
République Algérienne Démocratique et Populaire

Université de Blida
INSTITUT D'AERONAUTIQUE ET DES ETUDES SPATIALES

Département NAVIGATION AERIENNE

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master option

CNS/ATM.



Étude comparative des méthodes d'inversion de la teneur en eau des sols à travers les données
SAR (Synthetic aperture Radar) satellitaire.

Membres du jury :

Encadré par :

Mr Sofiane Tahraoui

Rédigé et présenté par :

Bachir Cherif Chakib

Atailia Walid

2021/2022¹

Remerciement

J'adresse mes remerciements à tous ce qui ont contribué à ce que la réalisation de ce travail soit possible.

En premier lieu, je remercie évidemment ma famille, à savoir mes parents, mes sœurs et mon frère, mes amis et mes professeurs, qui m'ont soutenu tout au long de ce pénible et auxquels je dédie ce travail.

Je remercie Mr Sofiane Tahraoui , en tant que promoteur.

À toutes ces personnes, et à beaucoup d'autres que je n'ai pas citées, je présente mes remerciements et ma plus profonde gratitude.

CHAKIB

En premier lieu, Je souhaite avant tout Mes sincères remerciements à ma famille: Mes parents, ma mère, mes frères, ma sœur mes amis et mes professeurs, qui m'ont accompagné, m'ont aidé, m'ont soutenu, m'ont encouragé tout au long de la réalisation de cette mention, et de ma carrière scolaire.

Je remercie Dr Sofiane Tahraoui , pour le temps qu'il a consacré à la conduite de cette recherche.

WALID

Abstract :

The aim of this work is to obtain the value of the moisture in the ground through the process of remote sensing and knead to facilitate the process for farmers and knead by using several methods that help study the images captured from satellites

Résumé :

Le but de ce travail est d'obtenir la valeur de l'humidité dans le sol grâce au processus de télédétection et pétrir pour faciliter le processus pour les agriculteurs et pétrir en utilisant plusieurs méthodes qui aident à étudier les images capturées à partir de satellites

ملخص:

الغرض من هذا العمل هو الحصول على قيمة الرطوبة في التربة من خلال عملية الاستشعار عن بعد والعجن لتسهيل العملية على المزارعين والعجن باستخدام عدة طرق تساعد على دراسة الصور الملتقطة من الاقمار الصناعية

Liste des figures :

1 Chapitre : La Télédétection

Figure 1.1 : Schéma général de fonctionnement du système de télédétection	
Figure 1.2 : Evolution du champ électromagnétique dans l'espace-temps.....	
Figure1.3 : les régions du spectre électromagnétique	
Figure1.4 : Radars aéroportés et spatioportés	
Figure1.5 : synthetic aperture radar	
Figure 1.6 : La géométrie d'imagerie SAR	
Figure 1.7 : Effets de rétrécissement et d'inversion du relief.....	
Figure 1.8 : simple rebond	
Figure 1.9 : double rebond	
Figure1.10 : triple rebond	
Figure 1.11 : Image SAR de Death Valley colorée par polarimétrie	
Figure 1.12 : Evolution du champ électromagnétique dans l'espace-temps.....	
Figure 1.13 : paramètres de l'ellipse de polarisation.....	

Chapitre II : État actuel de l'estimation de l'humidité du sol par télédétection par micro-ondes.....

Figure2.1 : comment Télédétection hyperfréquence (micro-ondes) se des rôles.....	
Figure2.2 : Principes de base des radars	
Figure2.3 : Les bandes d'hyperfréquences les plus utilisées	
Figure 2.4 : Deux images radars du même champ agaric	
Figure2.5 : Atténuation atmosphérique et pénétration du signal RADAR sur les zones humides végétalisées en fonction de la bande de fréquence (X, L, C).	

Chapitre III :

Figure3.1 : Location of the DEMMIN test site in the German federal state Mecklenburg- Western Pomerania.....	
Figure3.2 : Carte des fermes au sein du site de test Demmin.....	
Figure3.3 : Recadrage de La ferme Gormin en 2006.....	
Figure 3.4 : Couverture des pistes de vol du site d'essai de Demmin (ferme de Görmin) pour le vol radar continu.....	
Figure 3.5 : Traitement DEM en bande X et acquisition de données de la ferme de Görmin, où la boîte rouge représente la frontière du DEM.	
Figure 3.6 : Couverture Demmin (ferme de Görmin) PAR MATLAB.....	
Figure3.7 : Deux des 11 points sélectionnés dans la zone d'étude (Görmin Farm).....	
Figure3.8 : comparaison d'humidité du sol entre les trois model (TOPP MODEL/DUBOIS/ EA-IEM).....	
Figure3.9 : Les Deux Photos représentent la végétation des deux points.....	

Chapitre I 10

1. Introduction 10

1.1. Le rayonnement électromagnétique.....	11
1.2. Télédétection.....	12
1.2.1. Source d'énergie ou d'illumination.....	12
1.2.2. Rayonnement et atmosphère.....	12
1.2.3. Interaction avec la cible.....	12
1.2.4. Enregistrement de l'énergie par le capteur	13
1.2.5. Transmission, réception et traitement.....	13
1.2.6. Interprétation et analyse.....	13
1.2.7. Application.....	13
1.3. Télédétection hyperfréquence (micro-ondes).....	13
1.3.1. Télédétection hyperfréquence active	14
1.3.2. Télédétection passive par micro-ondes	15
1.3.3. Les avantages.....	15
1.3.4. Inconvénients	16
1.4. Détection passive et active.....	16

1.5.	Type d'acquisition.....	16
1.5.1.	Les capteurs passifs.....	16
1.5.2.	Les capteurs actifs.....	16
1.6.	Les Domaines D'application De La Télédétection.....	16
1.7.	Le spectre électromagnétique.....	17
1.8.	Le radar.....	18
1.9.	Bandes de fréquences des Radars.....	19
1.10.	Fonctions principales de radar.....	19
1.11.	L'utilisation du Radar dans la Télédétection.....	19
1.12.	Radar à synthèse d'ouverture (SAR).....	19
1.12.1.	Principe de la génération des images SAR.....	20
1.12.2.	Principe de base.....	20
1.13.	Configuration géométrique du SAR.....	22
1.14.	Caractéristiques de l'image SAR.....	23
1.14.1.	Les info sur l'acquisition de l'image SAR.....	23
1.15.	Radars aéroportés et spatioportés.....	23
1.16.	Problèmes liés à la géométrie de l'image radar.....	24
1.17.	Polarimétrie.....	26
1.18.	Polarimétrie SAR.....	27
1.19.	Polarisation du champ électromagnétique.....	28
1.20.	Vecteur de Jones.....	28
1.21.	Rapport de polarisation – Ellipse de Polarisation.....	29
1.22.	Matrice de cohérence.....	30
1.23.	Vecteur de stockes.....	31
1.24.	Description des cibles.....	32
Chapitre II		35
II.	L'estimation de l'humidité du sol par télédétection par micro-ondes.....	35
2.	L'estimation du taux d'humidité du sol par télédétection active.....	35
2.1.	L'humidité du sol.....	36
2.2.	Facteurs influençant la télédétection micro-ondes.....	36
2.2.1.	Constante diélectrique (ϵ).....	36
2.2.2.	Coefficient de rétrodiffusion (σ_0).....	37
2.2.3.	Rugosité de surface.....	37
2.2.4.	Densité apparente.....	38
2.2.5.	Texture du sol.....	38
2.2.6.	Couverture végétale.....	38
2.2.7.	Angle d'incidence (θ).....	39
2.2.8.	Bande de fréquences.....	39

2.3.	Modèles de récupération du coefficient de rétrodiffusion et de l'humidité du sol :	40
2.3.1.	Topp model.....	41
2.3.2.	Model de Dubois	42
2.3.3.	IEM Model	43
2.3.3.1.	EA-IEM.....	44
2.3.3.1.1.	A- Original IEM	44
2.3.3.1.2.	B -EA-IEM.....	45
Chapitre III		50
III. Résultat		50
3.	Description de Site d'études.....	50
3.1.	ACQUISITION DE DONNÉES AÉROPORTÉES.....	52
3.2.	Acquisition de données radar.....	52
3.2.1.	Expliquer comment étudier La région de Görmin.....	53
3.3.	Description de l'algorithme de récupération de l'humidité du sol	54
3.4.	Application des model : (Topp model / Dubois / IEM).....	55
3.4.1.	Topp Model	55
3.4.2.	Dubois Model	56
3.4.3.	IEM MODEL.....	58
3.5.	Comparaison les résultats de les trois modèles (topp model / Dubois / IEM)	61
3.6.	Conclusion Générale.....	62
3.7.	References.....	63

Listes des sigles et des acronymes :

SAR : Synthetic Aperture Radar.

RSO: Radar à Synthèse d'Ouverture.

POLSAR : Polarimetric Synthetic Aperture Radar.

ECV : variable climatique essentielle.

Θ : Angle d'incidence.

rms : Rugosité de surface .

σ_0 : Coefficient de rétrodiffusion.

ϵ : Constante diélectrique.

ϵ' ϵ'' : Partie réel et imaginaire de ϵ .

Mv : la teneur en humidité volumétrique.

VHM : la mesure du coefficient de diffusion polarisé VH.

λ : longueur d'onde.

f=La Fréquence.

c=Célérité.

T=La Période= λ/c .

ms=Relatif.

W(t)=profil humidité du sol.

ρ_b : Densité apparente.

k : nombre d'onde.

Γ_0 : Réflectivité de Fresnel de la surface.

t : temps.

Introduction Générale :

Dans un contexte de la détérioration du secteur agricole en raison du manque de moyens technologiques qui facilitent de nombreuses tâches dans ce secteur et se concentrent davantage sur les méthodes traditionnelles qui nécessitent de grands efforts et une période de temps plus longue dans les zones faciles. le côté technologique et suivre l'approche suivie par le monde développé pour exploiter au maximum les richesses de notre pays. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette thèse. Nous nous intéressons en particulier à Fournir des commodités d'utilisation dans le secteur agricole en utilisant La Télédétection.

Il existe deux manières principales pour la cartographie de la terre : l'observation par des systèmes d'acquisition d'images optiques ou par des systèmes radar. L'utilisation des systèmes radar a plus d'avantages que l'autre puisque la production des images est possible de jour comme de nuit grâce a leur fonctionnement indépendant des conditions d'illumination ainsi que des conditions atmosphériques.

Le Radar a Synthèse d'Ouverture, appelé Synthetic Aperture Radar (SAR) en anglais est un système d'imagerie radar qui permet d'atteindre en pratique des résolutions spatiales élevés. Il est soit arien ou satellitaire.

Les capteurs embarqués sur des porteurs aériens fournissent de meilleures résolutions tandis que les porteurs spatiaux sont plus stables et ont la possibilité de capter des zones plus étendues.

Ce document est organisé comme suit :

Le premier chapitre comprend la présentation du radar a synthèse d'ouverture (SAR) caractéristiques et son principe de base et fonctionnement et la télédétection et ses avantages et inconvénients

Le deuxième chapitre parle de l'estimation d'humidité du sol par micro-ondes actives et les 1.5. Facteurs influençant la télédétection micro-ondes et les Modèles de récupération du coefficient de rétrodiffusion et de l'humidité du sol ce sont (TOPP, DUBOIS, IEM).

Le troisième chapitre nous avons discuté sur la Région (230 gorminfarm) que nous avons étudiés et ses Données et comment on a appliqué les trois modèles sur cette région.

Afin de compléter l'étude et se replacer dans le contexte industriel et opérationnel de la thèse, il nous a paru important de réaliser des expérimentations de l'ensemble de l'algorithme sur des images complètes pour évaluer les performances et le temps de traitement. Les résultats seront présentés dans le chapitre 3.

Enfin nous concluons sur cette étude et proposerons des perspectives sur la suite des travaux.

I. La Télédétection :

1. Introduction :

Le mot télédétection (en anglais « remote sensing ») désigne l'ensemble des techniques qui permettent d'étudier à distance des objets ou des phénomènes. Le terme « remote sensing » fait son apparition aux **Etats-Unis** dans les années soixante, lorsque des capteurs nouveaux viennent compléter la traditionnelle photographie aérienne.

Selon cette définition très vaste, la télédétection peut se pratiquer de la surface de la Terre vers l'atmosphère ou vers l'espace, comme de l'espace vers la Terre, et l'astronomie utilise largement la télédétection. Mais ce mémoire est concerné plus précisément par les techniques de la télédétection aérospatiale, qui a pour but l'étude de la surface de la Terre, des océans et de l'atmosphère à partir d'avions, de ballons ou de satellites, en utilisant les propriétés du rayonnement électromagnétique émis, réfléchi ou diffusé par les objets ou surfaces que l'on étudie. Dans ce cas, on peut définir plus précisément la télédétection comme ; l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir de l'information sur les cibles (terres, atmosphère, océans...), sans contact direct avec celle-ci.

(D'après le site Web du Centre Canadien de Télédétection :

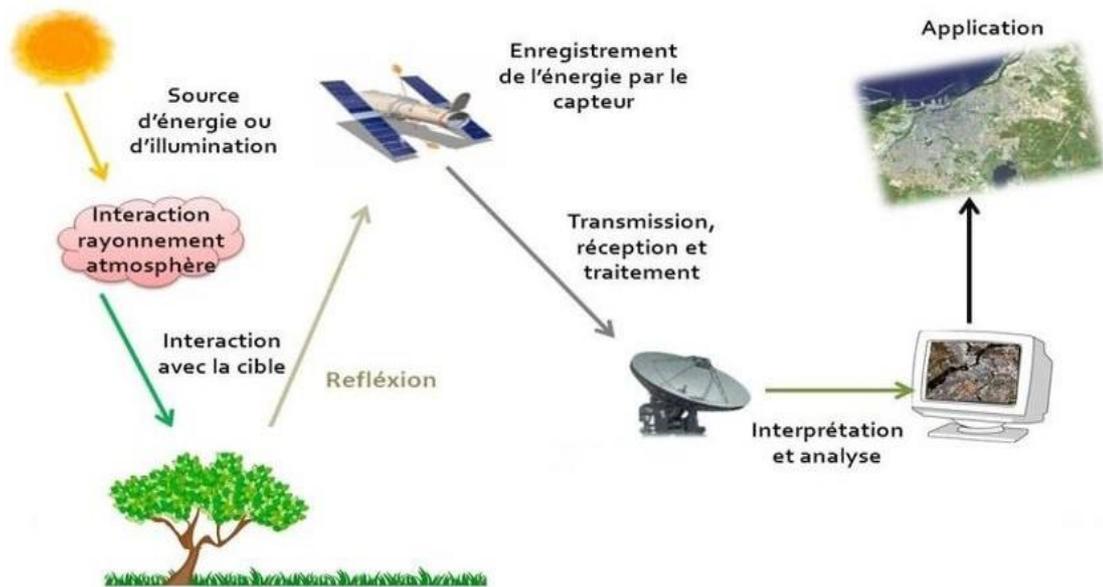


Figure 1.1 : Schéma général de fonctionnement du système de télédétection. [92]

1.1. Le rayonnement électromagnétique :

Le rayonnement électromagnétique est une onde qui transporte de l'énergie et qui se déplace à la vitesse de la lumière. Il est composé d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Le champ électrique varie en grandeur et est orienté perpendiculairement à la direction de propagation du rayonnement. Le champ magnétique est orienté perpendiculairement au champ électrique. La principale propriété d'un rayonnement électromagnétique est sa longueur d'onde (λ) qui est la distance entre deux crêtes successives de l'onde. Elle est exprimée en unité dérivée du mètre (nanomètre : 10^{-9} m. - micron : 10^{-6} m. millimètre : 10^{-3} m. - etc..). La fréquence ($\nu = c / \lambda$ mesure le nombre d'oscillation par unité de temps. Elle se calcule avec la formule $\nu = c \times \lambda$ (avec $c =$ vitesse de la lumière). On classifie le rayonnement électromagnétique en fonction de sa longueur d'onde : le spectre électromagnétique va des courtes longueurs d'onde (rayons gamma, rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio) en passant par l'ultraviolet, la lumière visible et l'infrarouge. La quantité d'énergie transportée par l'onde électromagnétique décroît avec la longueur d'onde. Une grande partie du spectre Électromagnétique peut être utilisé pour la télédétection [2].

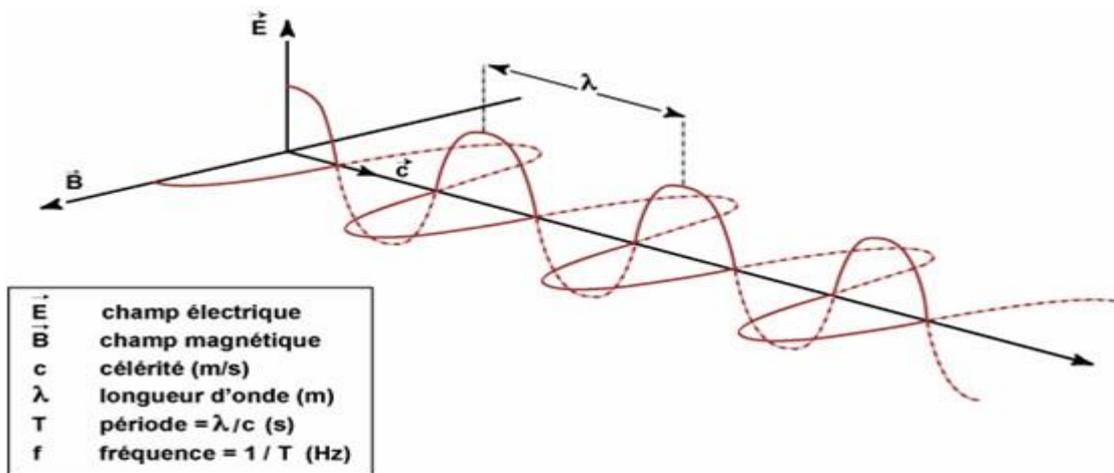


Figure 1.2 : Évolution du champ électromagnétique dans l'espace-temps [93]

1.2. Télédétection :

Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre l'énergie incidente et les cibles. Le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte les sept étapes que nous élaborons ci-après. Notons cependant que la télédétection peut également impliquer l'énergie émise et utiliser des capteurs non-imageurs.

