing of Environment, Vol. 84, pp. 42-52.

FIGURES

Figure 1. Location map of the study sites.

Figure 2. Variations of the backscattering coefficient in HH and HV polarizations as a function of *rms* surface height for three ranges of incidence angle: (a) HH: 20°-24°, (b) HH: 34°-37°, (c) HH: 40°- 43°, (d) HV: 20°-24°, (e) HV: 34°-37°, and (f) HV: 40°- 43°. The line represents the best fit of the experimental points.

Figure 3. Relationships between the depolarization ratio HH/HV and the *rms* surface height (a): 20°-24°, (b): 34°-37°, and (c): 40°-43°. The line represents the best fit of the experimental points.

Figure 4. Relationships between the backscattering coefficient in HH and HV polarizations and the volumetric moisture content in the top 0-5 cm of soil depth for three ranges of incidence angle: (a) HH: 20°-24°, (b) HH: 34°-37°, (c) HH: 40°- 43°, (d) HV: 20°-24°, (e) HV: 34°-37°, and (f) HV: 40°- 43°. The line represents the best fit of the experimental points.

Figure 5. Relationships between the depolarization ratio HH/HV and the volumetric soil moisture (a): 20°-24°, (b): 34°-37°, and (c): 40°-43°. The line represents the best fit of the experimental points.

Figure 6. Relationships between the ratio $HH_{low\text{-}incidence}$ / $HH_{high\text{-}incidence}$ and $HV_{low\text{-}incidence}$ / $HV_{high\text{-}incidence}$ as a function of *rms* surface height.

Figure 7. Relationships between the ratio $HH_{low\text{-}incidence}$ / $HH_{high\text{-}incidence}$ and $HV_{low\text{-}incidence}$ / $HV_{high\text{-}incidence}$ as a function of soil moisture.

Date (dd/mm/yy)	Site	Sensor mode - Incidence angle	Polarization	Soil moisture (%) [min – mean - max]	Soil bulk density [min - max]	Soil roughness (cm) [min - max]
09/02/03	Villamblain	IS5 – 37°	HH and HV	[25.3 - 27.8 - 30.8]	[0.86 – 0.94]	[0.74 – 3.13]
23/09/03	Villamblain	IS6 – 40°	HH and HV	[8.8 - 16.3 - 21.8]	[0.94 – 1.28]	[0.65 – 1.89]
26/09/03	Villamblain	IS4 – 34°	HH and HV	[5.4 - 6.7 - 10.6]	[0.94 – 1.28]	[0.65 – 2.21]
29/09/03	Villamblain	IS2 – 24°	HH and HV	[5.4 - 6.7 - 10.6]	[0.94 – 1.28]	[0.65 – 2.21]
02/10/03	Villamblain	IS1 – 20°	HH and HV	[14.3 - 18.2 - 21.9]	[0.94 – 1.28]	[0.65 – 2.21]
09/10/03	Villamblain	IS7 – 43°	HH and HV	[17.7 - 24.2 - 32.5]	[0.94 – 1.28]	[0.66 – 1.79]
15/10/03	Villamblain	IS1 – 20°	HH and HV	[12.1 - 21.2 - 30.7]	[0.94 – 1.28]	[0.66 – 1.79]
03/11/03	Villamblain	IS2 – 24°	HH and VV	[25.5 - 31.5 - 35.5]	[0.94 – 1.19]	[0.87 – 3.22]
09/11/03	Villamblain	IS5 – 37°	HH and VV	[18.9 - 26.1 - 31.3]	[0.94 – 1.19]	[0.87 – 2.60]
25/11/03	Villamblain	IS4 – 34°	HH and HV	[25.1 - 31.6 - 37.2]	[0.94 – 1.19]	[0.84 – 2.60]
02/12/03	Villamblain	IS6 – 40°	HH	[28.2 - 32.3 - 36.1]	[0.94 – 1.17]	[0.84 – 2.40]
08/12/03	Villamblain	IS2 – 24°	HH	[19.7 - 25.6 - 34.1]	[0.94 – 1.17]	[0.84 – 2.40]
14/12/03	Villamblain	IS5 – 37°	HH	[22.5 - 28.6 - 35.1]	[0.94 – 1.17]	[0.84 – 2.40]
13/03/04	Touch	IS7 – 43°	HH and HV	[34.4 - 42.3 - 47.3]	[1.19 – 1.66]	[0.50 – 3.56]
17/04/04	Touch	IS7 – 43°	HH and VV	[32.7 - 39.0 - 46.5]	[1.05 – 1.65]	[0.77 – 3.52]
20/04/04	Villamblain	IS6 – 40°	HH and HV	[24.0 - 29.1 - 33.5]	[1.11 – 1.34]	[0.78 – 1.27]

Table 1. Main characteristics of the data set used in this study: images characteristics, range of soil moisture, soil bulk density and soil surface roughness.


UNITED KINGDOM
NETHERLANDS
GERMANY
BELGIUM
LUXEMBOURG
Dunkerque
Lille
English Channel
Cherbourg
Rouen
PARIS
Nancy
Brest
Villamblain
Orléans
Strasbourg
AUSTRIA
Nantes
Dijon
SWITZERLAND
Limoges
Lyon
Bay of Biscay
Grenoble
ITALY
Valence
Bordeaux
Touch
Nice
MONACO
Toulouse
Toulon
Marseille
Perpignan
Corsica (FR.)
SPAIN
ANDORRA
Mediterranean Sea
0 100 200 km
0 100 200 mi

Figure 1.

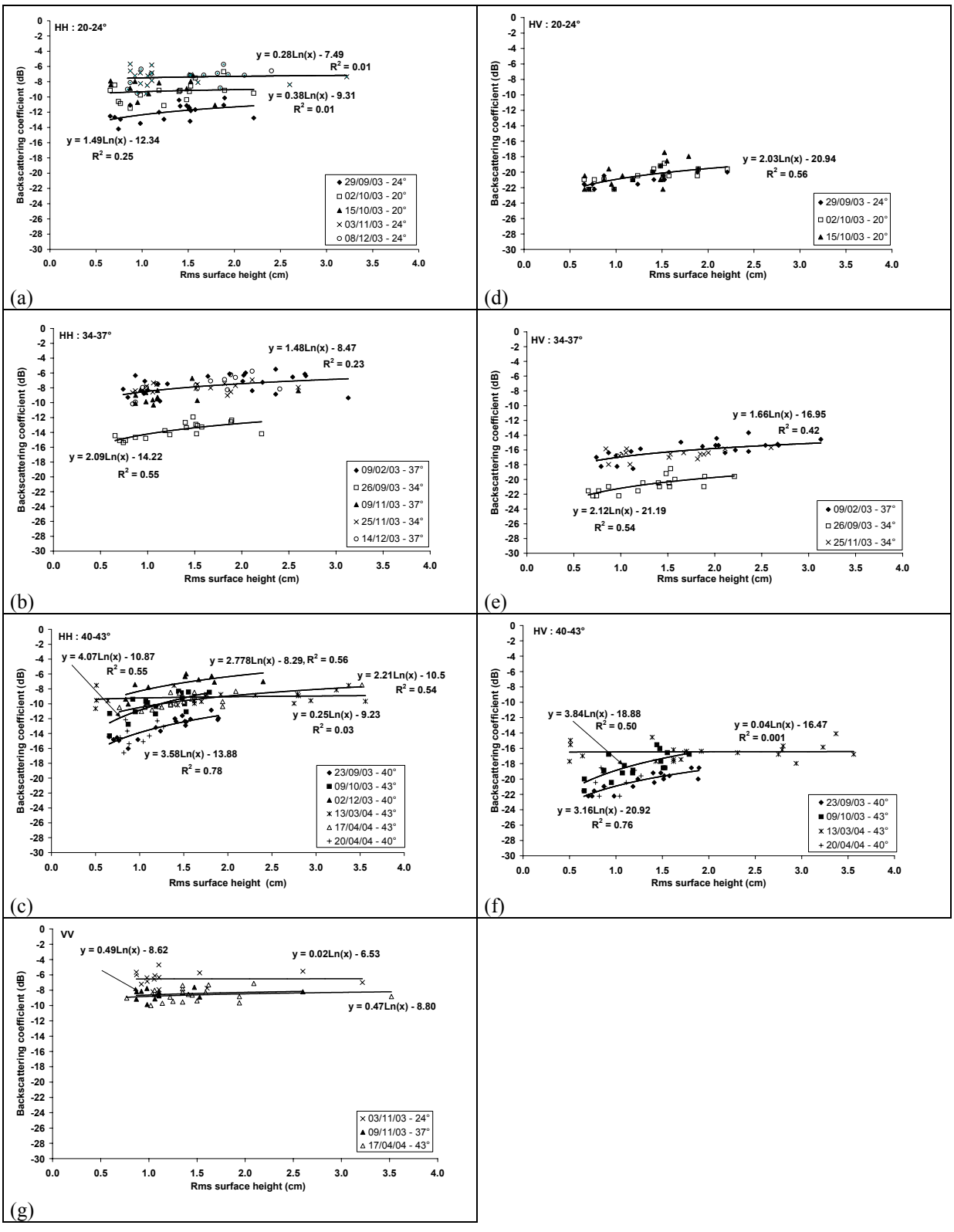

HH : 20-24°
y = 0.28Ln(x) - 7.49
R² = 0.01
y = 0.38Ln(x) - 9.31
R² = 0.01
y = 1.49Ln(x) - 12.34
R² = 0.25
29/09/03 - 24°
02/10/03 - 20°
15/10/03 - 20°
03/11/03 - 24°
08/12/03 - 24°
Backscattering coefficient (dB)
Rms surface height (cm)
(a)
HV : 20-24°
y = 2.03Ln(x) - 20.94
R² = 0.56
29/09/03 - 24°
02/10/03 - 20°
15/10/03 - 20°
Backscattering coefficient (dB)
Rms surface height (cm)
(d)
HH : 34-37°
y = 1.48Ln(x) - 8.47
R² = 0.23
y = 2.09Ln(x) - 14.22
R² = 0.55
09/02/03 - 37°
26/09/03 - 34°
09/11/03 - 37°
25/11/03 - 34°
14/12/03 - 37°
Backscattering coefficient (dB)
Rms surface height (cm)
(b)
HV : 34-37°
y = 1.66Ln(x) - 16.95
R² = 0.42
y = 2.12Ln(x) - 21.19
R² = 0.54
09/02/03 - 37°
26/09/03 - 34°
25/11/03 - 34°
Backscattering coefficient (dB)
Rms surface height (cm)
(e)
HH : 40-43°
y = 4.07Ln(x) - 10.87
R² = 0.55
y = 2.778Ln(x) - 8.29, R² = 0.56
y = 2.21Ln(x) - 10.5
R² = 0.54
y = 0.25Ln(x) - 9.23
R² = 0.03
y = 3.58Ln(x) - 13.88
R² = 0.78
23/09/03 - 40°
09/10/03 - 43°
02/12/03 - 40°
13/03/04 - 43°
17/04/04 - 43°
20/04/04 - 40°
Backscattering coefficient (dB)
Rms surface height (cm)
(c)
HV : 40-43°
y = 3.84Ln(x) - 18.88
R² = 0.50
y = 0.04Ln(x) - 16.47
R² = 0.001
y = 3.16Ln(x) - 20.92
R² = 0.76
23/09/03 - 40°
09/10/03 - 43°
13/03/04 - 43°
20/04/04 - 40°
Backscattering coefficient (dB)
Rms surface height (cm)
(f)
VV
y = 0.49Ln(x) - 8.62
y = 0.02Ln(x) - 6.53
y = 0.47Ln(x) - 8.80
03/11/03 - 24°
09/11/03 - 37°
17/04/04 - 43°
Backscattering coefficient (dB)
Rms surface height (cm)
(g)

Figure 2.

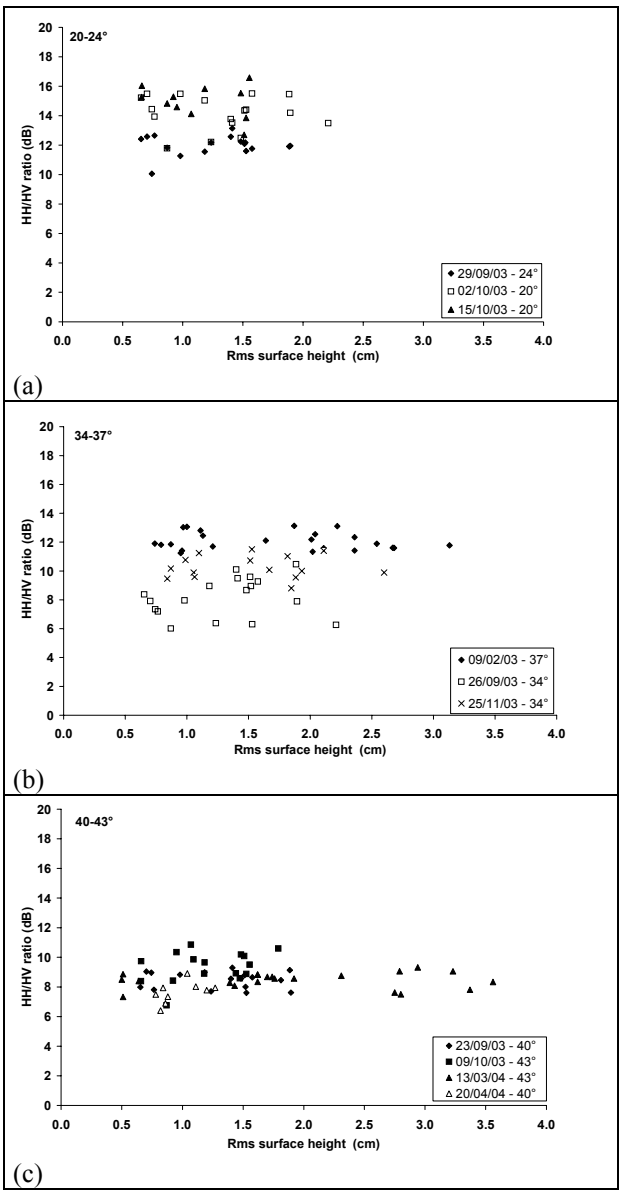

20-24°
HH/HV ratio (dB)
Rms surface height (cm)
29/09/03 - 24°
02/10/03 - 20°
15/10/03 - 20°
(a)
34-37°
HH/HV ratio (dB)
Rms surface height (cm)
09/02/03 - 37°
26/09/03 - 34°
25/11/03 - 34°
(b)
40-43°
HH/HV ratio (dB)
Rms surface height (cm)
23/09/03 - 40°
09/10/03 - 43°
13/03/04 - 43°
20/04/04 - 40°
(c)

Figure 3.

