

# UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE DOCTORALE: Physique, Chimie, Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Ingénieur

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2013 N° d'ordre :

..

## THESE DE DOCTORAT

Pour l'obtention du grade de

*Docteur de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar*

*Discipline : PHYSIQUE APPLIQUEE*

*Spécialité : TELEDETECTION SPATIALE DE LA BIOSPHERE*

**Présenté par :**

**Gayane FAYE**

**COMPLEMENTARITE DES CAPTEURS RADAR POUR LE SUIVI DE LA  
VEGETATION ET DE L'HUMIDITE DU SOL EN ZONE SEMI-ARIDE  
APPLICATION A LA ZONE SAHELIEENNE : CAS DU FERLO AU SENEGAL**

**Soutenu le : 30/07 - /2013 devant le jury composé de :**

<b>Pr Amadou Thierno GAYE</b> (Président)	Professeur Université Cheikh Anta Diop Dakar, Sénégal.
<b>Pr Aboubaker Chedikh BEYE</b> (Rapporteur)	Professeur Université Cheikh Anta Diop Dakar, Sénégal.
<b>Dr Eric MOUGIN</b> (Rapporteur)	Directeur de Recherche, CNRS, laboratoire GET, Toulouse, France.
<b>Dr Joseph SARR</b> (Directeur)	Professeur à l'Université Cheikh Anta Diop Dakar, Sénégal.
<b>Dr Pierre Louis FRISON</b> (HDR, Co-directeur)	Maître de conférence à l'Université Paris-Est Marne-La-Vallée, France.
<b>Dr Souleye WADE</b> (Examineur)	Maître assistant à l'Université Cheikh Anta Diop Dakar, Sénégal.
<b>Dr Jacques André NDIONE</b> (HDR, Examineur)	Directeur de Recherche au Centre de Suivi Ecologique Dakar, Sénégal.



## Résumé :

Depuis plusieurs années, les problèmes environnementaux ne concernent plus les seuls cercles écologiques. L'état de l'environnement est devenu une préoccupation sociétale majeure. Les effets des changements climatiques sur les écosystèmes, les ressources naturelles et les divers secteurs socio-économiques se font de plus en plus sentir. Le Sahel, transition entre le désert du Sahara au nord et les savanes soudaniennes au sud, se caractérise par une courte saison des pluies et une longue saison sèche. Le développement de la végétation naturelle et cultivée est étroitement lié à la pluviométrie. Les grandes sécheresses qui ont frappé le Sahel en 1972-1973 et en 1984-1985 ont eu des conséquences dramatiques et durables pour les populations. Compte tenu de l'impact de cette variabilité à l'échelle régionale sur la vie des populations, il est fondamental de mieux comprendre les mécanismes physiques régissant les processus de surface, de manière à améliorer la prévision saisonnière du climat.

La télédétection a pour principal atout de permettre des observations globales, continues et répétitives. Des travaux récents ont démontré l'intérêt des capteurs radars (diffusiomètres et Radar à Synthèse d'Ouverture) pour le suivi des surfaces au Sahel, notamment l'humidité du sol et la production végétale.

Ce travail s'inscrit dans ce contexte et il vise à étendre sur la région pastorale du Ferlo (Sénégal), les travaux effectués préalablement à l'aide des données du diffusiomètre ERS dans deux autres zones sahéliennes (Gourma au Mali, Fakara au Niger). Ceci permettra d'une part d'évaluer la pertinence de la méthode pour son application à l'ensemble de la ceinture sahélienne. D'autre part, cette étude permet de prospecter l'apport d'autres capteurs spatiaux pour une meilleure estimation des paramètres de surface étudiés. Notre analyse a porté sur des données radar acquises en bande C (ASAR, ESCAT et ASCAT) et en bande Ku (SeaWinds). Cela nous a permis d'étudier la complémentarité multi fréquences des capteurs radar pour le suivi des paramètres de surface. Les résultats de cette étude permettent de mieux comprendre la sensibilité du signal radar aux variations saisonnières des surfaces sahéliennes d'une part, et d'autre part de déterminer les paramètres optimaux (polarisation, incidence, et longueur d'onde) du signal pour l'estimation de la production végétale et l'humidité du sol au Sahel. Le couplage du modèle de développement de la végétation sahélienne *STEP (Sahelian Transpiration Evaporation and Production model)* avec le modèle de transfert radiatif a permis de montrer une bonne concordance entre les simulations et les mesures et d'estimer la contribution des différents paramètres étudiés à savoir l'humidité du sol et la production végétale, à la réponse radar pour les deux bande de fréquences.

Ces travaux montrent que l'approche développée au Mali et au Niger est valide au Ferlo, ce qui permet l'extension à l'ensemble de la bande sahélienne. Ils illustrent également la complémentarité des observations radar satellitaire pour une meilleure estimation des paramètres de surface sur la zone sahélienne.

## DEDICACES

*Je dédie ce travail à feu mon père **Ousmane FAYE** qui m'a beaucoup aidé durant tout le chemin qui m'a mené jusqu'ici.*

*A ma mère **Ngane FAYE** qui m'a beaucoup soutenu durant mon cursus scolaire et universitaire.*

*Hommage à mes sœurs **Ndiougue FAYE** et **Astou FAYE**, que la terre leur soit légère.*

*Hommage à ma tante **Déguène FAYE**, que le bon DIEU l'accueille au paradis.*

*A mes frères, sœurs, oncles et tantes pour leurs engagements à mes côtés pendant ce long périple.*

*A tous mes parents, mes amis ainsi que toutes les personnes que j'ai connues durant toute ma vie.*

*A ma femme ainsi que ma fille bien adorée.*

## REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements à Monsieur Abdoulaye DIA, Directeur de l'Institut des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (IST/FST/UCAD), qui abrite le projet. Merci aussi à Messieurs Souleye WADE, Chef du Laboratoire de Télédétection Appliquée (LTA) de l'IST et Jean Paul RUDANT du Laboratoire G2I de l'Institut Francilien des Géosciences, Université de Marne la Vallée (IFG/UMLV), responsables scientifiques et coordonnateurs du projet CORUS/GESCAN, pour l'appui financier qu'ils ont bien voulu m'accorder dans le cadre de mon stage de recherche du 1<sup>er</sup> Septembre au 30 Novembre 2005 au Laboratoire G2I.

Je tiens à exprimer ma profonde et respectueuse gratitude à Monsieur Pierre Louis FRISON d'avoir assuré la co-direction scientifique de cette thèse

Ce travail a pu être réalisé grâce à l'appui matériel et scientifique que le Laboratoire ESYCOM de l'Université Paris-Est-Marne-La-Vallée. Qu'il me soit permis ici d'exprimer ma vive reconnaissance à Monsieur le Directeur du Laboratoire ESYCOM ainsi qu'au professeur Jean Paul RUDANT chef de l'équipe Télédétection du dit laboratoire.

Que Monsieur le Directeur Général du Centre de Suivi Ecologique (CSE) veuille bien trouver ici l'expression de mes sincères remerciements pour m'avoir accueilli en stage et autorisé l'accès à la banque de données du Centre, notamment aux données de biomasse annuelles des sites choisis au Ferlo pour cette étude. Mes vifs remerciements à Jacques André NDIONE qui a assuré la direction scientifique de mes stages au sein du Centre, ainsi qu'à l'ensemble du personnel du CSE.

Je tiens à remercier Messieurs BEYE Aboubaker C, GAYE Amadou Thierno, MOUGIN Eric, FRISON Pierre Louis, SARR Joseph, NDIONE Jacques André, WADE Souleye d'avoir accepté d'être membres du jury.

Je remercie mon très cher père Ousmane FAYE et ma très chère mère Ngane FAYE pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

Mention spéciale à ma femme Mme FAYE Diakhère DIOUF et ma fille Mariama Déguène FAYE qui ont su me soutenir dans les moments les plus difficiles.

Que tous ceux qui ont contribué à ma réussite dans le domaine des études voient ici l'expression de ma sincère gratitude.

Je pense :

A mon oncle paternel Paul Abdou FAYE et sa femme Marie DIAGNE à Gossas;

A mon oncle maternel Laurent Ngor FAYE et à sa femme Marie DIOUF à Kaolack ;

A mon oncle Mbade FAYE et sa femme Diatou DIOP à Keur Massar ;

A ma tante Thiab FAYE ;

A mon oncle Paul FAYE et de ses enfants du côté de Paris

A mes frères Ngagne FAYE, Adiouma FAYE, Pascal FAYE, Blaise FAYE, Mbade FAYE, Mbaye Diène FAYE, Etienne Biram FAYE, Jean Noel FAYE, Abdou FAYE ;

A mes sœurs Diouma FAYE, Yacine FAYE, Monique Diouma FAYE, Marie Thérèse FAYE ;

A mes cousins Ngor TINE, Bathie TINE, Latyr FAYE, Fallou FAYE, Moussa FAYE, Diab FAYE, Mody FAYE, Malick FAYE, Aliou NGOM ;

A mon cousin et ami Brian FAYE de Paris ;

A mes cousines Astou FAYE, Mame Diarra FAYE, Ndambaw FAYE, Mame Fatou FAYE ;

A mes cousin Adiouma FAYE, Khady FAYE et toute la famille FAYE du côté de Diamaguène ;

A toute ma belle famille du côté de Thies ;

A Ibrahima FAYE et sa femme Thiab FAYE du côté de Diamaguène ;

A mes promotionnaires et amis Waly NDIAYE, Lamine DIA, Mamadou TINE, Moustapha THIAM, El Hadj Ibrahima THIAM, Alioune Badara MBALO, Omar NIANE, Aliou KAB, Balla Diop NGOM, Matar DIAW, Kader BA, Alioune Mamadou DIA ;

A mes amis Fap FAYE, Timack NGOM, Miniane DIOUF, Babacar Ndiaye, Momar Talla NIANG, Mamadou NDONG, Mamadou NGING ;

A tout le personnel du CSE

A Benedic FRUNAUX, Cedric LARDEUX, David NIAMIEN avec qui j'ai partagé le laboratoire ESYCOM durant cette thèse ;

# PLAN

<b>Chapitre I : <u>INTRODUCTION GENERALE</u></b> .....	<b>10</b>
I-1/ Contexte.....	11
I-2/ Le programme AMMA.....	14
I-2-1/ Dynamique de la Mousson Ouest Africaine.....	16
I-2-2/ Phase continentale du cycle de l'Eau.....	16
I-2-3/ La chimie Atmosphérique.....	17
I-2-4/ Conditions de surface.....	18
I-3/ Travaux de thèse.....	18
<b>Chapitre II : <u>PRESENTATION DU FERLO</u></b> .....	<b>21</b>
II-1/ Présentation du FERLO.....	22
II-1-1/ Situation géographique.....	22
II-1-2/ Géomorphologie.....	23
II-1-3/ Les sols.....	27
II-1-4/ Le climat.....	28
II-1-5/ La végétation.....	32
II-1-6/ La population.....	35
II-1-7/ Les activités socio-économiques.....	35
II-2/ Présentation de la zone d'étude.....	38
<b>Chapitre III : <u>LES CAPTEURS RADAR</u></b> .....	<b>40</b>
III-1/ Théorie du RADAR.....	41
III-1-1/ Les fréquences.....	42
III-1-2/ Principes d'acquisition des images à visée latérale.....	44
III-1-3/ La résolution spatiale.....	45
III-1-3-a/ Résolution radiale.....	45
III-1-3-b/ Résolution azimutale.....	47
A- Le SAR ( <i>Synthetic Aperture Radar</i> ; ou RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture) .....	48
B- Les diffusiomètres.....	49
III-1-4/ Équation radar.....	50
III-2/ Les capteurs utilisés.....	52
III-2-1/ Le diffusiomètre ESCAT à bord de ERS.....	52
III-2-2/ Le diffusiomètre Seawind à bord de Quikscat.....	54

III-2-3/ Le diffusiomètre ASCAT à bord de Metop.....	56
III-2-4/ Le Radar à Synthèse d'ouverture (SAR) à bord de Envisat.....	58
<b>Chapitre IV : <u>LES MODELES DE SIMULATION</u>.....</b>	<b>61</b>
IV-1/ Modèle STEP.....	62
IV-1-1/ Module de croissance végétale.....	63
IV-1-2/ Module du bilan hydrique.....	64
IV-2/ Modèle de rétrodiffusion radar (Interaction onde-matière).....	66
IV-2-1/ La diffusion de surface.....	66
A/ interface plane.....	66
B / Cas des surfaces naturelles.....	68
IV-2-2/ La diffusion de volume.....	72
<b>Chapitre V : ANALYSE DES MESURES RADAR ET DES RESULTATS DE LA MODELISATION.....</b>	<b>75</b>
V-1/ Les Mesures RADAR.....	76
V-1-1/ Le diffusiomètre ESCAT.....	76
V-1-2/ Le diffusiomètre ASCAT.....	80
V-1-3/ Le diffusiomètre Seawind.....	83
A- Analyse des produits 1B et 2A.....	83
B- Analyse des signatures temporelles.....	86
V-1-4/ Le Capteur ASAR à bord du satellite Envisat.....	90
V-1-5/ Comparaison entre capteurs.....	91
V-1-5-1/ Comparaison bande C - bande Ku.....	91
V-1-5-2/ Comparaison des polarisations HH - VV.....	93
V-2 / Modélisation du signal radar.....	94
V-2-1/ Modélisation en bande C.....	94
V-2-2/ Modélisation en bande Ku.....	98
<b>CONCLUSION et PERSPECTIVE.....</b>	<b>104</b>
<b><u>ANNEXES</u>.....</b>	<b>107</b>
ANNEXE -I : Méthode d'échantillonnage de la végétation par le CSE (www.cse.sn) .....	108
ANNEXE -II : La polarisation.....	111
ANNEXE -III : Traitement du speckle.....	112
ANNEXE -IV : Les différents types de données du capteur SeaWind de Quikscat.....	117
ANNEXE -V : Description des paramètres du module de croissance de la végétation.....	120

## LISTE DES ACRONYMES

AEJ	: <i>African Easterly Jet.</i>
AEO	: <i>Africa Environment Outlook.</i>
ALOS	: <i>Advanced Land Observing Satellite.</i>
AMMA	: <i>Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine.</i>
ANAMS	: <i>Agence Nationale de la Météorologie du Sénégal.</i>
APM	: <i>Alternating Polarisation Mode.</i>
ASAR	: <i>Advanced Synthetic Apearture Radar.</i>
ASCAT	: <i>Advanced <b>S</b>cat<sup>t</sup>erometer.</i>
CATCH	: <i>Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique.</i>
CILSS	: <i>Comité Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel.</i>
CIPEA	: <i>Centre International pour l'Elevage en Afrique.</i>
CNES	: <i>Centre National d'Etudes Spatiales.</i>
CO <sub>2</sub>	: <i>Dioxyde de Carbone.</i>
CORUS	: <i>Coopération pour la Recherche Universitaire et Scientifique.</i>
CSE	: <i>Centre de SuiviEcologique.</i>
DEFCCS	: <i>Direction des Eaux, ForêtsChasses et de la Conservation des Sols.</i>
DMN	: <i>Direction de la Météorologie Nationale.</i>
DN	: <i>Number Digitbrute.</i>
ERS	: <i>European Radar Satellite.</i>
ESA	: <i>European Space Agency.</i>
ESCAT	: <i>ERS Scatterometer.</i>
ESM	: <i>Energie Statique Humide.</i>
EUMETSAT	: <i>European <b>M</b>eteorological Satelite.</i>
GES	: <i>Gaz à Effet de Serre.</i>
GESCAN	: <i>Gestion des Catastrophes Naturelles.</i>
GEO	: <i>Global Environment Outlook.</i>
GIEC	: <i>Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.</i>
GM	: <i>Global Monitoring Mode.</i>
GO	: <i>Geometric Optic.</i>
GPS	: <i>Global Position System.</i>
HAPEX-Sahel	: <i>Hydrology - Atmosphere Pilot Experiment –Sahel.</i>
HDF	: <i>Hierarchical Data Format.</i>

IEM	: <i>Integral Equation Model.</i>
IM	: <i>Image Mode.</i>
IPCC	: <i>Intergovernmental Panel on Climate Change.</i>
ITD	: <i>Inter-Tropical Discontinuity.</i>
JEA	: <i>Jet d'Est Africain.</i>
JPL	: <i>Jet Propulsion Laboratory.</i>
JERS	: <i>Japanese Earth Resource Satellite.</i>
JET	: <i>Jet d'Est Tropical.</i>
JOST	: <i>Jet d'Ouest SubTropical.</i>
LAI	: <i>Leaf Area Index.</i>
MEPN	: <i>Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature.</i>
METEOSAT	: <i>Meteorological Satellite.</i>
METOP	: <i>Meteorological Operational.</i>
MOC	: <i>Mission Operations Center.</i>
NDVI	: <i>Normalized Difference Vegetation Index.</i>
NOAA	: <i>National Oceanic and Atmospheric Administration.</i>
ORE	: <i>Observatoire de Recherche en Environnement.</i>
O <sub>2</sub>	: <i>Dioxygène.</i>
PALSAR	: <i>Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar.</i>
PNAT	: <i>Plan National d'Aménagement du Territoire.</i>
PO	: <i>Physical Optics.</i>
PODAAC	: <i>Physical Oceanography Distributed Archive Center.</i>
PRF	: <i>Pulse Repetition Frequency.</i>
RADAR	: <i>Radio Detection And Ranging.</i>
ROSELT/OSS	: <i>Réseau d'Observatoires de Surveillance Environnementale à Long Terme / Observatoire du Sahara et du Sahel.</i>
RSO	: <i>Radar à Synthèse d'Ouverture.</i>
SAR	: <i>Synthetic Aperture Radar.</i>
SMAP	: <i>Soil Moisture Active-Passive.</i>
SMOS	: <i>Soil Moisture and Ocean Salinity.</i>
SPM	: <i>Small Perturbation Model.</i>
STEP	: <i>Sahelian Transpiration Evaporation and Production model.</i>
STWJ	: <i>SubTropical Westerly Jet.</i>
TEJ	: <i>Tropical Easterly Jet.</i>

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature et de ses ressources.

UIT : Union Internationale des Télécommunications.

WAM : *West African Monsoon.*

WSM : *Wide Swath Mode.*

WSC : *Wind Scaterometer.*

WVC : *Wind Vector Cell.*

# CHAPITRE I

## INTRODUCTION GENERALE

## **I-1/ Contexte**

Depuis plusieurs années, la réflexion sur les problèmes environnementaux n'est plus cantonnée aux seuls cercles écologiques. L'état de l'environnement est devenu une préoccupation majeure de la communauté scientifique internationale (GEO-4, 2007 ; AEO-2, 2006 ; IPCC, 2007). Les effets des changements climatiques sur les écosystèmes, les ressources naturelles et les divers secteurs socio-économiques se font de plus en plus sentir (MEPN, 1997 ; MEPN, 2010). En effet, la biosphère terrestre qui joue un rôle prépondérant dans le système climatique global subit des changements préoccupants sous l'effet de forçages climatiques et anthropiques (GIEC, 2001). Les variations de la concentration de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols dans l'atmosphère, de la couverture végétale et du rayonnement solaire modifient le bilan énergétique du système climatique (GIEC, 2007). Des études ont montré que l'humidité du sol a le potentiel d'affecter le climat notamment la pluviométrie (Koster et al., 2004 ; Polcher, 2003). C'est une variable clé dans le processus régissant les échanges entre l'atmosphère et les surfaces continentales. En effet, les sols secs réchauffent et assèchent l'atmosphère sur son premier kilomètre comparé à des sols humides. Les orages peuvent être très sensibles à la température et à l'humidité de ces niveaux bas. Cela signifie qu'en principe, l'humidité du sol peut influencer les pluies qui elles-mêmes augmentent l'humidité du sol, c'est un mécanisme de rétroaction. (AMMA, 2002).