1.2.1. Source d'énergie ou d'illumination

À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.

1.2.2. Rayonnement et atmosphère

Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.

1.2.3. Interaction avec la cible

Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.

1.2.4. Enregistrement de l'énergie par le capteur

Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.

1.2.5. Transmission, réception et traitement

L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).

1.2.6. Interprétation et analyse

Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.

1.2.7. Application

La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

Ces sept étapes couvrent le processus de la télédétection, du début à la fin. C'est dans cet ordre que tout au long de ce cours, nous vous invitons à construire, étape par étape, votre connaissance de la télédétection.

1.3. Télédétection hyperfréquence (micro-ondes) :

La détection par hyperfréquences (micro-ondes) comprend la forme active et la forme passive de la télédétection. La portion du spectre des hyperfréquences couvre une longueur d'onde d'une étendue variant de 1 centimètre à 1 mètre. Ces longueurs d'onde sont grandes par rapport aux ondes visibles et infrarouges, les hyperfréquences ont donc des propriétés particulières en télédétection. Les ondes les plus longues Cliquez pour le graphique passent au travers de la couche nuageuse, la bruine, la poussière et la pluie fine puisqu'elles ne sont pas sensibles à la diffusion atmosphérique qui affecte les ondes plus courtes. Cette propriété permet la détection dans presque toutes les conditions atmosphériques, et donc l'acquisition de données en tout temps.

La télédétection passive par hyperfréquences est semblable à la télédétection thermique. Tout objet émet une certaine quantité d'énergie dans les hyperfréquences, mais la magnitude en est généralement très faible. Un capteur passif détecte l'énergie dans les hyperfréquences émises naturellement dans son champ de vision. Cette énergie est

fonction de la température et de l'humidité de l'objet sur la surface émettrice. Les capteurs passifs sont habituellement des radiomètres ou des balayeurs et fonctionnent de la même manière que les systèmes dont il a été question précédemment. Toutefois, la détection de l'énergie dans les hyperfréquences requiert une antenne.

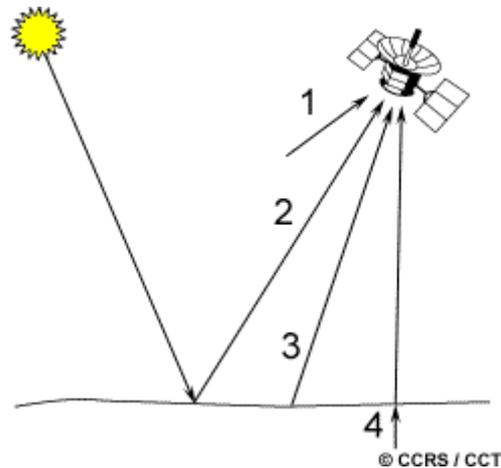


Figure 2.1 : comment Télédétection hyperfréquence (micro-ondes) se déroule.[102]

L'énergie enregistrée dans la partie du spectre des hyperfréquences par un capteur passif peut être émise par l'atmosphère (1), réfléchi du sol (2), émise par le sol (3) ou transmise du sous-sol (4). Parce que la longueur des ondes est aussi grande, l'énergie disponible est très petite par rapport aux longueurs d'onde visibles. Ainsi, le champ de vision doit être grand afin de détecter assez d'énergie pour enregistrer un signal. La plupart des capteurs à hyperfréquences sont donc caractérisés par une résolution spatiale faible [12].

1.3.1. Télédétection hyperfréquence active :

La télédétection hyperfréquence active utilise l'antenne radar en termes d'ouverture réelle ou synthétique, qui transmet des impulsions d'onde d'énergie connue et reçoit un signal de retour dont l'intensité dépend des caractéristiques de la cible [36]. Le signal renvoyé qui a été enregistré par le capteur est généralement exprimé en coefficient de rétrodiffusion (σ_0). Le σ_0 dépend principalement de la teneur en humidité du sol, principalement en raison de constant diélectrique (ϵ) du sol [37].et fournit ainsi une méthode de récupération du sol teneur en eau. Par conséquent, les micro-ondes est le plus approprié pour l'humidité du sol car il est exempt d'atténuation atmosphérique. Un certain nombre de facteurs tels

que la végétation, la rugosité de la surface, la profondeur de mesure et la topographie affectent le signal de rétrodiffusion détecté par l'antenne [38].

1.3.2. Télédétection passive par micro-ondes :

Pour la récupération de l'humidité du sol, la télédétection passive par micro-ondes a été considérée comme supérieure et plus fiable en termes de basses fréquences que la télédétection hyperfréquence active [41].

La télédétection micro-ondes passive fournit quotidiennement les données temporelles de la terre qui sont applicables à des modèles tels que le modèle de prévision numérique du temps [41]. Passif les instruments à micro-ondes sont généralement caractérisés par une large bande et une résolution temporelle élevée, mais également des résolutions spatiales grossières d'environ 10 à 30 km en bande L et en bande C, respectivement [40]. Les micro-ondes se situe dans 10–30 cm ne sont pas largement affectés par la rugosité de la surface, la couverture végétale et la texture du sol plutôt il est très sensible à l'humidité du sol [41].

L'ESA a lancé la mission SMOS le 2 novembre 2009. Il s'agit également des toutes premières micro-ondes passives en bande L capteur dédié à la mesure globale du sol proche de la surface de la Terre (jusqu'à 10 cm) [41]. La résolution spatiale de SMOS est suffisante pour récupérer l'humidité du sol pour de nombreuses applications mondiales. Combinaison des données SMOS avec d'autres capteurs les données de résolution peuvent fournir une solution potentielle pour les estimations globales de l'humidité du sol [41].

La mission SMAP a été lancée en janvier 2015. Le capteur SMAP est conçu de manière à produire actif (radar : polarisations VV, HH et HV) et passif (radiomètre ; registre V, H et haut et 4e polarisations des paramètres de Stokes) données d'humidité du sol simultanément. Les polarisations multiples aident à estimations précises de l'humidité du sol avec des corrections pour la végétation, la rugosité de surface, la rotation de Faraday et d'autres facteurs perturbateurs dans la gamme 1,2–1,4 GHz (bande L) à partir d'une dépression héliosynchrone Orbite terrestre. Le projet SMAP est géré pour la NASA par le Jet Propulsion Laboratoire, avec la participation du Goddard Space Flight Center [13].

1.3.3. Les avantages :

On doit insister sur quelques-uns d'entre eux qui sont particulièrement importants pour les géographes.

- La possibilité de disposer d'une information synoptique, homogène sur de grandes.
- La possibilité de disposer d'une information d'un haut niveau taxo- nomique
- La possibilité de disposer de documents numérisés, de façon originelle ou acquise.

1.3.4. Inconvénients :

- Impossibilité d'obtenir des modèles avec grande précision en comparaison avec les observations sur site.

1.4. Détection passive et active :

Les capteurs sont des appareils capables de recevoir le rayonnement qui vient de la terre et de le transformer en un signal permettant la mémorisation de l'information. Ils se distinguent par leurs types d'acquisitions (passif ou actif), leurs modes d'acquisitions et leurs résolutions.

1.5. Type d'acquisition :

1.5.1. Les capteurs passifs

En télédétection passive, le soleil est la source d'énergie ou de rayonnement utilisé en télédétection. Cette énergie est soit réfléchi (la portion visible) ou absorbée et transmise (fluorescence, infra -rouge thermique) par la cible. Les capteurs passifs sont des dispositifs de télédétection qui mesure l'énergie disponible naturellement.

1.5.2. Les capteurs actifs

Les capteurs en télédétection active produisent leur propre énergie pour illuminer la cible, et mesurer le signal rétrodiffusé dans sa direction. Ce sont des radiomètres opérant dans le domaine des hyperfréquences, ils ont l'avantage de pouvoir prendre des mesures à n'importe quel moment de la journée ou de la saison [3].

1.6. Les Domaines D'application De La Télédétection

Le premier grand domaine d'application de la télédétection a été l'étude de l'atmosphère (météorologie et climatologie). L'intérêt de la télédétection dans ce domaine est d'assurer une couverture globale et très fréquemment répétée de la planète entière. En océanographie, la télédétection offre l'avantage de permettre une

vision synoptique de vastes régions qu'il est impossible d'obtenir par les moyens traditionnels (bateaux). Pour certaines études à petite échelle, les données des satellites météorologiques sont largement utilisées en océanographie.

Les applications terrestres de la télédétection sont extrêmement variées. La photographie aérienne, sous toutes ses formes, est encore, sans doute pour peu de temps, le moyen le plus usuel de télédétection ; les photographies aériennes sont de plus en plus utilisées sous forme numérique de façon à permettre leur correction géométrique (orthophotos) et leur intégration dans les Systèmes d'Information Géographique. En télédétection spatiale, ce sont surtout les radiomètres optiques à haute ou très haute résolution qui sont utiles pour les applications terrestres.

Le champ des utilisations de la télédétection ne cesse de s'élargir : cartographie, géologie et prospection minière, mais aussi surveillance des cultures ou du couvert forestier, urbanisme, aménagement, génie civil, etc[1].

1.7. Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie (figure ci-dessous)[4].

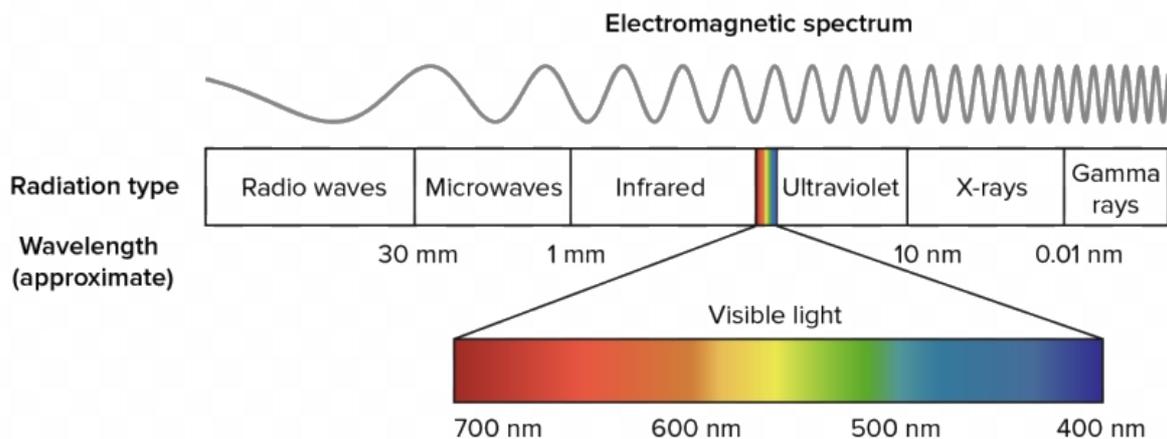


Figure 1.3 : les régions du spectre électromagnétique. [94]

La télédétection utilise plusieurs régions du spectre électromagnétique qui sont :

- **L'ultraviolet** ; rayonnements qui restent assez énergétiques, ils sont nocifs pour la peau. Heureusement pour nous, une grande part des ultraviolets est stoppée par l'ozone atmosphérique qui sert de bouclier protecteur des

cellules. Leurs longueurs d'onde s'échelonnent d'un cent millièmètre (10⁻⁸ m) à quatre dixièmes de millièmètre (4.10⁻⁷ m) de millièmètre.

- **Le visible** : correspond à la partie très étroite du spectre électromagnétique perceptible par notre œil. C'est dans le domaine visible que le rayonnement solaire atteint son maximum (0,5 μm) et c'est également dans cette portion du spectre que l'on peut distinguer l'ensemble des couleurs de l'arc en ciel, du bleu au rouge. Il s'étend de quatre dixièmes de millièmètre (4.10⁻⁷ m) - lumière bleue - à huit dixièmes de millièmètre (8.10⁻⁷ m) de millièmètre
- **L'infrarouge** : rayonnement émis par tous les corps dont la température est supérieure au zéro absolu (-273°C). En télédétection, on utilise certaines bandes spectrales de l'infrarouge pour mesurer la température des surfaces terrestres et océaniques, ainsi que celle des nuages. La gamme des infrarouges couvre les longueurs d'onde allant de huit dixièmes de millièmètre de millièmètre (8.10⁻⁷ m) à un millièmètre (10⁻³ m).
- **Les micro-ondes (ou hyperfréquences):**

Dans ce domaine spectral (1cm à 1m), les longueurs d'onde centimétriques sont grandes par rapport aux ondes visibles et infrarouges. Cela confère aux hyperfréquences des propriétés particulières et notamment la possibilité d'observer la surface de la Terre par tous les temps, de jour comme de nuit. L'atmosphère est en effet quasiment transparente à ces longueurs d'onde qui traversent donc sans problème les couches nuageuses. Ce domaine est celui des capteurs radars et des radiomètres à micro-ondes passives, utilisés notamment en océanographie pour l'étude des glaces de mer et la détection des nappes d'hydrocarbures [4].

1.8. LE RADAR :

Un radar est un instrument mesurant des distances des vitesses. Il consiste en un émetteur, un récepteur, une antenne et un système électronique pour traiter et enregistrer les données. L'émetteur génère de courtes impulsions d'hyperfréquences (A) à intervalle régulier qui sont concentrées en un faisceau (B) par l'antenne. Le faisceau radar illumine latéralement la surface à angle droit par rapport au déplacement de la plate-forme [2].

1.9. Bandes de fréquences des Radars :

HF	3-30MHz	Radars transhorizon, Radars spécifiques
VHF	30-300MHz	Radars transhorizon, Radars spécifiques
UHF	0.3-1GHz	Radars longue portée : suivi de satellites
L	1-2GHz	Radars longue portée suivi du trafic aérien
S	2-4GHz	Trafic Aérien
C	4-8GHz	Surveillance aérienne.
X	8-12GHz	Radars Aéroportés, radar d'atterrissage
Ku	12-18GHz	Radars Aéroportés, radar d'atterrissage
K	18-27GHz	Radars Aéroportés, radar d'atterrissage
Ka	27-40GHz	Radars Aéroportés, radar d'atterrissage
V	40-75GHz	autodirecteurs de missiles
W	75-110GHz	autodirecteurs de missiles

1.10. Fonctions principales de radar :

- Émettre un signal radio.
- Capturer le signal rétrodiffusé de la scène.
- Enregistrer l'intensité du signal de retour et le délai entre ce dernier et le signal émis.

1.11. L'utilisation du Radar dans la Télédétection

On utilise le radar dans la télédétection pour beaucoup de causes

- On peut contrôler la source d'illumination.
- Il traverse les nuages, la pluie, l'obscurité.
- Il donne une haute résolution d'image.

1.12. Radar à synthèse d'ouverture (SAR)

Le système **Radar à synthèse d'ouverture (SAR)** est une technique de radar spéciale qui permet d'obtenir des images radar haute résolution d'objets très éloignés, dans l'espace par exemple.

Avec le radar, les micro-ondes servent à mesurer les distances (amplitudes). Contrairement à un altimètre¹ radar dirigé vers le nadir, le système SAR émet des impulsions radar latérales. Grâce à ce principe de balayage latéral, le radar renvoie vers le capteur des signaux émis par différents objets sur Terre à différents moments. Cela permet de distinguer les objets. Les impulsions des radars à visée latérale forment des lignes (l'amplitude). Une autre dimension d'image (l'azimut) est formée par le mouvement et la direction du capteur, qui émet et reçoit en continu les impulsions radar[6] [7] voirFigure 1.5.

1.12.1. Principe de la génération des images SAR

Le SAR est capable de télédétection haute résolution, indépendamment de l'altitude de vol et des conditions météorologiques, car le SAR peut sélectionner des fréquences pour éviter l'atténuation du signal causée par les conditions météorologiques. Le SAR a une capacité d'imagerie de jour et de nuit car l'éclairage est fourni par le SAR.

Les images SAR ont de nombreuses applications dans la télédétection et la cartographie des surfaces de la Terre et d'autres planètes. Les applications du SAR sont nombreuses. Les exemples incluent la topographie, l'océanographie, la glaciologie, la géologie (par exemple, la discrimination du terrain et l'imagerie du sous-sol). Le SAR peut également être utilisé en foresterie pour déterminer la hauteur de la forêt, la biomasse et la déforestation. La surveillance des volcans et des séismes utilise l'interférométrie différentielle. Le SAR peut également être appliqué pour surveiller la stabilité des infrastructures civiles telles que les ponts. Le SAR est utile dans la surveillance de l'environnement, comme les marées noires, les inondations, la croissance urbaine, la surveillance militaire : y compris la politique stratégique et l'évaluation tactique. Le SAR peut être mis en œuvre en tant que SAR inverse en observant une cible en mouvement pendant un temps substantiel avec une antenne stationnaire [6], [7].