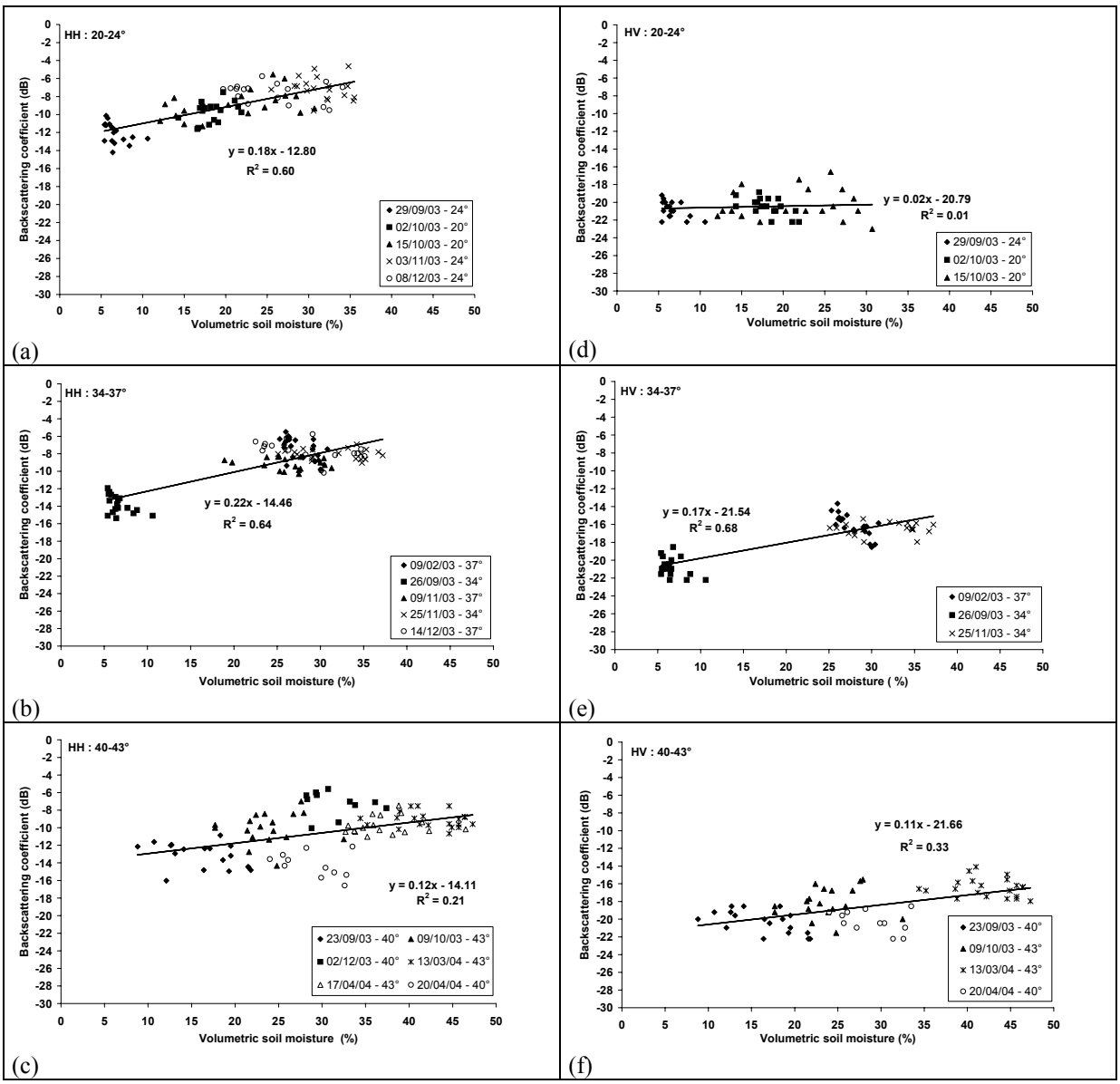

HH : 20-24°
y = 0.18x - 12.80
R² = 0.60
29/09/03 - 24°
02/10/03 - 20°
15/10/03 - 20°
03/11/03 - 24°
08/12/03 - 24°
(a)
HV : 20-24°
y = 0.02x - 20.79
R² = 0.01
29/09/03 - 24°
02/10/03 - 20°
15/10/03 - 20°
(d)
HH : 34-37°
y = 0.22x - 14.46
R² = 0.64
09/02/03 - 37°
26/09/03 - 34°
09/11/03 - 37°
25/11/03 - 34°
14/12/03 - 37°
(b)
HV : 34-37°
y = 0.17x - 21.54
R² = 0.68
09/02/03 - 37°
26/09/03 - 34°
25/11/03 - 34°
(e)
HH : 40-43°
y = 0.12x - 14.11
R² = 0.21
23/09/03 - 40°
09/10/03 - 43°
02/12/03 - 40°
13/03/04 - 43°
17/04/04 - 43°
20/04/04 - 40°
(c)
HV : 40-43°
y = 0.11x - 21.66
R² = 0.33
23/09/03 - 40°
09/10/03 - 43°
13/03/04 - 43°
20/04/04 - 40°
(f)
Backscattering coefficient (dB)
Volumetric soil moisture (%)

Figure 4.

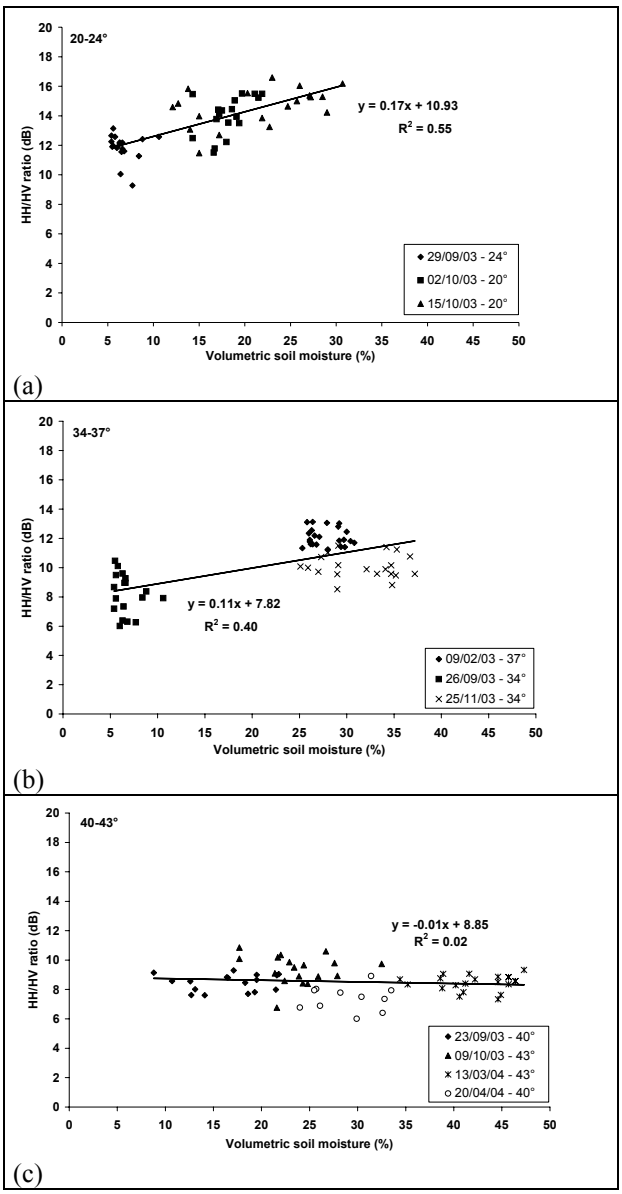

20-24°
y = 0.17x + 10.93
R2 = 0.55
29/09/03 - 24°
02/10/03 - 20°
15/10/03 - 20°
HH/HV ratio (dB)
Volumetric soil moisture (%)
(a)
34-37°
y = 0.11x + 7.82
R2 = 0.40
09/02/03 - 37°
26/09/03 - 34°
25/11/03 - 34°
HH/HV ratio (dB)
Volumetric soil moisture (%)
(b)
40-43°
y = -0.01x + 8.85
R2 = 0.02
23/09/03 - 40°
09/10/03 - 43°
13/03/04 - 43°
20/04/04 - 40°
HH/HV ratio (dB)
Volumetric soil moisture (%)
(c)

Figure 5.

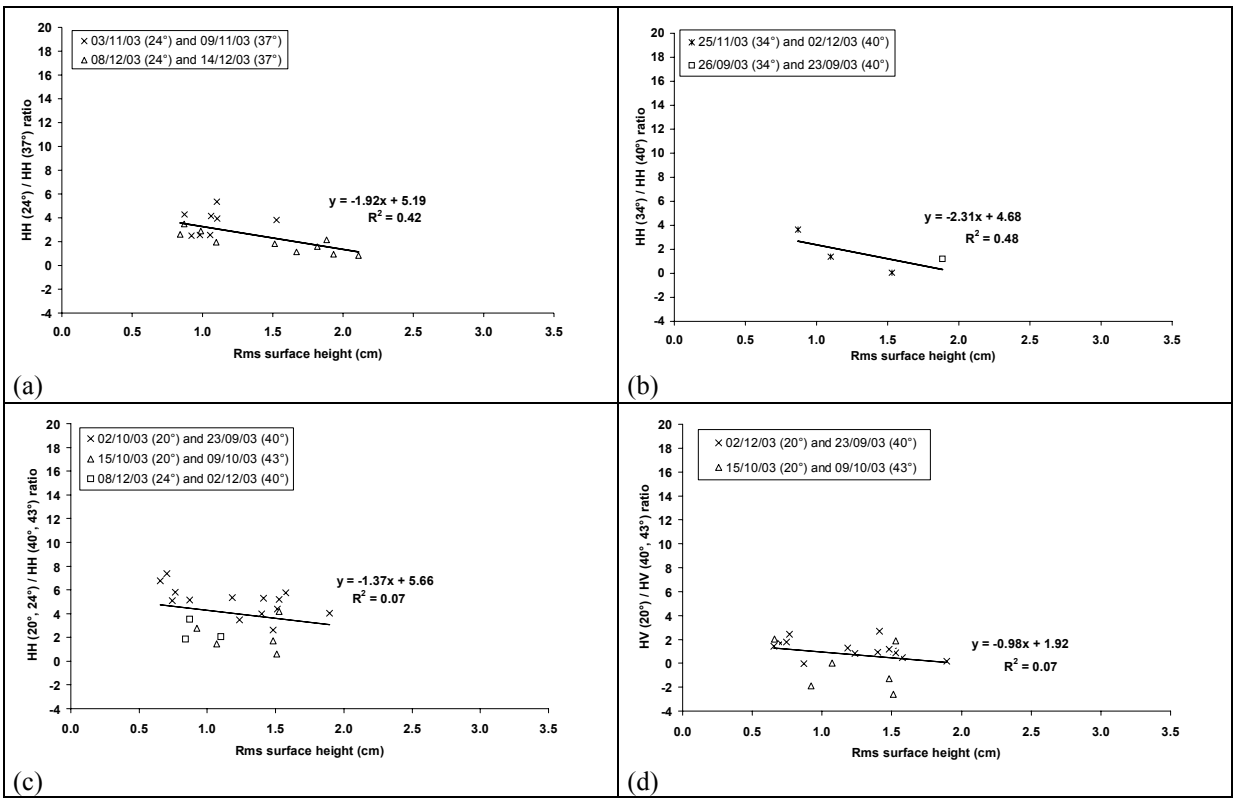

× 03/11/03 (24°) and 09/11/03 (37°)
△ 08/12/03 (24°) and 14/12/03 (37°)
HH (24°) / HH (37°) ratio
y = -1.92x + 5.19
R2 = 0.42
Rms surface height (cm)
(a)
× 25/11/03 (34°) and 02/12/03 (40°)
□ 26/09/03 (34°) and 23/09/03 (40°)
HH (34°) / HH (40°) ratio
y = -2.31x + 4.68
R2 = 0.48
Rms surface height (cm)
(b)
× 02/10/03 (20°) and 23/09/03 (40°)
△ 15/10/03 (20°) and 09/10/03 (43°)
□ 08/12/03 (24°) and 02/12/03 (40°)
HH (20°, 24°) / HH (40°, 43°) ratio
y = -1.37x + 5.66
R2 = 0.07
Rms surface height (cm)
(c)
× 02/12/03 (20°) and 23/09/03 (40°)
△ 15/10/03 (20°) and 09/10/03 (43°)
HV (20°) / HV (40°, 43°) ratio
y = -0.98x + 1.92
R2 = 0.07
Rms surface height (cm)
(d)

Figure 6.

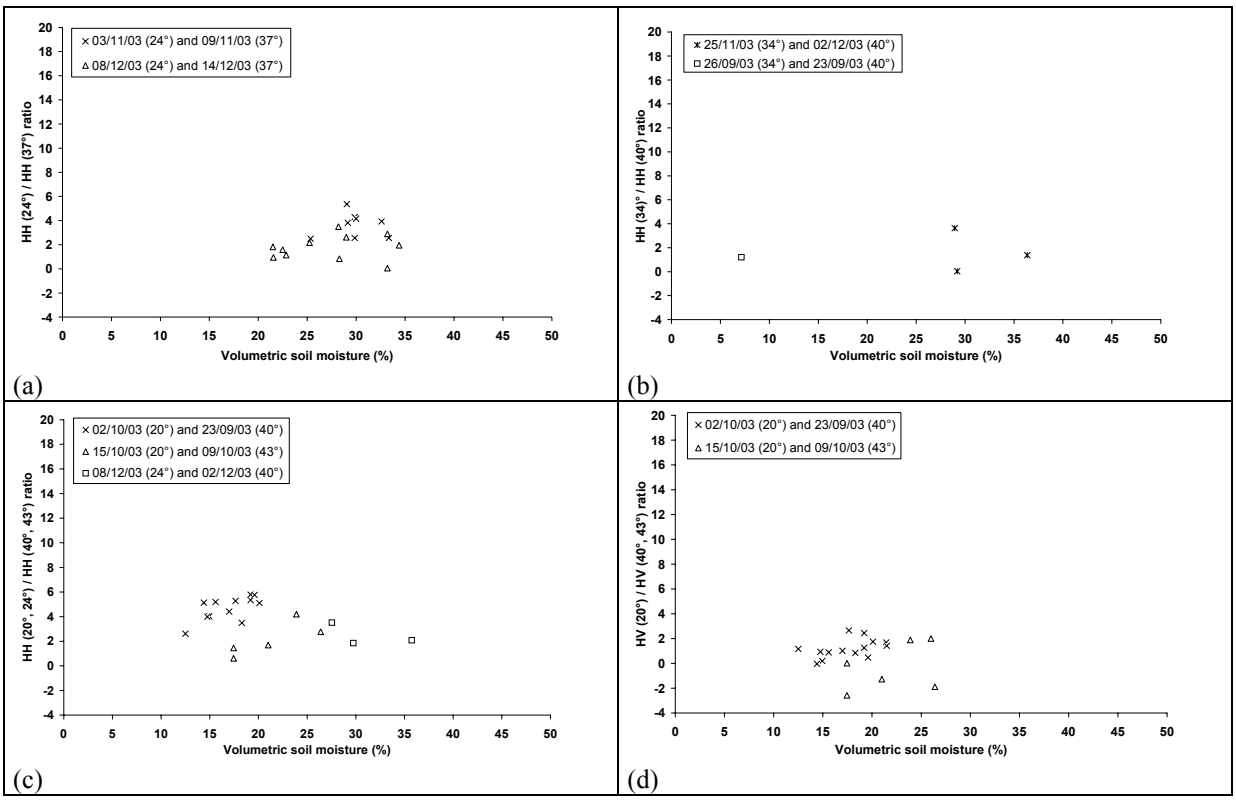

× 03/11/03 (24°) and 09/11/03 (37°)
△ 08/12/03 (24°) and 14/12/03 (37°)
HH (24°) / HH (37°) ratio
Volumetric soil moisture (%)
(a)
× 25/11/03 (34°) and 02/12/03 (40°)
□ 26/09/03 (34°) and 23/09/03 (40°)
HH (34)° / HH (40°) ratio
Volumetric soil moisture (%)
(b)
× 02/10/03 (20°) and 23/09/03 (40°)
△ 15/10/03 (20°) and 09/10/03 (43°)
□ 08/12/03 (24°) and 02/12/03 (40°)
HH (20°, 24°) / HH (40°, 43°) ratio
Volumetric soil moisture (%)
(c)
× 02/10/03 (20°) and 23/09/03 (40°)
△ 15/10/03 (20°) and 09/10/03 (43°)
HV (20°) / HV (40°, 43°) ratio
Volumetric soil moisture (%)
(d)

Figure 7.