L'Afrique est au premier rang des régions concernées par la question de l'impact des fluctuations climatiques sur les ressources en eau. Plus des 2/3 du continent sont localisés entre les tropiques. Le Sahel, transition entre le désert du Sahara au nord et les savanes soudanaises au sud, se caractérise par une courte saison des pluies et une longue saison sèche. Le développement de la végétation naturelle et cultivée est étroitement lié à la pluviométrie. Les grandes sécheresses qui ont frappé le Sahel durant la période 1970-1990 (notamment en 1972-1974 et 1983-1985) ont eu des conséquences dramatiques et durables pour les populations (Raynaut et al., 1997). Ces deux épisodes ont été la manifestation extrême d'une sécheresse ininterrompue qui a concerné toute l'Afrique de l'Ouest de la fin des années 60 au milieu des années 90 (Le Barbé et al., 2002). En effet, le changement radical des quantités de précipitations, abondantes dans les années 50 et 60, vers des conditions beaucoup plus sèches entre les années 70 et 90 sur toute l'Afrique de l'ouest, a été la tendance la plus importante à l'échelle du globe durant le 20ème siècle. Ce qui en fait le phénomène climatique de plus grande ampleur connu par notre planète au cours du XXIème siècle (Le Barbé et al., 2002 ; L'Hôte et al., 2002).

Cette sécheresse est l'une des signatures majeure de la variabilité du climat en Afrique de l'Ouest. La variabilité climatique au Sahel a des impacts environnementaux et socio-économiques extrêmes. Elle est à l'origine d'importants problèmes liés à la viabilité comme la disparition des arbres (Mainguet, 1990 ; Chamard et Courel, 1999), la dégradation des sols (Le Houérou, 1989), ainsi qu'à la sécurité alimentaire et en eau dans la région. Ce qui représente une situation dramatique pour les populations comme pour l'économie de cette région.

Vu l'impact de cette variabilité à l'échelle régionale sur la vie des populations, il est fondamental de mieux comprendre les mécanismes physiques régissant les processus de surface, de manière à améliorer la prévision saisonnière et interannuelles. Cependant, il est difficile d'évaluer cette variabilité même en connaissant l'un de ses facteurs climatique dominant : la mousson ouest Africaine. En effet, le climat de l'Afrique de l'Ouest et le cycle hydrologique qui lui est associé, est déterminé par un régime de mousson (Janicot, 2009 ; Bock, 2011 ; Lafore, 2011 ; Sultan, 2011). Cette dernière dépend du système couplé terre-océan-atmosphère. Son évolution peut être décrite comme suit : pendant la période Mars-Avril-Mai, l'élévation du soleil est importante sur la région Soudano-sahélienne. L'ESM (Energie Statique Humide) augmente grâce au réchauffement en surface, et la convection sèche permet une conversion (adiabatique) de l'enthalpie en énergie géopotentielle. Ceci est une condition nécessaire pour démarrer une circulation divergente méridienne directe sur le Soudan-Sahel. Cela facilite l'advection de la vapeur d'eau d'origine Atlantique équatoriale et favorise la convergence humide dans les basses couches et la pluviosité. Ces conditions initiales en Mars-Avril-Mai engendrent des conditions atmosphériques, qui permettent d'entretenir une circulation thermique directe pendant les mois de Juin-Juillet-Aout-Septembre. Les mouvements adiabatiques verticaux se maintiennent grâce au dégagement de la chaleur latente de condensation dans la troposphère moyenne. La circulation de la Mousson Ouest Africaine est associée à quatre champs de vents principaux : le flux de sud-ouest dans les basses couches, le Jet d'Est Africain (JEA) dans la troposphère moyenne, le Jet d'Est Tropical (JET) dans la haute troposphère entre 5°N et 10°N de Juin à Septembre, et le Jet d'Ouest Subtropical (JOST) entre 30°N et 35°N aussi de Juin à Septembre (AMMA, 2002).

La mousson africaine est la source de pluies dans les régions du Sahel. En effet, la dynamique atmosphérique est un facteur important de contrôle de la pluviométrie. L'activité humaine peut aussi avoir une influence non négligeable. Charney (1975) avait souligné qu'une surexploitation des sols entraînait une augmentation de l'albédo au Sahel avec un

impact direct sur la circulation de Hadley (transport ascendant de l'air chaud des tropiques de l'équateur vers les pôles puis descendant des pôles vers l'équateur ; figure-I-1). Une diminution importante du couvert végétal sur la région Soudano-Guinéenne peut avoir une influence non négligeable sur les précipitations dans la même région (Zheng et Eltahir, 1998).

La caractérisation des pluies en Afrique de l'Ouest dépend de l'échelle, spatiale ou temporelle utilisée. Il a été constaté que la moyenne annuelle des précipitations à Niamey est la même qu'à Paris mais toute l'eau tombe en 4 à 5 mois. L'agriculture pluviale n'est donc possible qu'à l'intérieur de cette saison des pluies. La dépendance de la majeure partie de l'agriculture ouest africaine à la pluviosité en fait un territoire particulièrement vulnérable à des changements des précipitations.

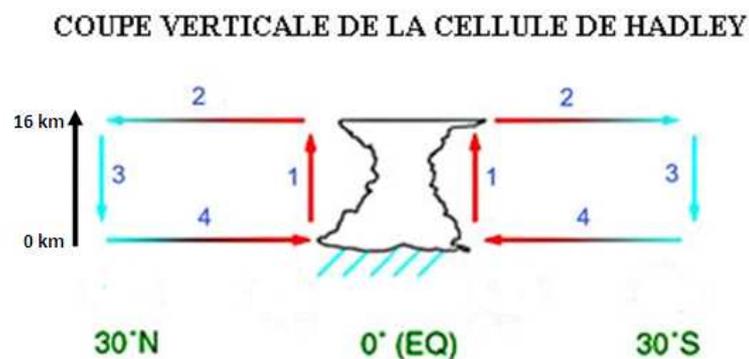


Figure I-1 : Schéma de la circulation de Hadley (AMMA, 2002).

La mousson ouest africaine joue un rôle important à l'échelle du globe. En effet, l'Afrique de l'Ouest, composante de l'espace tropical, est une des principales sources de chaleur du climat à l'échelle continentale et influence la circulation atmosphérique planétaire. La corrélation significative entre les cyclones tropicaux dans l'Atlantique et les précipitations de l'Ouest du Sahel est un exemple de la relation entre la Mousson de l'Afrique de l'Ouest et le climat dans d'autres régions du monde (Landsea et Gray, 1992). Cette région est aussi une source notable de particules d'aérosols qui, transportés sur de longues distances, ont des impacts sur le changement global du climat. Les feux de savane et des écosystèmes forestiers en détruisant la biomasse deviennent la principale source de pollution atmosphérique (Hao et al, 1996). En effet, les incendies de savane en Afrique produisent environ 0,7 Gigatonnes de Carbone par an (environ 20% du bilan global ; AMMA, 2002).

A partir de résultats récents basés sur des études de modélisation, il a été montré que les océans (Semazzi et al., 1996), la couverture végétale (Zheng et Eltahir, 1998 ; Wang et Eltahir,

2000) et la topographie (Semazzi et Sun, 1997) jouent un rôle important dans l'établissement de la circulation de mousson sur l'Afrique de l'Ouest. La dynamique et la chimie de l'atmosphère, la dynamique de la végétation et le cycle de l'eau continental sont donc étroitement liées. Leurs études doivent se faire de manière conjointe afin de mieux comprendre la variabilité pluviométrique en Afrique de l'Ouest. C'est l'une des originalités du projet AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine [www.amma-international.org](http://www.amma-international.org))

Les importantes modifications environnementales qu'a connues la région depuis une cinquantaine d'années pourraient avoir modifié la dynamique de la mousson, mais les observations disponibles pour valider une telle hypothèse sont insuffisantes. D'une manière plus large il est nécessaire, pour comprendre la variabilité de la mousson africaine et son impact sur le cycle hydrologique, de disposer de données couvrant la large gamme d'échelles spatio-temporelles auxquelles se manifestent la variabilité atmosphérique, la variabilité hydrologique et la variabilité des couverts végétaux. Ce contexte a fait apparaître l'intérêt d'une stratégie d'observation à long terme, permettant de documenter des échelles peu ou pas couvertes par les observations opérationnelles. Suite à HAPEX-Sahel (*Hydrology - Atmosphere Pilot Experiment - Sahel*), un observatoire hydro-météorologique a été maintenu sur le degré carré de Niamey. Cet observatoire a servi de précurseur pour la mise en place de l'ORE (Observatoire de Recherche en Environnement)AMMA-CATCH (Observatoire de la Variabilité Climatique Tropicale et de son Impact Hydrologique en Afrique de l'Ouest). Les observations de l'ORE sont destinées à fournir des éléments de validation pour les travaux de modélisation. Ces travaux visent à mieux cerner les rôles respectifs du forçage océanique de grande échelle, et des modifications régionales de la surface continentale dans la dynamique de la mousson. Elles alimenteront aussi les études sur les modifications observées depuis plusieurs années en matière de ressources en eau et de productivité agricole (parts respectives de la variabilité climatique et des changements environnementaux). L'observatoire CATCH (Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique) constitue l'un des noyaux de la composante d'observation à long terme du projet AMMA.

## **I-2/ Le programme AMMA**

Lancé en 2001 par des chercheurs français puis structuré à l'échelle Européenne à partir de 2005, le programme AMMA regroupe aujourd'hui plus de 140 laboratoires européens,

africains et américains. AMMA a bénéficié d'une contribution majeure du VIe Programme Cadre pour la Recherche de la Communauté Européenne. AMMA, programme international pluridisciplinaire a été lancé pour comprendre les raisons encore méconnues des perturbations de la mousson africaine. Il vise dans un premier temps à mieux connaître les mécanismes de la mousson africaine et de ses variations, et à évaluer son influence sur le climat local, régional et global. Dans un second temps, il faudra produire des connaissances qui permettront de relier la variabilité du climat aux problèmes de santé, de ressources en eau et de sécurité alimentaire pour les nations de l'Afrique de l'Ouest et de définir des stratégies de surveillance appropriée (Figure I-2)

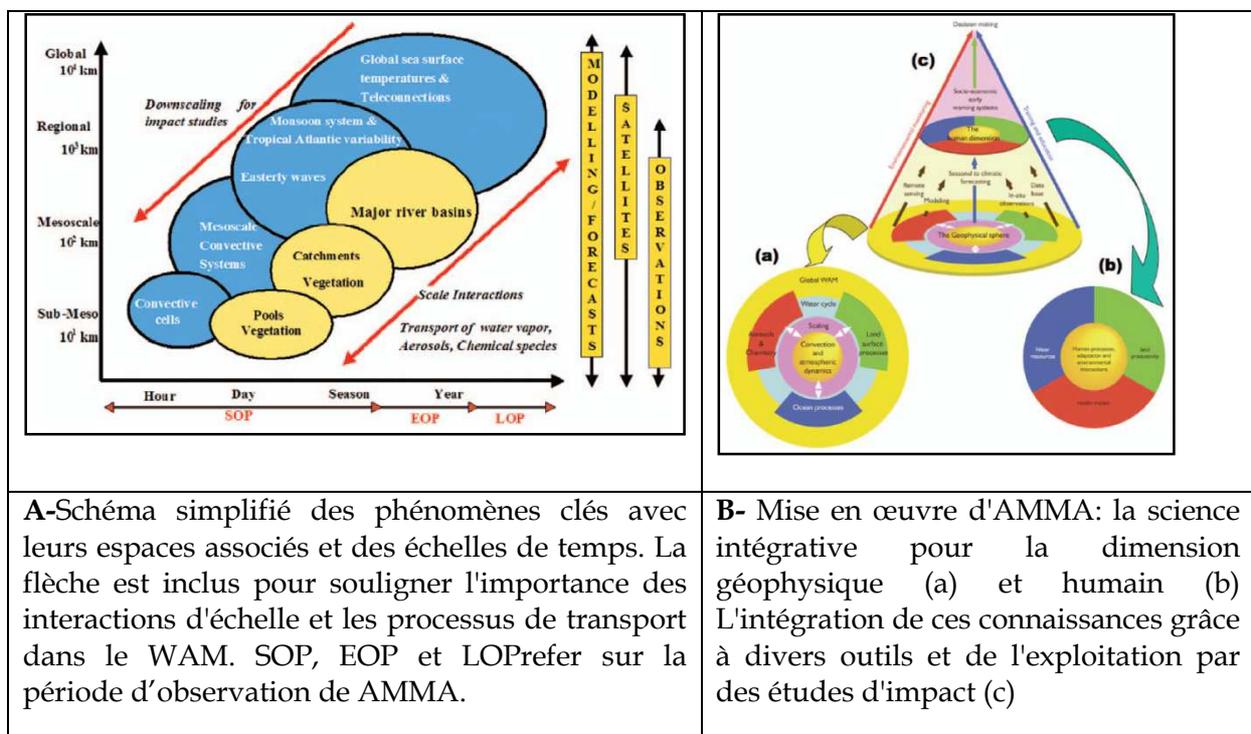


Figure I-2: schéma conceptuel des phénomènes clés (A) et approche multi échelle (B) ([www.amma-international.org](http://www.amma-international.org)).

L'objectif global de ce projet de recherche international est d'étudier les aspects scientifiques permettant de mieux comprendre les mécanismes de la mousson de l'Afrique de l'Ouest et ses composantes : la dynamique atmosphérique, le cycle de l'eau continental, la chimie atmosphérique et les conditions de surface sur l'océan et le continent.

## **I-2-1/ Dynamique de la Mousson Ouest Africaine**

La mousson en Afrique de l’Ouest trouve son origine dans une forte déclivité transéquatoriale de pression opposant la cellule des hautes pressions de Sainte-Hélène à la dépression saharienne estivale de basse couche (figure I-3 ; Sarr, 2009, Lafore et al., 2011).

Les réservoirs d’humidité du sol peuvent influencer les gradients énergétiques méridiens pendant le printemps boréal. Pour mieux comprendre le rôle joué par ces différents facteurs dans la variabilité de la Mousson Ouest africaine, des observations régionales et des expériences de modélisation sont nécessaires. En effet, le manque de données in situ et les carences des modèles dynamiques à simuler le climat entraîne des difficultés énormes dans la compréhension et la prévision du climat en Afrique de l’ouest. L’objectif principal est de comprendre les interactions entre la dynamique de la mousson et le cycle hydrologique continental.

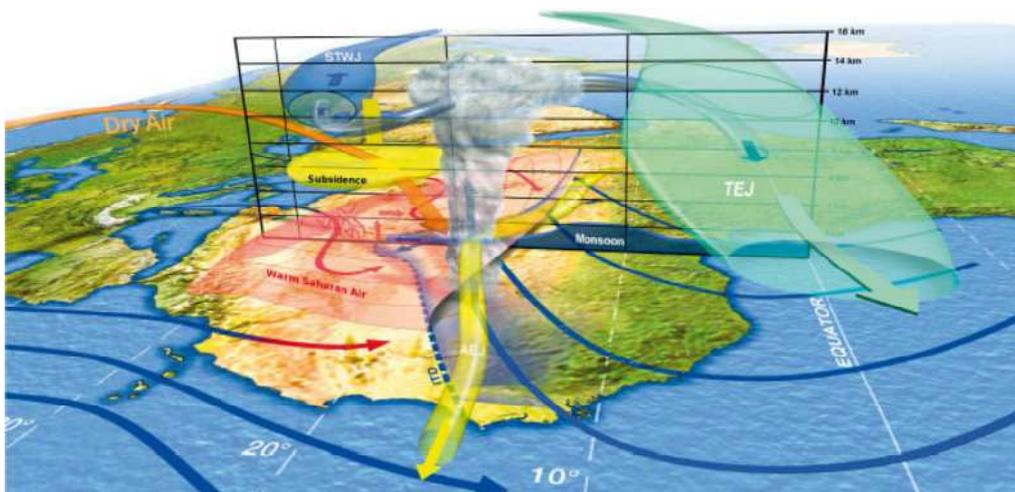


Figure I-3 : Schéma en trois dimensions de la Mousson Ouest Africaine. ITD, inter-tropical discontinuity; TEJ, tropical easterly jet; STWJ, subtropical westerly jet; AEJ, African easterly jet (Lafore et al., 2010).

## **I-2-2/ Phase continentale du cycle de l’Eau**

La figure I-4 montre la redistribution de l’eau à l’échelle du globe via le cycle atmosphérique. Sur les continents, autour de 40% de l’eau des précipitations retourne à l’océan par les rivières, 2% via les aquifères, le reste étant renvoyé dans l’atmosphère par évapotranspiration. Les flux évaporatifs sont plus importants dans le cycle de l’eau du continent Africain que dans celui du globe en moyenne (d’Orgéval, 2006). Le cycle continental de l’eau a été affecté par la dernière vague de sécheresse des années 70 et 90 (AMMA, 2002).

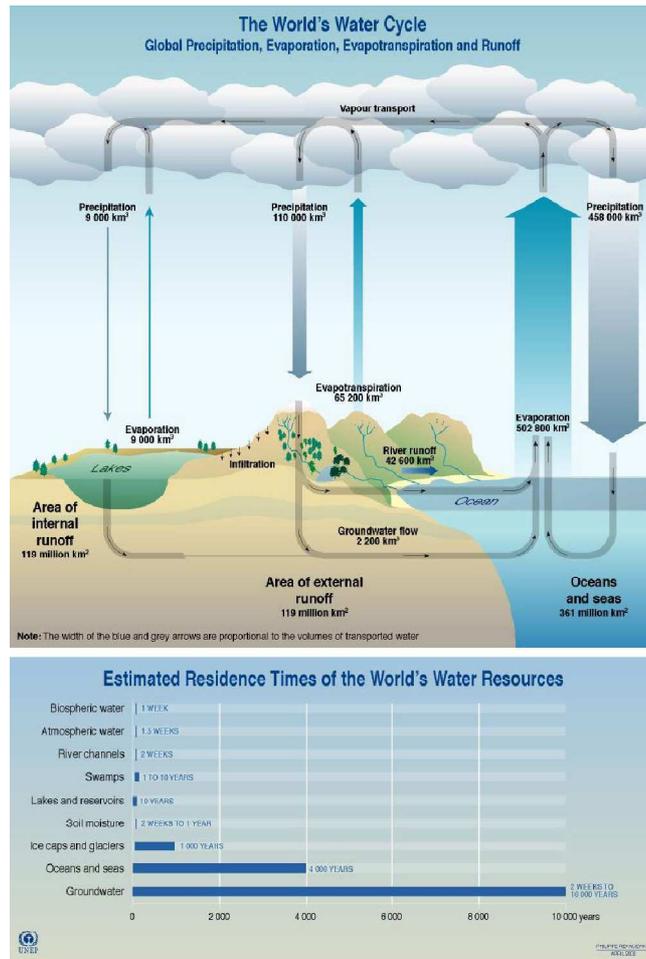


Figure I-4: Schéma des échanges du cycle de l'eau global (source : [www.unep.org](http://www.unep.org)).

Le projet AMMA vise à quantifier les contributions des différents compartiments (précipitation, écoulement dans les rivières, évapotranspiration, contribution des nappes souterraines) au cycle hydrologique et à mieux comprendre les interactions entre ces différents réservoirs.

### **I-2-3/ La chimie de l'atmosphère**

Les principaux objectifs de ce programme pour la thématique chimie de l'atmosphère ont été, d'une part l'étude des émissions et dépôts des espèces chimiques et la caractérisation de la chimie des nuages, et d'autre part l'étude des échanges troposphère - stratosphère (AMMA, 2002). En effet, la composition de l'atmosphère joue une large part dans le développement de la Mousson. Ainsi, pour une meilleure compréhension des différents phénomènes qui régissent la mousson, une bonne partie a été réservée à l'étude de la chimie de l'atmosphère dans le programme AMMA.

## **I-2-4/ Conditions de surface**

Les conditions de surface jouent un rôle fondamental dans la dynamique de la mousson Africaine. En effet, les émissions de grandes quantités d'aérosols relâchés dans la troposphère ont une grande influence sur le cycle de l'eau (Polcher, 2003).

Le programme AMMA étudie l'ensemble des processus et leurs interactions à diverses échelles spatio-temporelles : dynamique atmosphérique, hydrologie, biosphère, aérosols et chimie atmosphérique. Pour augmenter notre compréhension d'un système dynamique aussi complexe, une approche pleinement intégrée est donc hautement souhaitable pour coupler les trois composantes majeures de ce système (atmosphère, océan, continent). Comme la simulation numérique et l'assimilation fournissent un moyen unique d'étude de ces interactions, elles constituent un élément essentiel du projet.