1.12.2. Principe de base

Un radar à ouverture synthétique est un radar d'imagerie monté sur une plate-forme mobile instantanée. Les ondes électromagnétiques sont transmises séquentiellement, les échos sont collectés et l'électronique du système numérise et stocke les données pour un traitement ultérieur. Comme la transmission et la réception se produisent à des moments différents, elles

correspondent à différentes petites positions. La combinaison bien ordonnée des signaux reçus crée une ouverture virtuelle beaucoup plus longue que la largeur physique de l'antenne. C'est la source du terme "ouverture synthétique", lui donnant la propriété d'un radar imageur.[5] La direction de portée est perpendiculaire à la trajectoire de vol et perpendiculaire à la direction d'azimut, également appelée direction longitudinale, car elle est alignée sur la position de l'objet dans le champ de vision de l'antenne.

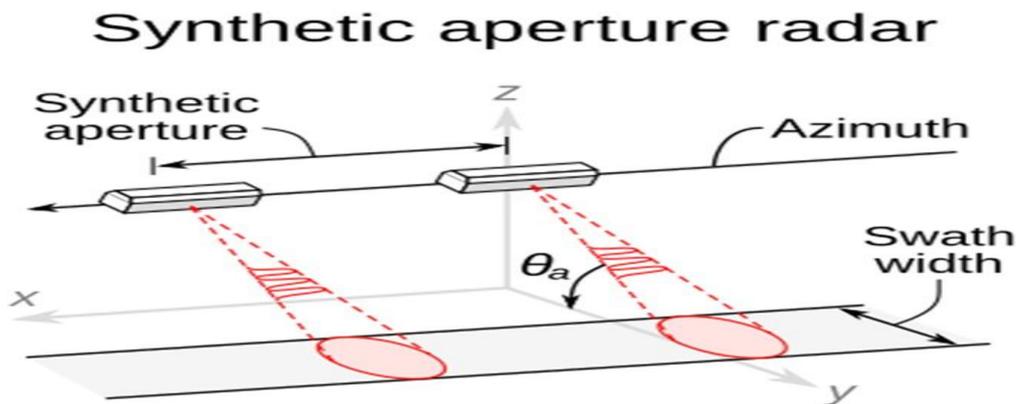


Figure1.5 : synthetic aperture radar. [96]

Le traitement 3D se fait en deux étapes. L'azimut et la direction de la distance sont focalisés pour la génération d'images haute résolution 2D (plage d'azimut), après quoi un modèle numérique d'élévation (DEM)[9][10] est utilisé pour mesurer les différences de phase entre les images complexes, qui est déterminé à partir de différents angles de vue pour récupérer les informations de hauteur. Cette information de hauteur, ainsi que les coordonnées de plage d'azimut fournies par la focalisation SAR 2D, donnent la troisième dimension, qui est l'élévation. [3] La première étape ne nécessite que des algorithmes de traitement standard,[10] pour la deuxième étape, un prétraitement supplémentaire tel que le co-enregistrement d'image et l'étalonnage de phase est utilisé.

De plus, plusieurs lignes de base peuvent être utilisées pour étendre l'imagerie 3D à la dimension temporelle. L'imagerie SAR 4D et multi-D permet l'imagerie de scénarios complexes, tels que les zones urbaines, et a amélioré les performances par

rapport aux techniques interférométriques classiques telles que l'interférométrie à diffusion persistante (PSI)[8].

1.13. Configuration géométrique du SAR

Le système Radar SAR Imageur est constitué d'un transmetteur de pulse micro-onde, une antenne qui sert à la fois d'émetteur et de récepteur, et de l'unité de réception. Le SAR est un système à visé latérale [26] tel qu'illustre le schéma de la figure (1.1).

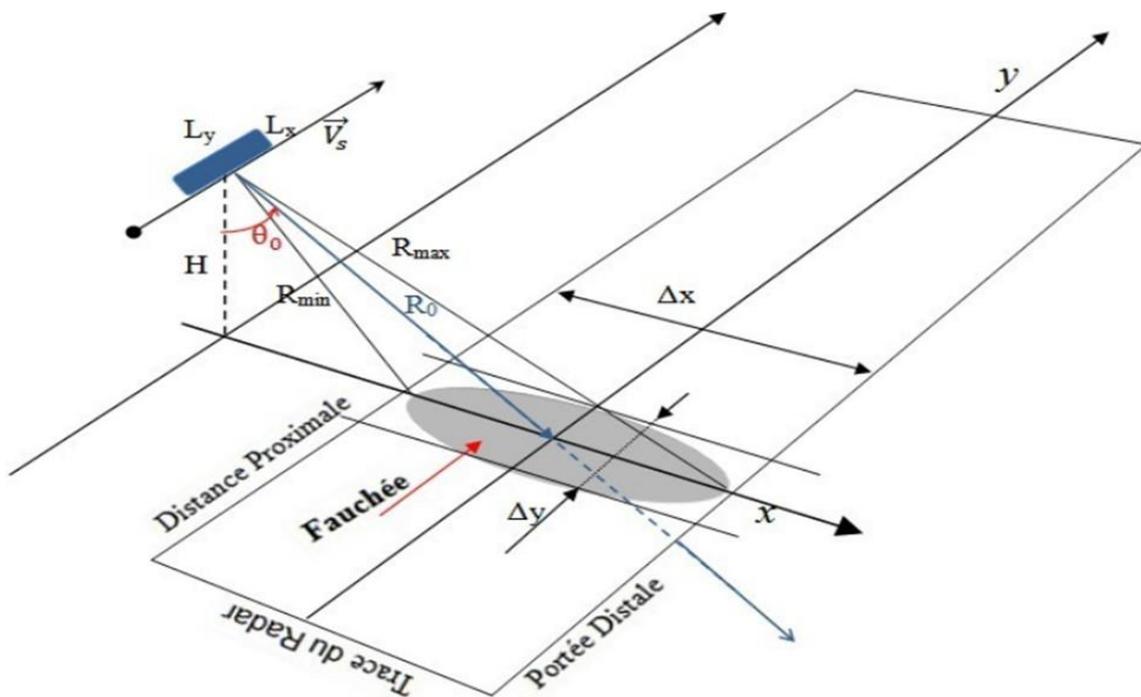


Figure 1.6 : La géométrie d'imagerie SAR [97]

Le système SAR imageur se déplace à une altitude H avec une vitesse V_s . L'antenne vise la direction perpendiculaire par rapport au sens du déplacement (l'azimut y). Le champ de l'antenne est alors dirigé vers le sol avec une inclinaison d'angle de visé θ_0 . L'axe radial s'appelle la portée distale (slant-range). La zone illuminée par le lobe principal de l'antenne entre la projection du slant-range au sol (x) et l'azimut (y) est dénommée fauchée (antenna foot print). Le temps de d'aller/retour du pulse électromagnétique fournit la position en distance des différents éléments réflecteurs de la surface. La distance séparant le point le plus proche de l'image au porteur est qualifiée de distance proximale (Near range), tandis que celle qui sépare le point le plus éloigné, est appelée portée distale R_{max} (Far range). La plateforme (avion ou satellite) qui se déplace le long de la direction du vol produit le scannage, et

la zone scannée par le champ de l'antenne s'appelle empreinte ou la trace du radar (radar swath). La fauchée qui est définie à partir des ouvertures de l'antenne (θ_x, θ_y), est donnée par [2].

$$\theta_x = \frac{\lambda}{L_x} \text{ Et } \theta_y = \frac{\lambda}{L_y} \quad (1)$$

L_x Et L_y correspondent aux dimensions physiques de l'antenne, et λ correspond à la longueur d'onde du signal transmis.

Les résolutions du SAR, en azimuth et en range sont données respectivement par :

$$\delta_\omega = \frac{R_0 \lambda}{L_y} \text{ Et } \delta r = \frac{c}{2f} \quad (2)$$

1.14. Caractéristiques de l'image SAR

Il est important de rappeler que l'image SAR obtenue est une matrice à deux dimensions où chaque pixel représente l'information d'une petite zone de la surface imagée, déterminée par une mesure de temps associée à une distance sous forme d'un nombre complexe (amplitude et phase). Ce pixel est associé à la réflectivité des diffuseurs qu'il contient. La réflectivité de la surface est fonction aussi de la rugosité et de l'humidité de la surface, aussi que des paramètres du système radar (fréquence f , polarisation, angle d'incidence du champ émis), et des caractéristiques de la cible (topographie, angle d'incidence local, rugosité, propriétés diélectrique, humidité, etc.) [2].

1.1.14 L'info sur l'acquisition de l'image SAR

La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information [1]. C'est au cours des années 1970 qu'a débuté la télédétection spatiale avec le satellite SEASAT. Ses images ont permis d'apprécier les avantages d'un tel système, ce qui a favorisé l'essor de la télédétection active. Mais ce sont les années 90 qui ont vu le développement de la collecte systématique d'images radar à synthèse d'ouverture (SAR) avec le lancement de nombreux satellites équipés d'une antenne SAR :

ALMAZ, ERS-1, JERS-1, ERS-2 et RADARSAT.

1.15. Radars aéroportés et spatioportés

Tout comme les autres systèmes de télédétection, un capteur radar qui acquiert des images peut être installé sur une plate-forme aéroportée ou sur un satellite. Selon l'utilisation finale de l'imagerie, l'on trouvera plus d'avantages à l'un ou l'autre des deux types de plates-formes. Quelle que soit la plate-forme utilisée, les radars à synthèse d'ouverture (SAR) possèdent l'avantage d'une résolution spatiale indépendante de l'altitude de la plate-forme. Une bonne résolution est donc possible à partir des deux types de plates-formes, aéroportée ou spatioportée [2].

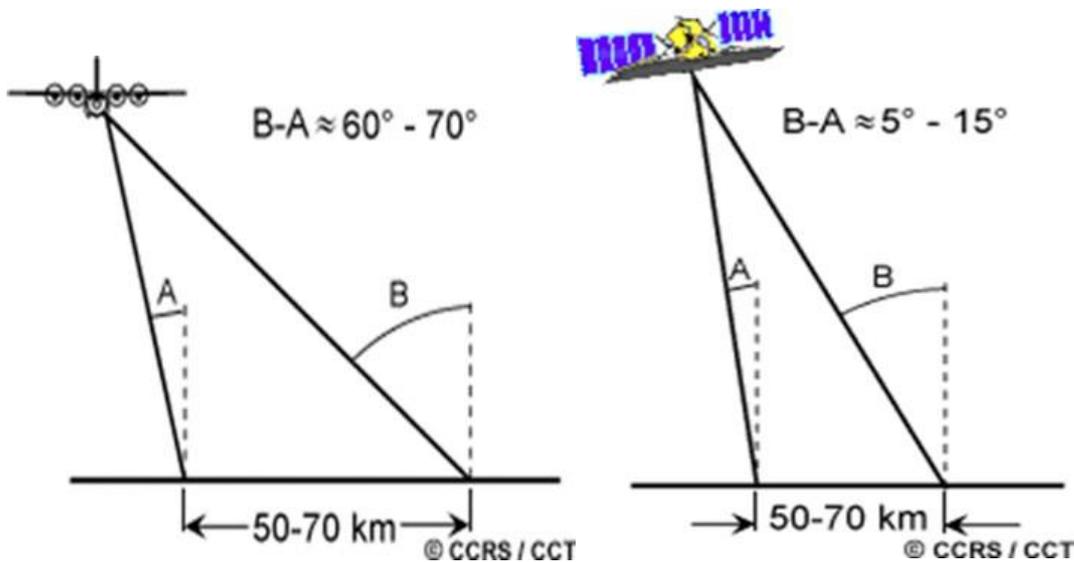


Figure 1.4 : Radars aéroportés et spatioportés [95]

1.16. Problèmes liés à la géométrie de l'image radar

a) Effet de rétrécissement ou "foreshortening" :

Ce phénomène apparaît dans les zones d'accumulation de pentes où la phase mesurée varie rapidement. L'image SAR présente des distorsions géométriques dues à la différence entre la distance inclinée ou salant range et la distance horizontale. Comme la figure (1.2) l'illustre, la pente CD apparaît comme "rétrécie"(C'D').

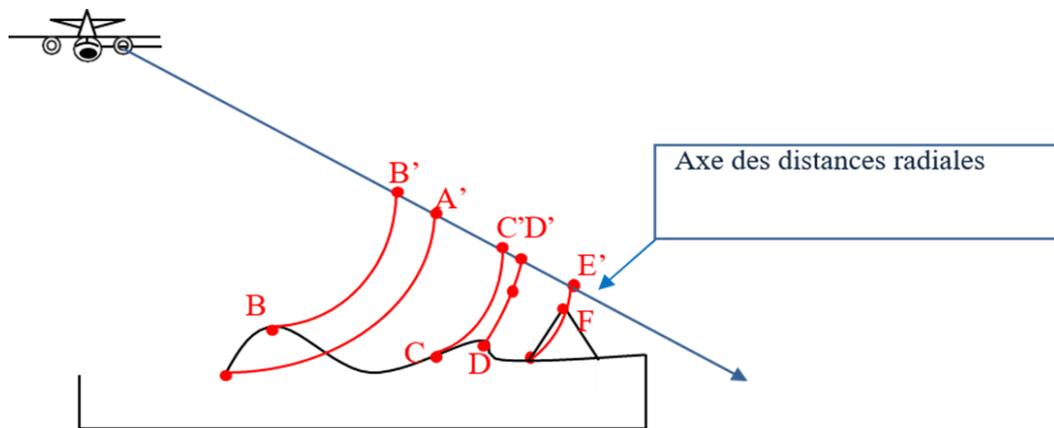


Figure 1.7 : Effets de rétrécissement et d'inversion du relief. [98]

b) Effet de repliement

Ce phénomène se produit quand la direction du radar est perpendiculaire à la surface illuminée, où le sommet et la base de la pente correspondent à un même point sur l'image, (voir figure (1.2)). Les points E et F se trouvent alors c.

c) Effet d'inversion du relief

Cet effet peut se produire lors de l'acquisition d'une forte pente, où la crête de la pente est vue avant le bas. Sur la figure (1.2) le point B' est vu avant le point A'.

d) Zones d'ombres

Les zones d'ombres, sont dues à la nature des capteurs actifs, et se produisent si le champ ne peut pas illuminer une surface du sol qui va apparaître sombre sur l'image (figure (1.6)).

f) Effet Rebond

La détermination des hauteurs et des distances se base sur le temps aller-retour de l'onde. Si ce dernier est étonnée nous aurons un calcul biaisé. En effet, le phénomène de rebond allonge le chemin de l'onde électromagnétique rétrodiffusée et donc la phase. Nous distinguons plusieurs types de rebonds.

- Le rebond simple (figure (1.8))
- Le double rebond ou effet dièdre : Le point est alors perçu comme si il est à une hauteur nulle (point représenté en rouge sur la figure (1.9)).
- Le triple rebond : Très rare, le phénomène de triple rebond (figure (1.10)) peut se manifester si, par exemple, un bâtiment est rugueux, alors, il reflète l'onde dans le même sens d'où elle est originaire. Le bâtiment imagé peut alors être perçu à l'envers.

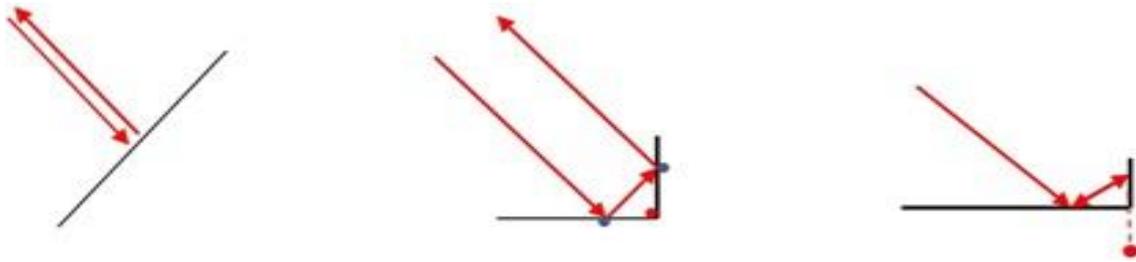


Figure 1.8 : simple rebond Figure 1.9 : double rebond Figure 1.10 : triple rebond [99]

g) Effet Superposition d'écho

Cet effet se produit lorsque deux objets différents sont aperçus comme un seul objet, cela se produit si les distances inclinées entre les objets et le capteur sont égales [2].

1.17. Polarimétrie

Les ondes radar ont une polarisation. Différents matériaux reflètent les ondes radar avec des intensités différentes, mais les matériaux anisotropes tels que l'herbe reflètent souvent des polarisations différentes avec des intensités différentes. Certains matériaux convertiront également une polarisation en une autre. En émettant un mélange de polarisations et en utilisant des antennes de réception avec une polarisation spécifique, plusieurs images peuvent être collectées à partir d'une même série d'impulsions. Fréquemment, trois de ces polarisations RX-TX (HH-pol, VV-pol, VH-pol) sont utilisées comme les trois canaux de couleur dans une image synthétisée. C'est ce qui a été fait sur la photo de droite. L'interprétation des couleurs résultantes nécessite des tests importants sur des matériaux connus.

Les nouveaux développements en polarimétrie incluent l'utilisation des changements dans les retours de polarisation aléatoires de certaines surfaces (comme l'herbe ou le sable) et entre deux images du même emplacement à des moments différents pour déterminer où des changements non visibles pour les systèmes optiques se sont produits. Les exemples incluent les tunnels souterrains ou les chemins de véhicules traversant la zone en cours d'imagerie. L'observation améliorée des nappes d'hydrocarbures en mer par SAR a été développée par une modélisation physique appropriée et l'utilisation de mesures entièrement polarimétriques et bipolarimétriques[9],[10].