Baghdadi N., Holah N., and Zribi M., 2005. Calibration of the Integral Equation Model for SAR data in C-band and HH and VV polarizations. International Journal of Remote Sensing, in press.

Calibration of the Integral Equation Model for SAR data in C-band *and HH and VV polarizations*

Nicolas BAGHDADI[1], Noha HOLAH[1,2], and Mehrez ZRIBI[3]

[1]*French Geological Survey (BRGM), ARN*
3 avenue C. Guillemin, B.P. 6009, 45060 Orléans cedex 2, France
n.baghdadi@brgm.fr

[2] *Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO)*
Université d'Orléans, Géosciences B.P. 6759
45067 Orléans cedex 2, France

[3] *CETP/CNRS*
10/12, avenue de l'Europe, 78140, Velizy, France

Abstract

The inversion of radar images to estimate surface soil parameters requires the use of well-calibrated backscattering models. The first objective of this paper is to confirm the empirical calibration proposed by Baghdadi *et al*. (2004) for the backscattering *Integral Equation Model*. That calibration was a partial one, because it covered only a few radar configurations. The second objective is to extend this calibration to include SAR (*Synthetic Aperture Radar*) data in C-band, for HH and VV polarizations, at any radar incidence between 20° and 50°. ASAR data were used to supplement the database employed by Baghdadi et *al*. (2004). The results show good agreement between the backscattering coefficients given by the SAR sensors and those estimated from the calibrated IEM. This study also confirms the robustness of this calibration.

Key words: Integral Equation Model (IEM), calibration, SAR images, ASAR data

1. Introduction

Estimation of soil parameters by inversion of radar data is generally performed by using a backscattering model capable of reproducing the radar signal regardless of soil characteristics. The Integral Equation Model (IEM: Fung *et al.,* 1992) is one of the models most widely used in inversion procedures for retrieving soil moisture and/or roughness parameters. It is a physical model that is applicable to a wide range of the surface roughness values encountered on agricultural soils, in contrast to other models that usually apply either to smooth or to rough surfaces (SPM, GOM, and POM). However, the IEM results are often in poor agreement with the measured data from satellite radar (e.g., Rakotoarivony *et al.*, 1996; Zribi *et al.*, 1997; Baghdadi *et al.*, 2004).

In the IEM, the description of surface roughness on bare agricultural soils is currently based on three parameters: the correlation function, the correlation length, and the standard deviation of heights (rms). A number of studies have shown that the backscattering coefficient varies considerably depending on the shape of the correlation function, and that the correlation length is highly variable, which introduces significant errors into the modelled radar signal (Altese *et al.,* 1996; Oh and Kay, 1998; Baghdadi *et al.*, 2000; Zribi *et al.*, 2000; Baghdadi *et al*., 2004).

Baghdadi *et al*., (2004) undertook an empirical calibration of the IEM, based on a large experimental database composed of SAR (Synthetic Aperture Radar) images and ground measurements (moisture and roughness). The discrepancies between the IEM and the satellite radar data were related both to the shape of the correlation function and the accuracy of the correlation

length measurements. The other physical input parameters used in the IEM (standard deviation of heights and soil moisture) are assumed to be relatively accurate. The approach consisted of replacing the measured correlation length by a calibration parameter (Lopt) for each data element, so that the model simulations agree closely with the radar measurements. The calibration parameter (Lopt) is thus assumed to correct for the true correlation length as well as the imperfections of the IEM. The fractal correlation function produced the best performance by the IEM, in comparison to the exponential and Gaussian functions. The results showed that the calibration parameter was dependent on rms surface height and instrumental parameters (incidence angle, polarization, and frequency). This calibration enabled a good fit between the simulated model data and the radar data. At the same time, it allowed us to reduce the input parameters for the IEM model to two surface parameters (rms surface height and soil moisture) in place of the initial three (rms surface height, correlation length, and soil moisture).

In spite of the large database utilized by Baghdadi *et al.* (2004) for the empirical calibration of the IEM, it was not possible to obtain a parameterization of the calibration parameter for SAR sensors in the C band, for HH and VV polarizations and for incidence angles between 20° and 50° (the incidences available on the space sensors). In addition to this database, a supplementary database acquired from the ENVISAT ASAR sensor over two sites in France was used. In this study, we demonstrate the robustness of the calibration proposed by Baghdadi *et al.* (2004) by comparing the backscattering coefficient of the ASAR data and the backscattering coefficient given by the model before and after calibration. Next, a mathematical calibration parameter based on the rms surface height, the incidence angle (20° to 50°), and the polarization (HH and VV) is proposed for C-band data. In accordance with the results of previous work, a fractal correlation function is used in the calibration and validation processes.

2. Database

Seventeen radar images were acquired by the ASAR SAR (C-band, 5.33 GHz) between 9 February 2003 and 20 April 2004 over two study sites in France. The first is located near Paris, at Villamblain (latitude 48° 00` N, longitude 01° 34` E). The second is located near Toulouse, in the Touch catchment basin (latitude 43° 27` N, longitude 01° 02` E). These sites are characterised by agricultural fields with homogenous soils composed of about 60% loam, 30% clay, and 10% sand at the first site, and about 55% loam, 21% clay, and 24% sand at the second. Ground truth measurements carried out on several bare soil test fields, simultaneously with the radar acquisition, provided descriptions of the soils and their dielectric and structural properties (roughness, moisture).

The ASAR images used in this study are in HH and VV polarizations, with incidence angles between 20° and 43°. The images were first calibrated to enable the derivation of backscattering coefficients (σ^0). The average backscattering coefficient was then calculated for each test field.

Soil moisture content was measured using the gravimetric method. Soil samples were collected from the upper 0-5 cm soil layer at ten locations within each test field. Most of the *in situ* ground measurements of soil moisture were made within ± 2 hours of the ASAR overpasses. The soil moistures range from 5.4% to 47.3% with a standard deviation of about 2%. The dielectric constant was derived from the surface volumetric moisture content and the soil texture by using the empirical model developed by Hallikaïnen *et al.* (1985).

Soil roughness measurements were also carried out, using a 2-metre-long needle profilometer with a 1 cm sampling interval. Ten roughness profiles were sampled for each test field (five parallel and five perpendicular to the row direction). Based on these measurements, the two roughness parameters, root mean square (*rms*) surface height and correlation length (*L*), were calculated using the mean of all experimental correlation functions, both parallel and perpendicular. The rms surface heights range from 0.5 cm to 3.6 cm.

Table 1 presents the characteristics of the new ASAR database and the one used previously by Baghdadi *et al*. (2004).

3. Empirical calibration of the IEM

The backscattering IEM (Fung *et al.,* 1992) has a large validity domain (k.rms ≤ 3, where k is the wave number ≅ 1.11 cm^{-1} in C band). It provides a value for the backscattering coefficient (σ^0) using the characteristics of the sensor (incidence angle, polarization, and radar wavelength) and of the target (dielectric constant, standard deviation of heights, correlation length, and correlation function). However, many studies have shown the discrepancies between IEM simulations and experimental data extracted from various SARs (ERS, RADARSAT, SIR-C, X-SAR, etc.) (e.g., Rakotoarivony, 1995; Zribi *et al.*, 1997 ; Baghdadi *et al*., 2004).

Baghdadi *et al*. (2004) proposed an empirical calibration of the IEM model, which consisted of replacing the measured correlation length, for each radar configuration, by an optimal calibration parameter (Lopt). The calibration parameter allows us to force the IEM model to better reproduce the SAR data. It replaces the approximate correlation length measurement and compensates for the inaccuracy of the model. Results show that Lopt has two possible solutions, Lopt1 and Lopt2, that ensure good agreement between the IEM and the radar backscattering coefficient (Fig. 1). However, Lopt2 (the highest value) ensures a better physical behaviour of the backscattering coefficient (σ°) as a function of rms (increasing σ° with increasing rms, for a given moisture value). The calibration parameter was found to depend on the roughness, the incidence angle (θ), the polarization (pp), and the radar frequency. The results also showed that a fractal correlation function was optimal, when compared with exponential and Gaussian functions. The fractal function is defined as follows:

$$\rho(x) = e^{-\left(\frac{x}{L}\right)^{\tau}} \qquad (1)$$

where $\tau = -1.67\ D + 3.67$. D is the fractal dimension and is approximately 1.4 for agricultural plots (Zribi, 1998). Thus the coefficient τ is approximately 1.33.

Lopt2 was described using a power-type relationship for all the incidences considered, and for HH and VV polarizations (Baghdadi *et al.,* 2004):

$$Lopt2(rms,\theta,pp) = \alpha\ rms^{\beta} \qquad (2)$$

The coefficients α and β are listed in Table 2 for the C-band radar configurations used in the study by Baghdadi *et al.* (2004).

4. Validation of the IEM calibration

To evaluate the robustness of the IEM calibration proposed by Baghdadi *et al*. (2004), only ASAR data having the same radar configurations or only slightly different incident angles were used (cf. Tables 1 and 2). Simulations were carried out using the calibrated IEM for each radar configuration. The correlation length measured for each plot was replaced by the calibration parameter (Lopt2) extracted from the relationship between Lopt2 and the parameters rms, θ, and pp (cf. Table 2). Figures 2 and 3 present a comparison of σ° simulated by the IEM before and after calibration, and σ° measured from ASAR data. The mean and standard deviation of the difference between IEM σ°

and ASAR σ° were calculated. Table 3 presents comparative results for the calibrated IEM. The results show that the IEM before calibration over-estimates the radar σ° for incidences between 20.4° and 41°, and under-estimates it for incidences between 43° and 43.6°, for both HH and VV polarizations. The bias varies from +4.7dB for HH20.4°/24° to -4.1dB for HH43°/43.6°, and from +3.4dB for VV24° to –7.8dB for VV43.6°. These results show that the bias between the calibrated IEM and the ASAR data has decreased significantly. For example, it fell from +4.7 dB to -0.5dB for HH20.4°/24°, and from +3.4dB to -0.6dB for VV24°. As regards the standard deviation of the error, it remains at the same order of magnitude except for the radar configuration HH43°/43.6°, where it decreases to about 1dB using the calibrated IEM, compared to 4.3dB before calibration. For the other configurations, it ranges between 1.1dB and 2.0dB using the calibrated IEM (cf. Table 3).

These results show the robustness of the empirical calibration proposed by Baghdadi *et al*. (2004) and confirm its interest, since there is good agreement between the IEM-simulated data and the radar-sensor data.

5. Parameterization of the calibration parameter

The second objective of this paper is to extend the calibration of the IEM model to all radar configurations in C-band with incidence angles between 20° and 50°, and for HH and VV polarizations. The diversity of data in the ASAR database allows us to refine the calibration parameter for the radar configurations previously studied in 2004 (Baghdadi *et al*., 2004), and to propose a calibration parameter for the new configurations.

The calibration parameter Lopt2 was calculated for all reference plots. Figure 4 shows the relationship between the calibration parameter and surface roughness for various C-band radar configurations. This figure shows both the results obtained in 2004 and the new results obtained from the ASAR database. They show that the calibration parameter Lopt2 is strongly dependent on the incidence angle. It decreases as the incidence angle increases and is highly variable for low incidence angles. For example, Lopt2 is very different for HH20°/21° and HH24°/25°/26°, and is almost identical for HH from 34° to 41°. We note that Lopt2 is slightly less for VV23°/24° than for HH24°/25°/26° (cf. Figure 5).

The new relationships obtained between the Lopt2 parameter and the rms surface height (Figure 4) differ little from those obtained previously from the 2004 database alone, except for the configuration HH20.4°/21° (cf. Table 2). For this configuration, the relationship between Lopt2 and rms was calculated in the study by Baghdadi *et al*. (2004) only from data with rms greater than 2.5cm.

Next, we parameterized the calibration parameter as a function of rms surface height, incidence angle (θ), and polarization. The mathematical formulations of the calibration parameter, illustrated in Figures 4 and 5, allowed us to plot the α and β parameters of equation (2) as a function of incidence angle for HH and VV polarizations (Figure 6). The incidence angle corresponding to each radar configuration is equal to the mean of the incidences grouped under each configuration. For example, for the HH24°/25°/26° configuration, we find a mean incidence of 25°. Figure 6 shows that the α and β parameters of Lopt2 (eq. (2)) can be written as follows:

$$\alpha_{pp} = \delta\ (\sin\theta)^{\mu} \tag{3}$$

and

$$\beta_{pp} = \eta\theta + \xi \tag{4}$$

Thus the calibration parameter has the form:

$$Lopt2\,(rms, \theta, pp) = \delta\,(\sin\theta)^{\mu}\; rms^{(\eta\theta+\xi)} \qquad (5)$$

where pp is the polarization (HH or VV). Because there are few available data for VV polarization, we have assumed that the relationships between the α and β parameters and the incidence θ take the same form for both HH and VV polarizations. The parameters δ and ξ are dependent on the polarization, while the parameters μ and η are found to be independent of the polarization: δ_{HH} = 4.026 (R^2 = 0.99), δ_{VV} = 3.289, $\mu_{HH} = \mu_{VV}$ = -1.744, $\eta_{HH} = \eta_{VV}$ = -0.0025, ξ_{HH} = 1.551 (R^2 = 0.98), and ξ_{VV} = 1.222.

In order to estimate the errors in IEM simulations that are due to the parameterization of the calibration parameter, we have simulated the backscattering coefficient from the calibrated IEM model by using the calibration parameter calculated from eq. 5. Both databases were used (ASAR database and Baghdadi *et al*. 2004 database). Figure 7 illustrates the results provided by the IEM before and after calibration. They show that the proposed empirical calibration of the IEM is robust, since it provides improved results. The biases and the standard deviations of the error have decreased for all radar configurations. We observe a small difference between calibrated IEM simulations and SAR data (less than 1dB) with a standard deviation better than 2dB. The parameterization of the calibration parameter as illustrated in equation (5) thus enables a correct simulation of the backscattering signal.

6. Conclusions

For a better reproduction of the radar backscattering coefficient on bare soils in an agricultural environment, a good description of the soil surface and an appropriate backscattering model are necessary. The IEM backscattering model was used and its behaviour was studied by comparison with SAR data. The discrepancies noted between IEM simulations and SAR data were found to be related to the uncertainty of the correlation length measurements and to the model itself. The semi-empirical calibration of the IEM, proposed by Baghdadi *et al*. (2004) to ensure better agreement between the model and the SAR data, was evaluated to determine its robustness, by using a new database obtained from the new ASAR sensor. This calibration consisted of finding a calibration parameter that corrects for the measured correlation length and the inaccuracy of the model.