## **I-3/ Travaux de thèse**

L'objectif de ce présent travail, mené dans le cadre du projet AMMA, est d'évaluer l'apport des données acquises par les capteurs radar spatiaux (diffusiomètres, radar à synthèse d'ouverture-RSO) pour l'extraction des paramètres de surface au Sahel, notamment l'humidité du sol et la quantité de végétation.

En effet, la télédétection spatiale radar offre de fortes potentialités pour la cartographie et la surveillance des problèmes environnementaux. De nombreuses études ont déjà été réalisées sur le potentiel de la télédétection radar pour le suivi de l'humidité et la rugosité du sol et du couvert végétal (Ulaby et al, 1978 ; Bradley et Ulaby, 1981 ; Le Toan et al, 1981 ; Bernard et al, 1981 ; Jackson et O'Neil, 1985; Dobson and Ulaby, 1986 ; Bruckler et al, 1988 ; Kennett et Li, 1989a ; Oh et al., 1992 ; Fung and Chen, 1992 ; Dubois et al., 1995 ; Frison et Mougin, 1996a ; Frison et al, 1998 ; Quesney et al., 2000 ; Le Hégarat et al., 2002 ; Baghdadi et al., 2002c ; Zribi et al., 2002 ; Srivastava et al., 2003 ; Oh, 2004).

L'intensité des ondes radar, en raison de leurs longueurs d'ondes centimétriques, sont peu voir insensibles aux effets atmosphériques, plus particulièrement les nuages. Ils permettent également de cartographier quelles que soient les conditions d'éclairement (jour et nuit), ce qui n'est pas toujours le cas des capteurs optiques dont les données sont parfois difficilement exploitables pendant la saison des pluies où la couverture nuageuse est intense.

Historiquement, les premières acquisitions radar spatiales permettant une analyse continue sur le long terme ont été acquises par le diffusiomètre ESCAT et le SAR d'ERS mis en orbite en 1991. Il est ainsi normal que les premiers travaux d'analyse aient été effectués sur ces données, notamment pour le cas de l'Afrique de l'ouest (Mougin et al., 1995a ; Magagi et Kerr 1997 ; Wagner et al., 2000 ; Woodhouse et Hoekman, 2000 ; Jarlan et al, 2003 ; Zine et al, 2004). Pour la suite, des études similaires ont été faites avec les données du SAR ASAR d'ENVISAT (Baup et al, 2007). Ces travaux ont permis de mettre en évidence la dynamique du signal radar dans les zones semi-arides, notamment au Sahel. Les études effectuées dans la zone pastorale malienne du Gourma par Frison et al, (1998) et agropastorale du Fakara au Niger par Zine et al, (2004) ont montré d'une part la forte dépendance saisonnière du signal radar, permettant de discriminer l'alternance des saisons sèches et humides. D'autre part ils ont montré que l'évolution temporelle du signal radar était directement corrélée à l'augmentation de l'humidité du sol, et au développement de la végétation. Le bon étalonnage du signal radar permet ainsi un suivi interannuel du développement de la végétation pendant la saison des pluies.

Dans le cadre de ce travail, il s'agira pour nous d'étendre ces travaux à la région agropastorale du Ferlo (Sénégal). Par ailleurs, nous allons analyser l'apport de nouveaux capteurs radar (diffusiomètre et RSO) mis en orbite ultérieurement au satellite ERS. Les diffusiomètres ont pour avantage d'avoir une bonne résolution radiométrique avec une faible résolution spatiale. A l'inverse les capteurs RSO ont pour avantage une résolution spatiale élevée au détriment de la résolution radiométrique.

Nous avons utilisé les données des diffusiomètres Seawind à bord de QuikSCAT avec une résolution de 25km, ASCAT (*Advanced Scatterometer*) de METOP (*Meteorological Operational*) avec une résolution de 25km et 50km, et du RSO ASAR (*Advanced Synthetic Aperature Radar*) d'ENVISAT 20m à 1 km de résolution. Cela nous a permis d'étudier l'aspect multi polarisations, multi incidences et multi bandes des capteurs radar.

Ces travaux sont réalisés en collaboration avec le Centre de Suivi Ecologique (CSE) de Dakar, qui a fourni les données in situ pour la validation des modèles dans cette région du Sahel. Ce travail a bénéficié du projet CORUS/GESCAN.

Ce document contient les autres chapitres suivants :

Le deuxième chapitre est réservé à la description géographique de la zone d'étude. La région du Ferlo dans le nord du Sénégal en zone sahélienne. Cette région à vocation pastorale est caractérisée par une saison des pluies courte avec des températures élevées. Les sols sont sableux et la végétation est généralement éparse (savane sahélienne).

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes intéressés aux capteurs radar utilisés durant notre travail. Nous avons d'abord décrit les caractéristiques des diffusiomètres et des capteurs RSO. Nous avons ensuite donné les caractéristiques des trois diffusiomètres (ESCAT de ERS, ASCAT de METOP et SeaWinds de QuikScat) et du capteur RSO ASAR de d'ENVISAT.

Le quatrième chapitre traite des modèles de simulation utilisés dans le cadre de ce travail. Le modèle STEP permet de modéliser l'évolution journalière des paramètres au sol (végétation, humidité du sol, taux de recouvrement végétal, hauteur de la végétation). Le modèle de transfert radiatif radar calcule les coefficients de rétrodiffusion à partir des sorties du modèle STEP. Le modèle d'inversion nous a permis de calculer la biomasse et l'humidité du sol à partir des données radar.

Le dernier chapitre de ce manuscrit est réservé à la présentation des résultats obtenus durant notre thèse. Elle est séparée en deux sous parties :

- L'analyse de la sensibilité à la dynamique saisonnière des capteurs radar utilisés d'une part et d'autre part l'apport de l'aspect multi fréquence et multi polarisations.
- Les modélisations, afin de valider la méthode pour la région du Ferlo et sur l'ensemble de la bande sahélienne.

# CHAPITRE II

## PRESENTATION DU FERLO

## II-1/ Présentation du FERLO

### II-1-1/ Situation géographique

Le Sahel se situe entre les latitudes 14° et 18° Nord dans la partie occidentale de l'Afrique (Figure II-1 ; Courel, 1984). Il s'agit d'une bande située au sud du Sahara, d'une largeur comprise entre 400 et 600 km. Cette frange s'étire de l'Océan Atlantique à l'ouest à la Mer rouge à l'est, sur une longueur de l'ordre de 6000 km (Akpo, 1992). Cette zone, caractérisée par un climat tropical aride couvre une bonne partie des territoires des neuf états membre du CILSS (Comité Inter-Etats de Lutte contre la sécheresse au Sahel) que sont le Burkina Faso, le Cap vert, la Gambie, la Guinée-Bissau, le Mali, la Mauritanie, le Niger, le Sénégal et le Tchad (Akpo, 1992). IL est caractérisé par la prédominance de sols sableux résultant d'ergs fossiles (système Ogolien, en particulier) sur lesquels se développe une steppe arbustive plus ou moins lâche (Le Houerou, 1989).

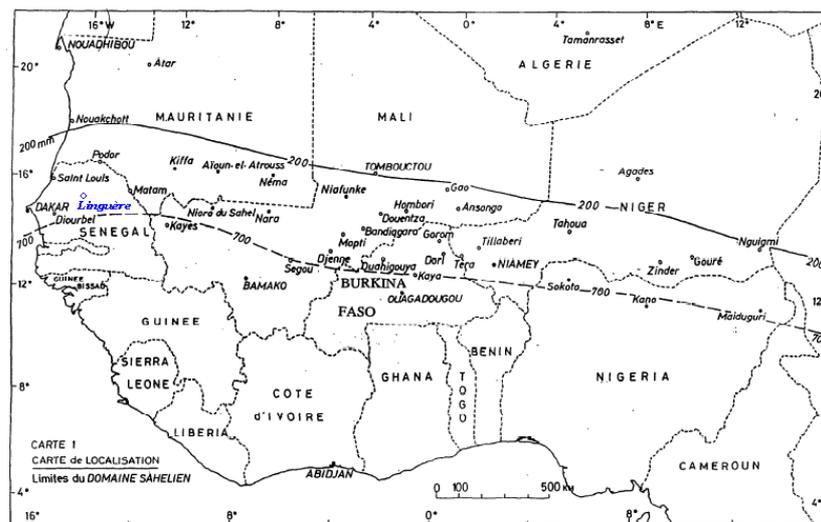


Figure II-1 : Localisation géographique du Sahel (Courel 1984).

Le Ferlo (Figure II-2), est un sous bassin du fleuve Sénégal ; il appartient à la zone bioclimatique sahélienne (Akpo, 1992). Il s'étend approximativement entre les latitudes 16°15 et 14°30 Nord, et les longitudes 12°50 et 16° Ouest (Sarr, 2009). Il couvre une superficie qui varie notablement selon les auteurs de 56 269 km<sup>2</sup> (DEFCCS, 1999) soit environ 28 % du territoire national à 70 000 km<sup>2</sup> (CSE et ROSELT/OSS, 2002) ou 60 000 km<sup>2</sup> (Wane et al., 2006). Le Ferlo constitue l'une des zones écogéographiques du Sénégal les plus vastes (Sarr 2009). Cet espace se trouve à cheval entre les régions administratives de Saint-Louis, Matam et Louga.

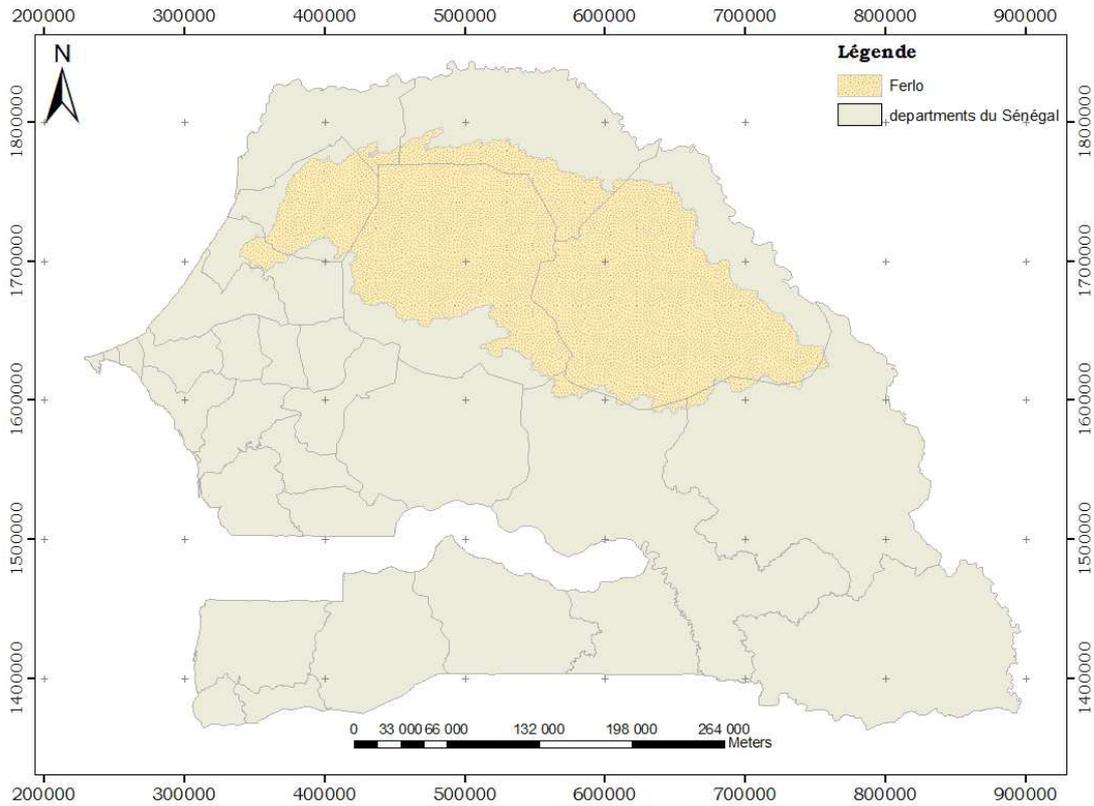


Figure II-2 : Localisation géographique du bassin du Ferlo (PNAT, 1986).

### II-1-2/ Géomorphologie

Le bassin du Ferlo appartient au bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien. Ce bassin regroupe des formations essentiellement marines et les couches gréseuses du Maestrichtien (Crétacé supérieur) qui renferment une importante nappe d'eau douce exploitée par des forages semi-artésiens (Jacqueminet, 1991). Cette nappe qui se situe à des profondeurs très élevées est devenue saumâtre par endroits suite à une forte exploitation (MEPN, 1999 ; Figure II-3).

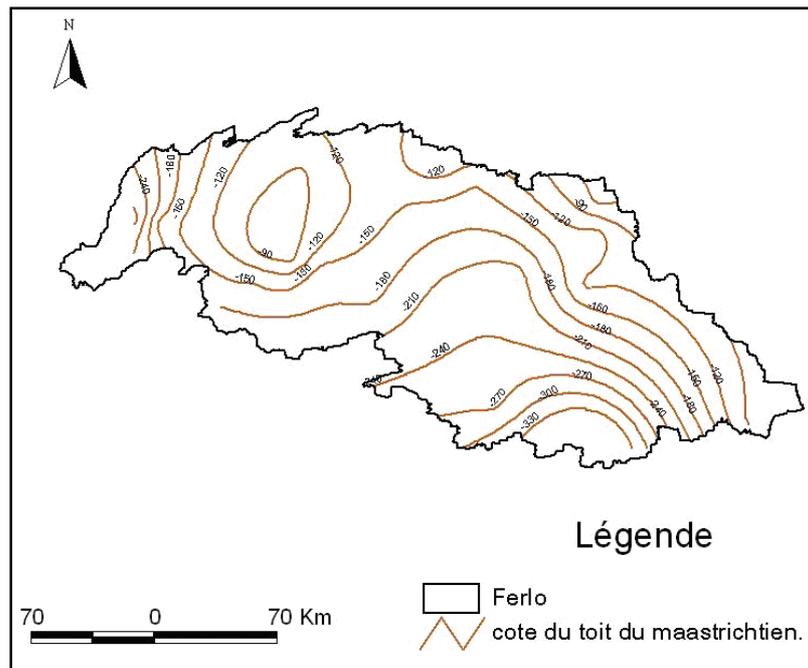


Figure II-3 :Carte du toit de la nappe du maastrichtien (CSE., 2006).

La zone est traversée par la vallée du Ferlo asséchée suite aux sécheresses. Cependant, le modelé dunaire et les vallées fossiles ont favorisé l'existence de mares temporaires avec des risques sanitaires (Lacaux et al., 2007 ; Ndione et al., 2009 ; Figure II-4). Ces mares sont issues du ruissellement pluvial ; elles s'assèchent quasiment dès la fin de la saison des pluies (Photo II-1a). Néanmoins, certaines conservent l'eau parfois jusqu'en décembre- janvier, voire au-delà : c'est le cas notamment des mares aménagées appelées lacs artificiels ou encore bassins de rétention, qui permettent de garder l'eau jusqu'à une période avancée en saison sèche (Photo II-1b).



(a)

(b)

Photo II-1 : mare asséchée (1), mare aménagée à Dahra qui contient encore une grande quantité d'eau (2) en octobre - novembre (clichés Faye, 2007).

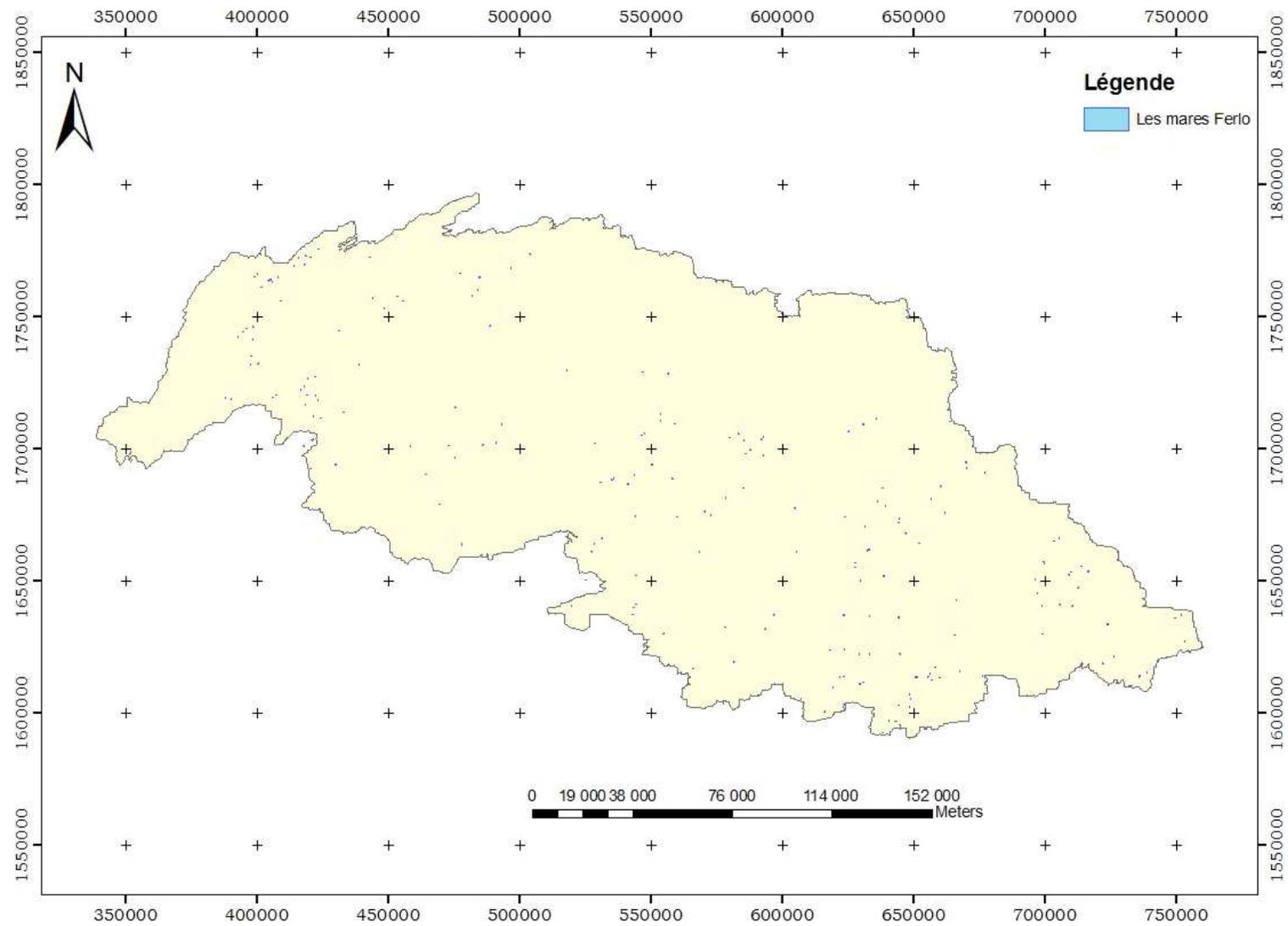


Figure II-4 : carte des mares du Ferlo (Sarr, 2009).

Entre la fin du Tertiaire et le début du Quaternaire, sous un climat plus humide, les dépôts aplatis du Continental Terminal ont subi un cuirassement. Au Quaternaire, l'alternance des périodes sèches et humides a entraîné l'altération de cette cuirasse ferrugineuse et la mise en place de matériaux sableux dunaires.