1.18. Polarimétrie SAR

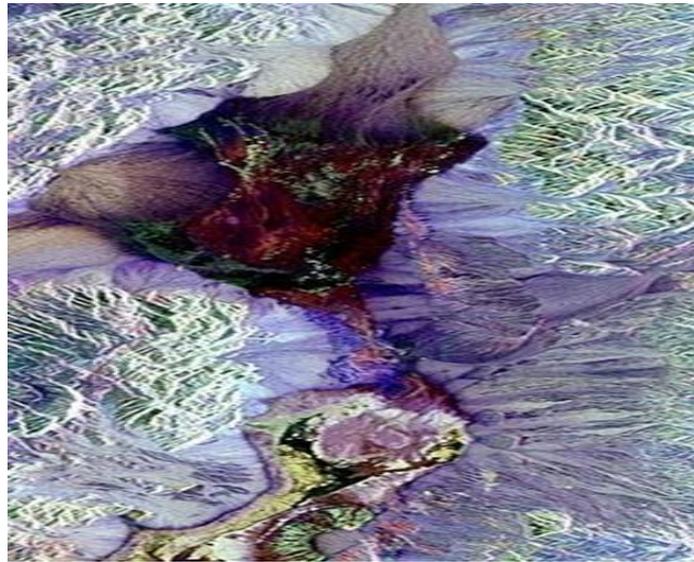


Figure 1.11 : SAR image of Death Valley colored using polarimetry [99].

La polarimétrie SAR est une technique utilisée pour dériver des informations physiques qualitatives et quantitatives pour la terre, la neige et la glace, les applications océaniques et urbaines basées sur la mesure et l'exploration des propriétés polarimétriques des diffuseurs artificiels et naturels. La classification du terrain et de l'utilisation des sols est l'une des applications les plus importantes du radar polarimétrique à synthèse d'ouverture (PoSAR).

La polarimétrie SAR utilise une matrice de diffusion (S) pour identifier le comportement de diffusion des objets après une interaction avec une onde électromagnétique. La matrice est représentée par une combinaison d'états de polarisation horizontale et verticale des signaux émis et reçus.

$$S = \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Où,

- HH est pour l'émission horizontale et la réception horizontale
- VV est pour l'émission verticale et la réception verticale
- HV est pour l'émission horizontale et la réception verticale,

- VH - pour l'émission verticale et la réception horizontale.

Les deux premières de ces combinaisons de polarisation sont appelées polarisation similaire (ou Co-polarisation), car les polarisations d'émission et de

Réception sont les mêmes. Les deux dernières combinaisons sont appelées à polarisation croisée car les polarisations d'émission et de réception sont orthogonales l'une à l'autre [9],[10].

1.19. Polarisation du champ électromagnétique

Lorsqu'on se place dans le plan contenant l'axe porteur du champ électrique et perpendiculaire à la direction de propagation « plan de polarisation », les extrémités des vecteurs E^{\rightarrow} et H^{\rightarrow} décrivent au cours du temps des courbes qui vont caractériser la polarisation de l'onde électromagnétique. Lorsque les extrémités des vecteurs décrivent une droite, c'est à dire quand le champ varie en amplitude mais toujours orienté dans la même direction, on dit que l'onde est polarisée linéairement. Les polarisations verticale et horizontale sont des exemples de la polarisation linéaire. Lorsque les extrémités des vecteurs décrivent un cercle ou une ellipse, l'onde est polarisée respectivement circulairement ou elliptiquement.

Une onde électromagnétique plane peut-être complètement polarisée CP, partiellement polarisée PP, ou complètement dépolarisée (annexe B).

En général le champ électrique d'une onde plane monochromatique se propageant dans la direction du vecteur d'onde k^{\rightarrow} s'écrit comme :

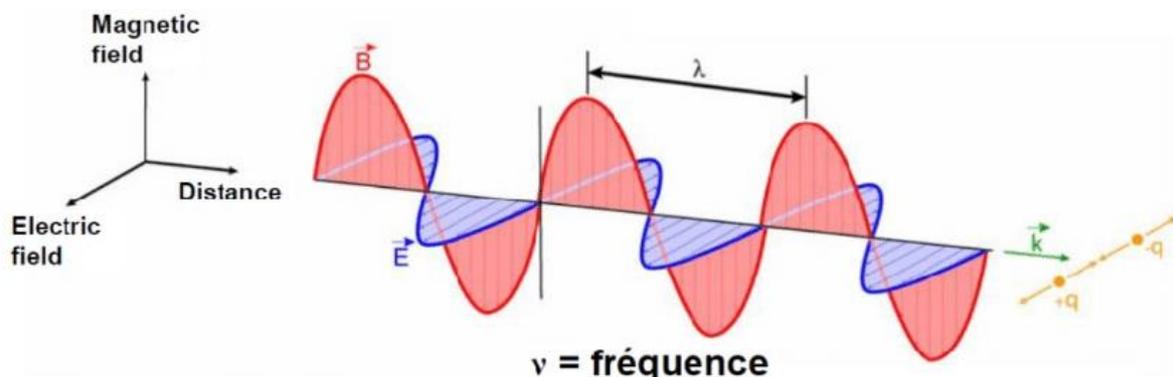


Figure 1.12 : Evolution du champ électromagnétique dans l'espace-temps.[100]

1.20. Vecteur de Jones :

Le vecteur de Jones permet de décrire l'état de polarisation de l'onde Électromagnétique de façon très simple dans une nouvelle base. Sa représentation

consiste à associer au vecteur du champ électrique réel $\vec{E}(t)$ défini dans le domaine temporel par $e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$, un vecteur complexe indépendant du temps \vec{P} de telle sorte que $\vec{E}(t) = \text{Re} \left((e^{j\omega t}) \vec{P} \right)$. Le vecteur \vec{P} est appelé vecteur de Jones ou vecteur de polarisation (Colin, 2005).

Pour une onde CP, les composantes du vecteur de Jones associées sont déterministes. Pour les ondes PP, ces composantes sont des variables aléatoires sur lesquelles vont intervenir des moyennages notés $\langle \dots \rangle$.

Dans ce qui va suivre, le vecteur de Jones d'une onde se propageant dans le sens de z dans une base (x, y) , sera exprimé à l'aide de deux composantes complexes [11].

$$\vec{E}(t) = \begin{bmatrix} E_{ox}(t) e^{j\delta_x} \\ E_{oy}(t) e^{j\delta_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{ox}(t) P_x \\ E_{oy}(t) P_y \end{bmatrix} \quad \text{Avec} \quad \vec{P} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.21. Rapport de polarisation – Ellipse de Polarisation :

Le rapport de polarisation est une mesure extrêmement utile car elle permet de distinguer l'état de polarisation canonique, elle nous permet aussi de quantifier la modification de l'état de polarisation, elle peut être écrite comme le rapport complexe des composantes du vecteur de Jones (annexe B) :

$$p = \frac{P_y}{P_x} \quad (5)$$

Pour les ondes CP, l'extrémité du champ électrique décrit dans le plan de polarisation une ellipse, comme illustré par la figure (1.13). Le sens de balayage de cette ellipse définit le sens de polarisation relativement au sens de propagation, dite droite (directe) ou gauche (inverse). Les cas particuliers de cette ellipse conduisent aux polarisations circulaire ou rectiligne. Cette ellipse peut être repérée par deux paramètres Φ et τ [11].

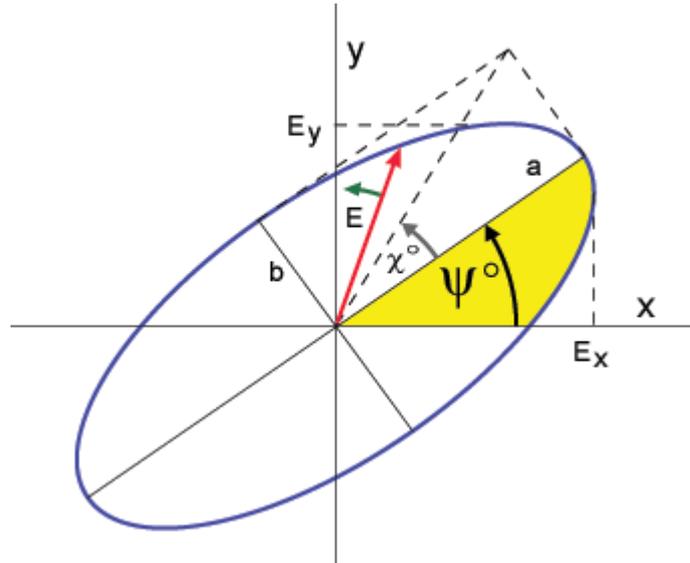


Figure 1.13 : paramètres de l'ellipse de polarisation. [101]

1.22. Matrice de cohérence :

Jusqu'à présent, les amplitudes E_{ox}, E_{oy} et la phase \pm ont été supposées indépendantes du temps, ce qui est suffisant pour d'écrire une onde plane monochromatique en régime stationnaire. Dans une approche plus réaliste, il n'est pas exclu que ces quantités fluctuent.

Dans le temps si elles sont observées dans un intervalle de temps suffisamment petit, inférieur à un temps appelé temps de cohérence de la source. Ainsi, pour une source ayant une certaine largeur spectrale, le champ électromagnétique est-il a priori partiellement polarisé, ce qui signifie que le champ électrique fluctue autour d'un état de polarisation moyen.

L'utilité de cette matrice est de représenter une onde pour laquelle les composantes du vecteur de Jones sont des variables aléatoires (cas des ondes PP).

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \end{pmatrix}$$

si est le vecteur de polarisation associé à l'onde. La matrice de cohérence de l'onde s'écrit alors :

$$C = \langle \vec{P} \vec{P}^{*T} \rangle = \begin{pmatrix} \langle P_x P_x^* \rangle & \langle P_x P_y^* \rangle \\ \langle P_y P_x^* \rangle & \langle P_y P_y^* \rangle \end{pmatrix} \quad (6)$$

Où $\langle . \rangle$ Est la valeur statistique moyenne et $*T$ désigne le transposé conjugué

Le degré de cohérence μ , De l'onde est défini par le module du coefficient de corrélation de L'onde [11].

$$\mu_c = \frac{\langle P_x P_y^* \rangle}{\langle P_x P_x^* \rangle \langle P_y P_y^* \rangle} \quad (7)$$

1.23. Vecteur de stockes

Le vecteur de Stokes aide à caractériser la polarisation d'une onde à travers les mesures de puissance. Ses paramètres décrivent la puissance totale transportée par l'onde et la répartition de cette puissance entre les composantes de l'onde polarisée linéairement et circulairement. Le

Vecteur de Stokes est un vecteur de quatre éléments réels définis par la projection de la matrice de covariance C sur le groupe des matrices de Pauli (annexe B). Il s'écrit sous la forme :

$$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle P_x P_x^* \rangle + \langle P_y P_y^* \rangle \\ \langle P_x P_x^* \rangle - \langle P_y P_y^* \rangle \\ 2 \operatorname{Re}(\langle P_x P_y^* \rangle) \\ 2 \operatorname{Im}(\langle P_x P_y^* \rangle) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Le premier paramètre g_0 représente la puissance totale transportée par l'onde (densité De l'onde). Le second paramètre g_1 représente la différence de puissance entre les polarisations verticale et horizontale, ou l'intensité de polarisation circulaire, qui peut être positive ou négative selon le sens de rotation. Le paramètre $(g_2 + i g_3)$, représente l'intensité de polarisation

Rectiligne à partir duquel on peut déduire l'angle d'inclinaison de la direction de polarisation (Gomez-Dans et Qegan, 2005).

La matrice de covariance C est donnée alors par[11] :

$$C = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} g_0 + g_1 & g_2 - i g_3 \\ g_2 + i g_3 & g_0 - g_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Comme la matrice C est hermitienne semi-défini positive, elle possède des valeurs propres réelles positives ou nulles qui sont données par :

$$\lambda_1 = \frac{g_0 + \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2}}{2}, \quad \lambda_2 = \frac{g_0 - \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2}}{2} \quad (10)$$

Le degré de polarisation, est obtenu au moyen des valeurs propres comme suit (Guillaso, 2003) :

$$\zeta = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (11)$$

Si $\zeta = 1$, alors la polarisation de l'onde est constante au cours du temps, et la relation suivante est vérifiée :

$$g_0^2 \geq g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 \quad (12)$$

1.24. Description des cibles

Pour caractériser les cibles vis-à-vis de la polarisation du champ incident CP, il faut mettre en lumière quelques outils.

Avant de voir ces outils, il est utile d'énoncer qu'une cible cohérente ou déterministe (dite cible simple), éclairée par une onde CP, renvoie une onde CP, tandis que les cibles incohérentes ou non déterministes (dites cibles distribuées ou complexes) renvoient une onde PP.

a) Matrice de diffusion /vecteur diffusion

La matrice de diffusion S (ou matrice de Sinclair) est un groupement de quatre Paramètres complexes dans une matrice carrée de dimension 2, qui permet de relier l'onde incidente à l'onde réfléchie.

$$E_{ref} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} E_{inc} \quad (13)$$

Ainsi nous travaillons sous l'hypothèse de réciprocité avec un vecteur de trois éléments appelé le vecteur de diffusion \vec{K} au lieu de la matrice S.

Plusieurs méthodes existent pour définir un vecteur de diffusion, suivant les matrices de bases que nous choisissons. Pour notre cas, deux bases sont largement utilisées : la base lexicographique et la base de Pauli. La solution la plus simple est de choisir la base lexicographique pour laquelle les couples de polarisation sont rangés dans l'ordre alphabétique.

Cependant, l'avantage de la base de Pauli, c'est qu'on peut avoir des vecteurs spécifiques à des cibles particulières suivant la matrice de Pauli choisie. Ainsi on aura une décomposition en sphère, dièdre 0° ou dièdre orienté de 45° (Lee et Pottier, 2009). Le vecteur \vec{K} est noté selon base choisie :

\vec{K}_L pour la base lexicographique et est donné par :

$$\vec{K}_L = \begin{pmatrix} S_{HH} \\ \sqrt{2}S_{HV} \\ S_{VV} \end{pmatrix} \quad (14)$$

\vec{K}_P Pour la base de Pauli et est donné par :

$$\vec{K}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{pmatrix} \quad (15)$$

b) Caractérisation des cibles cohérentes (Matrices S et T) :

Une cible cohérente est caractérisée par cinq paramètres indépendants, qui peuvent être tirés d'un jeu de divers paramètres, la matrice S contient six paramètres

(trois modules et trois phases) où seules les phases relatives nous intéressent. On choisit en général une phase de référence. Par exemple pour SHH, nous aurons comme référence $\arg(\text{SHV-SHH})$ et $\arg(\text{SVV-SHH})$, aussi pour interpréter la puissance de la cible, la matrice de cohérence T exprimée dans la base de Pauli nous offre neuf paramètres complexes.

c) Caractérisations des cibles non cohérentes :

Ce type de cible est paramétrable par neuf grandeurs, la matrice S ne suffit pas, car les composantes de la cible sont aléatoires. Divers jeux de paramètres créés à partir des vecteurs cibles $\vec{K}_L^{* \rightarrow}$ ou $\vec{K}_p^{* \rightarrow}$ sont utilisés pour définir les matrices planimétriques $[C]$ ou $[T]$.

$$T = \langle \vec{K}_p \vec{K}_p^{*T} \rangle \quad (16)$$

$$C = \langle \vec{K}_L \vec{K}_L^\dagger \rangle \quad (17)$$

Ces deux matrices hermitiennes sont équivalentes et sont liées par la relation de passage suivante (Hajnsek, 2003) :

$$[C] = [A][T][A]^{*T} \quad \text{Ou} \quad [A] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Conclusion :

Dans ce chapitre Nous avons appris à connaître la Télédétection et ses domaines avec ces deux types L'active et passive et aussi comment le SAR fonctionne et les Caractéristiques de l'image SAR

II. L'estimation de l'humidité du sol par télédétection par micro-ondes

2. L'estimation du taux d'humidité du sol par télédétection active

L'humidité du sol a été reconnue comme une variable climatique essentielle (ECV) en 2010 car elle joue un rôle crucial dans divers processus se produisant sur le sol-atmosphère [27]. Compte tenu de la grande variabilité et du faible degré de l'autocorrélation observée, il est difficile d'obtenir des estimations fiables à plus grande échelle à partir de mesures ponctuelles [28]. La possibilité de récupérer l'humidité du sol a été étudiée à l'aide de satellites, de navettes spatiales et de radars aéroportés à synthèse [29]. La télédétection par micro-ondes est la plus efficace technique d'estimation de l'humidité du sol, avec des avantages pour les observations par tous les temps et la physique des solides [30]. Étant donné que les mesures micro-ondes de la surface du sol sont affectées par la teneur en eau [31], il est facile de voir la potentialité de la télédétection dans la cartographie de l'humidité du sol et d'autres applications [32].

L'utilisation des données radar pour récupérer l'humidité du sol est d'une importance considérable dans de nombreux domaines, y compris l'agriculture, l'hydrologie et la météorologie [33]. Malgré les nombreux avantages qui peuvent découler de la connaissance de la distribution de l'humidité du sol, la mesure de l'humidité du sol a peu de limites. Cependant, la mesure de l'humidité du sol ne dépend pas seulement des caractéristiques cibles telles que la surface rugosité, couvert végétal, constante diélectrique et topographie [34] mais dépend également de diverses combinaisons des paramètres du capteur radar, y compris la fréquence, la polarisation et l'angle d'incidence (θ) par rapport au nadir [11].