The results obtained led to the conclusion that the simulations produced by the calibrated IEM are accurate, and that this calibration enables a good performance by the IEM (reduced bias and standard deviation of the error). The calibration parameter was found to be dependent on surface roughness, incidence angle, and polarization. With this calibration method, bare agricultural soils are characterized by two surface parameters (rms surface height and soil moisture) instead of three (rms surface height, correlation length, and soil moisture). The use of a new database obtained from the ASAR sensor showed that the calibration parameter is robust and stable; this enabled a refining of the relationships between the calibration parameter and the rms surface height, and an extension of this calibration to new C-band radar configurations. A parameterization of the calibration parameter was carried out on all the databases to allow this IEM calibration to be applied to SAR data in C-band, in HH and VV polarizations, and for incidence angles between 20° and 50°.

These results suggest an operational use for the calibrated version of the IEM. It could be used in SAR data inversion (ERS, RADARSAT, ASAR, etc.) to retrieve surface moisture and roughness data from bare agricultural soils.

Acknowledgements

This work was supported by the BRGM (the French Geological Survey) and by PNRH (the French National Hydrology Program). The authors wish to thank ESA (the European Space Agency) for kindly providing the ASAR images under Project No. 351 ENVISAT/ASAR. Database was produced from work carried out by the BRGM, the Centre d'étude des Environnements Terrestres et Planétaires (CETP), and the Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL) of the Université de Sherbrooke, Canada.

7. References

Altese E., Bolognani O., and Mancini M., 1996. Retrieving soil moisture over bare soil from ERS1 synthetic aperture radar data: Sensitivity analysis based on a theoretical surface scattering model and field data. *Water Resources Research*, vol. 32, no 3, pp. 653-661.

Baghdadi N., Gherboudj I., Zribi M., Sahebi M., Bonn F., and King C., 2004. Semi-empirical calibration of the IEM backscattering model using radar images and moisture and roughness field measurements. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, no. 18, pp. 3593-3623.

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

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

Hallikaïnen M., Ulaby F., Dobson F., EL Rayes M., and Wu L., 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil. Part I: Empirical models and experimental observations, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* vol. 23, pp. 25-34.

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

Rakotoarivony L., Taconet O., Vidal-Madjar D., Bellemain P., and Benallègue M., 1996. Radar backscattering over agricultural bare soils. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 10, no. 2, pp. 187-209.

Zribi M., Ciarletti V., Taconet O., Paillé J., Boissard P., and Chapron M., 2000. Characterisation of the soil structure and microwave backscattering based on numerical three dimensional surface representation: Analysis with a Brownian model, *Remote Sensing of Environment*, vol. 72, pp. 159-169.

Zribi M., 1998. Développement de nouvelles méthodes de modélisation de la rugosité pour la rétrodiffusion hyperfréquence de la surface du sol. Doctoral thesis, University of Toulouse, pp. 14-15.

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

TABLES

Database	Date	**Radar configurations (C-band)**	**Number of data points ($\sigma°$, *mv* , *rms*)**
ASAR (Touch and Villamblain)	2003 and 2004	HH-20°,24°,34°,37°,40°,41°,43°,44° VV-24°,37°,44°	302
Baghdadi *et al.,* 2004	1994 to 1999	HH-21°,24°,25°,26°,35°,39°,40°,45°,47°,48° VV-23°,24°	332

Table 1. Description of the two databases. $\sigma°$: backscattering coefficient (dB), mv: soil moisture (%), rms: standard deviation of heights (cm).

Radar configurations (C-band)	α	β
HH-21°	33.53	1.3605
HH-24°,25°,26°	16.78	1.4533
HH-35°,39°,40°	10.62	1.3955
HH-45°,47°,47.5°,47.7°	7.98	1.4150
VV-23°,24°	16.79	1.2525

Table 2. The coefficients α and β of the relationship between the calibration parameter (Lopt2) and the rms surface height (Baghdadi *et al.,* 2004) in C-band: $Lopt2(rms,\theta,pp) = \alpha\ rms^{\beta}$. θ is the incidence angle, and pp the polarization.

	Uncalibrated IEM		***Calibrated IEM Baghdadi et al., 2004***	
	(IEM-ASAR) [dB]		***(IEM-ASAR) [dB]***	
	mean	standard deviation	mean	standard deviation
HH-20.4°,24°	+4.7	1.7	-0.5	1.6
HH-34.4°,37.4°,40°,41°	+2.4	2.2	-1.3	2.0
HH-43°,43.6°	-4.1	4.3	-0.5	1.0
VV-24°	+3.4	1.6	-0.6	1.1
VV-37.4°	+1.4	1.7	-	-
VV-43.6°	-7.8	2.8	-	-

Table 3. Comparison between the results obtained with the ***uncalibrated IEM*** and those obtained with the ***calibrated IEM***. The calibration parameter is defined in Table 2. These statistics were obtained from the ASAR database. The fractal correlation function was used.

FIGURES

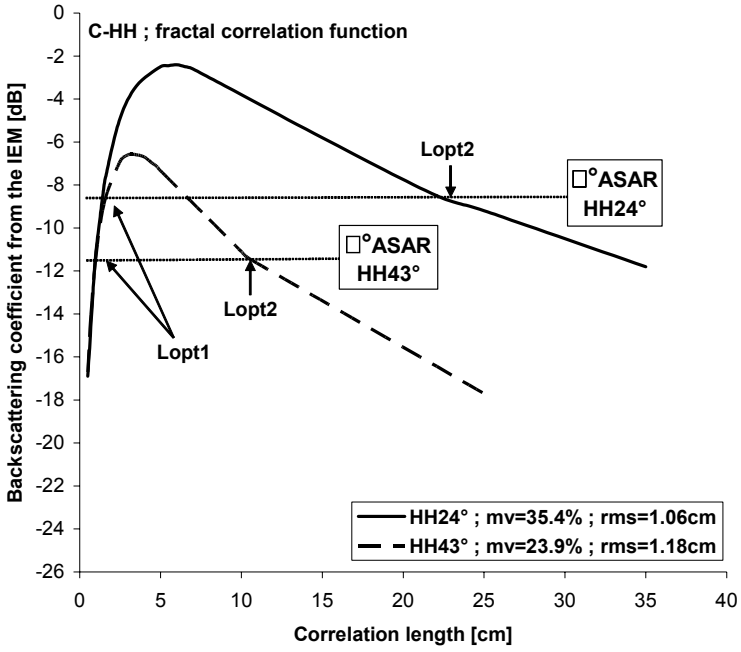


Figure 1. Behaviour of the IEM model as a function of correlation length for a given plot, with a fractal correlation function. Two radar configurations are used: C-HH24° and C-HH43°.

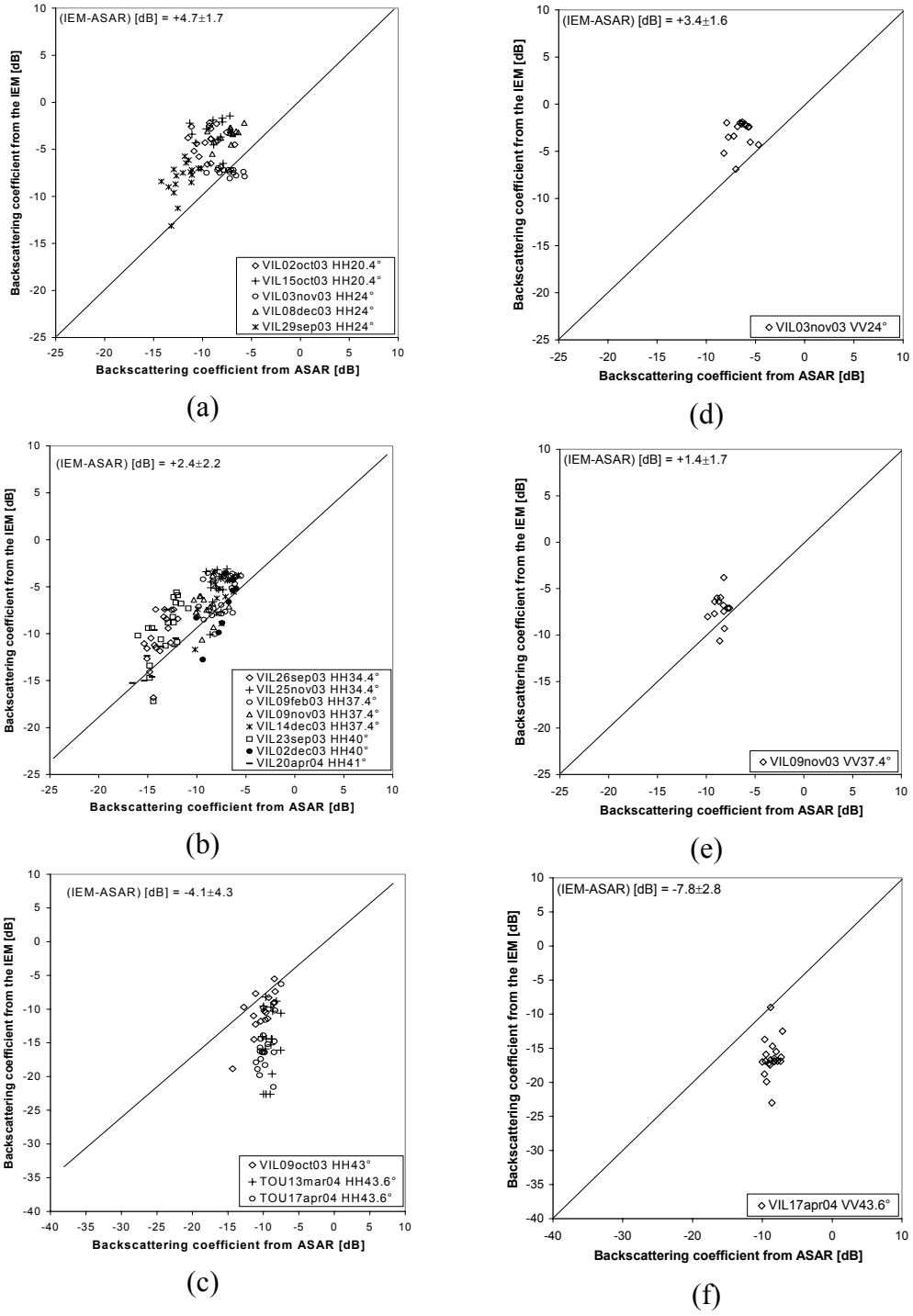


Figure 2. Comparison between the backscattering coefficient simulated by IEM using L measured, and the backscattering coefficient measured from ASAR images. The fractal correlation function was used.

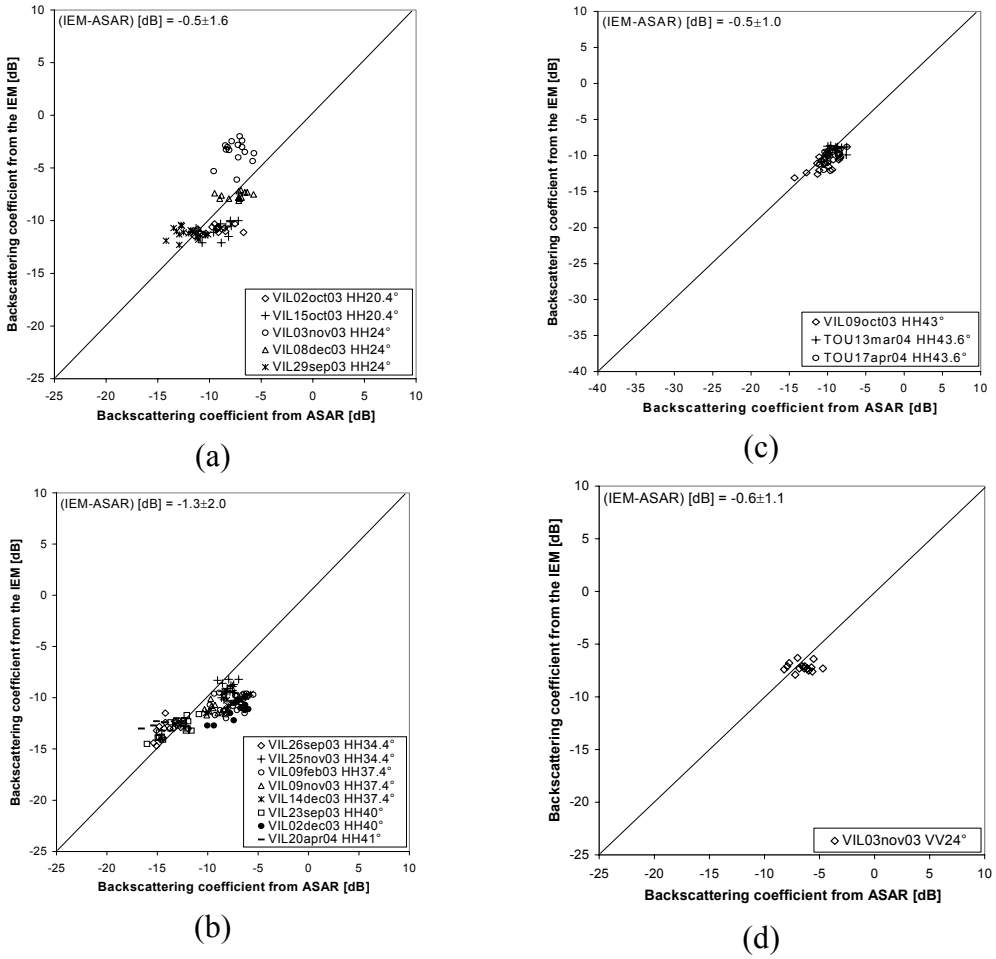


Figure 3. Comparison between the backscattering coefficient simulated by the calibrated IEM (using Lopt2 from Baghdadi *et al*., 2004), and the backscattering coefficient measured from ASAR images. The fractal correlation function was used.