On distingue généralement la formation de trois ergs principaux successifs (Michel, 1974) :

- l'erg ancien : vers 40 000 BP au cours d'une période aride, coïncidant avec une importante régression marine, se forme un grand erg qui couvre le Ferlo septentrional. Le modelé de cet erg se compose de massifs sableux, orientés SW-NE. Les dunes ont une longueur de plusieurs kilomètres, et une largeur de 500 à 800 mètres, avec 2 à 3 mètres de dénivellation. Ces massifs dunaires se présentent sur le terrain comme une succession d'ondulations à sommet aplani et émoussé, séparées par des dépressions marquées ;
- au Quaternaire récent (Ogolién : 20 à 18 000 BP) une nouvelle période sèche aboutit à la formation d'un nouvel erg aujourd'hui appelé "dunes rouges" (ou encore dunes ogoliennes) à cause de la rubéfaction des horizons supérieurs (la rubéfaction se réalisa pendant le pluvial Holocène : 11 000 à 3500 BP ; Michel, 1974). Au cours des fluctuations climatiques du Quaternaire, la cuirasse ferrugineuse a été détruite en presque totalité et reconstituée en cuirasses de nappe parfois affleurantes ou sub-affleurantes, à partir des éléments démantelés (Le Houerou, 1989) ;
- par la suite (de 7000 à 5000 BP), lors d'une troisième phase aride mineure, certains massifs dunaires ont été remaniés en bordure des zones alluviales notamment le lac de Guiers. Ils présentent aujourd'hui, le relief le plus marqué et apparaissent localement sur le secteur étudié : l'orientation de ces cordons dunaires est SSW-NNE (Leprun, 1971 ; Poupon, 1980).

Ces phases de dépôt et de remobilisation des sables ont engendré un modelé dunaire complexe, d'autant plus complexe qu'il est fort aplani et que les limites entre dune et interdune sont souvent masquées par des épandages sableux.

### II-1-3/ Les sols

Le Ferlo appartient aux formations sableuses dunaires. Les reliefs sont séparés par des dépressions longitudinales à sol sablo-argileux grisâtre, localement calcaire et à sol hydromorphe à engorgement temporaire, ainsi que des sols rouges bruns subarides. Ces sols du domaine sahélien sont généralement peu évolués ou dégradés. Leurs caractères sont pour la plupart hérités de périodes paléo climatiques de nature et de durée différentes (Leprun, 1971, Le Houerou, 1989, Akpo et al., 2005). La zone est caractérisée par une prédominance des sols à texture sableuse. Les états de surface, ou formations superficielles de ces sols, sont marqués par une alternance de surfaces couvertes en végétation, de sols nus et de surfaces encroûtés représentant un microrelief plus ou moins marqué.

Des observations pédologiques faites sur les sommets des bandes dunaires, indiquent dans la partie septentrionale, des sols peu profonds (0.5 à 2 m) et dans la partie méridionale, des sols assez profonds (1,40 à 2 m). Les horizons des sols de la partie septentrionale sont moins différenciés par rapport à ceux de la partie méridionale, donc logiquement plus jeunes (Leprun, 1971). Les sols des espaces interdunaires ont une texture sableuse, et le substratum est le même que celui des bandes dunaires : les sols sont peu épais et généralement tronqués.

On distingue :

- les sols ferrugineux tropicaux (ou *sols dior*) sont de couleur rouge, plus ou moins lessivés et très sableux (plus de 95% de sables) donc souvent très dégradés et pauvres en matière organique. Ces sables faiblement argileux sont d'origine éolienne (Leprun, 1971) ;
- les sols subarides (*sols deck*) intergradés hydromorphes ;
- les sols, brun-rouges subarides, sont neutres à faiblement acides et contiennent 80 à 85 % de sable et 3,5 % d'argile en surface. Ils sont pauvres en matière organique (Leprun, 1971 ; Le Houerou, 1989). Ils peuvent atteindre parfois 40 cm. Cet état facilite son déplacement par le vent et la formation d'ergs (Maignien, 1965) ;
- des sols peu évolués, de lithosol et rugosol (Figure II-5 ; MEPN, 1999).

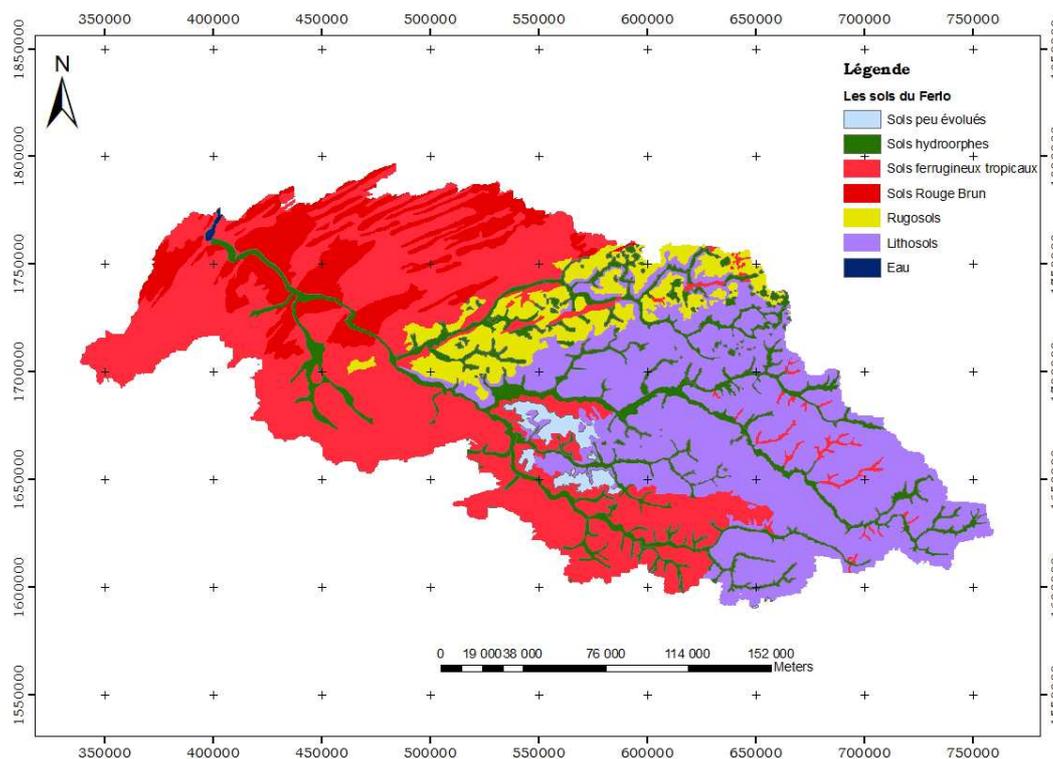


Figure II-5 : Carte des sols du Ferlo (PNAT, 1986).

## II-1-4/ Le climat

Le Sahel est une zone comprise entre les isohyètes 100 mm et 600 mm (Courel, 1984 ; Le Houérou, 1989; Akpo, 1992). Il est caractérisé par une extrême irrégularité dans le temps et dans l'espace de la pluie. La température moyenne annuelle s'établit à 29° C tandis que les températures moyennes mensuelles minimale et maximale sont respectivement de 14,1° C en janvier et 40,4° C en mai (Akpo, 1992).

Le Ferlo présente les principaux traits du climat sahélien *sensu stricto* à savoir : précipitations annuelles comprises entre 200 et 500 mm, associés à une forte variabilité (coefficient de variation : 30 à 40 %), une humidité relative de l'air faible en saison sèche, élevée en saison des pluies (moyenne annuelle de l'ordre de 35 %), températures élevées (moyenne annuelle de 29° C), forte évaporation (1800 à 2200 mm/an), précarité des réserves en eau du sol (Leroux, 1980 ; Le Houérou, 1989 ; Ndione, 2002). Le climat du Ferlo est de type sahélien continental caractérisé par deux saisons bien distinctes (MEPN, 1999) :

- une saison des pluies courte de juillet à octobre ;
- une longue saison sèche de novembre à juin.

La zone est soumise à l'influence de trois masses d'air (MEPN, 1999, Sagna 2000a, Sagna et al., 2000b) :

- les **alizés maritimes** provenant de l'anticyclone des Açores soufflant d'octobre à juin et adoucissant le climat grâce à leur fraîcheur mais ne provoquant pas de pluies ;

- l'**harmattan**, vent chaud et sec de secteur Nord-Est à Est et soufflant la majeure partie de l'année, plus actif de janvier à mai ;

- la **mousson**, quant à elle souffle de juillet à septembre ; de direction Sud, Sud Ouest, elle apporte la pluie.

Le calendrier Peuhl reconnaît quand à lui cinq (5) saisons basées sur les températures, la disponibilité en eau et la phénologie des arbres et de l'herbage (Anonyme, 1988). Ce sont :

- *dubunde* ou la saison sèche fraîche (décembre à février) ;

- *tchedio* ou la saison sèche chaude (mars, avril), la température est de l'ordre de 40° et une vitesse moyenne du vent maximal (2,9 m.s<sup>-1</sup>) ;

- *setselle* ou saison pré-pluviale (mai juin) avec des températures élevées et une hygrométrie élevée ;

- *nduggu* ou saison des pluies (juillet-septembre), seule période de l'année où la quantité de pluie mensuelle est en moyenne supérieure à 35 % de l'évapotranspiration ;

- *Kauze* ou saison post-pluviale (octobre, novembre) ; la vitesse du vent ne dépasse pas 1,8m.s<sup>-1</sup>.

A l'instar des autres régions sahéliennes (Olivry, 1993 ; Snijders, 1986), le Ferlo se caractérise par une sécheresse persistante (Akpo, 1992, Ndione, 2002). De 1950 à 1984, le total des pluies annuelles au nord du Sénégal a progressivement décroché, passant d'environ 400 mm en 1950 (moyennes calculées sur les stations de Dagana, Linguère et Windou Thiengoli) à environ 100mm en 1984 (moyennes calculées sur les stations de Windou Thiengoli, Lode et Tatki), (Figure II-6 ; Jacqueminet, 1991).

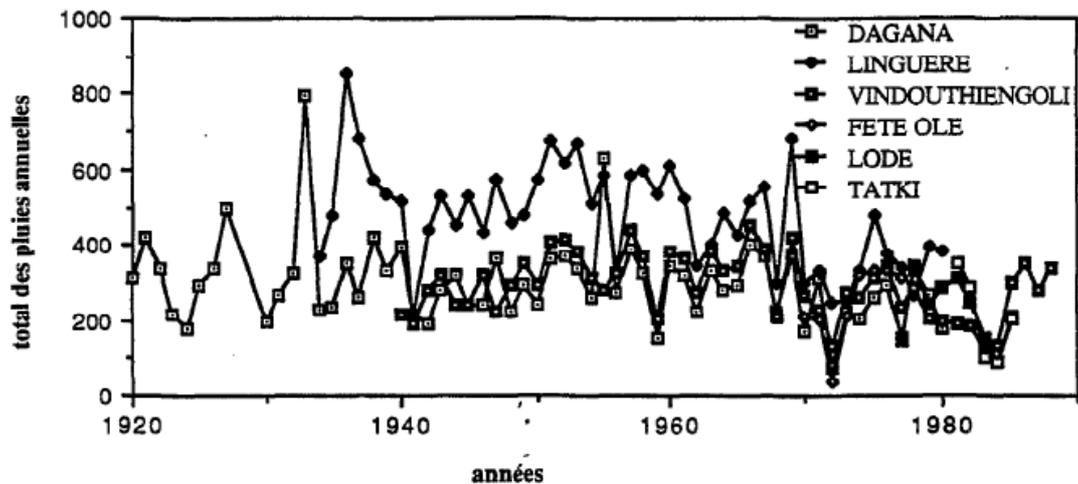


Figure II-6 : les variations interannuelles de la pluviométrie de 1920 à 1989 au Ferlo (Jacqueminet, 1991).

Selon l'UICN (1989), le déficit pluviométrique aurait commencé à Linguère en 1970.

La moyenne des pluviosités annuelles de 1987 à 2006 est de 382,1 mm à Linguère. Cette pluviométrie est répartie sur 14 à 49 jours de pluie (avec une moyenne de 28,45 jours de pluie par an). On observe une forte variabilité interannuelle avec des années exceptionnellement sèches (1991, 2002). La pluviométrie de l'année 2002 (207 mm) représente environ les 2/3 de celle de 2005 (597,0 mm). Cela montre ainsi le caractère aride du climat puisqu'il est notoirement démontré que l'irrégularité des précipitations augmente quand la quantité annuelle des pluies diminue (Riou, 1980 ; Le Houerou, 1989). Les pluies surviennent entre juin et octobre, elles se concentrent entre juillet, août et septembre (Figure II-7) où tombent plus de 85% des précipitations annuelles. Selon le seuil de 30 mm proposé par Koppen cité par Vacher (1984), pour caractériser les mois biologiquement secs, deux à trois mois en zone sahélienne (juillet, août et septembre) sont au dessus de ce seuil, soit 90 jours. Ils reçoivent près de 85,45 % des précipitations annuelles. Plusieurs études ont été faites sur le climat au Sahel en général et au Ferlo en particulier. Nous pouvons notamment citer les travaux de Leroux (1980), Sagna (1988, 2005), Janicot (1990), Ndong (1996), Diedhiou (1998), L'Hôte et al (2002), Ndione et al., (2002) et tout dernièrement les travaux du programme AMMA ([www.amma-international.org](http://www.amma-international.org)) et de Sarr (2009).

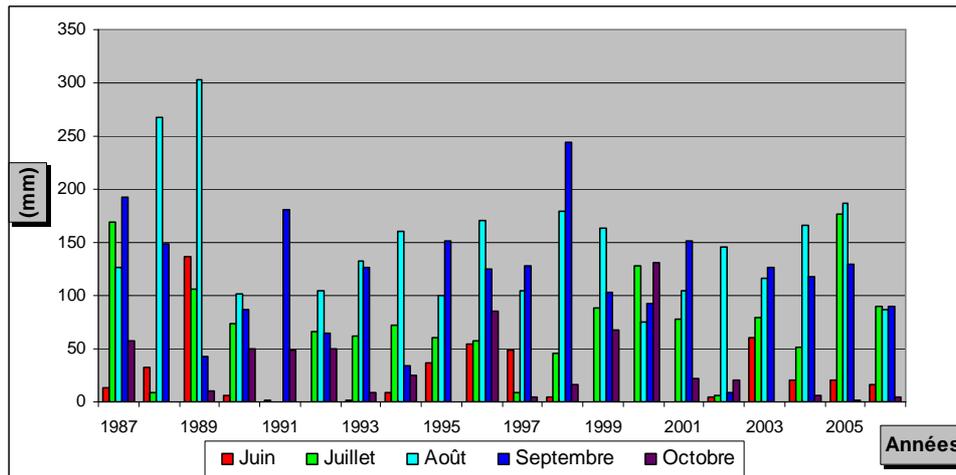


Figure II-7 : Cumul mensuel de la pluviométrie de Linguère de 1987-2006.

On observe une variation de la pluviométrie en dent de scie, avec une nette chute au début des années 90 (Figure II-8) passant de 597 mm en 1989 à 317 mm en 1990. Ces totaux pluviométriques annuels mettent en évidence les fortes variations interannuelles des précipitations dans la région du Ferlo.

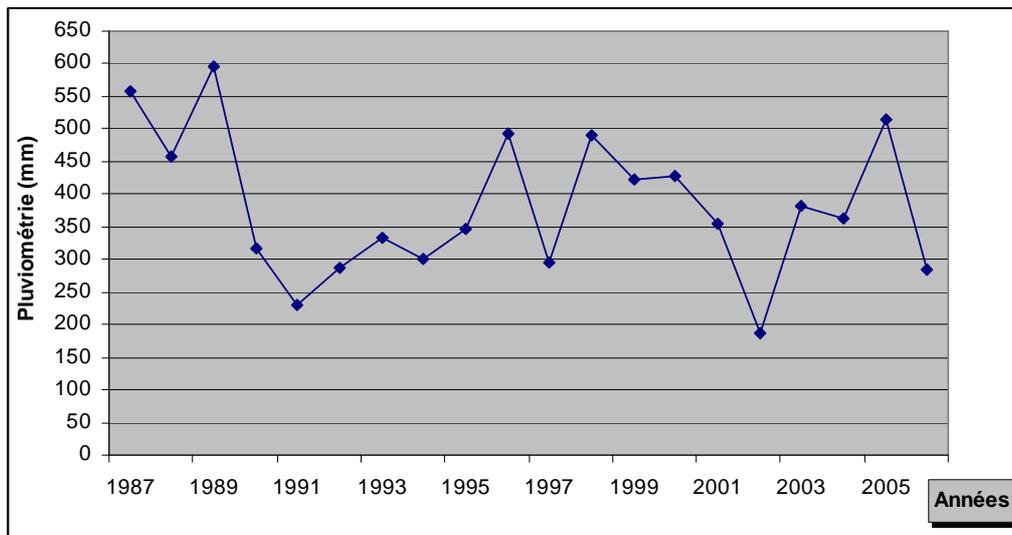


Figure II-8 : variation interannuelle de la pluie à la station de Linguère de 1987 à 2006.

Les écosystèmes sahéliens sont intimement liés au rythme climatique qu'impose la longue saison sèche et la grande variabilité des précipitations, tant dans les quantités que dans leurs distributions (Akpo, 1992).

## II-1-5/ La végétation

La couverture végétale typique du Sahel est la steppe arbustive et/ou arborée localement discontinue, elle se présente comme une mosaïque de formations variées ayant le même fond floristique.

La végétation au Ferlo est de type sahélien (Photo II-2) passant d'une pseudo steppe arbustive à la savane arborée du Nord Ouest au Sud Est (Figure II-9 ; MEPN, 1999). On distingue notamment :

- une pseudo steppe dominée par les graminées telles que *Cenchrus biflorus*, *Schoenfeldia gracillis* et *Dactyloctenium aegyptium* ;
- une strate ligneuse dominée par *Acacia radiana* et *Acacia senegal* en association avec *Balanites aegyptiaca*, *Ziziphus mauritiana*, *Boscia senegalensis*, *Acacia seyal*, *Pterocarpus lucens* et *Combretum sp.*
- une savane boisée dans les dépressions, les mares temporaires et le long des vallées fossiles, dominée par *Acacia seyal*, *Combretum glutinosum*, *Mitragyna inermis*, *Sclerocarya birrea* et d'*Acacia nilotica* ;



Photo II-2 : Vues de la végétation au Ferlo en fin de saison des pluies (novembre ; clichés Faye, 2007).

Valenza et Diallo (1972), au cours d'une étude sur les pâturages naturels du Nord Sénégal, distinguent sept types de formation suivant la nature du substrat. Chaque type de végétation, établi à partir de la description des strates herbacée et ligneuse est divisé en groupements, puis en parcours. Bien que ces formations ne correspondent pas précisément aux unités phytosociologiques, ces divisions donnent une bonne image de la végétation grâce à la profonde connaissance du milieu et de la végétation des auteurs. D'après cette étude, la zone étudiée appartient à 3 grandes formations végétales correspondant à trois types de sol (Anonyme, 1988) :

Gayane FAYE - 2012

- les sols squelettiques portant les groupements à *Balanites aegyptiaca*, *Adenium obesum* et *Aristida funiculata* (G8A) ;
- les sols sableux à argilo-sableux supportant les groupements sur pénéplaine haute à *Sclerocary birrea* et *Balanites aegyptiaca* (PS4) ;
- les sols sablo-argileux à argileux où se trouvent les groupements à *Balanites aegyptiaca* et *Schoenfeldia gracillis* (PA1 et PA4).

Les pasteurs Peulh distinguent quatre types principaux de parcours fondés sur la géomorphologie. Ce sont les parcours *seno* sur sol sableux plus ou moins dunaire, les parcours *bafdiol* dans les dépressions, les parcours *tiangol* des vallées sèches et les parcours *sangare* sur les sols gravillonnaires des pédiplaines.

Le département de Linguère est situé dans le domaine des steppes à épineux où prédominent les thérophytes et les phanérophytes. La nette dominance de ces types biologiques traduit une bonne adaptation écologique aux sévères conditions d'aridité qui règnent sur le milieu (Grouzis, 1988). La végétation de cette zone étudiée se présente, en fin de saison des pluies sous la forme d'un tapis herbacé, plus ou moins continu. Ce tapis est parsemé d'arbres et d'arbustes fréquemment épineux, ne formant jamais une strate continue (Aubreville, 1949). Cette végétation herbacée, essentiellement à base de graminées annuelles (*Schoeizefeldia gracilis* Kunth, *Cenchrus biflorus* Roxb. et *Aristida mutabilis* Trin.), dépasse rarement 40 cm de hauteur (Akpo et al., 1995).