Il existe différentes techniques de mesure de l'humidité d'un sol notamment par Télédétection hyperfréquence, Objectif de ce chapitre est l'estimation de l'humidité du sol par télédétection par micro-ondes.

2.1. L'humidité du sol

L'humidité est la présence d'eau ou de vapeur d'eau dans l'air ou dans une substance (linge, pain, produit chimique, etc.). Elle peut se mesurer grâce à un hygromètre à cheveu ou numérique et s'exprime généralement en pourcentage. Le terme humidité utilisé dans le langage de la construction correspond à une présence anormale d'eau dans un bâtiment. Celle-ci peut être sous forme de liquide, de vapeur d'eau ou de remontée capillaire.

L'humidité du sol est un paramètre important dans le bilan hydrique du sol et en irrigation, c'est un facteur intervenant dans la modélisation du drainage, et peut fournir de l'information sur le potentiel hydroélectrique et d'irrigation d'un bassin. Dans les régions de déforestation active, les évaluations de la teneur en humidité du sol aident à la prévision du volume de ruissellement, des taux d'évaporation et de l'érosion du sol.

2.2. Facteurs influençant la télédétection micro-ondes :

Les caractéristiques de surface, telles que la rugosité et la couverture végétale, ont une influence significative sur la coefficient de rétrodiffusion ; ainsi, il est très difficile de récupérer l'humidité du sol sans en avoir une connaissance détaillée [42]. De plus, le nombre de paramètres du capteur radar, tels que la fréquence, ϵ , la polarisation et θ par rapport au nadir, influence la rétrodiffusion des micro-ondes de plusieurs manières qui sont décrites comme suit [43].

2.2.1. Constante diélectrique (ϵ) :

ϵ est proportionnel au nombre de dipôles d'eau par unité de volume. L'estimation de l'humidité du sol est une perspective de sensibilité de ϵ à la teneur en eau pour de tels cas. La partie réelle de la constante diélectrique (ϵ') varie de 2,5 pour les sols très secs à 25 pour les sols très humides.

$$\epsilon'(or\epsilon') = (a_0 + a_1 s + a_2 c) + (b_0 + b_1 s + b_2 c)M_v + (c_0 + c_1 s + c_2 c)M_v^2 \quad (2.1)$$

Où s et c sont le pourcentage de sable et d'argile en poids, et a_i , b_i et c_i sont les coefficients dépendant de la fréquence. ϵ' et ϵ'' sont les parties réelle et imaginaire de la constante diélectrique.

Plusieurs modèles ont été développés pour corréler et corrélérer la teneur en humidité du sol [13].

2.2.2. Coefficient de rétrodiffusion (σ_0) :

Le coefficient de rétrodiffusion dépend linéairement de l'humidité du sol à des niveaux d'humidité inférieurs à la saturation. Près de la saturation, la diffusion inverse se stabilise et semble devenir moins sensible aux augmentations supplémentaires de l'eau [46].

L'humidité du sol affecte la quantité de rétrodiffusion en raison des propriétés isolantes du sol [47]. Lorsque ϵ du sol augmente linéairement, σ_0 augmente également, c'est-à-dire 0 et la teneur en humidité du sol devient positivement corrélée (Champion, 1996).

L'unité σ_0 est $m^2 m^{-2}$, mais est généralement exprimée en 0 dB (Wagner, 1998) augmentant avec l'augmentation de l'humidité du sol jusqu'à ce que la teneur en humidité atteigne 35 % lorsque le signal radar devient insensible à l'humidité du sol [48].

Grâce à de nombreuses expériences sur le terrain, la relation linéaire entre la teneur en σ_0 et M_v est exprimée expérimentalement dans l'équation (2)

$$\sigma^0 = A + B.W \quad (2.2)$$

Où A est le coefficient de rétrodiffusion d'une surface de sol complètement sèche et B est la sensibilité de σ_0 changé avec la teneur en humidité du sol de surface. A et B sont des coefficients de régression dépendant de rugosité de la surface du sol, angle d'incidence et texture du sol [49], [13].

2.2.3. Rugosité de surface :

La rugosité de la surface du sol est l'un des indicateurs clés pour cartographier les surfaces de ruissellement potentielles car elle conduit à des infiltrations [50]. La rugosité de la surface influence fortement la rétrodiffusion radar et cela est bien plus que la présence d'humidité à la surface [51]. Plusieurs études ont démontré que le signal radar est plus sensible à la rugosité de surface à des angles d'incidence élevés [52].

Cependant, dans le cas d'une inversion de σ_0 , la réponse radar est sensible aux paramètres de rugosité de surface, notamment la corrélation de longueur (L), et la racine carrée moyenne RMS de la hauteur efficace de la surface (s), alors que les autres paramètres de surface sont peu sensibles. La principale source d'erreurs de récupération est due aux différences dans les paramètres de rugosité du sol résultant de différentes techniques de mesure et profils de rugosité [77]. Les écarts observés sont principalement liés à l'incertitude des paramètres de rugosité mesurés, en particulier pour L. L a été retiré de la pratique dans [74] en raison de l'incertitude de mesure.

$$r.m.s = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (Z_i - \bar{Z})^2}{n-1}} \quad (2.3)$$

Où Z_i désigne la hauteur du point, \bar{Z} est la hauteur moyenne et n est le nombre total de points pris en considération [14].

2.2.4. Densité apparente :

La densité apparente du sol (ρ_b) a une relation inverse significative avec l'émission de micro-ondes [53]. La masse volumique croissante du sol affecte les propriétés diélectriques de sol sec et humide. La densité apparente croissante du sol affecte les propriétés diélectriques de sol sec et humide [54].

2.2.5. Texture du sol :

La détermination de la texture directe du sol au moyen d'images SAR est une tâche très difficile. La texture du sol influence le coefficient de rétrodiffusion par modification des propriétés diélectriques du sol par sa configuration texturale en termes de capacité de rétention d'eau [45]. Les sols sableux contiennent plus de quantité d'eau libre que les sols argileux [105]. La corrélation entre la rétrodiffusion et l'humidité du sol est plus élevée dans les sols sableux [106].

2.2.6. Couverture végétale :

La présence de végétation à la surface du sol réduit la sensibilité à la rétrodiffusion du sol, même si champs agricoles, les gradients d'humidité du sol près de la surface

peuvent changer rapidement [58]. La couverture végétale affecte également la récupération de l'humidité du sol par micro-ondes en raison de divers facteurs qui sont la biomasse végétale, le type et la configuration de la canopée et l'état des cultures [59]. Les effets de la végétation deviennent plus forts dans cas de végétation dense ainsi qu'avec l'augmentation de la fréquence des micro-ondes. Parmi tous les micro-ondes bandes, les mesures en bande L donnent toujours de bons résultats sous divers types de couvert car il a un pouvoir de pénétration plus élevé du couvert végétal ou du couvert végétal pour atteindre la surface du sol, alors que pour la bande C qui est très sensible à la couverture végétale peut conduire à une mesure [60].

2.2.7. Angle d'incidence (θ) :

L'angle d'incidence local joue un rôle important dans l'inversion de l'humidité du sol par rapport à l'état de la rugosité de la surface du sol [61]. Plusieurs résultats d'essais et données de simulation ont montré que la sensibilité du signal radar est plus sensible à la rugosité de la surface à des angles d'incidence élevés qu'à de faibles angles d'incidence. Bien que de faibles angles d'incidence soient optimaux pour l'estimation de l'humidité du [62]. Ils notent également que la dépendance du signal radar sur la rugosité de surface de la surface est principalement importante pour les faibles niveaux de rugosité et qu'il est difficile de distinguer les rugosités supérieures à environ 0,015 m à l'aide de capteurs SAR [63]. [17]

2.2.8. Bande de fréquences :

La capacité du capteur radar à mesurer l'humidité du sol est très faible dans les zones à forte la dominance de la végétation telle que la forêt, [63]. Parce que les bandes de fréquences micro-ondes basses pénètrent à peine les couches de végétation [9A]. De ce fait, Les couverts végétaux peuvent également influencer le σ_0 ; par le fait diélectrique de leurs feuilles.

Le comportement diélectrique des feuilles a été déterminé par des méthodes empirique directe pour différents types de plantes séchées et humides pour mesurer la différence ϵ'' . Les feuilles ont une partie réelle de la constante diélectrique (ϵ') entre 1,5 et 2, et la partie imaginaire du constant diélectrique (ϵ'') est inférieure à 0, [64].

D'autre part, l'estimation de l'humidité du sol par une longueur d'onde plus courte que la bande C est hydrologiquement inefficace en raison du faible pouvoir de pénétration en surface, alors que les mesures en bande L donnent encore de bons résultats sous différents types de couvert [65] (voir Figure 1). Pour inverser le taux en humidité du sol en bande C et inférieures (voir tableau 2) nécessite des informations de rugosité plus précises pour les études d'inversion [66]. Une longueur d'onde de l'ordre de la bande L ou P contient plus d'informations sur le profil du sol par rapport aux autres bandes [66]. Ainsi, pour minimiser l'influence du couvert végétal sur les images radar, les bandes de fréquences et les angles d'incidence spécifiques sont préférés [66] [17].

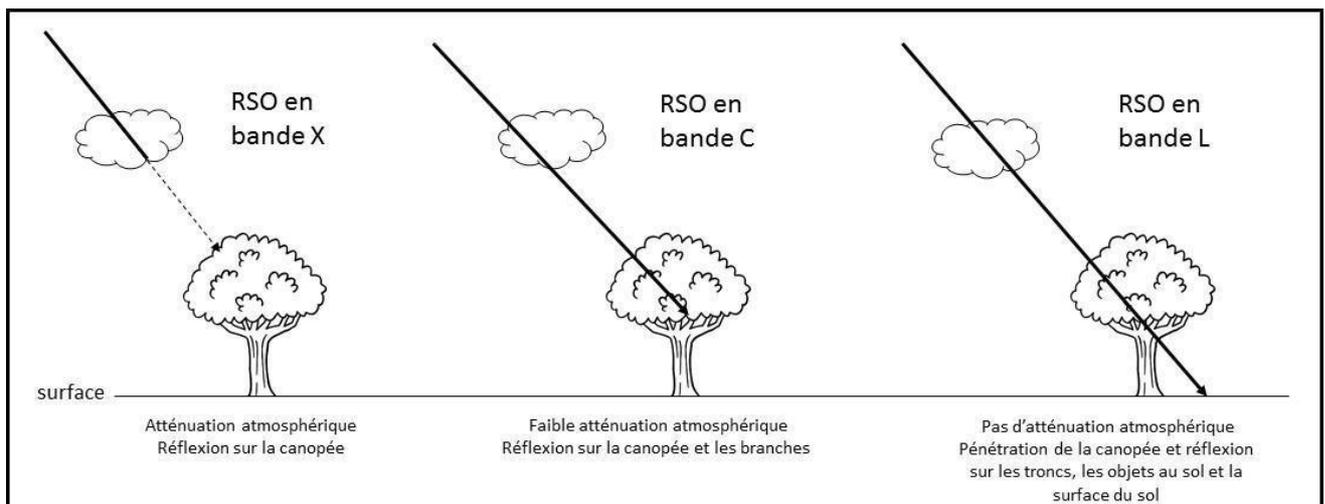


Figure 2.5 : Atténuation atmosphérique et pénétration du signal RADAR sur les zones humides végétalisées en fonction de la bande de fréquence (X, L, C).[103]

2.3. Modèles de récupération du coefficient de rétrodiffusion et de l'humidité du sol :

De nombreuses méthodes théoriques, empiriques et semi-empiriques ont été développées depuis le début d'études SAR pour relier le coefficient de rétrodiffusion SAR à l'humidité

du sol [50] Ces modèles théoriques sont dérivés de la théorie électromagnétique. Ces théories dépendent sur le site et le type de surface sur lesquels ils ont été développés et testés en considérant l'incidence angle, λ et paramètres du sol [38]. Certains des modèles les plus utilisés ont été décrits ci-dessous.

2.3.1. Topp model :

La relation entre la permittivité relative et la teneur en eau volumétrique a été utilisée par des chercheurs antérieurs pour déterminer la teneur en eau volumétrique. De nombreuses fonctions ont été proposées pour décrire le modèle de relation ϵ - θ sur une gamme de teneur en eau du sol.

$$\nabla \cdot (\epsilon(x,y,z) \nabla \phi(x,y,z)) = -\rho(x,y,z) \quad \nabla \cdot \epsilon_{xyz} \nabla \phi_{xyz} = -\rho_{xyz} \quad (2.4)$$

Certains modèles proposent la relation ϵ - θ . [112] ont introduit avec succès la relation ϵ - θ couramment utilisée en géotechnique. La relation est comme indiqué ci-dessous :

$$\epsilon = 3.03 + 9.3\theta + 146.0\theta^2 - 76.7\theta^3 \quad (2.5)$$

Où ϵ est la permittivité relative ou la constante diélectrique et θ est la teneur en eau volumétrique du sol.

Est dérivé empiriquement à travers des expériences de divers sols minéraux à l'aide d'un réflectomètre dans le domaine temporel (TDR) à une fréquence comprise entre 1 MHz et 1 GHz, avec une valeur d'erreur estimée de 0,013. Sous une autre forme, l'équation de Topp peut aussi s'écrire comme suit :

$$M_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon' - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon'^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon'^3 \quad (2.6)$$

Le modèle de Topp [86] a été utilisé efficacement pour dériver l'humidité du sol à partir du sol ϵ [87]. Le modèle de Topp est utilisé pour créer une étude comparative avec l'humidité du sol récupérée et σ_0 pour chacun des modèles théoriques et physiques [87]. Pour dériver l'humidité du sol, ce modèle ne nécessite aucune connaissance préalable de la texture et de la surface du sol. Rugosité et M_v peut être récupéré par l'algorithme (2.6).

2.3.2. Model de Dubois :

En 1995 dans [79] ont développé un modèle empirique. Cet algorithme a été développé en utilisant les données du diffusiomètre au sol du LCX POLARSCAT3 [109] et les systèmes RASAM 4[108] et applicable aux mesures de données radar sur une large gamme de surfaces.

Le POLARSCAT est un diffusiomètre basé sur un analyseur de réseau monté sur camion fonctionnant à 1,25, 4,75 et 9,5 GHz [109] et les données comprenaient des mesures de rétrodiffusion hh, vv et hv entre 10 et 700 à 100 intervalles pour quatre profils de surface qui a été ensuite utilisé pour mesurer une hauteur RMS variant de 0,32 à 3,02. Le RASAM est un camion Diffusiomètre fonctionnant de 2,5 à 11 GHz avec des ensembles de données de mesures évoluées des HH, VV, HV et coefficients de rétrodiffusion polarisée VH de 300 à 600 à des intervalles de 100 avec une surface efficace hauteurs variant de 0,57 à 1,12 cm. Ces deux ensembles de données ont ensuite été utilisés pour décrire la Co polarisation rapport de rétrodiffusion de la surface nue en fonction de la rugosité de la surface, diélectrique constante, angle d'incidence et fréquence.

Les coefficients de rétrodiffusion σ_{hh} et σ_{vv} donnée par Dubois et al., 1995 s'écrit :

$$\sigma_{hh}^0 = 10^{-2.75} \frac{\cos^{1.5} \theta}{\sin^{1.5} \theta} 10^{0.028\varepsilon \tan \theta} (kh \sin \theta)^{1.4} \lambda^{0.7} \quad (2.7)$$

$$\sigma_{vv}^0 = 10^{-2.35} \frac{\cos^3 \theta}{\sin^3 \theta} 10^{0.046\varepsilon \tan \theta} (kh \sin \theta)^{1.1} \lambda^{0.7} \quad (2.8)$$

L'équation d'inversion pour estimer la constante diélectrique et la rugosité de surface est donnée par,

$$\varepsilon = \frac{C_{vv} (\sigma_{hh} - A_{hh}) - C_{vv} (\sigma_{vv} - A_{vv})}{\tan \theta (B_{hh} C_{vv} - B_{vv} C_{hh})} \quad (7)$$

$$h = \frac{\lambda}{2\pi \sin \theta} 10^{\left\{ \left[B_{hh} (\sigma_{vv} - A_{vv}) - B_{vv} (\sigma_{hh} - A_{hh}) \right] / [B_{hh} C_{vv} - B_{vv} C_{hh}] \right\}} \quad (2.9)$$

Où,

$$A_{hh} = 1.5 \log(\cos \theta) - 5 \log(\sin \theta) + 0.7 \log(\lambda) - 2.75 \quad (2.10)$$

$$A_{vv} = 3 \log(\cos \theta) - 3 \log(\sin \theta) + 0.7 \log(\lambda) - 2.35 \quad (2.11)$$

$$B_{hh} = 0.028 \quad B_{vv} = 0.046 \quad (2.12)$$

$$C_{hh} = 1.4 \quad C_{vv} = 1.1 \quad (2.13)$$

2.3.3. IEM Model :

Le modèle d'équation intégrale (IEM) est considéré comme un algorithme prometteur pour la récupération de l'humidité du sol à partir d'actifs données micro-ondes sur un sol nu et des conditions de végétation clairsemée.

Cependant, la constante diélectrique du sol est implicitement intégrée dans l'IEM compliqué ; l'inversion de l'humidité du sol est souvent accomplie par itération et est donc nécessite un temps de calcul inestimable, en particulier lorsqu'il est appliqué pour récupérer l'humidité du sol à travers des données SAR à grande échelle.