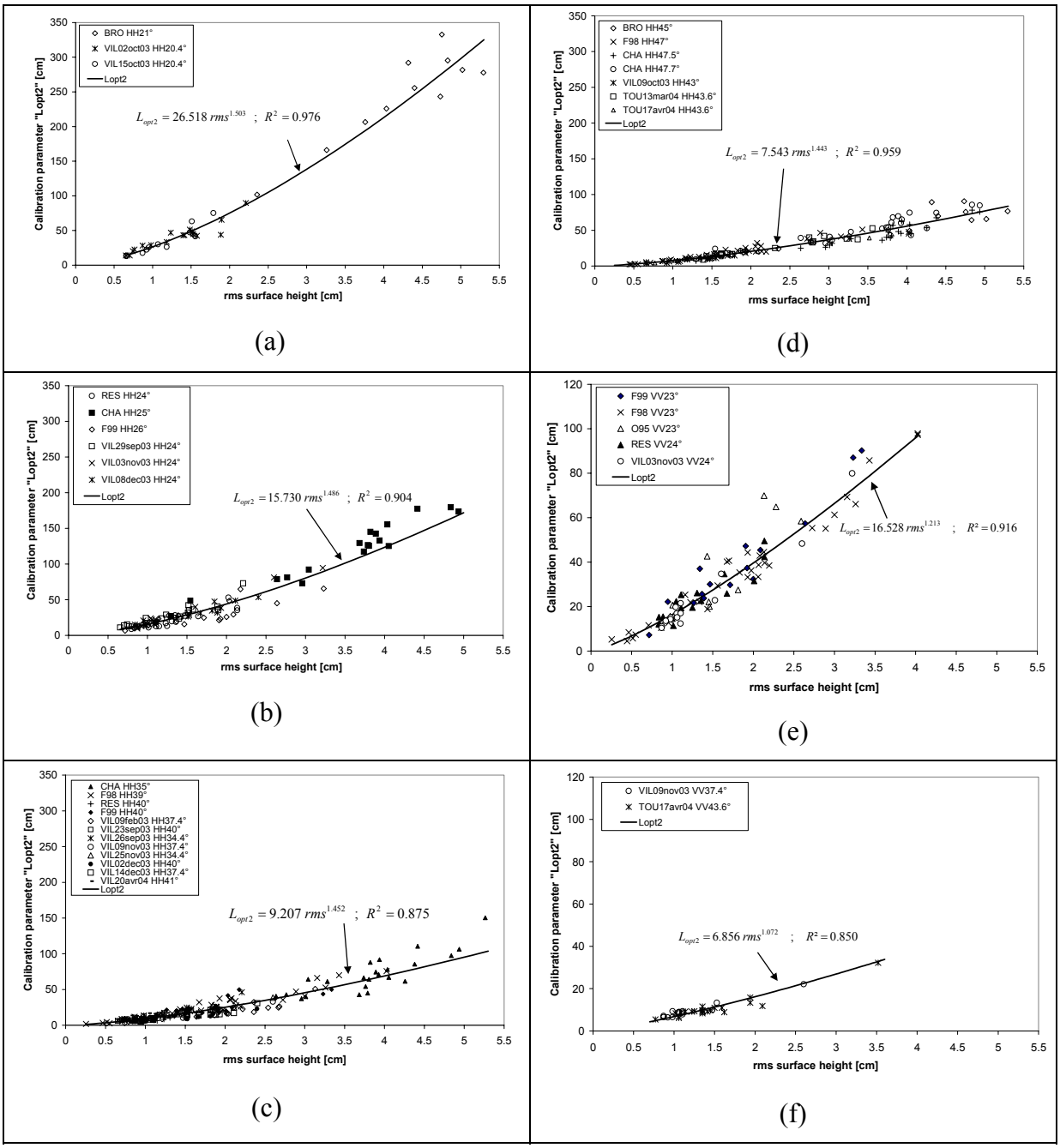


Figure 4. The calibration parameter Lopt2 as a function of surface height for radar configurations in C-band, HH and VV polarizations, and incidence angles between 20° and 48°. The ASAR database (VILxxx and TOUxxx) was used to supplement the database employed by Baghdadi *et al*. (2004).

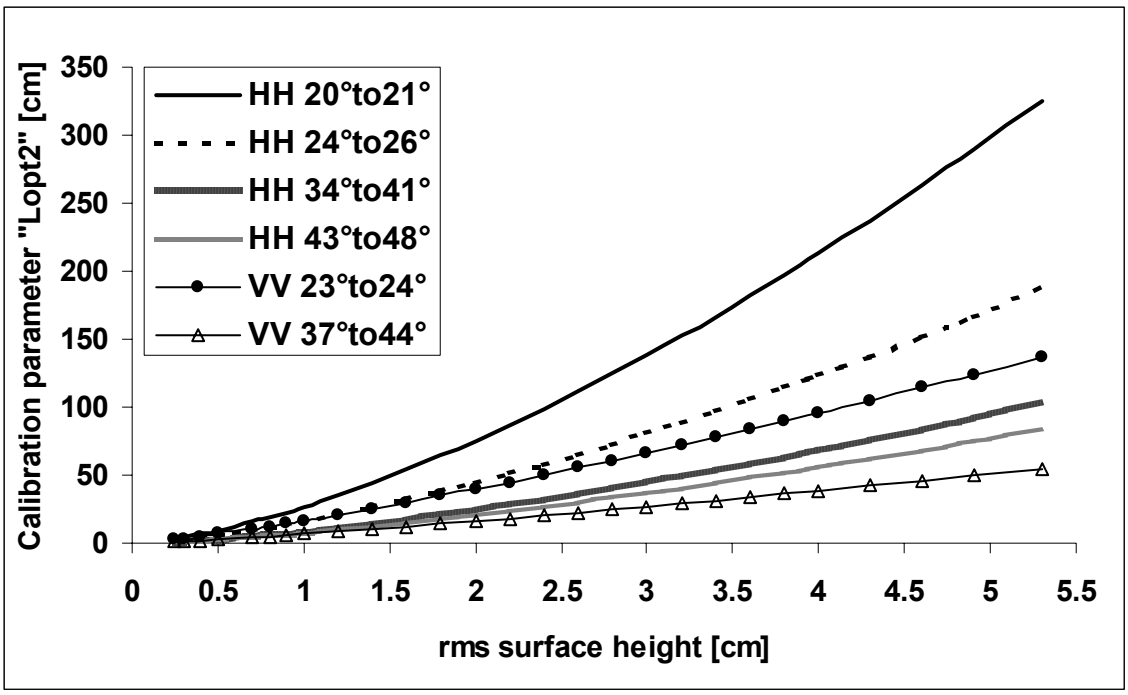


Figure 5. The calibration parameter Lopt2 from Figure 4 as a function of surface height for radar configurations in C-band, HH and VV polarizations, and incidence angles between 20° and 48°.

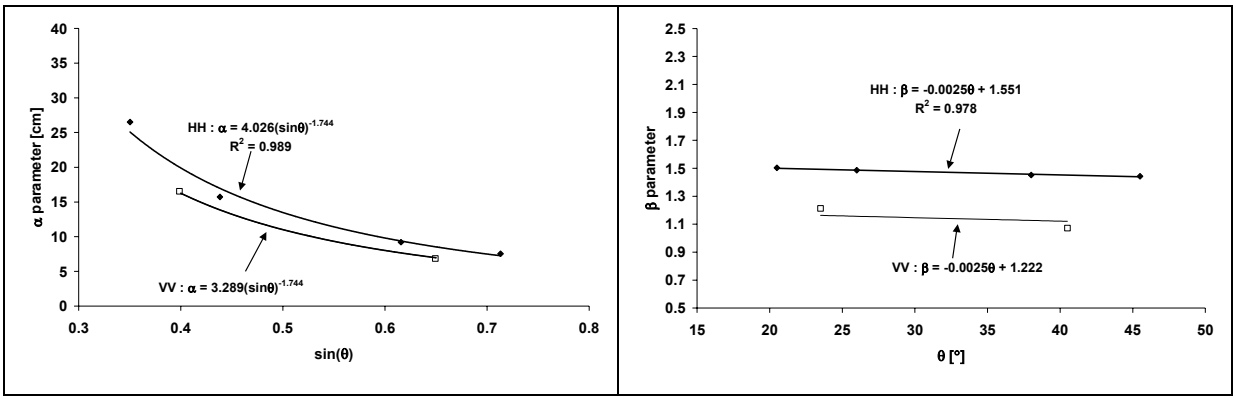


Figure 6. The α and β parameters of the relation $Lopt2 = \alpha rms^{\beta}$ as a function of incidence angle (θ) for HH and VV polarizations.

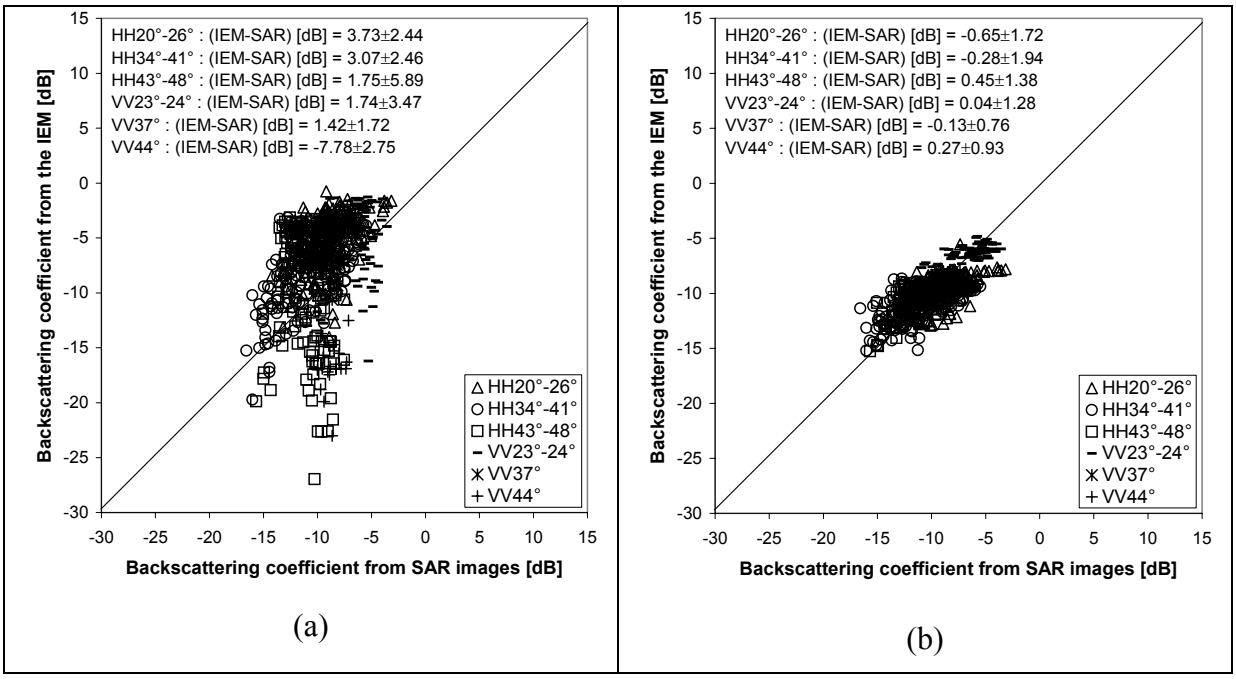


Figure 7. Influence of the parameterization of the calibration parameter Lopt2 on IEM simulations: (a) comparison between σ° IEM using L measured and σ° SAR, (b) comparison between σ° IEM using Lopt2 given by eq. (5) and σ° SAR. Both databases were used.

Baghdadi N., Holah N., and Zribi M., 2005. Soil moisture estimation using multi-incidence and multi-polarization ASAR SAR data. International Journal of Remote Sensing, in press.

Soil moisture estimation using multi-incidence and multi-polarization ASAR SAR data

Nicolas Baghdadi[1], Noha Holah[1,2], and Mehrez Zribi[3]

[1] *Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM ~ French Geological Survey)*
BP 6009, 45060 Orléans, France, Tel.: 02 38 64 32 02, E-mail: n.baghdadi@brgm.fr

[2] *Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO)*
Université d'Orléans, Géosciences B.P. 6759
45067 Orléans cedex 2, France

[3] *CETP/CNRS, 10/12, avenue de l'Europe, 78140 Velizy, France*

Abstract

The potential of Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) for the retrieval of surface soil moisture over bare soils was evaluated for several ASAR acquisition configurations: (1) one date/single channel (one incidence and one polarization), (2) one date/two channels (one incidence and two polarizations), (3) two dates/two channels (two incidences and one polarization), and (4) two dates/four channels (two incidences and two polarizations). The retrieval of soil moisture from backscattering measurements is discussed, using empirical inversion approaches. When compared with the results obtained with a single polarization (HH or HV), the use of two polarizations (HH and HV) does not enable a significant improvement in estimating soil moisture. For the best estimates of soil moisture, ASAR data should be acquired at both low and high incidence angles. ASAR proves to be a good remote sensing tool for measuring surface soil moisture, with accuracy for the retrieved soil moisture that can reach 3.5% (RMSE).

Keywords **-** *ASAR data, inversion, soil moisture*

1. Introduction

Soil moisture and surface roughness are significant indicators for hydrologic studies and the monitoring of agricultural environments. These parameters play an important role in the distribution of precipitation between runoff and infiltration. Extensive studies have been conducted on agricultural fields to assess the behavior of radar signals as a function of soil moisture and surface roughness in the case of bare soil. The possibility of retrieving these soil parameters has been

investigated by using scatterometers, satellites, space shuttles, and airborne synthetic aperture radars (e.g. Ulaby *et al*., 1978; Le Toan, 1982; Dobson and Ulaby, 1986; Bruckler *et al*., 1988; Oh *et al.,* 1992; Fung *et al*., 1992; Dubois *et al.,* 1995; Shi *et al*., 1997; Quesney *et al*., 2000; Le Hégarat *et al*., 2002; Baghdadi *et al*., 2002a; Satalino *et al*., 2002; Zribi *et al*., 2002; Oh, 2004). With the launch of satellites using the C-band (~5.3 GHz), such as ERS-1/2 (VV polarization and 23° incidence angle) and RADARSAT-1 (HH polarization and incidence angle between 20° and 50°), the use of SAR (Synthetic Aperture Radar) data to derive soil parameters has become quite common. For a better estimate of soil moisture when using only one radar channel (the earlier satellite SAR sensors ERS-1/2 and RADARSAT-1), it is necessary to use a radar configuration that minimizes the effects of surface roughness. The optimal radar incidences in C-band for the retrieval of soil moisture are between 10° and 20°, whereas those for the estimation of surface roughness are greater than 40°. The dependence of radar signal on surface roughness is mainly significant for low levels of roughness (approximately <1.5 cm in C-band). The launch of the new European Environmental Satellite (ENVISAT) in March 2002, carrying the C-band Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR), should enable the scientific community to improve and increase its ability to retrieve physical parameters, based on ENVISAT's capability of providing images in HH, HV, and VV polarizations (two polarizations are possible simultaneously) and at various incidence angles between 15° and 45°.

Soil moisture and surface roughness can be extracted from SAR images by using either physical or statistical approaches. The first approach is based on physical models, the most popular being the Integral Equation Model (IEM) developed by Fung *et al*. (1992). This approach consists in using a physical model that predicts the radar backscattering coefficient from the radar configuration (wavelength, polarization, and incidence angle) and soil parameters (surface roughness and soil dielectric constant). However, physical models have limited roughness domains. Consequently, it is rare to find a good agreement between measured backscattering coefficients and those predicted by the models. The second approach is statistical, based on data collected from a great number of experimental measurements. This approach requires the use of abundant experimental data on soil parameters and radar signals, in order to establish experimental calibration relationships. These relationships are often difficult to apply to sites other than those on which they were developed, and are generally valid only for specific soil conditions, which limits their use. The results obtained using C-band show that, for bare soils, the radar signal (σ°) increases linearly with the volumetric soil moisture for values between approximately 5% and 35%, and follows an exponential or logarithmic function with the soil surface roughness (e.g. Ulaby, 1974; Ulaby *et al.*, 1978; Dobson and Ulaby, 1986; Sano *et al.*, 1998; Baghdadi *et al.*, 2002b; Le Hégarat *et al.* 2002; Holah *et al*.,

2004). If we consider both the soil moisture and the surface roughness, the radar signal in decibels may be expressed as the sum of the linear function that describes the dependence of the radar signal on the soil moisture, and the exponential or logarithmic function of the radar signal in terms of the surface roughness (e.g. Weimann *et al*., 1998; Zribi *et al*., 2002).