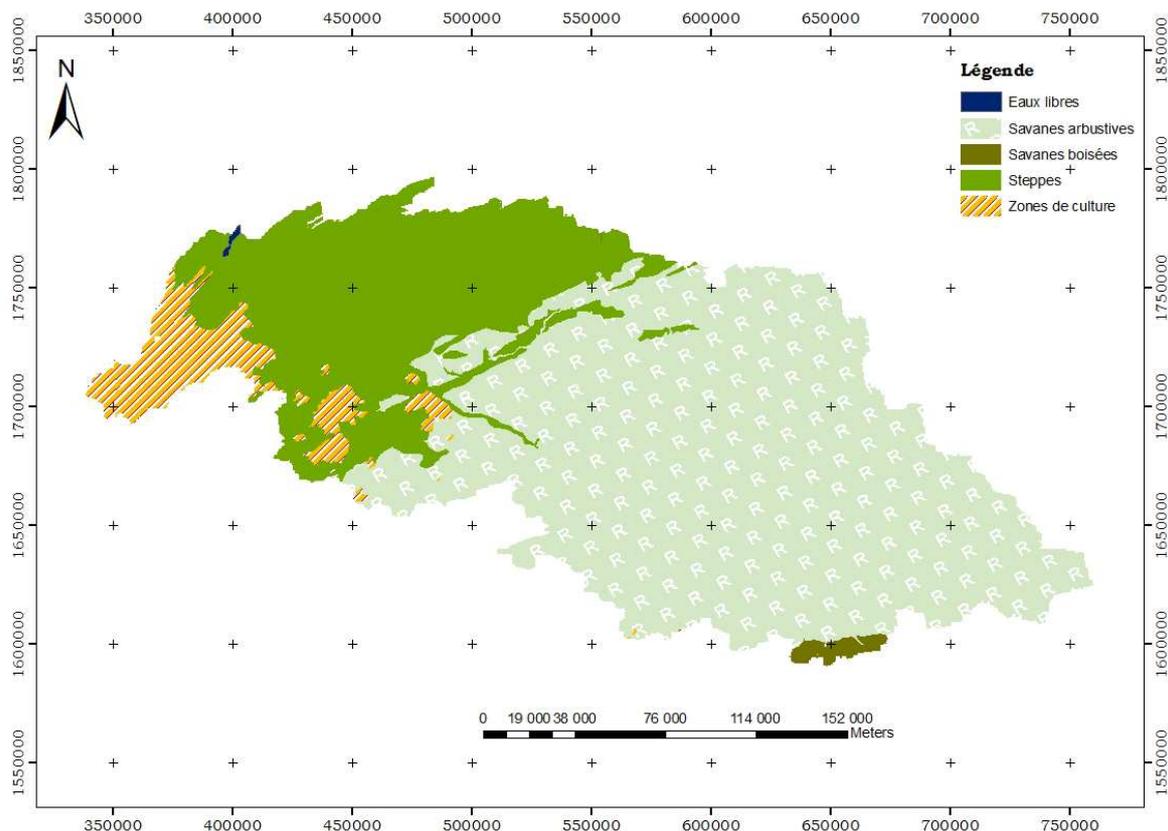


Figure II-9 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude (PNAT, 1986).

Les écosystèmes sahéliens subissent une forte dégradation en raison de la péjoration des conditions climatiques et de l'anthropisation croissante (Grouzis et Albergel, 1989). Cette situation est préjudiciable aux conditions de vie des populations et à l'économie des pays sahéliens, puisque la végétation spontanée constitue la base de l'alimentation des troupeaux, et que la production vivrière repose sur la culture pluviale. Les effets conjugués de la nature (sécheresse et aridité sévère) et de l'action de l'homme (pression des éleveurs, exploitation forestière, feux de brousse ainsi que les saignées et coupes) favorise la réduction de la diversité des espèces (MEPN, 1999).

Notons enfin qu'en milieu sahélien, l'arbre peut favoriser dans certaines situations les conditions édapho-climatiques de développement de la strate herbacée. Cet effet se traduit au niveau du système d'exploitation par une amélioration des conditions d'élevage, d'une part par son action à travers la strate herbacée (production de matière azotée) et d'autre part par son action propre (production de feuilles, apport de matière verte pendant 9 mois de l'année ; Akpo et Grouzis, 1992). Ainsi, un des problèmes les plus urgents à résoudre dans les régions sahéliennes est la reconstitution des écosystèmes dégradés.

## **II-1-6/ La population**

La population est assez faible avec des densités qui peuvent atteindre 6 hbts/km<sup>2</sup>, répartie dans de petits villages ou hameaux. Elle est en majorité constituée de jeunes. Les femmes sont plus nombreuses que les hommes chez les adultes. Le taux d'accroissement est de 2.84% contre 2.6% sur le plan national. Deux ethnies sont fortement représentées : il s'agit des Halpulaars et des Wolofs totalisant plus de 90% de la population. Les autres ethnies sont les Sérères et les Maures. La population qui est à plus de 70% rurale est soumise à des flux migratoires, le plus souvent intra et inter régional comme l'exode rural et la transhumance. La migration internationale reste encore faible dans la zone bien que rapportant d'énormes sommes d'argent (MEPN, 1999).

## **II-1-7/ Les activités socio-économiques**

L'économie des régions sahéennes repose en grande partie sur l'activité pastorale. L'agriculture est présente mais dans des proportions faibles. L'utilisation des terres est principalement pastorale et traditionnellement transhumante (Sharman, 1987). L'élevage, de type extensif, exploite les herbages, composés essentiellement de graminées et parsemés d'autres épineuses (*Acacia*, *Balanites*, *Ziziphus*, etc.). Le fourrage naturel joue donc un rôle considérable, car il constitue quasiment encore le seul mode d'alimentation des herbivores domestiques (Akpo et al, 1995). Cependant, ces ressources fourragères quantitativement et qualitativement, sont extrêmement dispersées dans l'espace et fluctuantes dans le temps. La recherche conjointe du fourrage et de l'eau entraîne une mobilité des pasteurs et de leurs troupeaux de plus ou moins grande amplitude (Milleville, 1989).

Cette mobilité est dépendante de la distribution dans le temps et dans l'espace des pluies, qui influe sur la plus ou moins bonne reconstitution des pâturages. La nature condamne donc les pasteurs "à suivre les pluies" et à courir après les pâturages (Photo II-3). Avec l'accroissement de la population et compte tenu des progrès sanitaires de l'élevage, on assiste à une augmentation de la charge des pâturages. Cependant, l'accroissement du cheptel et les activités anthropiques associés aux conditions de sécheresse intense, engendrent des perturbations parfois profondes des systèmes écologiques sahéens, par ailleurs déjà fragiles. On parle souvent de dégradation. Celle-ci se manifeste notamment par des modifications de la composition floristique de la végétation (Akpo et Grouzis, 1995).



Photo II-3 : transhumants Peuls (clichés Faye, 2007).

Jusqu'à l'ouverture du premier forage, à Dodji en 1950, le Ferlo était considéré comme un « désert » en raison de la rareté des points d'eau permanents. Ce « désert » du Ferlo était seulement fréquenté quatre à six mois par an par des pasteurs Peuls. Ces derniers transhumaient avec leurs troupeaux au cours de la saison sèche soit vers la vallée du fleuve au nord, soit vers la vallée du Ferlo au sud (Akpo, 1992).

Le paysage et les terroirs étaient organisés en fonction d'une mare ou d'un système de mares autour desquelles s'articulaient les "*Houroum*". Le développement de l'hydraulique pastorale a permis la création, entre 1950 et 1980, de 35 forages profonds (80-322m) et de 33 puits-forages alimentés par l'aquifère Maëstrichien (Barral, 1982 ; Diop et al., 2010). La création de ces forages a profondément perturbé les pratiques de ces sociétés avec l'abandon progressif de la transhumance vers une sédentarisation (Photo II-4 (a.)).

Les forages (Figure II-10) sont devenus alors des pôles de peuplements permanents où les campements se sont fixés et des villages se sont créés (Photo II-4 (b.)). Entre 1950 et 1980, le taux de transhumants est passé de 60 à 13% et l'augmentation du cheptel de 20% (Akpo, 1992).



Photo II-4 : Peuls sédentaires (a.) et troupeaux de vache au forage dans la réserve de Doly (b.) ; (clichés Faye, 2007).

L'aphosphorose, maladie des forages (botulisme hydrique) est apparue, en relation avec la disparition de la cure salée. La gestion actuelle des parcours en saison pluvieuse repose sur des déplacements de faibles distances (moins de 5km) d'un "*Rumano*" permanent vers une mare. Celle-ci assure un abreuvement quotidien du troupeau. La saison sèche voit l'exploitation des pâturages les plus éloignés (10 à 20 km) du campement, et l'abreuvement du cheptel a lieu un jour sur deux. Le campement de saison sèche (*Sedano*) peut être déplacé deux ou trois fois en fonction de la disponibilité des parcours. La mobilité est devenue moins unidirectionnelle et périodique, elle est devenue anarchique. On passe plus à un micro-nomadisme de faible amplitude qu'à une véritable sédentarisation (Barral et al., 1983). Pendant les années à fort déficit pluviométrique, on assiste à des transhumances exceptionnelles et à un exode quasi général vers le sud (Akpo, 1992). Les forages du Ferlo auront donc réalisé le paradoxe de permettre le maintien du pastoralisme, là où l'on pouvait s'attendre à une sédentarisation et à une désaffectation rapide envers le genre de vie pastoral" (Barral, 1982).

Le cheptel est composé de bovins, ovins, caprins, équins, asins, camelins et de la volaille. Les petits ruminants représentent 30% du cheptel, les bovins 22%. Chez les bovins le type génétique dominant est le zébu *Gobra*. Les moutons sont représentés par la race peulh (*peulh peulh*) locale et la race *touabire* originaire de la Mauritanie. Pour les caprins, seule la chèvre du Sahel se rencontre dans la zone (MEPN, 1999).

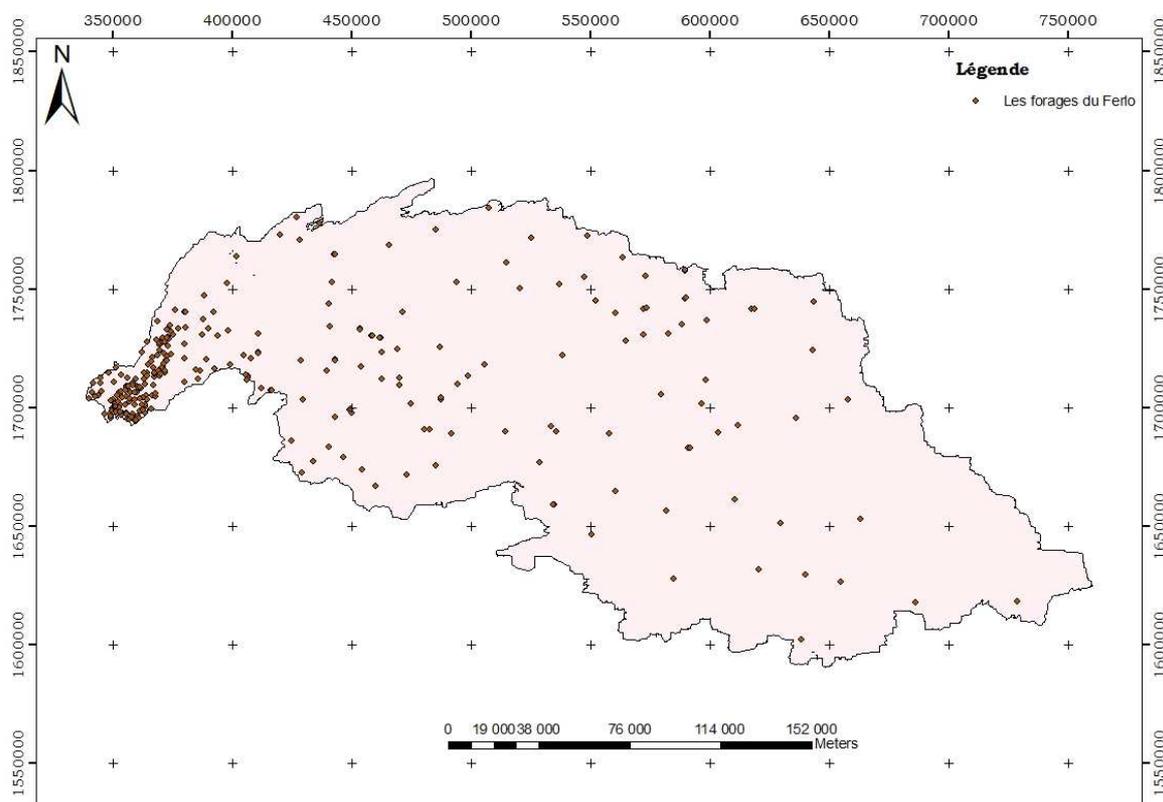


Figure II-10 : carte des forages du Ferlo (Sarr, 2009).

Malgré la présence de sols pauvres et des aptitudes agricoles variables, l'agriculture occupe une place tout de même substantielle. Elle est essentiellement pluviale, avec comme principales cultures le mil, l'arachide, le niébé, le sorgho et le béréf. Cette agriculture évolue dans un environnement écologique très difficile (pluviométrie défavorable, dégradation des sols absence d'amélioration foncière, feux de brousse etc ; MEPN, 1999).

## **II-2/ Présentation de la zone d'étude**

Notre zone d'étude se situe dans le bassin du Ferlo (Figure II-11). Il s'agit d'une zone pastorale où le développement est étroitement lié aux ressources naturelles. Le périmètre choisi se situe entre 15°9' et 15°2' nord, et -15°48' et -14°9' ouest et appartient au département de Linguère.

Le choix de cette zone autour de Linguère est motivé par sa position géographique au cœur du Ferlo d'une part. Et d'autre part, par l'existence de stations pluviométriques permettant une bonne couverture en données de pluie. Il existe trois stations pluviométriques de l'Agence Nationale de la Météorologie du Sénégal (ANAMS ; Tableau II-1). D'autre part, le CSE dispose de trois sites de contrôle de biomasse dans cette zone (Tableau II-2 et Figure II-

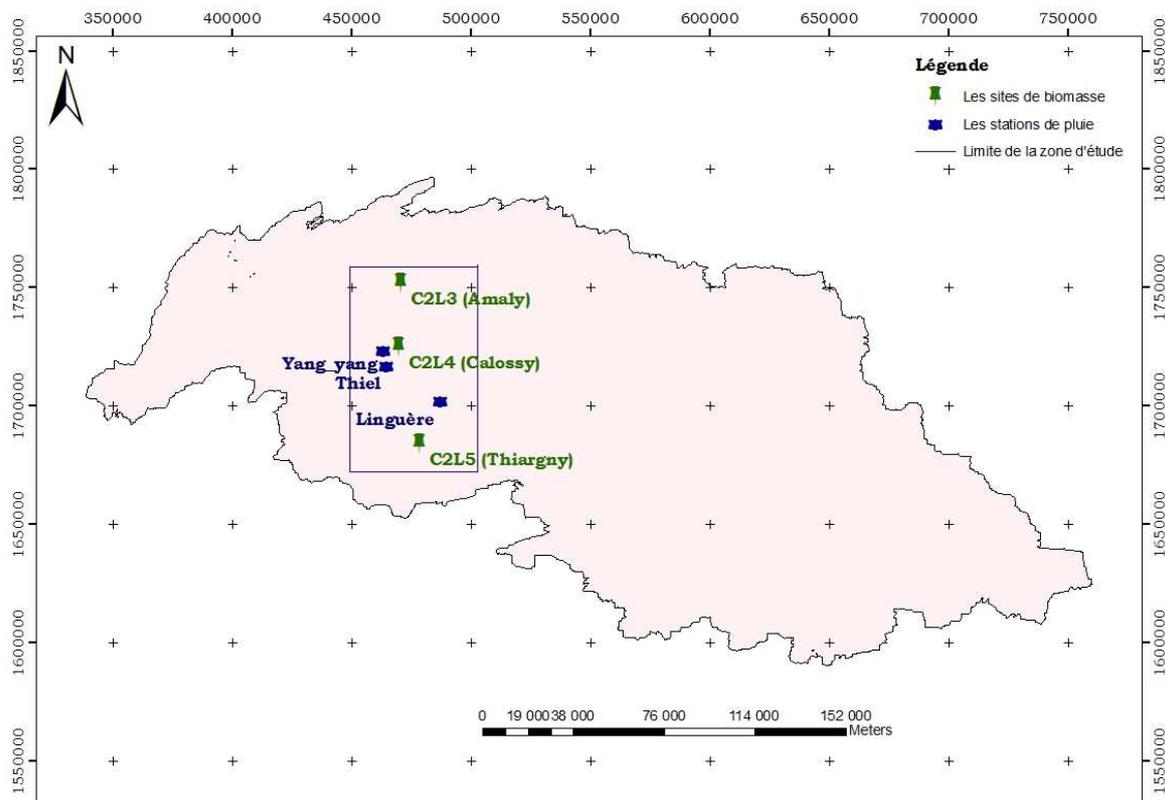
11). Chaque site d'une superficie de 3km X 3km (soit 9km<sup>2</sup>) est repéré par un arbre qui porte le chiffre 3 matérialisant le début du transect (voir ANNEXE -I). La biomasse est mesurée une fois par an en fin de saison correspondant au maximum de la biomasse, mais les estimations sont très sensibles à la date de mesure.

**Tableau II-1 :** coordonnées géographiques des stations pluviométriques de l'ANAMS dans la zone d'étude.

Sites pluviométriques	Longitude ouest	Latitude nord
Linguère	-15°12'	15°39'
Yang yang	-15°34'	15°59'
Thiel	-15°33'	15°53'

**Tableau II-2 :** coordonnées géographiques des sites de biomasse du CSE dans la zone d'étude.

Sites de biomasse	Longitude ouest	Latitude nord
C2L3 (Amaly)	-15°28'	15°84'
C2L4 (Calossy)	-15°29'	15°60'
C2L5 (Thiargny)	-15°20'	15°23'



**Figure II-11 :** Zone d'étude, sites d'échantillonnage de biomasse du Centre de Suivi Ecologique (CSE) et les stations de l'Agence Nationale de la Météorologie du Sénégal.

# CHAPITRE III

## LES CAPTEURS RADAR

La télédétection est une technique permettant d'obtenir de l'information sur des objets à distance. Cette technique a connu son développement depuis les années 1970 avec la mise en orbite de satellites, avec à leur bord des capteurs permettant des acquisitions multi-spectrales et multi-résolutions spatiales et temporelles. Elle est souvent utilisée pour cartographier les ressources naturelles. Certains capteurs, appelés systèmes passifs, sont conçus pour enregistrer la radiation solaire réfléchiée par la Terre, ou celle directement émise par la terre. Les capteurs RADAR font partie des capteurs dits actifs, c'est à dire fournissant leur propre source d'illumination, pouvant de ce fait observer tant la partie illuminée que la partie ombragée de la Terre. D'autre part, les données qu'ils acquièrent ont la particularité d'être peu perturbées par l'atmosphère et les nuages.

### III-1 / Théorie du RADAR

Le RADAR (*Radio Detection And Ranging*), est un système actif qui envoie un signal électromagnétique et enregistre le signal rétrodiffusé par les surfaces observées.

La figure III-1 trace l'historique de la mise en orbite de quelques capteurs radar spatiaux d'observation de la terre.