Pour simplifier le processus d'inversion de l'humidité du sol directement à partir des données micro-ondes, des fonctions mathématiques ont été adoptées pour contrefaire le processus itératif de la IEM d'origine de sorte que le coefficient de rétrodiffusion radar deviens une fonction explicite de la constante diélectrique du sol.

L'humidité du sol est ensuite calculée directement à partir du coefficient rétrodiffusion radar sans itération. Ce modèle est appelé modèle IEM-Empirique adopté (en anglais Empirically Adaptive-IEM) [113].

Les écarts moyens de coefficients de rétrodiffusion entre l'EA-IEM et l'original IEM sont de 0,14 dB pour la polarisation HH et de 0,12 dB (fonction de corrélation Gaussienne) et 0,2 dB (fonction de corrélation exponentielle) pour la polarisation VV.

2.3.3.1. EA-IEM :

2.3.3.1.1. A- Original IEM

Comme il a été cité précédemment (3), le coefficient de rétrodiffusion de la surface du sol est fonction de la texture, de la structure, la densité, rugosité (hauteur efficace de la surface), humidité du sol, et les conditions décrites par la fonction d'autocorrélation aléatoire de hauteur de surface « s » et de longueur de corrélation L. Pour un terrain naturel qui a de petite pente rms L et s, la diffusion multiple n'est pas significative, puis la diffusion globale dominera dans la plupart des cas.

Ainsi, les coefficients de rétrodiffusion de Co polarisation sont donnés par l'IEM comme (2.14) :

$$\sigma_{pp}^0 = \frac{k_z^2}{2} \exp(-2k_z^2 \sigma^2) \sum_{n=1}^{\infty} \sigma^{2n} |I_{pp}^n|^2 \frac{W^n(-2k_x, 0)}{n!} \quad (2.14)$$

Où p = polarisation h (horizontale) ou v (verticale) et :

$$I_{pp}^n = (2k_z)^n f_{pp} \exp(-k_z^2 \sigma^2) + k_z^n \phi_p(k_x) / 2 \quad (2.15)$$

$$f_{vv} = -\frac{2R_{\parallel}}{\cos \theta} \quad (15)$$

$$f_{hh} = -\frac{2R_{\perp}}{\cos \theta} \quad (2.16)$$

$$\phi_v = F_{vv}(-k_x, 0) + F_{vv}(k_x, 0) \quad (2.17)$$

$$= \frac{2 \sin^2 \theta (1 + R_{\parallel})^2}{\cos \theta} \left[\left(1 - \frac{1}{\epsilon_r} \right) + \frac{\mu_r \epsilon_r - \sin^2 \theta - \epsilon_r \cos^2 \theta}{\epsilon_r^2 \cos^2 \theta} \right] \quad (2.18)$$

Où σ est la hauteur efficace de la surface, k est le nombre d'onde ($k = 2\pi/\lambda$, λ étant la longueur d'onde du signal radar), $k_z = k \cos \theta$, $k_x = k \sin \theta$, θ est l'angle d'incidence, ϵ_r est la relative

Permittivité (constante diélectrique relative) du sol, μ_r est perméabilité relative, et R et R_{\perp} sont les valeurs verticales et horizontale coefficients de réflexion de Fresnel polarisés, respectivement.

$W_n(k_x, k_y)$ est la transformée de Fourier de la puissance n de la fonction de corrélation de surface connue qui peut être calculée par

$$W^n(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \iint \rho^n(x, y) \exp(jk_x x + jk_y y) dx dy \quad (2.19)$$

2.3.3.1.2. B -EA-IEM

Les études dans [110] [111] ont montré que l'IEM à diffusion unique pouvait être utilisé pour calculer coefficients de rétrodiffusion du sol pour un sol nu ou à végétation courte. Cependant, l'application du modèle pour récupérer l'humidité du sol est difficile car la dépend du modèle en ϵ_r , θ , σ , est compliquée et nécessite une inversion itérative. Par conséquent, une nouvelle approche est souhaitée pour dériver un modèle d'inversion directe qui peut être utilisé pour récupérer le sol constante diélectrique directement à partir de la rétrodiffusion active des micro-ondes coefficients pour les sols nus ou les surfaces à végétation courte.

Une fois que la constante diélectrique du sol est extraite des micro-ondes actives coefficients de rétrodiffusion sur les surfaces de sol nu, la teneur en humidité du sol peut être trouvée en appliquant des modèles de mélange constant [24] – [26].

De (13) à (17), nous pouvons voir que la constante diélectrique seulement apparaît dans I_{pp}^n qui dépend à la fois de la constante diélectrique ϵ_r et angle d'incidence θ . Pour retrouver la constante diélectrique du sol, nous il faut inverser ϵ_r de I_{pp}^n , ce qui est généralement difficile. Basé sur cette observation, nous pouvons intégrer I_{pp}^n avec des bases mathématiques adaptées fonctions de sorte que ϵ_r puisse être dérivé directement des équations des coefficients de rétrodiffusion.

Construire des fonctions appropriées pour I_{pp}^n , on analyse d'abord le ϵ_r dépendance de f_{pp} / ϕ_p . La figure 1 montre f_{hh} / ϕ_h par rapport au constante diélectrique ϵ_r à différents angles d'incidence : $\theta = 30^\circ$, 40° et 50° .

Les résultats montrent que f_{hh} / ϕ_h vient de changer d'environ 0,1 sur une gamme de la constante diélectrique de 4 à 42, ce qui signifie que f_{hh} / ϕ_h dépend très peu de la

constante diélectrique ϵ_r sur la plage de 4 à 42. Puisque f_{hh} [(16)] et ϕ_h [(17)] sont fonctions explicites de ϵ_r , la faible dépendance de f_{hh}/ϕ_h signifie que la dépendance de f_{hh} et ϕ_h à la constante diélectrique ϵ_r est presque le même. Sur la base de cette observation, nous supposons que

f_{hh} Et ϕ_h contiennent la même fonction qui dépend de ϵ_r .

Ainsi, pour la polarisation HH, nous définissons

$$f_{hh} = f_h(\epsilon_r, \theta) f_{h1}(\theta) \quad (2.20)$$

$$\phi_h = 2 f_h(\epsilon_r, \theta) f_{h2}(\theta) \quad (2.21)$$

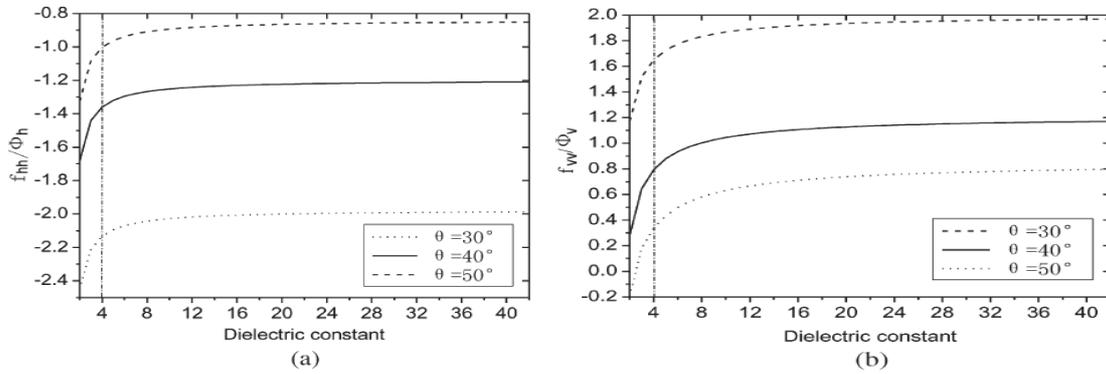


Fig. 1. ϵ dependence of f_{pp}/Φ_p for (a) HH-polarization and (b) VV-polarization.

Où $F_h = f_h(\epsilon_r, \theta)$ est une fonction de ϵ_r et θ . ϵ_r peut être exprimée explicitement comme

$$\epsilon_r = f_h^{-1}(F_h, \theta) \quad (2.22)$$

Puis dans hh peut être exprimé comme :

$$I_{hh}^n = f_h(\epsilon_r, \theta) k_z^n \left[f_{h1}(\theta) 2^n \exp(-k_z^2 \sigma^2) + f_{h2}(\theta) \right] \quad (2.23)$$

Dans (8)–(11), les formes spécifiques de $f_h(\epsilon_r, \theta)$, $f_{h1}(\theta)$ et $f_{h2}(\theta)$ sont spécifiés en les ajustant aux résultats de simulation des IEM d'origine, c'est-à-dire (4) et (6). Par régression non linéaire analyse utilisant quelques fonctions mathématiques de base, $f_h(\epsilon_r, \theta)$, $f_{h1}(\theta)$ et $f_{h2}(\theta)$ sont approchés comme suit :

$$f_{h1}(\theta) = \frac{4175.4 \sin^{0.11}(\theta + 0.3) \sin^{3.91} 0.1\theta}{\sin^{0.86}(\theta + 1.5)} \quad (2.24)$$

$$f_{h2}(\theta) = \frac{\sin^{5.9} \theta \sin^{0.22}(\theta + 0.5)}{\cos^{3.12} 0.8\theta} \quad (2.25)$$

Où l'angle d'incidence θ est en radians. Le susdit les formules s'appliquent sur une plage de constante diélectrique ϵ_r entre 4 et 42 et angle d'incidence θ compris entre 10° et 60° . Pour la plupart matériaux géologiques, ϵ_r est compris entre 3 et 30, avec du sable sec à l'extrémité inférieure de cette plage à environ 3–5. La plage de 4 à 42 de la constante diélectrique couvre le sol des régimes très secs aux régimes humides.

De (12), on déduit le constant diélectrique

$$\epsilon_r = \left(\frac{F_h \sin^{3.94} \theta}{1.26} \right)^{4.167/\cos\theta} + 1.93 \quad (2.26)$$

Où F_h est calculé à partir du coefficient de rétrodiffusion σ_{0hh} comme suit :

$$F_h = \frac{\sqrt{2\sigma_{hh}^0 \exp(k_z^2 \sigma^2)} / k}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} |f_{h1}(\theta) 2^n \exp(-2k_z^2 \sigma^2) + f_{h2}(\theta)| \frac{2^{\sigma^{2n} k_z^{2n} W^n(-2k_x, 0)}}{n!}}} \quad (2.27)$$

Où $f_{h1}(\theta)$ peut être calculé à partir de (2.26) et $f_{h2}(\theta)$ à partir de (2.27).

Pour le mode de polarisation VV, nous avons trouvé que f_{vv}/ϕ_v modifié d'environ 0,4 (plus de 50 %) par rapport à la constante diélectrique de 4 à 42 sur la Fig. 2.(b), ce qui signifie que la dépendance de f_{vv}/ϕ_v sur la constante diélectrique ϵ_r sur le diélectrique constante de 4 à 42 ne peut être ignorée. En d'autres termes, la dépendance de f_{vv} et ϕ_v sur la constante diélectrique ϵ_r est différente. Dans ce cas, pour garantir l'exactitude, nous adoptons une méthode différente méthodologie que celle utilisée pour la polarisation HH.

Laisser

$$I_{vv}^n = \sqrt{f_v(\varepsilon_r, \theta, \sigma, L)} (2k_z)^n \quad (2.28)$$

Où $F_v = f_v(\varepsilon_r, \theta, \sigma, L)$ est une fonction de ε_r , θ , σ et L . ε_r peut être exprimé comme

$$\varepsilon_r = f_v^{-1}(F_v, \theta, \sigma, L). \quad (2.29)$$

$f_v(\varepsilon_r, \theta, \sigma, L)$ est dérivé d'une régression non linéaire analyse comme (2.28)

De même,

et (2.29), montré au bas de la page, pour la fonction de corrélation de surface gaussienne et la fonction de corrélation de surface exponentielle, respectivement. Ici, l'angle d'incidence θ est en radians, et la surface rms la hauteur σ et la longueur de corrélation de surface L sont en mètres.

$$F_v = f_{vG}(\varepsilon_r, \theta, \sigma, L) = \frac{106 \left[0.5 - (\varepsilon_r + 3)^{-\cos(1.02\theta - 0.2)} \right]^{5.4} \exp(-1.996\sigma^2 k_z^2) \sigma^{-0.05}}{\sin^{3.35}(\theta + 1.1) \tan^{-0.46}(\theta + 0.32) (L - 0.049)^{[0.042 + 0.06\sin(\theta - 1)]}} \quad (2.30)$$

$$F_v = f_{vE}(\varepsilon_r, \theta, \sigma, L) = \frac{\left[7 - (\varepsilon_r + 2.2)^{-\cos(0.98\theta - 0.2)} \right]^{81.61} \exp(-158.14 - 59.5\sigma - 1.8664\sigma^2 k_z^2)}{\exp[-2.31 \tan(0.9\theta)] \sin^{2.1}(\theta + 0.77) (L - 0.046)^{[0.08 + 0.07\sin(\theta - 1.7)]}} \quad (2.31)$$

Les équations (19a) et (19b) s'appliquent sur une plage pour le diélectrique constante ε_r de 4 à 42, pour l'angle d'incidence θ de 10° à 60°, et pour la hauteur rms de surface de 4 à 31 mm

De (2.29), (2.30) et (2.31), pour le Fonction de corrélation de surface gaussienne et surface exponentielle fonction de corrélation, respectivement. Ici, F_v est calculé du coefficient de rétrodiffusion σ_{vv}^0 pour la constante diélectrique récupération comme

$$F_v = \frac{\sigma_{vv}^0}{\frac{k^2}{2} \exp(-2k_z^2 \sigma^2) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2\sigma k_z)^{2n} W^n(-2k_x, 0)}{n!}} \quad (2.32)$$

Conclusion :

Dans ce chapitre on a pris théoriquement les méthodes (Topp et al, Dubois, IEM) et comment ça fonctionne avec leurs formules et les Facteurs influençant la télédétection micro-ondes ($\varepsilon, \sigma, \theta, \dots$).

III. Résultat

3. Description de Site d'études :

DEMMIN (Réseau Permanent Pluridisciplinaire d'Information sur la Surveillance de l'Environnement) est Un site de test standardisé situé dans le Mecklenburg-Vorpommern dans le nord-est de l'Allemagne, Environ 60 km au nord de Neustrelitz et 150 km au nord de Berlin (Fig. 3.1). DLR allemand. Le Centre de données de télédétection (DFD) coopère avec les agriculteurs locaux pour exploiter le site de test DEMMIN sur le long terme.

Les coordonnées principales géographiques dans la zone UTM 33, Date WGS84 de la ferme Görmin sont :

Görmin Farm	X-Coordinate	Y-Coordinate
In front of the main office	387392.90276	5984646.40529

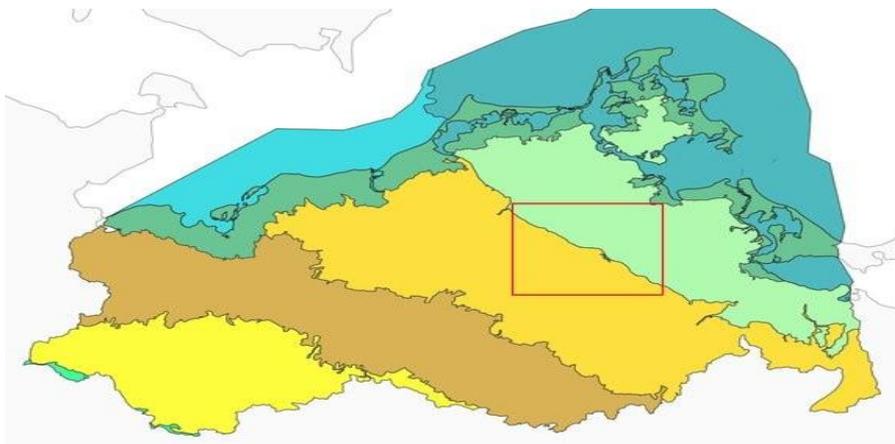


Figure3.1: Location of the DEMMIN test site in the German federal state Mecklenburg-Western Pomerania [104]

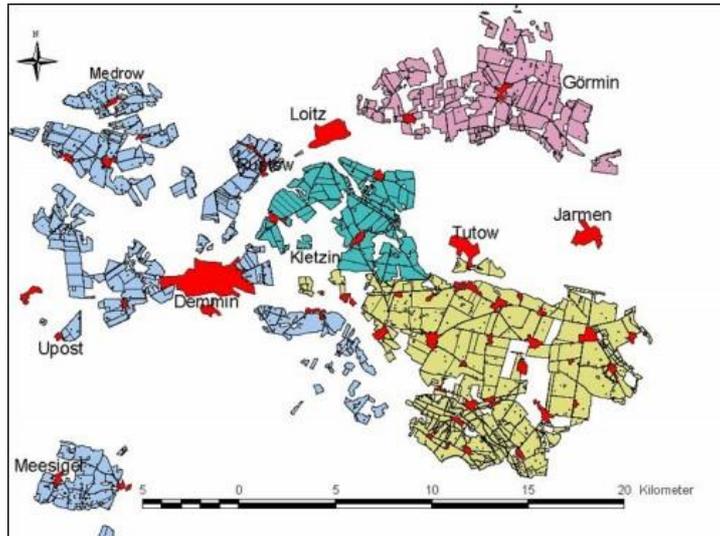


Figure3.2 : Carte des fermes au sein du site de test Demmin.

La région de Görmin est une zone très plate avec de très petites différences topographiques. Ce qui précède la différence topographique varie de 0 m dans une rivière entre 40 m et 37 m au milieu de la route.