Several semi-empirical models for estimating soil moisture and surface roughness from radar backscattering coefficients have been reported in the literature (e.g. Oh *et al*., 1992; Dubois *et al*., 1995; Baghdadi *et al*., 2002b; Oh *et al*., 2002; Zribi *et al*., 2002; Srivastava *et al*., 2003). The most popular are those developed by Oh *et al*. (1992 ; 2002) and Dubois *et al*. (1995) from scatterometer measurements over bare soils. The Oh model links the ratios HH/VV and HV/VV to the volumetric soil moisture and surface roughness, while the Dubois model links the backscattering coefficients in HH and VV polarizations to the volumetric soil moisture and surface roughness. As an example, Srivastava *et al.* (2003) have shown that the use of two RADARSAT images acquired at two incidences, a low one of about 20° and a high one around 40°, produced a distinct improvement in the soil moisture estimate, in comparison with results obtained using a single incidence (20°).

The objective of the present study is to investigate empirical inversion approaches in order to retrieve volumetric soil moistures for bare soil from ASAR images acquired at various incidence angles and in HH and HV polarizations. This work will enable us to evaluate the potential of the new ASAR sensor for extracting surface soil moisture. Section 2 presents the data set. In Section 3 the proposed methodology for retrieving soil moisture is described. The results are shown in Section 4, and finally, Section 5 presents the main conclusions.

2. Data Set

The image data used in this study were acquired by the ASAR SAR between 9 February 2003 and 20 April 2004 over two study sites. The first lies to the west of Paris, near Villamblain, France (latitude 48° 00` N, longitude 01° 34` E). The second is located near Toulouse in the Touch catchment basin (latitude 43° 27` N, longitude 01° 02` E). The ASAR SAR operates in the C-band (5.331 GHz) and can acquire images in dual-polarization mode (two simultaneous polarizations selected from the four polarizations HH, HV, VH, and VV). A more detailed description of the ASAR data is presented in Table 1.

The sites are composed mainly of agricultural fields intended for growing wheat and corn. Simultaneously with the radar acquisition, ground truth measurements including soil moisture,

surface roughness, and bulk density were performed on several bare soil test fields. Soil moisture content was measured using the gravimetric method. Soil samples were collected from the upper 0-5 cm soil layer at 10 locations within each test field to determine gravimetric soil moisture. The resulting mean gravimetric soil moisture was then transformed into a volumetric moisture content for each test field by multiplying by the mean bulk density of the soil. An average of three soil bulk density measurements were performed for each test field. The volumetric soil moistures range from 5.4% to 47.3% with a standard deviation of about ±1.7%. The soil bulk density ranges from 0.86 to 1.66 with a standard deviation of about 0.06. Most of the *in situ* ground measurements of soil moisture were made within ± 2 h of the ASAR overpasses. The 5 cm soil moisture sampling depth is in keeping with the penetration depth of a C-band microwave signal (of the order of one wavelength). Bruckler *et al*. (1988) have shown a radar signal penetration depth in C-band of 5 cm or less for volumetric soil moistures greater than 10%.

Soil roughness measurements were also carried out, using a 2 meter-long needle profilometer with a 1-cm sampling interval (cf. Fig. 1). Ten roughness profiles were sampled for each test field (5 parallel and 5 perpendicular to the row direction). On the basis of these measurements the roughness parameters, such as the root mean square (*rms*) surface height and the correlation length (*L*) were calculated using the mean of all experimental auto-correlation functions, both parallel and perpendicular. The *rms* values fluctuate between 0.5 cm and 3.56 cm; the lowest ones correspond mainly to wheat-sown fields and the highest ones to recently ploughed fields. Soil roughness profiles were not acquired for each ASAR overpass. However, a field visit was arranged for each satellite overpass, to check field by field whether the surface roughness had changed since the last field campaign. The roughness measurements were recalculated only for fields where the roughness had changed.

The precision associated with the measurements of soil surface roughness parameters, rms surface height and correlation length, is directly dependant on the length and horizontal resolution of the roughness profiles. On the basis of simulations, Oh and Kay (1998) found that in order to measure rms surface height and correlation length with a precision of ±5% of their mean values, that the length of the roughness profiles had to be at least 100L and 270L respectively (L being the correlation length). Measurements precision can be improved by averaging multiple profiles. For a correlation length that ranges from 2 to 20 cm (95% of measurements), and for 10 averaged profiles, we deduce that the 2-m profiles provide a precision better than ±5% for rms surface height and between ±5% and ±15% for correlation length. Oh and Kay (1998) also showed that the estimation of rms surface height and correlation length with a precision better than ±5% demands a

profilometer sampling interval of less than 0.5L and 0.2L respectively. In our particular case, these constraints are respected with a 1-cm sampling interval and the use of multiple profiles.

The test fields were identified on the ASAR images on the basis of GPS points and optical SPOT images. The ASAR images were calibrated, and the mean backscattering coefficients were then calculated at field scale by averaging the linear intensity values within each field. Table 1 gives the ranges of values obtained for the roughness parameter and the volumetric soil moisture. The data set available for this study consists of about 400 triplets of backscattering coefficient, soil moisture, and surface roughness (Table 2).

3. Methodology

3.1. Concept

The retrieval of volumetric soil moisture by means of an empirical inversion procedure requires the establishment of experimental calibration relationships between the backscattering coefficient and the soil moisture. ASAR data acquired in various configurations of polarization and incidence angle were used, together with ground measurements conducted over bare soil. The sensitivity of the radar signal to volumetric soil moisture is greatest in HH polarization and for low and middle incidence angles (0.18 dB/% for 20°-24° and 0.22 dB/% for 34°-37°, Figure 2). The sensitivity of the HH/HV ratio to soil moisture decreases with the incidence angle, vanishing for incidence angles of 40°-43° (Holah *et al*., 2004). Regarding surface roughness, Holah *et al*. (2004) used this database to show that the behavior of the radar signal is more strongly correlated with the *rms* surface height in HH and HV polarizations and at high incidence angle (40°-43°).

The sensitivity of the radar signal to soil moisture at middle incidence angles (34°-37°) should be slightly lower than that obtained at low incidence angles (20°-24°). This higher sensitivity observed at middle incidence angles is related to the lack of measurement points for soil moistures between 5% and 20%. Indeed, Ulaby *et al*., (1978) found that the sensitivity of the radar signal to soil moisture decreases slightly when radar incidence is increased from 20° to 30° (~0.25dB/% for C-HH-20° and ~0.23dB/% for C-HH-30°).

The objective of this study was to use empirical approaches to investigate the accuracy of estimates of soil moisture (*mv*). The contributions of polarization and incidence angle were studied, as well as the combination of multi-incidence and multi-polarization data. To improve the accuracy of soil moisture estimates we have studied cases where one ASAR image is acquired with two

polarizations (HH and HV), or two ASAR images are acquired at two different incidence angles (one low and one high), but with closely spaced dates and only minor variations in soil characteristics. It is hoped that mixing two polarizations and/or two incidences in this way will enable better estimates of volumetric soil moisture when compared with those obtained using a single polarization and a single incidence. The time elapsed between the images acquired at two selected incidence angles was less than 10 days. No correction was made to the backscattering coefficients to compensate for the variation in soil moisture that occurred between the two acquisition dates. However, fields exhibiting a soil moisture variation greater than 5% were eliminated.

Four cases are considered in this study:

- ASAR images acquired on one date, with only one channel: one incidence angle (20°-24°, 34°-37°, 40°-43°) and one polarization (HH, HV).
- ASAR images acquired on one date, with two channels: one incidence (20°-24°, 34°-37°, 40°-43°) and two polarizations (HH, HV).
- ASAR images acquired on two dates, with two channels: two incidences (20°-24°, 34°-37°, 40°-43°) and one polarization (HH, HV).
- ASAR images acquired on two dates, with four channels: two incidences (20°-24°, 40°-43°) and two polarizations (HH, HV).

3.2. Empirical backscattering models

To retrieve volumetric soil surface moisture (*mv*) from a single radar configuration, it is necessary to establish a relationship between the radar backscattering coefficient (σ°) and *mv* alone, without having any knowledge of the *rms* surface height. Many studies have found a linear relationship between the radar signal acquired over bare soil surfaces and the soil moisture, up to values of *mv* of around 35% (e.g. Ulaby, 1974; Ulaby *et al*., 1978; Dobson and Ulaby, 1986; Le Hégarat *et al*., 2002; Holah *et al*., 2004). As a first approximation, the radar backscattering coefficient (in decibels, dB) may be expressed as follows:

$$\sigma^{0}_{dB} = \delta\, mv + \xi \qquad (1)$$

This simplified relationship ignores the surface roughness. For a given radar frequency, the coefficient δ was observed to be dependent on both radar incidence angle and polarization (Holah *et*

al., 2004). Cross-polarization produced a lower value of δ compared with HH polarization. For HH polarization, δ is of the same order of magnitude for incidence angles of 20°-24° and 34°-37°, and decreases for 40°-43° (Figure 2). The coefficient ξ is primarily controlled by incidence angle, polarization, and surface roughness. HH polarization gives a greater value of ξ than HV polarization. Similarly, ξ is greater for low incidences and rough surfaces. The coefficients δ and ξ are often found to be dependent on the catchment basin, and thus different from one basin to another. However, for the same catchment, the slope of the observed linear relationship between radar signal and soil moisture is consistent (Le Hégarat *et al*., 2002).

To take the surface roughness into account, the radar backscattering coefficient σ° (in decibels) of a bare soil can be expressed as the sum of two functions: the first one, f (linear), describes its dependence on volumetric surface soil moisture, while the second, g (exponential), illustrates the dependence of σ° on *rms* surface height:

$$\sigma^0_{dB} = f(mv,\theta,mn,\lambda)_{dB} + g(rms,\theta,mn,\lambda)_{dB} = \delta\, mv + \mu\, e^{-krms} + \tau \qquad (2)$$

where *mn* is the polarization (*m* is the transmitting polarization and *n* the receiving polarization; *m*, *n* = *H* (Horizontal) or *V* (Vertical)), θ the incidence angle, and k the wave number (≈1.11 cm^{-1} for ASAR).

3.3. Empirical models for estimating soil moisture

Retrieval of soil moisture from ASAR data involves two steps: a calibration phase and a validation phase. The data set was divided equally into a calibration set and a validation set (Table 4). First, empirical relationships between the backscattering coefficients and the ground truth volumetric soil moisture were established for the calibration set. Then the inversion procedure was applied to the validation set to estimate the soil moisture. The validity of this procedure was verified by comparing the output from the inversion procedure with the experimental data.

The various cases that were studied for the purpose of estimating *mv* were:

- One date characterized by one incidence and one polarization. The model is written as follows (cf. eq. 1):

$$mv = \alpha\sigma^0_{mn}(\theta) + \beta \qquad (3)$$

where *mn* is the polarization = HH or HV and θ is the radar incidence = 20°-24°, 34°-37°, or 40°-43°.

- One date characterized by one incidence and two polarizations (HH and HV). This case allows the benefits of the multi-polarization ASAR configuration to be tested. Solving equation (2) for two polarizations gives (substituting the e^{-krms} of σ^0_{HH} into σ^0_{HV}):

$$mv = \alpha\sigma^0_{HH}(\theta) + \beta\sigma^0_{HV}(\theta) + \gamma \tag{4}$$

Use of the HH/HV ratio leads to the following formula:

$$mv = \alpha\sigma^0_{mn}(\theta) + \beta\left(\frac{\sigma^0_{HH}(\theta)}{\sigma^0_{HV}(\theta)}\right) + \gamma \tag{5}$$

where *mn* is the polarization = HH or HV and θ = 20°-24°, 34°-37°. or 40°-43°.

- Two dates characterized by one low incidence and one high incidence, and a single polarization (HH or HV). An incidence angle-based model has been proposed for estimating soil moisture over bare soils. Solving equation (2) for two incidences leads to:

$$< mv >= \alpha\sigma^0_{mn}(\theta_{low}) + \beta\sigma^0_{mn}(\theta_{high}) + \gamma \tag{6}$$

where <*mv*> is the mean moisture for two different dates, *mn* = HH or HV, θ_{low} = 20°-24°, and θ_{high} = 34°-37° or 40°-43°.

Several studies have used the ratio $\sigma^0_{HH}(20°)/\sigma^0_{HH}(40°)$ in formulating the inversion procedure, because of the extreme sensitivity of this ratio to surface roughness (e.g. Zribi *et al*., 2002; Srivastava *et al*., 2003):

$$< mv >= \alpha\sigma^0_{mn}(\theta_{low}\ or\ \theta_{high}) + \beta\left(\frac{\sigma^0_{mn}(\theta_{low})}{\sigma^0_{mn}(\theta_{high})}\right)_{dB} + \gamma \tag{7}$$

where *mn* = HH or HV, θ_{low} = 20°-24°, and θ_{high} = 34°-37° or 40°-43°.

This last equation is obtained by combining the σ° described by equation (2) and the ratio of σ° at low and high incidence angles, which follows an exponential function of the *rms* surface height.

- Two dates characterized by two incidence angles (one low incidence = 20°-24°, and one high incidence = 40°-43°), and two polarizations (HH and HV). In this case, we solve the set of equations based on equation (2):

$$\begin{cases} \sigma^0_{HH}(20°) = \alpha_1\, mv + \beta_1 e^{-krms} + \gamma_1 \\ \sigma^0_{HV}(20°) = \alpha_2\, mv + \beta_2 e^{-krms} + \gamma_2 \\ \sigma^0_{HH}(40°) = \alpha_3\, mv + \beta_3 e^{-krms} + \gamma_3 \\ \sigma^0_{HV}(40°) = \alpha_4\, mv + \beta_4 e^{-krms} + \gamma_4 \end{cases} \quad (8)$$

This equation system allows retrieval of the mean moisture for two dates.

The various calibration relationships defined by equations (3) to (8) are fitted to the calibration database by using the least squares method (cf. Table 3). The backscattering coefficients and the σ° ratios are in dB.

4. Results and Discussion

The inversion procedures based on equations (3) to (8) were applied in order to retrieve soil moisture. The inputs are the mean backscattering coefficients calculated for each test field. The inversion performance was evaluated by using the following statistical indices: bias, standard deviation, Mean Absolute Error (MAE), and Root Mean Square Error (RMSE):

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|Pi - Oi\right| \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Pi - Oi)^2} \quad (10)$$

where P represents the estimated variable, O the measured variable, and N the data number. MAE and RMSE are expressed in % for soil moisture.

The results obtained in the validation phase with one incidence and one polarization show inversion errors in the estimation of *mv* of about 6% for HH polarization and incidence angles of 20°-24° and 34°-37°. The use of HV polarization for incidence angles of 34°-37° gives slightly poorer results (RMSE about 7%). In contrast, large errors in the retrieved soil moisture are observed for

incidences of 40°-43° (RMSE of 9.6% and 9.1% for HH and HV polarizations respectively). This is due to the fact that the radar signal is much more sensitive to surface roughness at high incidence angles. It is therefore preferable to use radar observations at the lowest available incidence angle to estimate the soil moisture of a bare soil surface. The use of both HH and HV polarizations does not improve on the inversion results obtained from a single polarization. Indeed, the RMSE is reduced by about 1% at most for incidence angles of 20°-24°, and remains relatively unchanged for 34°-37° and 40°-43°.