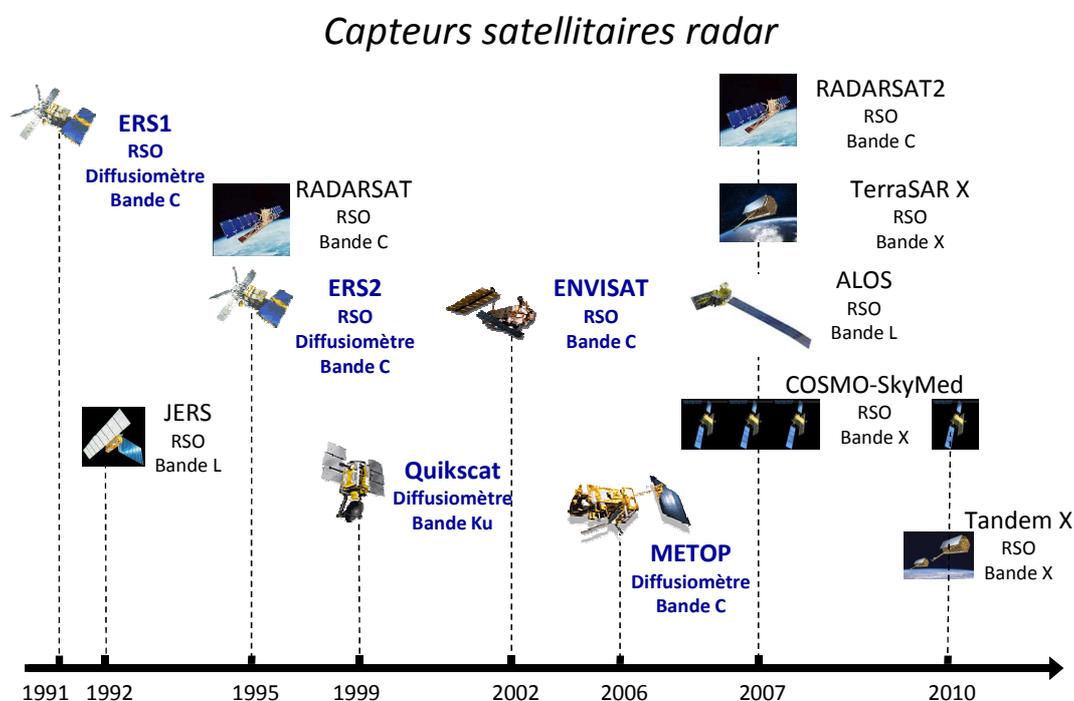


Figure III-1 : quelques capteurs radar mis en orbite ces dernières années.

### III-1-1/ Les fréquences

Les systèmes Radar utilisent une gamme de longueurs d'ondes qui s'étale de 1,3 m à 0,8 cm et dont les domaines sont détaillés dans la figure III-2. Cette région du domaine spectral a été divisée en sous régions, appelées bandes de fréquences, dont les noms proviennent des désignations militaires. En effet, pour garder secret le développement de ces systèmes, les militaires ont décidé de donner des noms de codes qui restent en usage aujourd'hui. Ces codes ont été adoptés aux Etats-Unis par l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Ils sont alloués au niveau international au sein de la Conférence Mondiale des Radiocommunications réunie tous les trois ans au sein de l'UIT (Union Internationale des Télécommunications). Cependant, certains utilisateurs des bandes radios, comme les télédiffuseurs et les industriels, ont remplacé les vocables traditionnels par leur propre identification. La fréquence est principalement choisie en fonction de l'application visée. Seuls les objets dont la taille typique est au moins de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde sont visibles. Par exemple, une forêt sera partiellement transparente pour les grandes longueurs d'ondes notamment la bande P ( $\lambda \approx 70$  cm), dans ce cas seuls les troncs d'arbres sont visibles. Par contre, la forêt sera opaque en bande X ( $\lambda \approx 3$  cm), où seule la canopée sera visible, car la longueur d'onde est de l'ordre de la taille des feuilles et des petites branches.

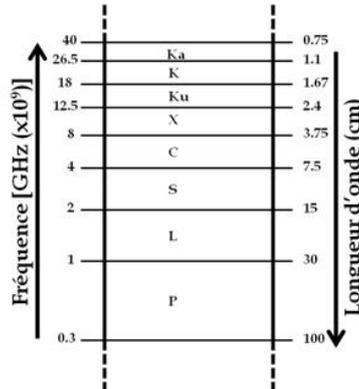


Figure III-2 : Bandes de fréquences utilisées en télédétection radar.

Les principales fréquences utilisées en télédétection radar listées dans la figure III-2 présentent chacune leurs spécificités :

**Bande P :** c'est une fréquence utilisée presque uniquement à des fins de recherche et de développement (exemple : *Earth Explorer* dont l'une des missions dénommée BIOMASS a pour but d'estimer la biomasse forestière). L'objectif est de mieux quantifier le rôle des écosystèmes terrestres dans le cycle de carbone (Le Toan *et al.*, 2008). Des informations supplémentaires sur cette mission sont disponible sur :

[http://www.esa.int/esaLP/SEMUE0AWYNF\\_index\\_0.html](http://www.esa.int/esaLP/SEMUE0AWYNF_index_0.html)

Gayane FAYE - 2012

**Bande L :** cette fréquence a souvent été utilisée dans les systèmes RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) expérimentaux conçus pour les militaires et pour les applications civiles. Les RSO opérant en bande L peuvent voir au travers des averses de pluies intenses avec un minimum d'atténuation. Leur capacité de pénétration de la canopée végétale, des glaciers, de la glace de mer et du sol est importante. On peut citer les capteurs japonais JERS et ALOS/PALSAR.

**Bande S :** Ces fréquences ne sont pas très utilisées pour les applications de RSO. Les capteurs opérant en bande S sont capables de voir au travers des nuages tropicaux et des averses de pluie avec un minimum d'atténuation. Sa capacité de pénétration de la canopée végétale et du sol est moyenne et est limitée aux couches supérieures. Ce qui peut présenter un intérêt pour le suivi des couverts végétaux.

**Bande C :** cette bande a été adoptée pour plusieurs des systèmes aéroportés expérimentaux ainsi que pour une série de satellites dont les systèmes ERS-1 et ERS-2 depuis 1991, le RSO d'Envisat et le RSO de RADARSAT. Les Radar en bande C ne sont généralement pas gênés par les perturbations atmosphériques et sont capables de voir au travers des nuages tropicaux et des averses de pluie. Leur capacité de pénétration de la canopée végétale et du sol est moyenne et est limitée aux couches supérieures. Cette bande est également utilisée pour les mesures de distances (altimétrie), pour la détection de cibles militaires et pour le téléguidage des missiles.

**Bande X :** cette bande a une bonne résolution spatiale (métrique). Elle est souvent utilisée pour des systèmes satellitaires RSO comme le capteur TerraSAR X mis en orbite en 2007. Les Radar imageurs opérant en bande X ne sont généralement pas gênés par les perturbations atmosphériques et sont capables de voir au travers des nuages et des averses de pluie. Une atténuation significative du signal peut toutefois survenir en cas de pluies intenses, particulièrement dans les régions tropicales. La capacité de pénétration de la canopée végétale et du sol est limitée aux couches supérieures.

**Bande Ku :** elle est souvent utilisée pour les radars de cartographie à haute résolution et l'altimétrie satellitaire, comme le capteur Seawind de QuikSCAT. Son problème réside dans sa sensibilité aux problèmes atmosphériques comme illustré dans le chapitre V.

**Bande K :** elle est utilisée en météorologie (elle est très absorbée par la vapeur d'eau) et dans les radars routiers.

**Bande Ka :** cette bande est souvent utilisée pour la cartographie, la surveillance des aéroports, les Radar routiers et les Radar anti-collision montés sur les voitures. Cette fréquence est utilisée par l'altimètre AltiKa (35.75 GHz).

### III-1-2/ Principes d'acquisition des images à visée latérale

Les Radars spatiaux sont des instruments embarqués à bord des satellites. Au cours de leur déplacement, ils émettent des impulsions successives avec fréquence de répétition notée PRF (*Pulse Repetition Frequency* ; figure III-3). Chaque impulsion correspond à une ligne de l'image qui est ensuite échantillonnée avec une Fréquence d'échantillonnage. Chaque échantillon correspond à un pixel. Au cours du déplacement de la plateforme, le capteur radar illumine une bande continue d'une largeur  $S$ , appelée fauchée, parallèle à la trajectoire du satellite.

Les signaux émis par les capteurs radar sont soit polarisés verticalement ou horizontalement (voir ANNEXE -II). Le radar mesure ensuite la composante verticale ou horizontale du champ électromagnétique rétrodiffusé.

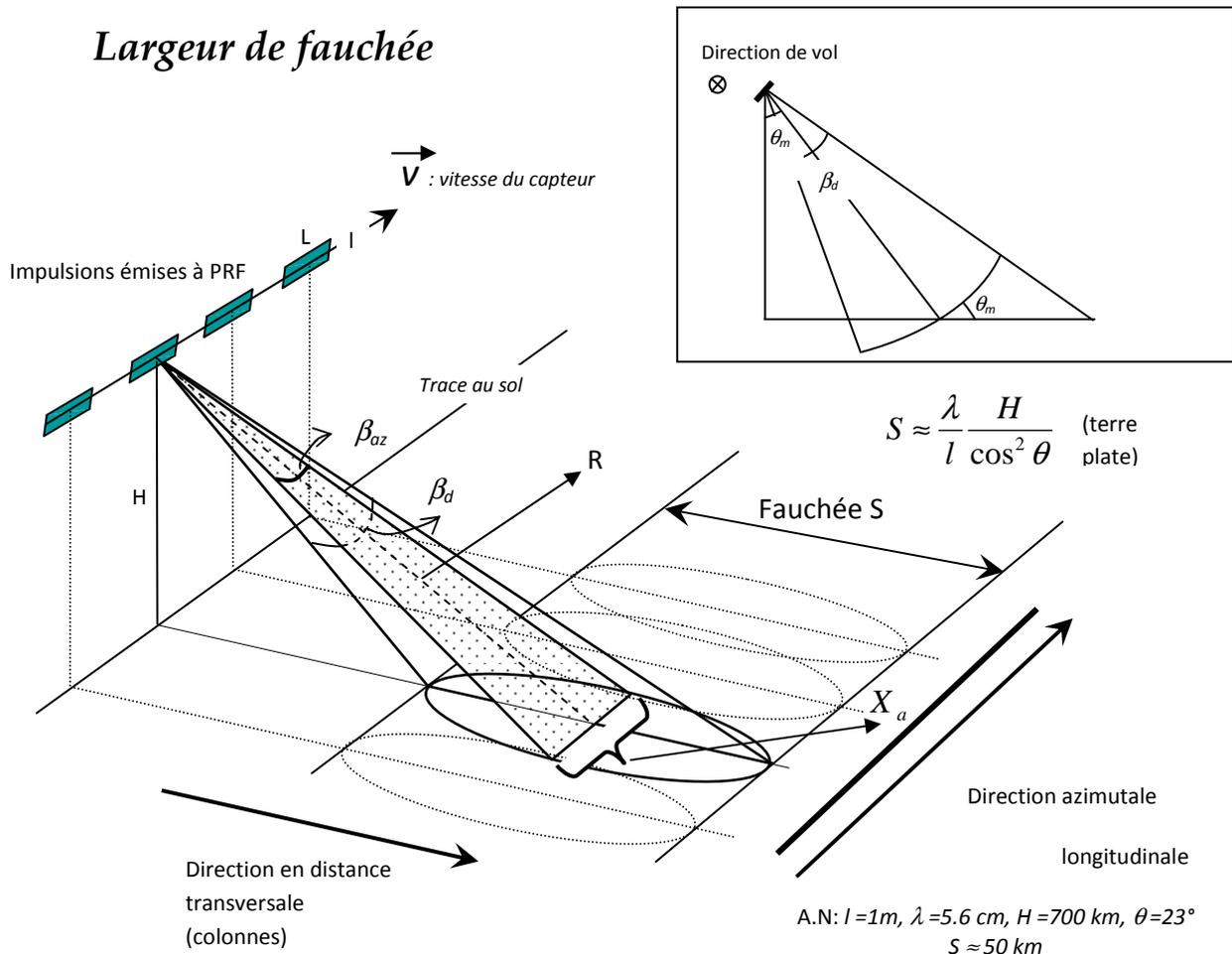


Figure III-3 : bande illuminée par le radar (fauchée) au cours de son déplacement.

### III-1-3/ La résolution spatiale

La résolution radar est un paramètre important. Elle caractérise la distance minimale séparant deux objets pour qu'ils puissent être discriminés dans l'image (capacité d'un radar à séparer deux cibles voisines). Elle se définit selon les deux directions, en distance (résolution radiale) et en azimut (Maitre et al, 2001).

#### III-1-3-a/ Résolution radiale

La résolution radiale (dans la direction de l'onde émise) est directement reliée à la durée  $\tau$ , de l'impulsion émise par le radar et se propageant à la vitesse  $c$ . Deux cibles séparées par une distance  $d$  dans la direction radiale pourront être distinguées par une impulsion si sa durée  $\tau$  vérifie ( $\tau \leq \Delta t = 2d/c$ ; comme illustré sur la figure III-4(a)), le radar recevra ainsi deux échos distincts. Le facteur 2 provient du fait du trajet aller retour. Dans le cas contraire, les échos successifs de deux cibles seront mélangés et confondus. Les échos des points A et C seront mélangés ce qui n'est pas le cas pour les points A et E.

La résolution radiale est donnée par :  $X_r = \frac{c\tau}{2}$

Une impulsion rectangulaire monochromatique de durée  $\tau$  est caractérisée par une bande passante  $B = \frac{1}{\tau}$ . La résolution radiale dans ce cas est :  $X_r = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B}$  (III-1)

La résolution radiale au sol  $X_{rs}$  s'obtient par projection au sol orthogonalement à la direction de propagation du signal (figure III-4(b)).

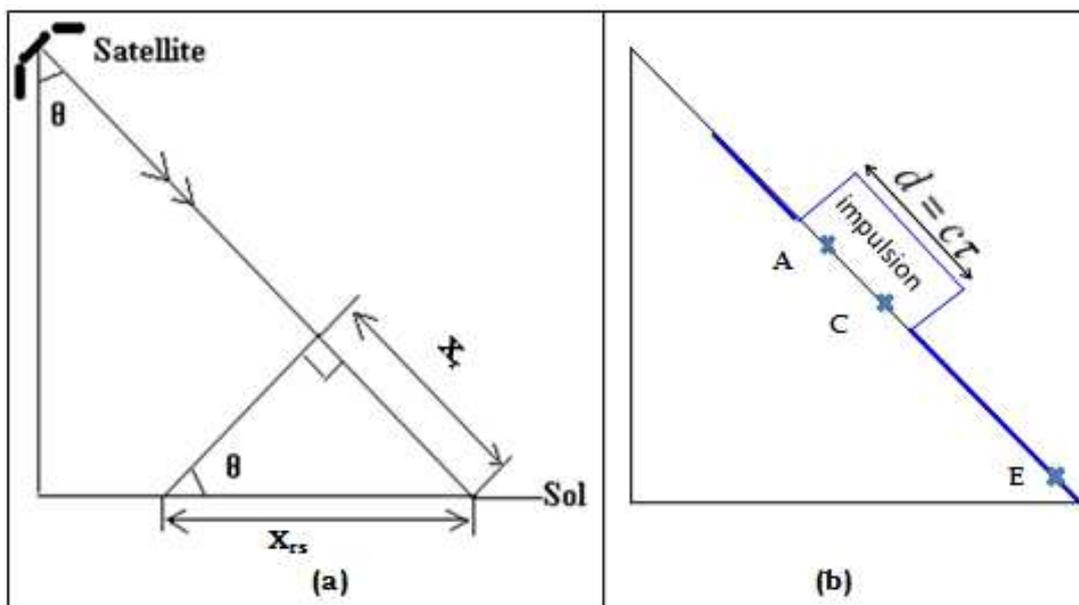


Figure III-4 : impulsion rectangulaire illuminant trois points distincts (a) Configuration de la résolution radiale au sol (b).

Elle est donnée par :  $X_{rs} = \frac{c}{2B \sin \theta}$  (III-2)

Pour une durée d'impulsion donnée, la résolution radiale au sol augmente avec l'angle d'incidence, introduisant ainsi une distorsion de l'image radar.

Si on prend l'exemple du radar à synthèse d'ouverture (RSO) à bord des satellites ERS,  $\tau = 37 \mu s$ ,  $\theta = 23^\circ$ , entraînant dans le cas d'une impulsion rectangulaire monochromatique une bande passante de  $B = \frac{1}{\tau} = 27 \text{ kHz}$ . Ce qui donne  $X_r = 5.5 \text{ km}$  et  $X_{rs} = 14.2 \text{ km}$ .

Pour avoir une meilleure résolution, il faudrait diminuer la durée de l'impulsion  $\tau$ . Mais cela aurait comme contrepartie de réduire trop fortement la puissance moyenne du signal ( $P_{moyenne} = P_c * \tau * PRF$ ). La technique dite de compression d'impulsion permet de garder  $\tau$  grand (et donc la puissance moyenne grande) tout en réduisant la résolution spatiale en augmentant artificiellement la bande passante  $B$ . La compression d'impulsion consiste à effectuer une corrélation entre l'écho reçu par le capteur et une réplique du signal émis (Elachi, 1988).

On montre que la corrélation entre les deux signaux n'est autre que la fonction d'auto corrélation du signal émis centré sur le temps aller-retour nécessaire à l'onde pour atteindre la cible. La résolution spatiale ne dépend donc que de la largeur du pic d'auto-corrélation de l'impulsion (figure III-5). Celle-ci est inversement proportionnelle à  $B$ . On crée donc une impulsion avec une large bande passante  $B$ , l'impulsion généralement utilisée est appelée *Chirp*.

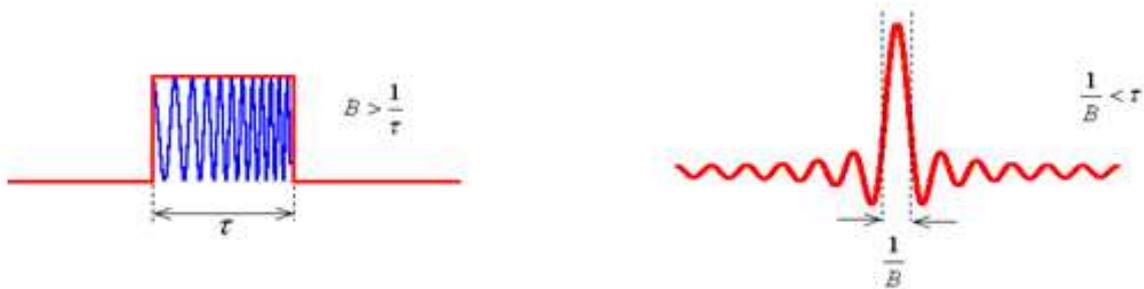


Figure III-5 : largeur du pic d'auto-corrélation de l'impulsion.

Le signal modulé peut s'écrire :  $f(t) = \cos \{2\pi (f_o t + \alpha t^2)\}$  (III-3)

Où  $\alpha$  est un facteur de modulation donné par :  $\alpha = \frac{\tau \cdot B}{2}$

En reprenant l'exemple du RSO d'ERS, le *chirp* est caractérisé par une bande passante  $B = 15.55 \text{ MHz}$ , on obtient une résolution radiale au sol de  $24.7 \text{ m}$  ce qui fait une amélioration d'un facteur d'environ 600 par rapport à une impulsion monochromatique.

### Taille des pixels en distance

Le signal est échantillonné en temps sur la direction radiale afin de donner une représentation non-ambigüe du signal modulé (Maître, 2001). La fréquence d'échantillonnage doit être supérieure à la valeur de modulation en fréquence du signal  $\Delta f$ .

$$\text{La taille du pixel en distance est donnée par : } \Delta_{\text{distance}} = \frac{c}{2Fe} \quad (\text{III-4})$$

$$\text{En le projetant au sol on obtient : } \Delta_{\text{distance-au-sol}} = \frac{\Delta_{\text{distance}}}{\sin(\theta)} = \frac{c}{2Fe \cdot \sin(\theta)} \quad (\text{III-5})$$

En reprenant l'exemple de ERS-1 avec une  $Fe = 18,96 \text{ MHz}$ , et une incidence variant de  $18^\circ$  à  $59^\circ$  au sol, le pas entre pixel en distance varie de 18 à 24m.

### III-1-3-b/ Résolution azimutale

La résolution azimutale d'un radar à ouverture réelle, c'est-à-dire dans le sens de l'avancement du satellite, est fonction de l'ouverture  $\beta$  de l'antenne. La résolution azimutale brute est donnée par :  $X_a = \beta_{az} * R$

Avec  $R = \frac{H}{\cos \theta}$  la distance antenne cible et  $\beta_{az} \approx \frac{\lambda}{D}$  l'ouverture angulaire et  $\lambda$  et  $L$  étant respectivement la longueur d'onde et la largeur de l'antenne,  $H$  l'altitude du capteur et  $\theta$  l'angle entre la verticale et la direction de l'onde incidente (figure III-3).

$$\text{Ce qui donne : } X_a = \frac{\lambda * H}{D * \cos(\theta)} \quad (\text{III-6})$$

Avec les caractéristiques du RSO d'ERS ( $L = 10 \text{ m}$ ,  $\lambda = 5.7 \text{ cm}$ ,  $hs = 785 \text{ km}$ ,  $\theta = 23^\circ$ ), on a  $X_a = 4.9 \text{ km}$ .