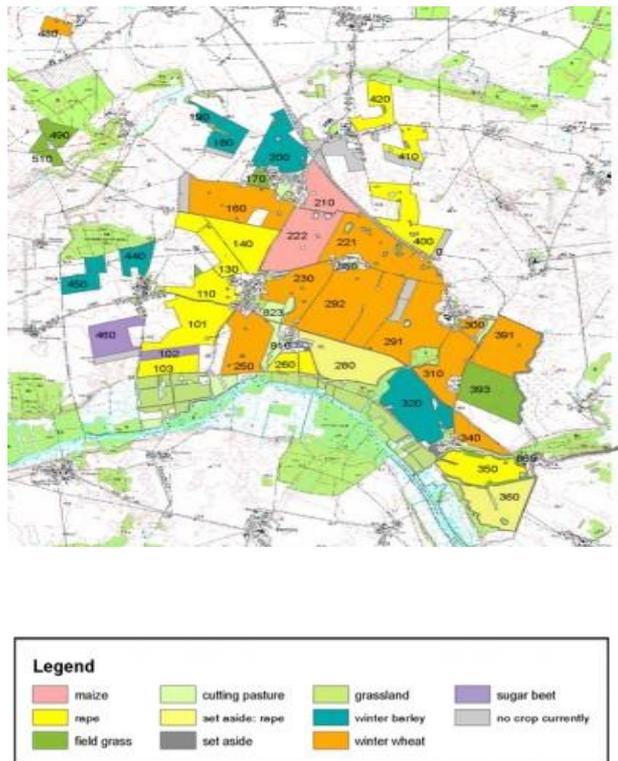


Figure3.3 : Recadrage de La ferme Gormin en 2006.

3.1. ACQUISITION DE DONNÉES AÉROPORTÉES

Trois capteurs aéroportés ont été exploités au cours de la campagne de vol AGRISAR pour acquérir les données nécessaires à l'estimation des paramètres bio-/géophysiques. Deux directions de vol communes ont été choisies afin d'acquérir les caractéristiques paysagères les plus importantes. Le plus important pour l'observation hydrologique du site est la trajectoire de vol N-S qui couvre le bassin versant entre deux petits systèmes fluviaux. Cette piste a été scannée lors des trois principales intensives campagnes. La principale trajectoire de vol de l'opération radar tout au long de la période de végétation était la trajectoire E-W, car elle représente la direction la plus appropriée par rapport à la direction principale du vent. Les deux trajectoires de vol sont tracées (rectangles rouges) sur la carte topographique, où en bleu les bordures des champs agricoles sont présentées (Figure 3.4).

Les pistes de vol mesurent environ 10 km de long et 3 km de large. Les deux pistes de vol ont été recouvertes de données des trois systèmes embarqués.



Figure 3.4 : Couverture des pistes de vol du site d'essai de Demmin (ferme de Görmin) pour le vol radar continu.

3.2. Acquisition de données radar :

Bien que les données radar aient été acquises dans plusieurs bandes de fréquences (X C, L) comme indiqué dans le tableau 3.5. Seules les données en bande L ont été utilisées dans cette étude. Cela est dû à la pénétration du signal. Inversion des paramètres du sol. Une carte d'élévation numérique de la zone d'étude est illustrée à la Figure 3.5.



Figure 3.5 : Traitement DEM en bande X et acquisition de données de la ferme de Görmin, où la boîte rouge représente la frontière du DEM.

12-th Date		05. Jul 06					
06agrsar1201x1	Goermin1	1-Kanal,HR-NS	X	VV	2	0	270
06agrsar1203x1	Goermin1	1-Kanal,HR-NS	X	HH	2	0	270
06agrsar1205x1	Goermin1	2-Kanal,HR-NS	C	DP	2	0	270
06agrsar1207x1	Goermin1	2-Kanal,HR-NS	C	DP	2	0	270
06agrsar1208x1	Goermin1	2-Kanal,HR-NS	C	DP	2	0	270
06agrsar1210x1	Goermin1	4-Kanal,HR-NS,PM	L	PM	2	0	270

3.2.1 Expliquer comment étudier La région de Görmin

La région de Görmin est une région très plate avec de très petites différences topographiques que nous avons montrées par MATLAB comme le montre la figure, puis nous lui avons attribué 11 points. Dans la figure 2 il y a deux points de la région 18 (Görmin), et nous leur avons appliqué les trois modèles en utilisant MATLAB pour étudier le pourcentage d'humidité à chaque point et comparer les pourcentages obtenus à partir des trois modèles.



Figure 3.6 : Couverture Demmin (ferme de Görmin) PAR MATLAB



Figure 3.7 : Deux des 11 points sélectionnés dans la zone d'étude (Görmin Farm)

3.3. Description de l'algorithme de récupération de l'humidité du sol

Des tests de performance des algorithmes d'inversion du taux d'humidité du sol ont été effectués à l'aide d'un ensemble de données de mesures d'humidité, recueillies sur le site lors de la campagne. Au cours des missions, des mesures au sol ont été effectuées à plusieurs endroits, qui ont été sélectionnées pour fournir des échantillons spatialement distribués pour avoir une information sur l'humidité du sol.

Ces champs d'essai sélectionnés comprenaient soit des champs agricoles homogènes ou des terrains nus avec un terrain plat. Les mesures au sol en termes de teneur en humidité du sol, de rugosité de surface et de longueur de corrélation correspondant à l'acquisition radar telle que l'angle d'incidence et la fréquence ont été prises en entrée des modèles.

La Rugosité a été supposée uniforme de corrélation $0,5 < r_{rms} < 1,5$ et $3 < \text{longueur} < 12$ et $0 < \text{constante diélectrique} < 20$. Les images de polarisation de HH, VV et HV polarisation ont été utilisées pour développer les modèles de détermination de l'humidité du sol basés sur les critères de validité (tableau 4.6) de ces modèles en fonction de l'angle d'incidence et des conditions de rugosité. Les données LISS-3 ont été utilisées pour identifier l'état de la végétation sur l'imagerie radar.

La réduction du bruit de chatoiement a été effectuée à l'aide du filtre médian. La sélection du filtre et son paramètre spécifique est une sorte de compromis entre le lissage du speckle et la préservation

L'algorithme développé a ensuite été utilisé pour générer l'estimateur optimal pour la constante diélectrique du sol du site d'essai en utilisant les coefficients de rétrodiffusion mesurés en HH et VV Polarisation.

Sur la base des relations empiriques entre les coefficients de rétrodiffusion et la constante diélectrique du sol et <toop model> et les informations disponibles sur la texture du sol, les valeurs d'humidité du sol, ont été obtenus en appliquant Peplinski et al. (1995) modèle. La description détaillée des modèles pour la récupération du coefficient de rétrodiffusion et de l'humidité du sol est donnée ci-dessous :

3.4. Application des modèles : (Topp model / Dubois / IEM)

3.4.1. Le Modèle Empirique d'inversion direct de l'humidité [Topp et al] :

Nous avons utilisé ce modèle pour récupérer le taux d'humidité à partir de la constante diélectrique du sol récupéré à partir des coefficients de réflexion

Le modèle de réflexion symétrique a été supposé comme ci-dessous.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = m_s \begin{bmatrix} R_s(\theta, \varepsilon) & 0 \\ 0 & R_p(\theta, \varepsilon) \end{bmatrix}$$

On a utilisé les coefficients de réflexion de la matrice de diffusion assumant la diffusion de Bragg. Ces deux coefficients sont fonctions de la constante Diélectrique.

$$R_s = \frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}} \quad R_p = \frac{(\varepsilon - 1)(\sin^2 \theta - \varepsilon(1 + \sin^2 \theta))}{(\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta})^2}$$

On a utilisé une méthode de régression sous Matlab pour trouver cette constante diélectrique. La valeur finale de cette constante est la moyenne des deux valeurs inverser. La partie réelle de la constante diélectrique est utilisé dans la formule ci-dessous:

$$Mv = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon' - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon'^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon'^3$$

Ensuite, nous remplaçons les paramètres du modèle par leurs valeurs numériques dans le tableau :

paramètres du modèle	Valeur numérique	unité
dielectric constant εr	42	
the incidence angles (theta)	35	degree
ub	100	
lb	-100	
InitialGuess	0.010	
correlation functions	Gaussian	

Tableau1 : contient un ensemble d'informations à étudier

3.4.2. Le Modèle de Dubois :

Dans ce modèle on calcule la valeur de la Constante diélectrique du sol avec une autre manière a travers la formule (4.28). Cette formule contient plusieurs valeurs. On a utilisé le coefficient de rétrodiffusion, (4.26)et (4.27),mais sous une autre forme pour faciliter le processus.

on a pas trouvé beaucoup de difficulté durant le processus.

$$\sigma_{hh}^0 = 10^{-2.75} \frac{\cos^{1.5} \theta}{\sin^5 \theta} 10^{0.028 \varepsilon \tan \theta} (kh \sin \theta)^{1.4} \lambda^{0.7} \quad 4.26$$

$$\sigma_{vv}^0 = 10^{-2.35} \frac{\cos^3 \theta}{\sin^3 \theta} 10^{0.046 \varepsilon \tan \theta} (kh \sin \theta)^{1.1} \lambda^{0.7} \quad 4.27$$

Après ça on substitue les valeurs et les formules ci-dessous dans la formule (4.28)

$$B_{HH} = 0.028$$

$$B_{VV} = 0.046$$

$$C_{HH} = 1.4$$

$$C_{VV} = 1.1$$

$$A_{hh} = 1.5 \log(\cos \theta) - 5 \log(\sin \theta) + 0.7 \log(\lambda) - 2.75$$

$$A_{vv} = 3 \log(\cos \theta) - 3 \log(\sin \theta) + 0.7 \log(\lambda) - 2.35$$

$$\varepsilon = \frac{C_{vv}(\sigma_{hh} - A_{hh}) - C_{vv}(\sigma_{vv} - A_{vv})}{\tan \theta (B_{hh} C_{vv} - B_{vv} C_{hh})} \quad 4.28$$

Comme on a parlé précédemment la formule de Topp utilise la partie réelle de la constante diélectrique.

$$M_V = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon' - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon'^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon'^3$$

Paramètres du modèle	Valeur numérique	Unité
dielectric constant εr	4< εr >42	
The incidence angles (theta)	35	degree
BHH	0.028	
BVV	0.046	
CHH	1.4	
CVV	1.1	
lamda	0.225	
K	27.9111111111	
InitialGuess	0.010	
correlation functions	Gaussian	

Tableau2 : contient un ensemble d'informations à étudier

3.4.3. Le Modèle IEM

On considère ce modèle le plus précis parmi ces trois modèles. Nous avons traité ce modèle en détail dans le 2^{ème} CHAPITRE et nous avons parlé du remplacement du modèle IEM avec EA-IEM. Le modèle d'équation intégrale (IEM) est considéré comme un algorithme prometteur pour la récupération de l'humidité du sol à partir de données micro-ondes actives sur un sol nu et des conditions de végétation clairsemée.

Cependant, la constante diélectrique du sol est implicitement intégrée dans l'IEM compliqué ; l'inversion de l'humidité du sol est souvent accomplie par itération et donc coûteux en calcul, en particulier lorsqu'il est appliqué pour récupérer l'humidité du sol à partir des données micro-ondes actifs à grande échelle. Pour simplifier le processus d'inversion de l'humidité du sol directement à partir des données micro-ondes actives, des fonctions mathématiques de base ont été adoptées pour s'adapter aux résultats de simulation de l'IEM d'origine de sorte que le coefficient de rétrodiffusion radar devienne une fonction explicite de la constante diélectrique du sol ou du diélectrique du sol [113].

L'humidité du sol est ensuite calculée directement à partir du coefficient rétrodiffusion radar sans itération. Ce modèle est appelé empiriquement IEM adopté (EA-IEM). La précision de l'EA-IEM par rapport au IEM original et son applicabilité sont analysés à travers trois Processus :

- Comparaison de modèles.
- Analyse de sensibilité
- Comparaison avec des mesures in situ.

$$\sigma_{hh}^0 = \frac{0.7938k^2(\epsilon_r - 1.93)^{0.48\cos\theta}}{\sin^{7.88}\theta \exp(2k_z^2\sigma^2)} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{4175.4 \sin^{0.11}(\theta + 0.3) \sin^{3.91}(0.1\theta)}{\sin^{0.86}(\theta + 1.5)} 2^n \exp(-2k_z^2\sigma^2) - \frac{\sin^{5.9}\theta \sin^{0.22}(\theta + 0.5)}{\cos^{3.12}0.8\theta} \right]^2 \frac{k_z^{2n} \sigma^{2n} W^n(-2k_z, 0)}{n!} \quad (22)$$

$$\sigma_{vv}^0 = \frac{53k^2 \exp(-3.996\sigma^2 k_z^2) [0.5 - (\epsilon_r + 3)^{-\cos(1.02\theta - 0.2)}]^{5.4} \sigma^{-0.06}}{\sin^{3.35}(\theta + 1.1) \tan^{-0.46}(\theta + 0.32)(L - 0.049)^{0.042 + 0.06\sin(\theta - 1)}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2k_z\sigma)^{2n} W^n(-2k_z, 0)}{n!} \quad (23a)$$

Après application de cette méthode, nous avons deux valeurs de la constante diélectrique résultant des deux formules ci-dessus. La valeur de la constante diélectrique finale est la moyenne de ces deux valeurs. La partie réelle de cette constante sera utilisée dans la formule de Topp ci-dessous pour obtenir la teneur en eau du sol :

$$Mv = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon' - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon'^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon'^3$$

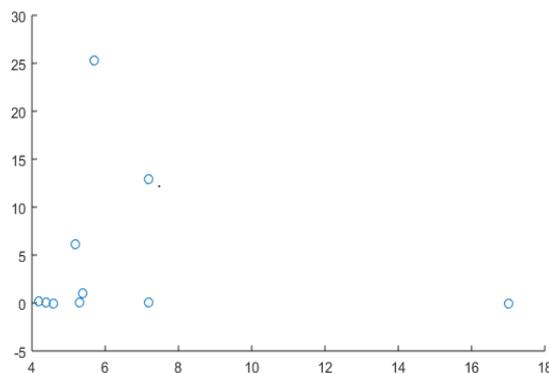
paramètres du modèle	Valeur numérique	unité
dielectric constant ϵ_r	4<ϵ_r>42	
the incidence angles (theta)	35	degree
lamda	0.225	
K	27.9111111111	
correlation length L	0.075	mm
ub	100	
lb	-100	
Rms height σ	4<σ>31	mm
InitialGuess	0.010	
correlation functions	Gaussian	

Tableau3 : contient un ensemble d'informations à étudier

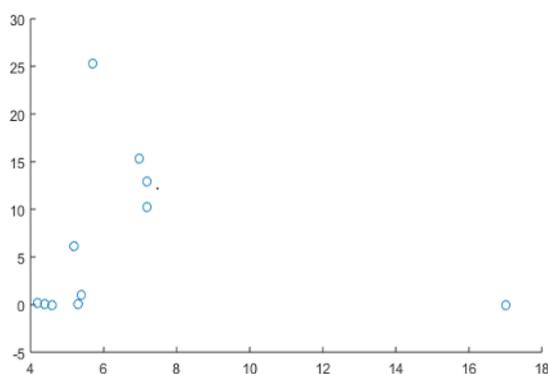
3.5. Comparaison les résultats de les trois modèles (topp model / Dubois / IEM)

Nous avons sélectionné 11 points de la ferme de Görmin avec des coordonnées différentes et avons obtenu le pourcentage du taux d'humidité pour chaque point. Le data contient également prélèvement direct du taux d'humidité que nous avons utilisées pour mettre une comparaison entre les trois programmes (c.a.d'Application direct du top model, IEM, Dubois) et les a comparées avec le humidité précédente dans repère .

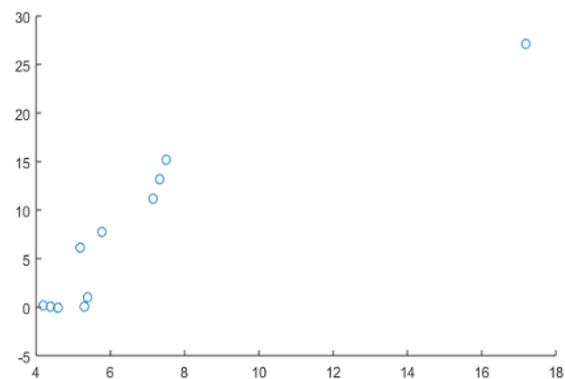
On a appliqué les trois modèles sur les 11 points, et apres calibration des resultats, et mise en échelle commun nous avons obtenu les resultats représenté par les figures ci-dessous :



Application directe du Topp model.



Dubois.



EA-IEM.

Figure3.8 : comparaison d'humidité du sol entre les trois model (TOPP MODEL/DUBOIS/ EA-IEM)

On remarque que les six premiers points sont les mêmes dans les trois figures.

Ceci est dû à la densité de végétation dans les régions à partir desquelles ont été pris ces échantillons. Ces valeurs donnent un résultat correct ou proche comme dans la figure 1 du cinquième point. Quant au reste des points, nous constatons qu'ils ne sont pas symétriques, ce qui est dû à la forte densité de végétation, qui est l'une des principales raisons, comme le montre la figure 2 du dixième point.

Nous notons que le résultat le plus précis et le plus fiable pour étudier les échantillons de la région à travers les trois modèles est le modèle **EA-IEM** parce qu'il représente une linéarité. Cela est dû à sa dépendance en grande partie sur l'aspect calculatoire. Le modèle de Dubois est plus proche dans le résultat que l'application directe du Topp.