The accuracy of estimates of soil moisture can be improved by about 2% by using ASAR multi-incidence data. In fact, the use of ASAR images at low and high incidence angles allows *mv* estimates with RMSEs of 3.5% to be obtained (cf. Table 4). Since the data set containing two incidences angles is small (between 17 and 21 points), we used all the points for the calibration phase. Figure 3 shows scatter plots for the estimated and measured *mv* values. The results show a good agreement between the soil moisture values estimated by the inversion models and those measured by ground sampling. The estimated *mv* values for high incidence angle (40°-43°) are quite poor compared to the measured ones.

5. Conclusions

This study examined the potential of ASAR data for estimating volumetric soil moisture (*mv*) over bare soils. ASAR images collected between 9 February 2003 and 20 April 2004 over two study sites in France were used. The ASAR images were acquired mainly at HH and HV polarizations and for incidence angles between 20° and 43°. The goal of this work was to compare estimates of *mv* obtained from various ASAR acquisition configurations, and to find the best sensor parameters (incidence angle and polarization) for measuring the bare soil moisture.

The study tested empirical approaches for soil moisture inversion from one channel ASAR data (one incidence and one polarization) and multi-channel ASAR data (multi-polarization and multi-incidence). The results of the study may be summarized as follows:

- For ASAR data with a single polarization and a single incidence, the retrieval algorithm performed very well for low incidence angles (20°-24° and 34°-37°). The RMSE for the soil moisture estimate is about 6% for HH and 20°-24°.
- The results are poor for high incidence angles (40°-43°) because of the low sensitivity to soil moisture and the high sensitivity of the backscattering coefficient ($\sigma°$) to surface roughness,

which produces strong variations in the relationship between σ° and mv. The RMSE between measured and estimated mv is of the order of 9%.

- Good agreement was obtained between observed and estimated mv when two incidence angles (one low and one high) were used. The RMSE of the comparison was found to be about 3.5%.
- The accuracy of the soil moisture estimate does not improve when two polarizations (HH and HV) are used instead of a only one (improvement <1%). Consequently, the improvement gained by the multi-polarization aspect of the ASAR sensor is minor.

These results appear promising for the development of simplified algorithms for retrieving soil moisture from ASAR data, and for monitoring multi-temporal moisture changes. However, the empirical relationships between the soil moisture and the ASAR data calculated in this study need checking and calibrating before their eventual application to other study sites. In the light of this study, the ASAR sensor does not seem to offer any advantage compared to the mono-polarization and multi-incidence RADARSAT-1 sensor. In the future, ASAR images at VV polarization and at various incidence angles will be necessary for a comprehensive study of the potential for extracting soil moisture by inversion of ASAR images.

Acknowledgements

This work was supported by BRGM (the French Geological Survey), CNES (Centre National des Etudes Spatiales), and two national programs: PNTS (the French national Remote Sensing program) and PNRH (the French national Hydrology program). The authors wish to thank ESA (the European Space Agency) for kindly providing the ASAR images under Project No. 351 ENVISAT/ASAR. The SPOT images were obtained at special rates through the ISIS program of the CNES (Centre National d'Etudes Spatiales). The authors also thank Olivier Cerdan, Ary Bruand, Steven Hosford, and Odile Duval for their logistic support during the field campaigns.

References

Baghdadi N., Gaultier S., and King C., 2002a. Retrieving surface roughness and soil moisture from SAR data using neural networks. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 28, no. 5, pp. 701-711.

Baghdadi N., King C., Bourguignon A., and Remond A., 2002b. Potential of ERS and RADARSAT data for surface roughness monitoring over bare agricultural fields: application to catchments in Northern France. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, no. 17, pp. 3427-3442.

Brucklet L., Witono H., and Stengel P., 1988. Near surface soil moisture estimation from microwave measurements. *Remote Sensing of Environment*, vol. 12, pp. 101-121.

Dobson M.C. and Ulaby F.T., 1986. Active microwave soil moisture research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-24, no. 1, pp. 23-36.

Dubois P.C., Van Zyl J., and Engman E.T., 1995. Measuring soil moisture with imaging radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 4, pp.915-926.

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

Holah N., Baghdadi N., Zribi M., Bruand A., and King C., 2004. Potential of ASAR/ENVISAT for the characterisation of soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote Sensing of Environment, in press.*

Le Hégarat-Mascle S., Zribi M., Alem F., Weisse A., and Loumagne C., 2002. Soil moisture estimation from ERS/SAR data: toward an operational methodology. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 12, pp. 2647-2658.

Le Toan T., 1982. Active microwave signatures of soil and crops: significant results of three years of experiments. *Proceeding Symposium IGARSS'82*, Munich, Germany, June 1982 (New York: I.E.E.E.), pp. 25-32.

Oh Y., 2004. 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.

Oh Y., Sarabandi K., and Ulaby F.T., 2002. Semi-empirical model of the ensemble-averaged differential Mueller matrix for microwave backscattering from bare soil surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 6, pp. 1348-1355.

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

Oh Y., Sarabandi K., and Ulaby F.T., 1992. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 370-381.

Quesney A., Le Hegarat-Mascle S., Taconet O., Vidal-Madjar D., Wingneron J.P., Loumagne C., and Normand M., 2000. Estimation of watershed soil moisture index from ERS/SAR data. *Remote sensing of environment*, vol. 72, no. 3, pp. 290-303.

Sano E.E., Huete A.R., Troufleau D., Moran M.S., and Vidal A., 1998. Relation between ERS-1 synthetic aperture radar data and measurements of surface roughness and moisture content of rocky soils in a semiarid range land. *Water Resources Research*, vol. 34, no. 6, pp. 1491-1498.

Satalino G., Mattia F., Davidson M., Le Toan T., Pasquariello G., and Borgeaud M., 2002. On current limits of soil moisture retrieval from ERS-SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* vol. 40 , no. 11 , pp. 2438 – 2447.

Shi J., Wang J., Hsu A.Y., O'Neill P.E., and Engman E.T., 1997. 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 – 1266.

Srivastava H.S., Patel P., Manchanda M.L., and Adiga S., 2003. Use of multi-incidence angle RADARSAT-1 SAR data to incorporate the effect of surface roughness in soil moisture estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 7, pp. 1638-1640.

Ulaby F.T., 1974. Radar measurements of soil moisture content. *IEEE Transactions Antennas Propagation*, vol. AP-22, pp. 257-265.

Ulaby F.T., Batlivala P.P., and Dobson M.C., 1978. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part I - Bare soil. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-16, no. 4, pp. 286-295.

Weimann A., Von Schönermark M., Schumann A., Jörn P., and Günther R., 1998. Soil moisture estimation with ERS-1 SAR data in the East-German loess soil area. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, no. 2, pp. 237-243.

Zribi M., and Dechambre M., 2002. A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from C-band radar data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 84, pp. 42-52.

TABLES

Date (dd-mm-yy)	Site	Sensor Mode - Incidence angle	Polarization	Range of *mv* (%)	Range of *rms* (cm)
09-02-03	Villamblain	IS5 - 37°	HH and HV	[25.3 – 30.8]	[0.74 – 3.13]
23-09-03	Villamblain	IS6 - 40°	HH and HV	[8.8 – 21.8]	[0.65 – 1.89]
26-09-03	Villamblain	IS4 - 34°	HH and HV	[5.4 – 10.6]	[0.65 – 2.21]
29-09-03	Villamblain	IS2 - 24°	HH and HV	[5.4 – 10.6]	[0.65 – 2.21]
02-10-03	Villamblain	IS1 - 20°	HH and HV	[14.3 – 21.9]	[0.65 – 2.21]
09-10-03	Villamblain	IS7 – 43°	HH and HV	[17.7 – 32.5]	[0.66 – 1.79]
15-10-03	Villamblain	IS1 – 20°	HH and HV	[12.1 – 30.7]	[0.66 – 1.79]
03-11-03	Villamblain	IS2 - 24°	HH and VV	[25.5 – 35.5]	[0.87 – 3.22]
09/11/03	Villamblain	IS5 – 37°	HH and VV	[18.9 – 31.3]	[0.87 – 2.60]
25/11/03	Villamblain	IS4 – 34°	HH and HV	[25.1 – 37.2]	[0.84 – 2.60]
02-12-03	Villamblain	IS6 - 40°	HH	[28.2 – 36.1]	[0.84 – 2.40]
08-12-03	Villamblain	IS2 - 24°	HH	[19.7 – 34.1]	[0.84 – 2.40]
14-12-03	Villamblain	IS5 - 37°	HH	[22.5 – 35.1]	[0.84 – 2.40]
13-03-04	Touch	IS7 – 43°	HH and HV	[34.4 – 47.3]	[0.50 – 3.56]
17-04-04	Touch	IS7 – 43°	HH and VV	[32.7 – 46.5]	[0.77– 3.52]
20-04-04	Villamblain	IS6 – 40°	HH and HV	[24.0 – 33.5]	[0.78 – 1.27]

Table 1. Main characteristics of ASAR images used in this study, and ranges of volumetric soil moisture (*mv*) measured at a depth of 5 cm and *rms* surface height measured during the field work.

Incidence	Polarization	Number of couplets (σ° , *mv*)	Number of triplets (σ° , *mv* , *rms*)
20°-24°	HH	92	76
20°-24°	HV	56	47
34°-37°	HH	98	83
34°-37°	HV	61	56
40°-43°	HH	103	96
40°-43°	HV	70	65

Table 2. Description of the data set available for the inversion procedures.

ASAR data	Regression model	Model number
20°-24°, HH	$mv=+3.34\sigma°+51.21$	1
34°-37°, HH	$mv=+2.80\sigma°+50.40$	2
40°-43°, HH	$mv=+2.14\sigma°+53.47$	3
20°-24°, HV	Weak relationship between $\sigma°_{HV}$ and mv	-
34°-37°, HV	$mv=+4.33\sigma°+98.79$	4
40°-43°, HV	$mv=+2.77\sigma°+80.30$	5
20°-24°, HH, HV	$mv=+3.46\sigma°_{HH}-1.27\sigma°_{HV}+25.24$	6
34°-37°, HH, HV	$mv=+0.74\sigma°_{HH}+3.42\sigma°_{HV}+89.95$	7
40°-43°, HH, HV	$mv=-0.10\sigma°_{HH}+2.88\sigma°_{HV}+81.10$	8
20°-24°, HH/HV	$mv=+3.27(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})-27.77$	9
34°-37°, HH/HV	$mv=+3.36(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})-11.44$	10
40°-43°, HH/HV	Weak relationship between $\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV}$ and mv	-
20°-24°, HH, HH/HV	$mv=+1.85\sigma°_{HH}+1.64(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})+12.74$	11
20°-24°, HV, HH/HV	$mv=+0.87\sigma°_{HV}+3.33(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})-10.93$	12
34°-37°, HH, HH/HV	$mv=+4.31\sigma°_{HH}-1.93(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})+83.81$	13
34°-37°, HV, HH/HV	$mv=+4.45\sigma°_{HV}-0.22(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})+103.05$	14
40°-43°, HH, HH/HV	$mv=+2.84\sigma°_{HH}-2.78(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})+84.37$	15
40°-43°, HV, HH/HV	$mv=+2.79\sigma°_{HV}-0.36(\sigma°_{HH}/\sigma°_{HV})+83.66$	16
20°-24°, 34°-37°, HH	$<mv>=+14.96-0.45\sigma°_{HH\text{-}20}-1.21\sigma°_{HH\text{-}37}$ $<mv>=+11.40-1.83\sigma°_{HH\text{-}20}+1.42(\sigma°_{HH\text{-}20}/\sigma°_{HH\text{-}37})$ $<mv>=+16.85-1.42\sigma°_{HH\text{-}37}-0.15(\sigma°_{HH\text{-}20}/\sigma°_{HH\text{-}37})$	17 18 19
20°-24°, 40°-43°, HH	$<mv>=+51.57+2.37\sigma°_{HH\text{-}20}+0.82\sigma°_{HH\text{-}40}$ $<mv>=+53.09+3.20\sigma°_{HH\text{-}20}-0.91(\sigma°_{HH\text{-}20}/\sigma°_{HH\text{-}40})$ $<mv>=+46.78+3.04\sigma°_{HH\text{-}40}+2.31(\sigma°_{HH\text{-}20}/\sigma°_{HH\text{-}40})$	20 21 22
20°-24°, 40°-43°, HV	$<mv>=+2.26-1.05\sigma°_{HV\text{-}20}+0.26\sigma°_{HV\text{-}40}$ $<mv>=+11.89-0.33\sigma°_{HV\text{-}20}-0.05(\sigma°_{HV\text{-}20}/\sigma°_{HV\text{-}40})$ $<mv>=+22.94+0.22\sigma°_{HV\text{-}40}+0.05(\sigma°_{HV\text{-}20}/\sigma°_{HV\text{-}40})$	23 24 25
20°-24°, 40°-43°, HH, HV	$\begin{cases}\sigma^0_{HH}(20°)=0.18\,mv-4.04e^{-krms}-11.68\\ \sigma^0_{HV}(20°)=0.04\,mv-6.32e^{-krms}-19.50\\ \sigma^0_{HH}(40°)=0.11\,mv-7.55e^{-krms}-12.21\\ \sigma^0_{HV}(40°)=0.11\,mv-5.03e^{-krms}-20.46\end{cases}$	26

Table 3. Regression models for ASAR backscattering coefficients and volumetric soil moisture. The backscattering coefficients and the σ° ratios are in dB. Soil moisture is calculated by solving the given equations.