Le **SAR** a pour but d'améliorer cette **résolution azimutale**. Ceci se fait au détriment de la résolution radiométrique qui peut parfois compliquer l'interprétation visuelle d'une image (Cf Spekle, Annexe III). Contrairement au SAR, le **diffusiomètre** a pour mission d'obtenir une bonne **résolution radiométrique** (faible écart de réflectance radar détectable). Ceci se fait par moyennage au détriment de la résolution spatiale.

La différence de traitement entre le RSO et le diffusiomètre est développée dans les deux parties qui suivent.

## A- Le SAR (Synthetic Aperture Radar ; ou RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture)

### ➤ Résolution (azimutale)

La synthèse d'ouverture, ou compression d'impulsion en azimut, est une technique qui s'applique aux systèmes radars à visée latérale. Le traitement RSO donne accès à des résolutions azimutales bien meilleures, et donc à des produits d'imagerie plus intéressants tant sur le plan physique que thématique. Cependant cette technique se fait au détriment de la résolution radiométrique. Cette technique, consiste de manière similaire à la direction radiale, à faire une corrélation entre le signal reçu (de tous les retours d'impulsions pendant la durée d'illumination) et le signal d'une cible ponctuelle. Contrairement à la résolution radiale qui utilise une bande passante artificielle, elle est basée sur l'exploitation de la bande Doppler  $B_D = \frac{2v}{D}$  qui est naturelle, en raison du déplacement du capteur à la vitesse  $v$ .

La résolution azimutale théorique est donnée en fonction de la largeur de la bande d'acquisition Doppler par :  $X_a = v \cdot \delta t$

$$\text{Avec, } \delta t = \frac{1}{B_D}, \text{ ce qui donne : } X_a = \frac{v}{B_D} = \frac{vD}{2v} = \frac{D}{2} \quad (\text{III-7})$$

La résolution azimutale ne dépend alors que de la longueur de l'antenne réelle et non plus de l'altitude ni de la distance à la cible. Ainsi, plus l'antenne sera de taille réduite, meilleure sera la résolution azimutale. Cependant, certaines limites sont imposées par les développements techniques : l'antenne doit avoir une taille suffisante pour émettre assez d'énergie et permettre de mesurer les caractéristiques du signal réfléchi.

En reprenant l'exemple du SAR de ERS, on a  $D=10\text{m}$ , ce qui donne  $X_a= 5\text{m}$ .

### ➤ Taille des pixels en azimut

Sur la direction azimutale, le signal reçu est échantillonné en distance, la fréquence doit être supérieure à la largeur de la bande Doppler, en ne dépassant pas la résolution théorique (Maître et al., 2001). En azimut, le pas entre pixels est évidemment inhérent à la FRI (fréquence de répétition des impulsions) et à la vitesse  $v$  de progression du porteur principal d'éclairement par rapport au sol dans la direction azimutale.

$$\text{Elle est donnée par : } \Delta_{\text{azimuth}} = \frac{v}{FRI} \quad (\text{III-8})$$

Dans le cas des SAR de ERS, ou  $FRI \approx 1680 \text{ Hz}$  et  $V \approx 6720 \text{ m/s}$ , les pixels ont une taille de 4m en azimut.

## B- Les diffusiomètres

Les diffusiomètres spatiaux ont pour mission le suivi des océans, ce qui leur permet de se passer des hautes résolutions spatiales. Ils privilégient la résolution radiométrique par moyennage d'échantillons dégradant ainsi la résolution spatiale. Ceci se fait par la sommation de 2 ou plusieurs vues de la même scène de la surface observée par le radar. La formation d'une image multivues ou image « N vues » consiste à effectuer la moyenne de N échantillons indépendants (cf voir l'annexe III). La figure III-6 présente un diffusiomètre à visée latérale (a) avec une cellule de résolution azimuthale associée aux 384 vues moyennées

(b), ce qui donne un coefficient de variation  $C = \frac{0.523}{\sqrt{384}}$  (III-9)

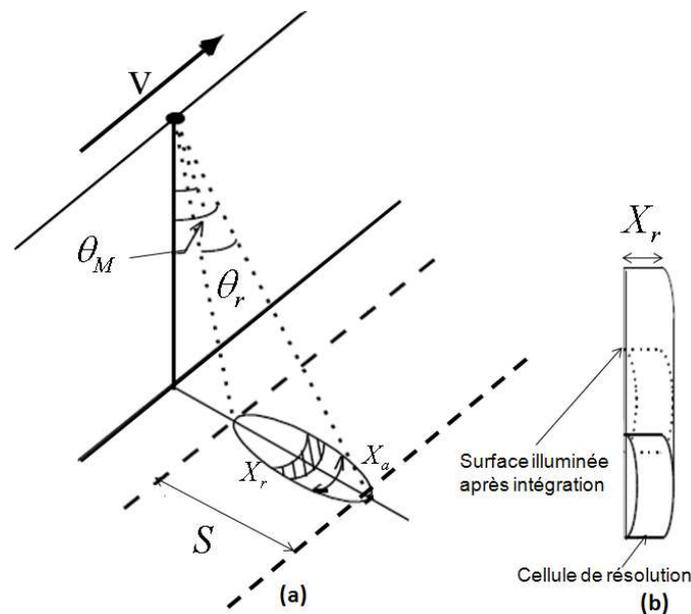


Figure III-6 : a) diffusiomètre à ouverture latérale - b) cellule de résolution.

Pour le diffusiomètre ERS ( $L = 2.5$  ou  $3.6$  m selon l'antenne,  $\theta$  compris entre  $18$  et  $59^\circ$ ),  $X_a$  va de  $13.7$  à  $26.2$  km.

Il existe quatre types de prise de vue selon le diffusiomètre concerné (figure III-7).

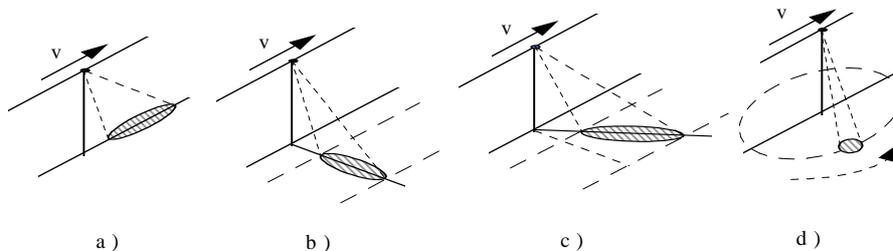


Figure III-7 : Les différentes formes de prise de vue des diffusiomètres spatiaux : a) visée avant, b) visée latérale, c) visée oblique, d) visée à balayage conique d'après Elachi et al (1987).

### III-1-4/ Equation radar

En télédétection radar, la mesure la plus fréquemment utilisée porte sur le coefficient de rétrodiffusion radar, proportionnel au rapport entre la puissance reçue et la puissance émise par l'antenne. En effet, quand une onde émise par un radar rencontre une cible, celle-ci renvoie une partie de l'énergie reçue qui sera captée en retour. La puissance de l'onde rétrodiffusée est fonction des caractéristiques de la surface observée et des paramètres du système. La section efficace radar est une grandeur caractéristique de la cible. Elle est définie par le rapport de la puissance totale diffusée de façon isotrope par un diffuseur équivalent et de la densité de puissance incidente (Curlander et Mc Donough, 1991)

$$\sigma^b(o,i) = 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \text{ (m}^2\text{)} \text{ (III-10)}$$

Avec  $E_i$  champ incident et  $E_s$  champ diffusé et  $R$  distance entre l'antenne et la cible.

L'équation radar permet d'établir l'expression du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^o$  en fonction de la puissance émise et reçue, ainsi que des paramètres du système (Ulaby et al., 1982) :

$$P_r = P_e \frac{G_e(r_1)}{F_e} \frac{1}{4\pi r_1^2} \frac{G_r(r_2)}{F_r} \frac{1}{4\pi r_2^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} \sigma^b(o,i) \text{ (III-11)}$$

Dans le cas des diffusiomètres spatiaux où l'antenne émettrice est la même que l'antenne de réception (cas monostatique),  $r_1 = r_2 = R$ , et  $G_e = G_r = G$ , l'équation radar se réduit à :

$$P_r = P_e \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^2 R^4 F} \sigma^0(-i,i) \text{ (III-12)}$$

Ce qui donne :

$$\sigma^0(-i,i) = \frac{(4\pi)^3 R^4 F}{G^2 \lambda^2} \frac{P_r}{P_e} \text{ (III-13)}$$

Où :

- $\lambda$  : longueur d'onde dans le vide ou dans l'air.
- $G$  : gain de l'antenne à l'émission ou à la réception
- $F$  : facteurs de perte à l'émission et la réception de l'antenne
- $R$  : distance entre la cible - antenne
- $P_e, P_r$  : Puissance émise et reçue. La puissance reçue est moyennée sur toutes les contributions de la zone éclairée.

Le coefficient de rétrodiffusion représente la somme des sections efficaces de tous les diffuseurs de la surface  $ds_k$  composant la surface illuminée. Il est donné par :

$$\sigma^{\circ} = \left\langle \frac{\sigma_k^b(-i, i)}{dS_k} \right\rangle (m^2/m^2) \quad (\text{III-14})$$

Le coefficient de rétrodiffusion radar étant une grandeur sans dimension, il est généralement exprimé en décibels.

$$\sigma_{dB}^{\circ}(\theta) = 10 \log \sigma^{\circ}(\theta) \quad (\text{III-15})$$

Le coefficient de rétrodiffusion radar est fonction des paramètres de la surface observée d'une part, et d'autre part des caractéristiques de l'onde et/ou reçu (angle d'incidence, polarisation, longueur d'onde).

### **III-2/ Les capteurs utilisés**

Nous avons dans le cadre de cette thèse utilisé les données des diffusiomètres ESCAT de ERS, ASCAT de METOP et SeaWinds de QuikScat ainsi que du SAR ASAR de ENVISAT.

Fonctionnel depuis 1991, ERS est le premier diffusiomètre à avoir fourni plus de 20 ans d'observations, ce qui présente un grand atout pour un suivi à long terme. Le diffusiomètre QuikSCAT mis en orbite depuis 1999 présente comme principal avantage la répétitivité temporelle élevée (il balaie 90% de la surface terrestre en une journée), ce qui permet d'avoir une acquisition tous les 2 jours en zone tropicale et quasi journalière en zone tempérée. Avec une fréquence de 13,4 GHz (bande Ku) et deux polarisations (HH et VV), les données de ce diffusiomètre nous permettront de regarder l'influence de la fréquence et de la polarisation sur la réponse radar. A l'instar du diffusiomètre Quikscat, l'instrument ASCAT (fréquence 5,255 GHz) est caractérisé par une répétitivité temporelle élevée (en moyenne une mesure tous les jours). L'aspect multi polarisations et multi résolution (de 20 m à 1 km) du capteur ASAR (bande C) devrait permettre d'améliorer la connaissance physique de la mesure et la cartographie et le suivi des états de surface.

#### **III-2-1/ Le diffusiomètre ESCAT à bord de ERS**

Le diffusiomètre ESCAT à bord des satellites ERS comprend trois antennes fonctionnant en bande C, à 5,3 GHz, et en polarisation verticale (VV) (voir II-1.3). Celles-ci acquièrent des mesures correspondant à une cellule de faible résolution spatiale (environ 50 km) sur une large gamme d'incidence (de 18° à 59°). Au cours de son déplacement, le diffusiomètre ERS balaie une bande au sol de 500 km avec ses trois (3) antennes de mesure : l'antenne du milieu (*Midbeam*) à visée latérale et les antennes avant (*forebeam*) et arrière (*aftbeam*) à ouverture oblique (figure III-8). Les antennes avant et arrière illuminent un nœud au sol avec le même angle d'incidence d'environ 10° supérieur à celui correspondant à l'antenne du milieu, mais à des angles azimutaux différents.

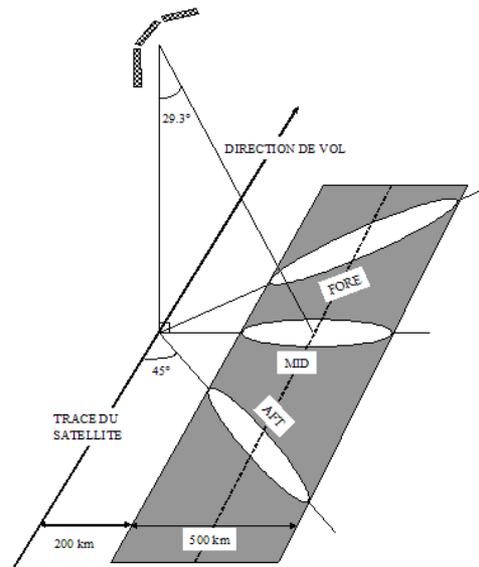


Figure III-8 : Description géométrique des diffusiomètres radar (modifié d'après Frison et Mougin, 1996).

Afin de réduire le bruit du speckle cohérent à la physique du radar, une mesure est le résultat de la somme incohérente de 100 échos successifs. La surface au sol associée à ce processus d'intégration correspond à :  $N \cdot PRF \cdot V \approx 85 \text{ km}$ .

Avec PRF la *Pulse Repetition Frequency* (fréquence de Répétition des impulsions) et égale à 115 Hz dans le cas d'ERS ;

V la vitesse du capteur ;

N le nombre d'impulsions intervenant dans la mesure.

Une pondération par une fenêtre de Hamming (Hans et al. 1986) permet d'obtenir des cellules de résolution à peu près circulaire d'environ 50km de diamètre. Chaque mesure correspond à l'interaction d'un maillage de 25 km de côté décomposant la fauchée (figure III-9). Le coefficient de rétrodiffusion de chaque nœud est mesuré quasi-simultanément par les trois antennes.

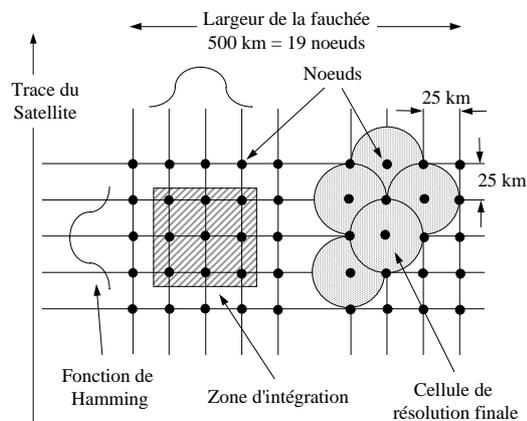


Figure III-9 : Principe de filtrage spatial.

### III-2-2/ Le diffusiomètre Seawind à bord de Quikscat

QuikSCAT (Quick SCATterometer) est un satellite américain d'observation de la terre, il a été lancé le 19 juin 1999 par la NASA. Ce satellite est programmé pour un cycle orbital de 4 jours. L'instrument SeaWind à son bord est un diffusiomètre rotatif à incidence constante (figure III-7), il fonctionne en bande Ku (13,4 Ghz).

Ce diffusiomètre délivre de façon indépendante deux spots d'illumination en polarisation HH et VV, faisant respectivement un angle de  $40^\circ$  et de  $46^\circ$  par rapport au nadir, correspondant à une incidence de  $46^\circ$  et  $54^\circ$  au sol comme illustré sur la figure III-10. La surface illuminée par chaque spot est une ellipse de 37 km dans la direction radiale et 25 km dans la direction azimutale.

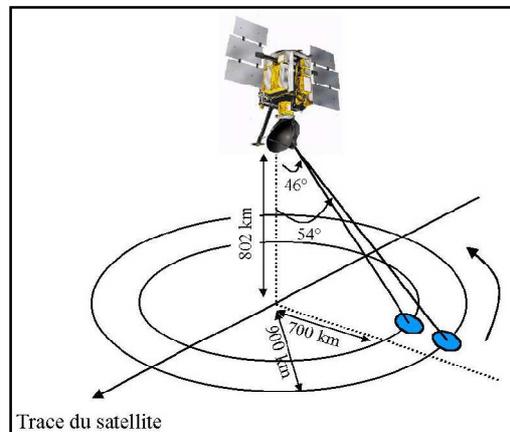


Figure III-10 : Géométrie d'acquisition du diffusiomètre Seawind de Quikscat ( Spencer et al., 1997).

Avec la rotation de l'antenne, ce radar balaie une surface (fauchée) de part et d'autre du nadir, de 1414 km pour le faisceau interne (polarisation HH), et 1800 km pour le faisceau externe (polarisation VV ; Figure III-11). L'instrument SeaWind balaie en moyenne 90% de la surface du globe en une journée (figure III-12). Ce qui donne en moyenne une acquisition tous les 2 jours en zone tropicale et quasi journalière en zone tempérée. Pour plus d'information sur les données de ce capteur voir ANNEXE -IV.

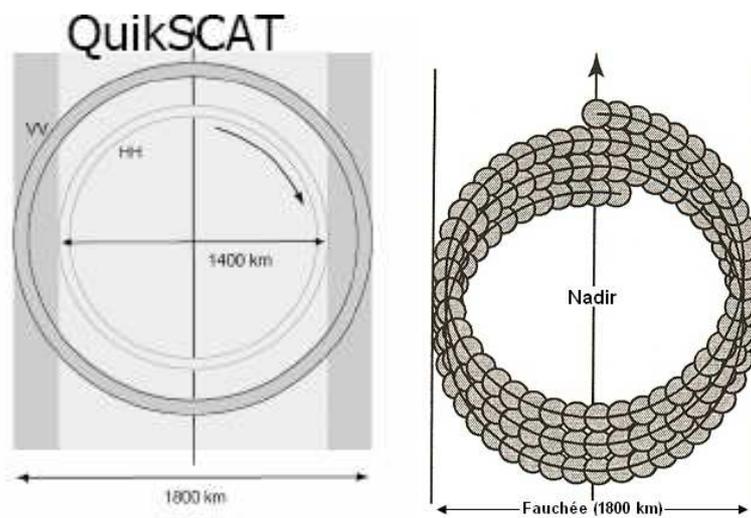


Figure III-11 : Fauchée extérieure du diffusiomètre Quikscat.

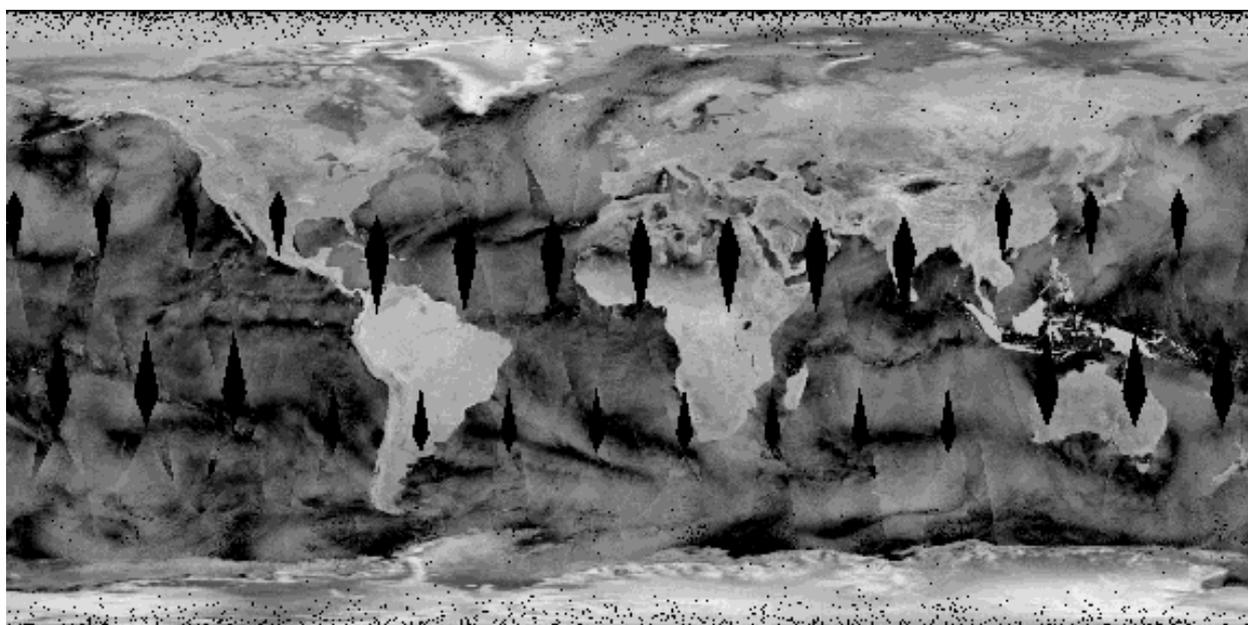


Figure III-12 : Surface balayée par le radar Quikscat durant la journée du 1<sup>er</sup> janvier 2001 (Dunbar, 2001).