Figure3.9 : Les Deux Photos représentent la végétation des deux points.

Conclusion :

Dans ce chapitre On a discuté de l'application des 3 modèles et ses résultats en comparant ces derniers et on a vu que le modèle IEM c'est le plus efficace aussi nous avons appris que la végétation a un grand rôle dans la pénétration des ondes.

3.6 Conclusion Générale :

L'inversion utilisant la télédétection passive a plus de potentiel pour la surveillance à grande échelle de l'humidité du sol, mais a une faible résolution spatiale. Les micro-ondes actives peuvent fournir une résolution spatiale élevée, mais sont plus sensibles à la rugosité du sol et à la végétation. (HH, VV, HV et VH) permettent une meilleure caractérisation des paramètres de surface.

Cependant, les mesures en bande L donnent de bons résultats sous diverses couvertures végétales en raison de leur pouvoir de pénétration élevé [81].

Le SAR a montré sa capacité et son potentiel dans l'inversion des cartes d'humidité du sol à grande échelle. Cependant, étant donné que le signal rétrodiffusé est affecté par plusieurs caractéristiques de surface, la récupération de l'humidité du sol est un problème mal posé lors de l'utilisation d'une seule configuration. L'objectif de ce mémoire est de faire une étude comparative des méthodes d'inversion d'humidité du sol utilisant les données SAR Polarimétrique. Trois modèles ont été investigués à savoir, IEM (The Integral Equation Model), Dubois et une application directe du modèle d'inversion de TOPP. Cette enquête est menée pour savoir le modèle le plus précis pouvant être utilisé pour l'inversion. Afin de vérifier la validité de ces méthodes, des données d'humidité mesurées sur le site lors de la campagne ont été utilisées pour la validation. Ces données nous ont permis d'avoir une référence systématique aux différentes méthodes. Chacune des méthodes et des modèles a ses propres limites et capacités de récupération en termes de leurs bandes micro-ondes, mais dans cette étude on se limite à la bande L seulement. Cependant, l'utilité de cette étude est que la contribution d'autres facteurs qui influencent la réflectance du sol peut ne pas être efficacement minimisée.

Le modèle EA-IEM pourrait donner de bons résultats d'une zone ayant un faible indice de végétation [65], mais d'après d'autres études, la plage de cette valeur NDVI n'est pas valable pour la bande P [81]. La principale difficulté associée au modèle est que le modèle est très sensible à la rugosité de surface en termes de longueur de corrélation (L) et de hauteur efficace (Davidson et al., 2000). Pour minimiser l'effet de la rugosité de la surface, le modèle IEM a été encore modifié pour supprimer l'effet de la longueur de corrélation et a montré de bons résultats.

3.7 Références :

- [1] GIRARD M.C. et GIRARD C.M..Traitement des données de télédétection, 530 pages + 1 cédérom, Dunod, 1999.
- [2] Centre canadien de télédétection, Notions fondamentales de télédétection, 1998, 266 p. (lire en ligne [archive]) — Tutoriel canadien
- [3] ABDELLAOUI A. ...: cours de La télédétection - La signature spectrale. Université Paris 12. 7p.
- [4] Centre canadien de télédétection, Notions fondamentales de télédétection, 1998, 266 p. (lire en ligne [archive]) — Tutoriel canadien
- [5] Kirscht, Martin, and Carsten Rinke. "3D Reconstruction of Buildings and Vegetation from Synthetic Aperture Radar (SAR) Images." MVA. 1998.
- [6] Introduction to Airborne RADAR", G. W. Stimson, Chapter 1 (13 pp).
- [7] a b c d Tomographic SAR. Gianfranco Fornaro. National Research Council (CNR). Institute for Electromagnetic Sensing of the Environment (IREA) Via Diocleziano, 328,I-80124 Napoli, ITALY
- [8] Maity (2016). "Supervised Classification of RADARSAT-2 Polarimetric Data for Different Land Features". arXiv:1608.00501
- [9] Moreira, Alberto;Prats-Iraola, Pau; Younis, Marwan; Krieger, Gerhard; Hajnsek, Irena; P. Papathanassiou, Konstantinos (2013). "A tutorial on synthetic aperture radar" (PDF). IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 1 (1): 6–43. doi:10.1109/MGRS.2013.2248301. S2CID 7487291.
- [10] I.Hajnesk,K.Papathanassiou.January 2005.
- [11] *Altese,E.,Bolognani,O.,Mancini,M.,&Troch,P.A.(1996).Retrievingsoil moistureoverbaresoilfrom ERS 1 synthetic aperture radar data:Sensitivityanalysisbased on atheoretical surface scattering model and field data. Water ResourcesResearch, 32, 653–661.doi:10.1029/95WR03638*
- [12] Canada Center for Remote Sensing, Fundamentals of Remote Sensing (read online [archive]) — Canadian Tutorial
- [13] Al-Yaari, A., Wigneron, J. P., Ducharne, A., Kerr, Y. H., Wagner,

W., De Lannoy, G., ...Mialon, A. (2014). Global-scale comparison of passive (SMOS) and active (ASCAT) satellite based micro waves soil moisture retrievals with soil moisture simulations (MERRA-Land). *Remote Sensing of Environment*, 152, 614–626. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.013>

- [14] Anguela, T. P., Zribi, M., Baghdadi, N., & Loumagne, C. (2010). Analysis of local variation of soil surface parameters with TerraSAR-X Radar data over bare agricultural fields. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48, 874–881. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2009.2028019>
- [15] Aubert, M., Baghdadi, N., Zribi, M., Douaoui, A., Loumagne, C., Baup, F., ...Garrigues, S. (2011). Analysis of TerraSAR-X data sensitivity to bare soil moisture, roughness, composition and soil crust. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1801–1810.
- [16] *Autret, M., Bernard, R., & Vidal-Madjar, D. (1989). Theoretical study of the sensitivity of the microwave backscattering coefficient to the soil surface parameters. International Journal of Remote Sensing, 10, 171–179. doi:10.1080/01431168908903854*
- [17] Baghdadi, N., Aubert, M., & Zribi, M. (2012). Use of TerraSAR-X data to retrieve soil moisture over bare soil agricultural fields. *IEEE Geo science and Remote Sensing Letters*, 9, 512–516. <http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2011.2173155>
- [18] *Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, 16, 574–582. doi:10.1029/WR016i003p00574*
- [19] Ulaby, F. T., & El-rayes, M. A. (1987). Micro wave dielectric spectrum of vegetation - Part II: Dual-dispersion model. *IEEE*

Transactions on Geo science and Remote Sensing, 25, 550–557.[doi:10.1109/TGRS.1987.289833](https://doi.org/10.1109/TGRS.1987.289833).

- [20] Vereecken, H., Huisman, J. A., Pachepsky, Y., Montzka, C., van der Kruk, J., Bogaen, H., ...Vanderborght,J.(2014).On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale.
- [21] Journal of Hydrology, 516, 76–96.<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.061>
- [22] Wigneron, J. P., Calvet, J. P., Pellarin, T., Van de Griend, A. A., Berger, M., & Ferrazzoli, P. (2003).Retrieving near-surface soil moisture from microwave radiometric observations: current status and future plans. Remote Sensing of Environment, 85, 489–506.[http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00051-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00051-8)
- [23] Zhao, W., & Li, Z. L. (2013). Sensitivity study of soil moisture on the temporal evolution of surface temperature over bare surfaces. International Journal of Remote Sensing, 34, 3314– 3331.<http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2012.716532>
- [24] Zribi, M., Baghdadi, N., Holah, N., & Fafin, O. (2005). New methodology for soil surface moisture estimation and its application to ENVISAT-ASAR multi incidence data inversion. Remote Sensing of Environment,96,485–496.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.04.005>
- [25] A ABDELLAOUI A. ...: cours de La télédétection - Le rayonnement électromagnétique Université Paris 12. 56p.
- [26] (Pottier et al, 2009)
- [27] interface (Agence spatiale européenne [ESA], réseau d'humidité du sol,Al-Yaari et al., 2014 ; Zhao et Li, 2013)
- [28] (Laguardia& Niemeyer, 2008)
- [29] (Engman& Gurney, 1991 ;Giacomelli, Bacchiega, Troch, & Mancini, 1995 ; Kornelsen&Coulibaly, 2013 ; Ulaby, Moore et Fung, 1986)
- [30] d'ouverture (Baghdadi, Holah, &Zribi, 2006a ; Baghdadi, King,

Chanzy et Wigneron, 2002)

- [31] (Engman, 1990 ; Kornelsen & Coulibaly, 2013 ; Petropoulos et al., sous presse)
- [32] connexes (Batlivala & Ulaby, 1977 ; Giacomelli et al., 1995 ; Petropoulos et al., sous presse ; Seneviratne et al., 2010).
- [33] (Baghdadi, King, Chanzy, et al. 2002 ; Petropoulos et al. sous presse ; Seneviratne et al. 2010)
- [34] (Ualby, Batlivala, & Dobson, 1978)
- [35] (Anguela, Zribi, Baghdadi, & Loumagne, 2010 ; Bertoldi et al., 2014 ; Dobson et Ulaby, 1981, 1986 ; Kornelsen et Coulibaly, 2013 ; Ualby et al., 1978)
- [36] (Kornelsen & Coulibaly, 2013)
- [37] Prakash, Singh, & Pathak, 2012 (Schmugge, Jackson, & McKim, 1980),
- [38] (Baghdadi et al., 2004 ; D'Urso et Minaecapilli, 2006 ; Wang & Qu, 2009)
- [39] (Bertoldi et al., 2014 ; Kornelsen et Coulibaly, 2013 ; Petropoulos et al., sous presse ; Schmugge et al., 1980 ; Ulaby et al., 1986).
- [40] (Anudeep, 2013 ; Moran, Peters-Lidard, Watts et McElroy, 2004 ; Wigneron et al., 2003)
- [41] [2E] (Petropoulos et al. sous presse)., (PNT) (Anudeep, 2013), (Chai et al., 2010), (Entekhabi et al., 2010).[
- [42] (Altese, Bolognani, Mancini, & Troch, 1996 ; Anguela et al., 2010 ; Bertoldi et al., 2014 ; Kornelsen et Coulibaly, 2013 ; Petropoulos et al., sous presse).
- [43] (Anguela et al., 2010 ; Bertoldi et al., 2014 ; Dobson et Ulaby, 1981, 1986 ; Kornelsen et Coulibaly, 2013 ; Petropoulos et al., sous presse ; Ualby et al., 1978):
- [44] (Dobson, Ulaby, Hallikainen et El-Rayes, 1985 ; Gharechelou, Tateishi et Sumantyo, 2015 ; Hallikainen et al., 1985 ; Li, Zhao, Ren, Ding et Wu, 2014 ; Wang et Schmugge, 1980).
- [45] (Hallikainen et al., 1985 ; Mironov, Dobson, Kaupp,

Komarov et Kleshchenko, 2004 ; Srivastava, Patel et Navalgund, 2006). Hallikainen et Al

- [46] (Dobson et al., 1985)
- [47] (Altese et al., 1996 ; Callens, Verhoest et Davidson, 2006)
- [48] Dobson&Ulaby, 1981 ; Raven Al-Zribi, Al-Baghdadi, Laila Shaaban et Mojinot, 2014 ; Al-Olabi et al., 1986 ; Al-Zaribi, Al-Baghdadi, Hawla et Fafin, 2005).
- [49] [(Autret, Bernard, & Vidal-Madjar, 1989 ; Bertuzzi, Chaånzy, Vidal-Madjar, &Autret, 1992 ; Champion & Faivre, 1997 ; Dobson et Ulaby, 1986 ; Ulaby et Batlivala, 1976 ; Wagner, 1998),(Dobson&Ulaby, 1986; Wagner, 1998).
- [50] (*Baghdadi, King, &Bonnefit, 2002*)
- [51] *sol* (*Srivastava, Patel, Manchanda et Adiga, 2003 ; Srivastava et al., 2006 ; Srivastava, Yograjan, Jayaraman, Rao et Chandrasekhar, 1997*).
- [52] *faibles* (*Baghdadi, King, &Bonivit, 2002; Baghdadi, Serdan, et al., 2008; Fong et Chan, 1992; Ulaby et al., 1986 ; Zribi&Dechambre, 2002*).
- [53] (Mattikalli, Engman, Jackson et Ahuja, 1998).
- [54] (Hallikainen et al., 1985 ; Singh &Kathpalia, 2007 ; Ulaby et al., 1982)
- [55] (*Kong &Dorling, 2008; Srivastava et al., 2006*)
- [56] (*Anguela et al., 2010*)
- [57] (*D'Urso&Minaecapilli, 2006*).
- [58] (Aubert et al., 2011 ;Ualby et al., 1978).yueadualtahdidalmubashirliqawam alt.
- [59] (Altese et al., 1996 ; Baghdadi, Holah, &Zribi, 2006b ; Paloscia et al., 2008)
- [60] *Magagi et Kerr (1997),Pulliainen, Manninen et Hallikainen (1998), Wagner,*
- [61] (Aubert et al., 2011 ; Al-Baghdadi, Serdan, et al., 2008)

- [62] sol (Autret et al., 1989 ;Baghdadi, King, Chanzy et al., 2002 ; Holah, Baghdadi, Zribi, Bruand et King, 2005 ; Ualby et al., 1978)
- [8C] (Al-Baghdadi, Al-Zaribi, et al .). Al, (2008).
- [63] (Jagdhuber et al., 2013 ; Ulaby& El-Rayes, 1987 ;Vereecken et al., 2014 ; Western et al., 2004)
- [64] 1 (Ulaby& El-Rayes, 1987).
- [65] Neusch& Sties, 1999; Sikdar& Cumming, 2004
- [66] (Mattia et al., 1997), (Ulaby et al., 1996). (Álvarez-Mozos et al., 2005).
- [67] (*Baghdadi, Cerdan et al., 2008 ; Zribi&Dechambre, 2002*)
- [68] (Holah et al., 2005).
- [69] (Wang &Qu, 2009).
- [70] (Beckmann &Spizzichino, 1963).
- [71] (Rice, 1951; Tsang et al., 1985),
- [72] (Winebrenner&Ishimaru, 1985).
- [73] (Boisvert et al., 1997 ;Ulaby et al., 1986).
- [74] Oh et al. (1992)
- [75] Oh, Sarabandi et Ulaby (1993)
- [76] D'Urso et Minaecapilli (2006)
- [77] Baghdadi et al., 2000 ; Oh & Kay, 1998
- [78] (Rao et al., 2013)
- [79] Dubois et al.
- [80] (Neusch&Sties, 1999 ; Sikdar et Cumming, 2004).
- [81] (Western et al., 2004).
- [82] (Baghdadi, ElHajj, et al., 2006; Paloscia, Pampaloni, Pettinato, & Santi, 2008).
- [83] (Fung et al., 1992)
- [84] (Davidson et al., 2000
- [85] Baghdadi, King, Chanzy, et al. (2002), Baghdadi, King et Bonnifait (2002)
- [86] (Topp, Davis et Annan, 1980.
- [87] Aqil& Schmitt, 2010 ;Rao et al., 2013).
- [88] Wagner, Lemoine, et al. (1999).
- [89] Wagner, Noll, et al. (1999)

- [90] (Wagner, Lemoine, & Rott, 1999).
- [91] Dubois et al. (1995a), Dubois, VanZyl et Engman (1995b)
- [92] https://www.researchgate.net/figure/Schema-general-de-fonctionnement-du-systeme-de-teledetection-Le-rayonnement_fig1_345766898
- [93] http://www.ehs-mcs.org/fr/comprendre-les-cem_96.html
- [94] https://wiki.travellerrpg.com/Electromagnetic_Spectrum
- [95] <https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-et-publications/imagerie-satellitaire-et-photos-aeriennes/tutoriel-notions-fondamentales-teledetection/teledetection-par-hyperfrequences/radars-aeroportes-et-spatioportes/9398>
- [96] https://en.wikipedia.org/wiki/Synthetic-aperture_radar
- [97] https://dumas.ccsd.cnrs.fr/file/index/docid/941870/filename/MAUBANT_JA_rA_me.pdf
- [98] <https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-et-publications/imagerie-satellitaire-et-photos-aeriennes/tutoriel-notions-fondamentales-teledetection/geometrie-de-visee-et-resolution-spatiale/geometrie-de-visee-et-resolution-spatiale>.
- [99] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Death-valley-sar.jpg>
- [100] <https://www.paperblog.fr/8879938/nature-de-l-effet-de-champ-electromagnetique/>
- [101] <https://www.rncan.gc.ca/ellipse-de-polarisation/9576>
- [102] <https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-et-publications/imagerie-satellitaire-et-photos-aeriennes/tutoriel-notions-fondamentales-teledetection/teledetection-par-hyperfrequences/9372>
- [103] <https://journals.openedition.org/confins/15027?lang=fr>
- [104] https://www.dlr.de/eoc/en/desktopdefault.aspx/tabid-9540/17340_read-40236/
- [105] (Kong et Dorling, 2008; Srivastava et coll., 2006)
- [106] Blumberg et al., 2000
- [107] Hirosawa, Komiyama et Matsuzaka (1978)
- [108] Wegmuller, 1993.
- [109] Tassoudji et al., 1989
- [110] Shi et al

- [111]** Zribi et Dechambre
- [112]** Topp et al.
- [113]** C. Notarnicola, M. Angiulli, and F. Posa, "Soil moisture retrieval from remotely sensed data: Neural network approach versus Bayesian method," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 2, pp. 547–557, Feb. 2008.