ASAR data	Model number (Table 3)	Calibration phase Soil moisture (*mv*)					Validation phase Soil moisture (*mv*)				
		Number of points	Bias (%)	MAE (%)	Std (%)	RMSE (%)	Number of points	Bias (%)	MAE (%)	Std (%)	RMSE (%)
20°-24°, HH	1	46	0	4.8	6.0	6.0	46	0.9	4.7	6.0	6.0
34°-37°, HH	2	49	0	4.9	5.9	5.8	49	0.4	4.9	5.7	5.7
40°-43°, HH	3	52	0	6.9	8.4	8.4	51	-0.2	8.3	9.7	9.6
20°-24°, HV	-	28	ND	ND	ND	ND	28	ND	ND	ND	ND
34°-37°, HV	4	31	0	4.5	5.5	5.4	30	-0.2	5.8	7.2	7.0
40°-43°, HV	5	35	0.1	7.4	8.7	8.6	35	0.6	7.6	9.3	9.1
20°-24°, HH, HV	6	28	0	3.5	4.6	4.5	28	1.3	4.1	5.5	5.5
34°-37°, HH, HV	7	31	-0.3	4.5	5.4	5.4	30	-0.4	5.3	6.5	6.4
40°-43°, HH, HV	8	35	0	7.4	8.7	8.6	35	0.5	7.5	9.2	9.1
20°-24°, HH/HV	9	28	0	4.1	4.9	4.8	28	1.8	3.9	5.0	5.2
34°-37°, HH/HV	10	31	0	7.5	9.3	9.2	30	0.5	5.9	7.7	7.6
40°-43°, HH/HV	-	35	ND	ND	ND	ND	35	ND	ND	ND	ND
20°-24°, HH, HH/HV	11	28	0	3.6	4.5	4.5	28	1.3	4.0	5.2	5.3
20°-24°, HV, HH/HV	12	28	0	3.9	4.8	4.7	28	1.5	4.0	5.0	5.2
34°-37°, HH, HH/HV	13	31	-0.1	4.5	5.4	5.3	30	0.3	4.6	5.6	5.5
34°-37°, HV, HH/HV	14	31	0	4.5	5.5	5.4	30	-0.2	5.9	7.3	7.2
40°-43°, HH, HH/HV	15	35	0	7.3	8.6	8.5	35	0.4	7.6	9.3	9.1
40°-43°, HV, HH/HV	16	35	0	7.4	8.7	8.6	35	0.5	7.5	9.2	9.1
20°-24°, 34°-37°, HH	17 18 19	19 19 19	0 0 0	3.0 2.9 3.0	3.7 3.6 3.7	3.6 3.5 3.6	NV	NV	NV	NV	NV
20°-24°, 40°-43°, HH	20 21 22	21 21 21	0 0 0	3.7 3.7 3.9	4.4 4.3 4.5	4.3 4.2 4.4	NV	NV	NV	NV	NV
20°-24°, 40°-43°, HV	23 24 25	18 18 18	0 0 0	2.8 2.9 3.0	3.9 3.8 3.8	3.7 3.7 3.7	NV	NV	NV	NV	NV
20°-24°, 40°-43°, HH,HV	26	17	-0.4	3.4	3.9	3.8	NV	NV	NV	NV	NV

Table 4. Statistics for the estimation of surface soil moisture (*mv*) using various ASAR data. ND: no relationship between the backscattering coefficient and the soil moisture. NV: no data for the validation phase of the inversion procedure.

FIGURES

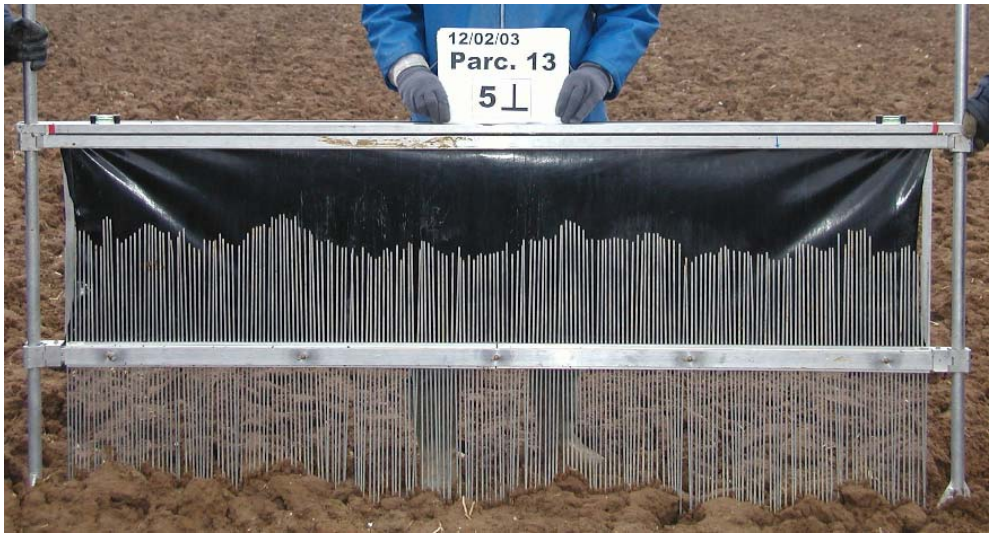


Figure 1. Example of a roughness profile with a 2-m long needle profilometer and a 1-cm interval between needles. The roughness parameters of this profile are: rms surface height = 2.36 cm and correlation length = 11.22 cm.

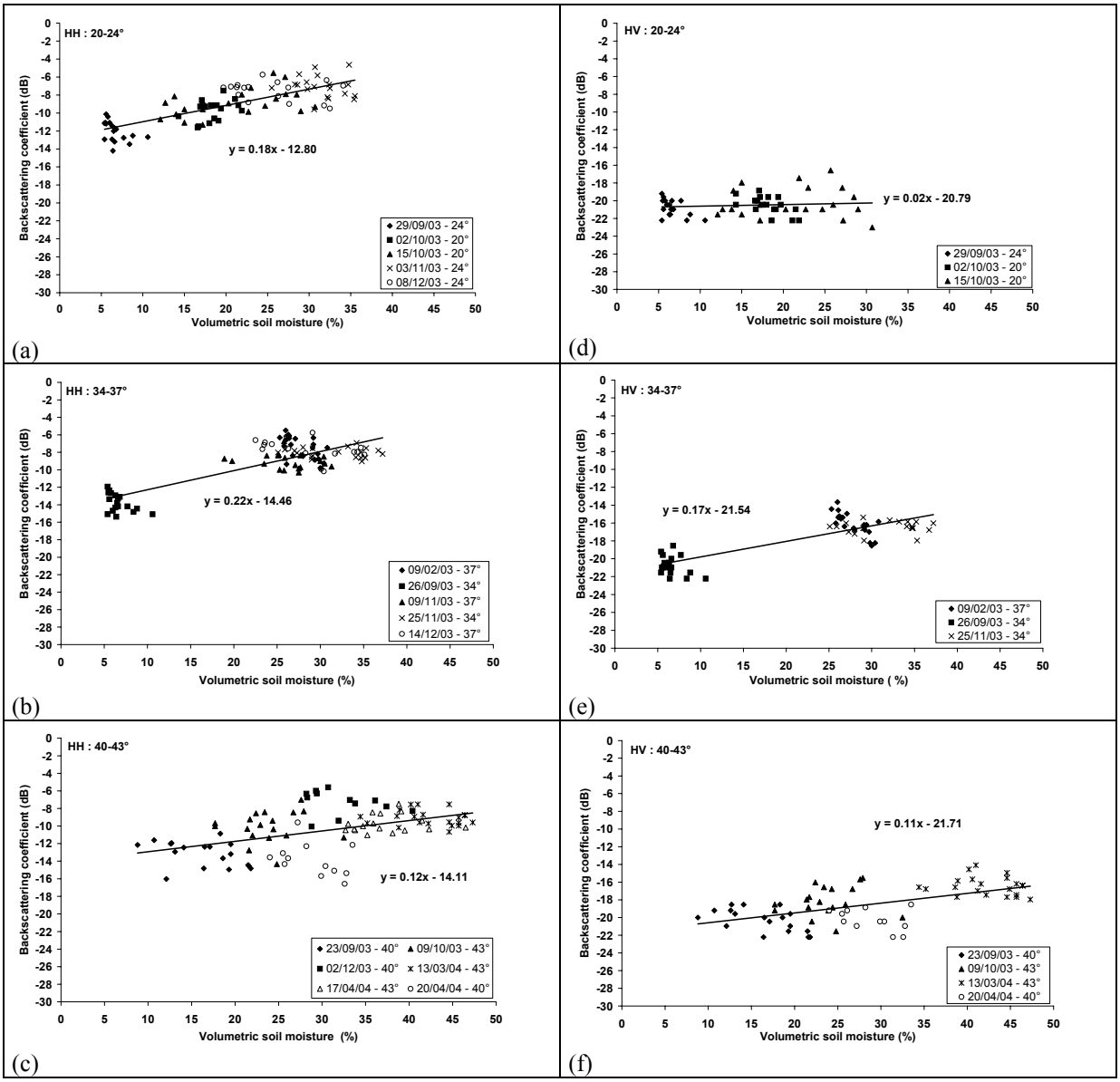


Figure 2. ASAR signal versus volumetric soil moisture measured in the uppermost 5 cm. Each point corresponds to the average backscattering coefficient in decibels for one test field.

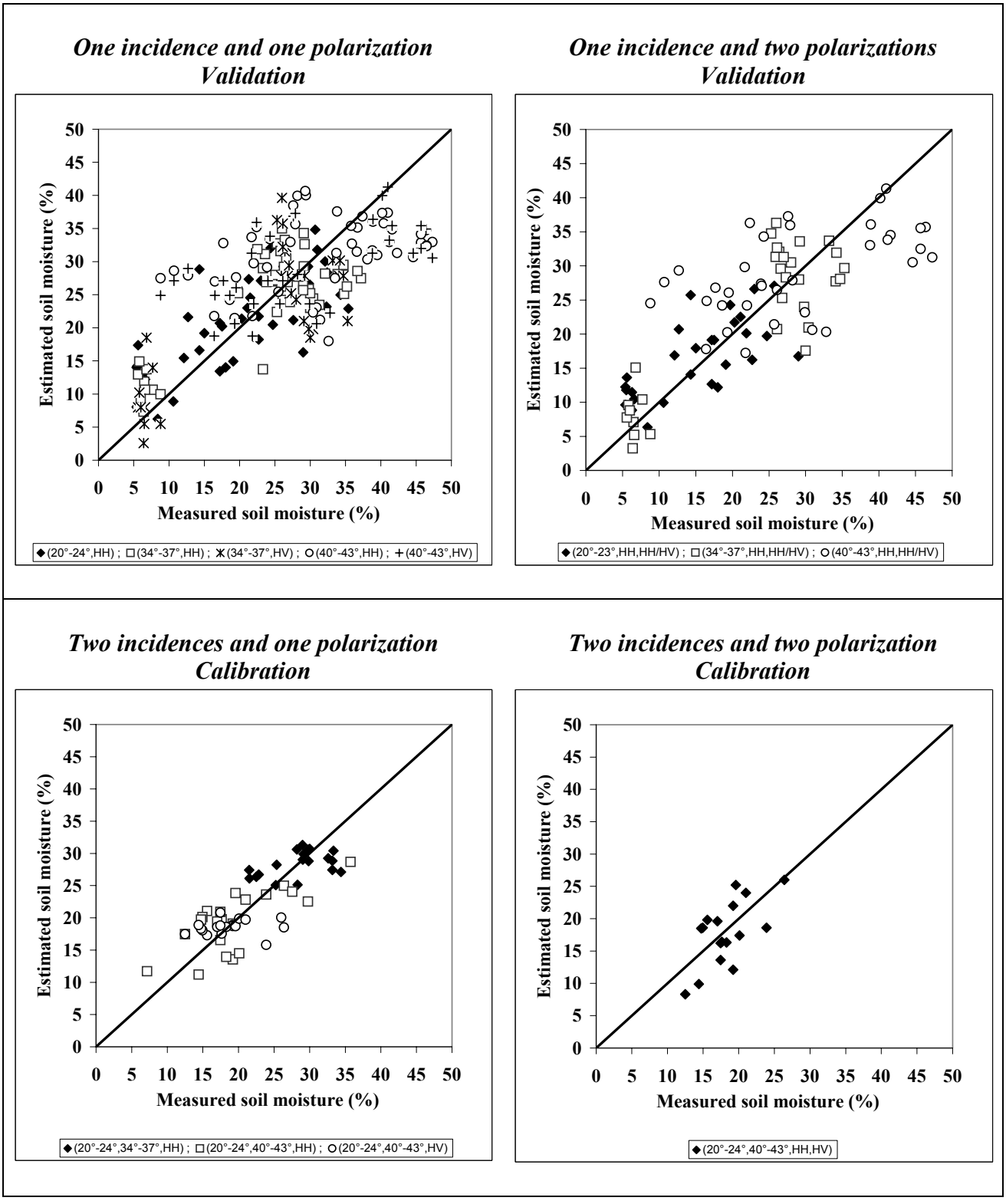


Figure 3. Comparison between the estimated *mv* values and those measured *in situ*. The various statistical parameters that describe the quality of the inversion are shown in Table 3.

Potentiel des nouveaux capteurs radar multi-polarisation et polarimétrique pour la caractérisation des états de surface en milieu agricole.

L'objectif de cette thèse est d'analyser l'information issue du nouveau capteur radar ASAR d'ENVISAT et des futurs capteurs polarimétriques en bande X pour l'estimation de la rugosité et de l'humidité du sol. Les résultats obtenus par le capteur aéroporté RAMSES montrent le faible potentiel des radars en bande X à 30° pour la discrimination des classes de rugosité. Néanmoins, cette étude a montré qu'il est possible d'identifier un état structural de surface dégradé en raison de la présence d'une croûte de battance et de distinguer les parcelles fraîchement labourées. L'utilisation du capteur ASAR a permis de définir les configurations radar optimales pour une meilleure estimation de l'humidité (polarisation HH, et faibles incidences) et de la rugosité du sol (polarisations HH et HV, et fortes incidences). Après avoir observé une faible corrélation entre les mesures expérimentales et celles simulées par le modèle de rétrodiffusion IEM, nous avons appliqué la calibration semi-empirique du modèle IEM proposée par Baghdadi et al. (2004) dans le but de mieux reproduire le coefficient de rétrodiffusion radar sur des sols nus en milieu agricole. Les résultats obtenus montrent que cette calibration permet de mieux restituer le signal radar. Des procédures d'inversion ont été utilisées pour estimer l'humidité à partir des signaux ASAR. Les résultats obtenus montrent une nette amélioration de l'estimation de l'humidité quand deux angles d'incidence sont utilisés (l'une faible et l'autre élevé). L'utilisation des données en mode multi-polarisation n'améliore pas l'estimation de l'humidité par rapport à l'utilisation d'une seule polarisation (amélioration inférieure à 1%).

Mots clefs : Capteur RAMSES en bande X, Capteur ASAR en bande C, Rugosité, Humidité, Signal radar, Modélisation, Inversion du signal.

Potential of new radar sensors multi-polarization and polarimetric for the characterization of soil surface of bare agricultural fields.

The objective of this thesis is to analyze information from the new radar sensor ASAR of ENVISAT and from future polarimetric sensors in the X band for the estimation of the soil roughness and soil moisture. The results obtained from the RAMSES sensor show the low potential of the radar in the X band with 30° for the discrimination of roughness classes. Nevertheless, this study showed that it is possible to identify a structural state of surface degraded because of the presence of a soil crust and to distinguish the recently tilled fields. The use of an ASAR sensor made it possible to define the optimal radar configurations for better estimating soil moisture (polarization HH at low incidences) and roughness (polarizations HH and HV at high incidences). After having observed a weak correlation between experimental measurements and those simulated by the model of retrodiffusion IEM, we applied the semi-empirical calibration of the IEM model suggested by Baghdadi et al. (2004) with an aim of better reproducing the coefficient of retrodiffusion radar over bare agricultural fields. The results obtained show that this calibration makes it possible to better retrieve the radar signal. Inversion procedures were used to estimate soil moisture from ASAR signals. The results obtained show a clear improvement in the estimation of soil moisture when two angles of incidence are used (one low and the other high). The use of data obtained in multi-polarization from an ASAR sensor does not improve the estimation of soil moisture compared to the use of only one polarization (an improvement of less than 1%).

Key words : RAMSES airborne X band, ASAR spaceborne C band, Soil Roughness, Soil Moisture, Radar Signal, Modelling, Inversion of the signal.

Discipline: Sciences de l'Univers

Laboratoire: BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), 3 Avenue Claude Guillemin, B.P. 6009, 45060 Orléans, service aménagement et risque naturelle.