### III-2-3/ Le diffusiomètre ASCAT à bord de Metop

Le satellite **MetOp** (**M**eteorological **O**perational) a été mis en orbite depuis 2006. Sa période de révolution est de 101 minutes si bien qu'il survole l'équateur au moins 14 fois par jour (figure III-13). L'instrument ASCAT (*A*dvanced *S*catterometer) à son bord, est un radaropérant à une fréquence 5,255 GHz (Bande C) et en polarisation verticale (VV).

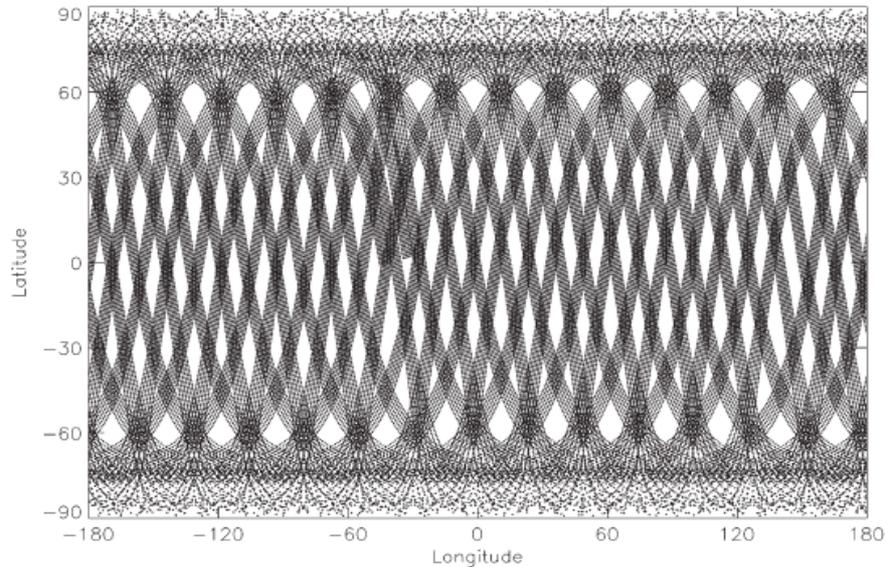


Figure III-13: Surface balayée par le capteur MetOp en une journée (Figa-Saldaña et al., 2002).

À l'instar du diffusiomètres ERS, le système géométrique de ASCAT est basé sur l'usage de trois paires d'antennes de chaque côté. Cela lui permet de délivrer des mesures le long de deux fauchées de 500 km de large, de part et d'autre de sa trace au sol (Figures III-14 et III-15),

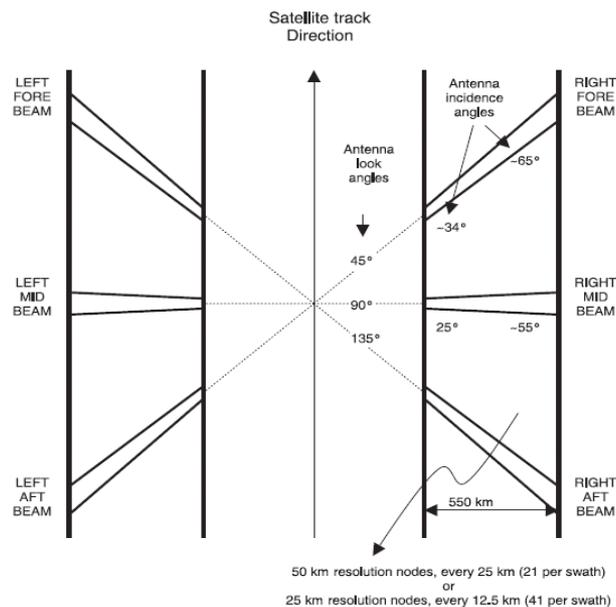


Figure III-14 : description physique du capteur ASCAT.(Figa-Saldaña et al., 2002).

**ASCAT** (*Advanced scatterometer*) délivre des mesures le long de deux fauchées de 500 km de large, de part et d'autre de sa trace, à raison d'une mesure tous les 12,5 km.

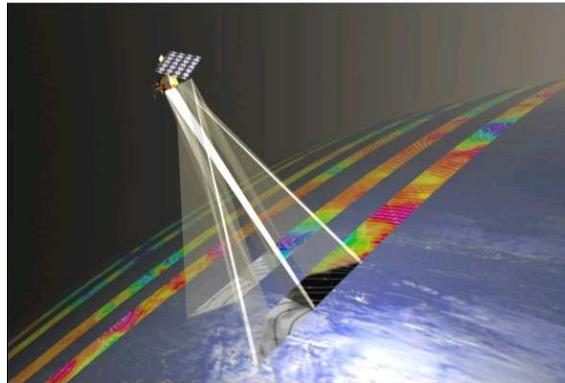


Figure III-15 : Principe de l'acquisition des données par l'instrument ASCAT (Copyright EUMETSAT).

Les données ASCAT sont prises à des incidences comprises entre 25 et 65 °.

Le traitement des mesures ASCAT conduit à la génération de plusieurs produits. J'ai utilisé les données de type 1b qui contiennent les coefficients de rétrodiffusion radar  $\sigma^{\circ}$ .

- **ASCSZO Level 1B product type**(résolution 50 km) ;
- **ASCSZR Level 1B product type** (résolution 25 km) ;

Les données de niveau 1b sont des coefficients de rétrodiffusion calibrés radiométriquement ( $\sigma^{\circ}$ ). La société EUMESAT procède au prétraitement des échos radar, de l'étalonnage et correction du bruit. Les coefficients de rétrodiffusion sont ensuite normalisés à 256 valeurs. Un moyennage spatial (lissage) est ensuite appliqué sur toutes les valeurs  $\sigma^{\circ}$ , avec comme objectif d'obtenir un ensemble de trois valeurs  $\sigma^{\circ}$  (une pour chaque faisceau) pour chaque nœud. Comme pour les données ESCAT, la fonction de pondération utilisée pour ces données est une fenêtre de Hamming à deux dimensions, centrée sur chaque nœud. La largeur des nœuds détermine en effet la résolution spatiale des données de sorties. On obtient ainsi deux valeurs du coefficient de rétrodiffusion à 50 et 25 km de résolution spatiale correspondant à des grilles de 25 et 12,5 km respectivement(<http://archive.eumetsat.org/umarf/>).

### III-2-4/ Le Radar à Synthèse d'ouverture (SAR) à bord d'ENVISAT

Le capteur ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*) embarqué à bord du satellite ENVISAT était fonctionnel du 28 février au 1<sup>er</sup> mars 2002. Sa période de révolution est de 101 minutes et son cycle orbital est de 35 jours. ENVISAT possède à son bord 10 instruments hautement spécialisés fournis par l'ESA (European Space Agency) et par plusieurs pays européens

Le radar ASAR à bord du satellite ENVISAT est équipé d'un nouveau système d'antenne constitué de 20 plaques. Chacune peut être configurée et orientée indépendamment, ce qui offre des acquisitions dans différents modes. Cette antenne permet de sélectionner différentes fauchées, d'une largeur de 100 à 400 km. Le radar ASAR fonctionne avec une fréquence de 5.331 GHz (bande C).

Ce capteur fournit des images avec deux polarisations simultanément (HH et HV ; HH et VV ; ou VV et VH) d'une part, et d'autre part avec une large gamme d'angles d'incidence (15° à 45°) et de résolutions spatiales (30, 150 et 1000 m ; Torres et al., 1999). Il y a cinq modes d'acquisition (figure III-16) :

- le mode **IM** (*Image Mode*), qui fournit des images avec une résolution spatiale de 30 m, en polarisation HH ou VV. Il contient sept fauchées et une gamme d'angles d'incidence entre 15° et 45° (tableau III-1). La largeur de la fauchée est entre 56 km et 100 km ;

Tableau III-1 : Les sept fauchées et l'angle d'incidence correspondant pour l'image Mode d'ASAR.

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

- Le mode **APM** (*Alternating Polarisation Mode*), est identique au mode précédent (IM) mais en plus, il peut fournir simultanément des images avec deux polarisations : HH et VV ou HH et HV ou VV et VH ;

- Le mode **WSM** (*Wide Swath Mode*) fournit quant à lui des images avec une résolution spatiale de 150 m et en polarisation HH ou VV. La largeur du faisceau est de 405 km ;

- Lemode **GM** (*Global Monitoring Mode*) est semblable au mode WSM mais avec une résolution spatiale de 1 km ;
  - Le mode **WM** (*Wave Mode*), permet d'obtenir des images avec une résolution spatiale d'environ 30 m en polarisation HH ou VV. La largeur du faisceau est de 5 km.
- Nous avons dans cas de cette étude, utilisé les données en mode APM et WSM.

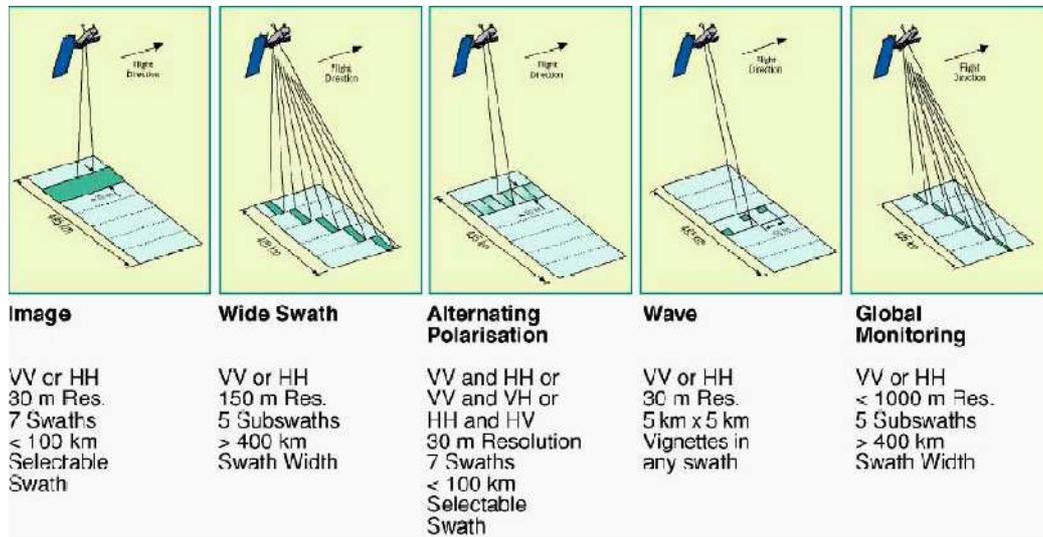


Figure III-16 : Mode d'opération du capteur ASAR (source : <http://earth.esa.int/envisat>).

Les images ASAR mises à notre disposition ont été toutes acquises en polarisation HH. En effet, les images radar nécessitent plusieurs prétraitements avant de pouvoir être exploitables. Cette étape consiste, d'une part à calibrer les images ASAR pour transformer les valeurs numériques (DN) des images en des coefficients de rétrodiffusion ( $\sigma^0$  en dB), et d'autre part à géoréférencer les images ASAR.

Les données ASAR reçues sont en valeur numérique radar (*Number Digitbrute*), le calcul de l'image coefficient de rétrodiffusion est effectué avec le logiciel BEST. Le calcul s'effectue selon :

$$\sigma^0(\theta) = \frac{DN^2 \sin \theta}{K} \quad \text{(III-16)}$$

DN la valeur numérique de chaque pixel appelé *Digital Number*

$\theta$  l'angle d'incidence de mesure du pixel correspondant

K la constante de calibration qui est fonction de l'angle d'incidence et du mode d'acquisition.

Les caractéristiques de chaque image (largeur de l'image, constante de calibration ainsi que l'angle d'incidence pour seulement 11 pixels) sont données dans son fichier header. L'image d'incidence est déduite de l'interpolation linéaire par :  $\theta_i = A_i + B$

Avec A et B les coefficients à déterminer.

Mais auparavant, les images doivent être replacées dans leur géométrie d'acquisition. En effet, les images acquises en mode descendant sont inversées droite gauche, ce qui fait que le

Gayane FAYE - 2012

premier pixel de l'image acquise correspond au dernier de la scène (figure V-17etV-18). En mode ascendant, l'image acquise a subi une inversion haut-bas mais le numéro des pixels dans la direction de visée du capteur n'a pas changé. Les coefficients de rétrodiffusion sont donc donnés par :

$$\text{En mode descendant} \quad \sigma^\circ = \frac{DN^2 \sin(A(N-i+1)+B)}{K} \quad (\text{III-17})$$

$$\text{En mode ascendant} \quad \sigma^\circ = \frac{DN^2 \sin(Ai+B)}{K} \quad (\text{III-18})$$

$N$  étant la largeur de l'image et  $i$  le numéro du pixel.

$$\sigma^\circ dB(\theta) = 10 \log \sigma^\circ(\theta) \text{ (dB)}$$

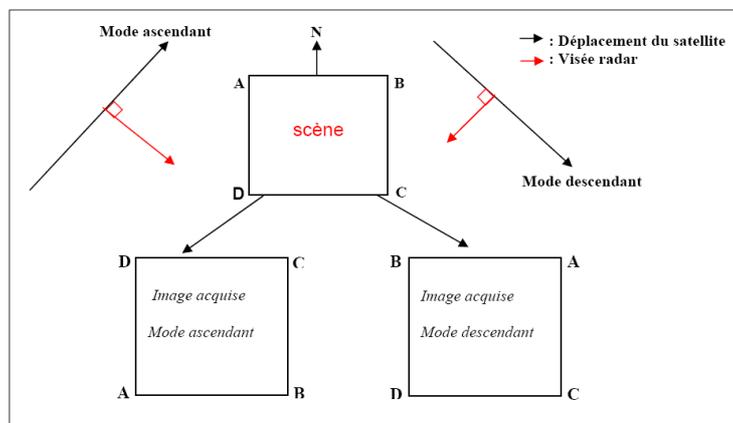


Figure III-17 : Géométrie d'acquisition ASAR (Holah, 2005).

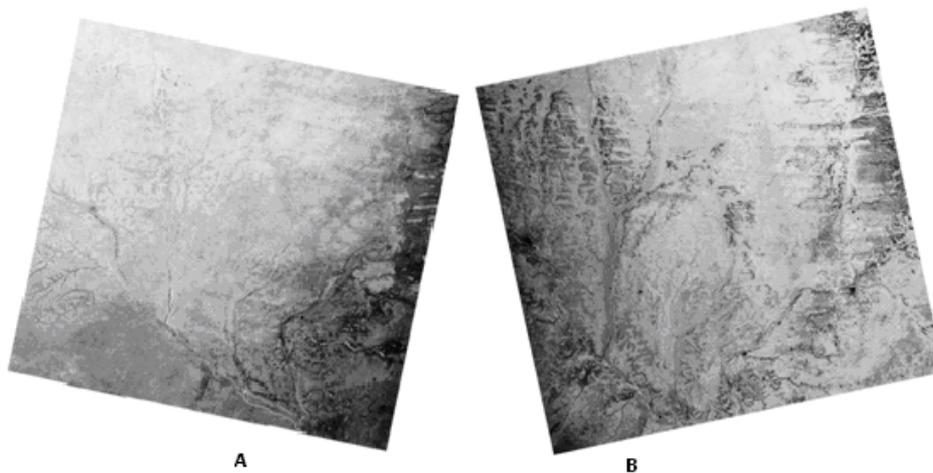


Figure III-18 : image ASAR acquise en mode ascendant (A) et en mode descendant (B).

# CHAPITRE IV

## LES MODELES DE SIMULATION

Pour les besoins de ce travail, nous avons utilisé deux types de modèles :

- Un modèle (STEP ; Mougin et al., 1995) simulant le fonctionnement des surfaces sahéliennes notamment l'humidité du sol et la production herbacée à un pas de temps journalier, à partir des données météo (pluviométrie, températures), et de mesures *in situ* de biomasse.
- Un modèle électromagnétique permettant de simuler l'interaction d'une onde électromagnétique avec une surface terrestre, décrite dans notre cas par le modèle STEP. Ce qui va permettre de « confronter l'évolution temporelle des simulations du coefficient de rétrodiffusion aux mesures satellitaires, afin d'analyser la validité des modèles dans la zone pastorale du Ferlo. Cette méthode étant déjà validée dans d'autres régions sahéliennes notamment le Gourma au Mali (Frison et al., 1998 ; Jarlan et al., 2002) et le Fakara au Niger (Zine, 2004). Une fois validé, le modèle de transfert radiatif permet par inversion de calculer la production végétale ainsi que l'humidité du sol à partir des mesures radar.

#### **IV-1/ Modèle STEP**

Le modèle STEP (*Sahelian Transpiration Evaporation and Production model*) est un modèle de fonctionnement qui permet de simuler la dynamique de croissance de la végétation herbacée sahélienne et des variations de l'état hydrique du sol à un pas de temps journalier (Mougin et al., 1995a). STEP est basé sur un modèle original développé pour les zones semi-arides tunisiennes (Rambal, 1980) et adapté pour la zone sahélienne dans le but du couplage avec la télédétection dans l'optique (Lo Seen et al., 1995) et les micro-ondes (Frison et al., 1998 ; Jarlan et al., 2002). Ce couplage a pour but de pouvoir interpréter la variabilité temporelle des observations satellitaires.

Les différentes caractéristiques du système Sol-Plante-Atmosphère jugées pertinentes pour simuler la croissance aérienne de la végétation herbacée annuelle ainsi que les variations de l'état hybride du sol sont prises en considération. Les variables d'entrée de ce modèle sont la pluviométrie, le rayonnement solaire, les températures maximales et minimales journalières, la composition minéralogique sol, ainsi que de la biomasse totale annuelle mesurée *in situ*, qui permet de contraindre l'amplitude des simulations temporelles de la végétation. A partir de ces mesures, STEP simule l'évolution temporelle des paramètres de surface (l'humidité du sol et la biomasse).

Les données de production de biomasse utilisées dans cette étude proviennent des mesures *in situ* réalisées par le Centre de Suivi Ecologique (CSE) de Dakar à la fin de la saison des pluies, lorsque la végétation est à son maximum de développement. Le calage des simulations avec les mesures *in situ* permet de contraindre l'amplitude des simulations temporelles de la végétation. La méthode d'échantillonnage des mesures *in situ* de la production végétale est détaillée en ANNEXE -I. Les données météo ont été acquises à partir des trois stations météorologiques (Linguère, Yang-yang et Thiel) se trouvant dans notre zone d'étude par l'Agence Nationale de la Météorologie du Sénégal (DMN).

Le modèle STEP comprend deux modules interdépendants que sont le module de croissance de plante et le module du bilan hybride du sol. Les deux modules sont liés par les échanges d'eau entre la plante, le sol et l'air. Parmi ceux-ci, l'évapotranspiration  $AET$  qui représente l'eau perdue sous forme de vapeur par évaporation  $E$  et Transpiration  $Tr$ . Elle dépend de l'évapotranspiration potentielle  $ETP$  (l'eau susceptible d'être perdue dans les mêmes conditions quand elle n'est plus limitante), qui est fonction de la température maximale et minimale journalière ainsi que de la latitude et de l'altitude.

$$AET = E + Tr = \left( \left( \frac{1}{r_{sol}} \right) fs + \left( \frac{1}{r_{cov}} \right) fg \right) .ETP \quad (IV-1)$$

- $r_{sol}$  : résistance du sol aux échanges d'eau, qui dépend de la quantité d'eau dans le sol ( $W$ ) et sa capacité de champ ( $F_c$  ; Van Keulen, 1975).
- $r_{cov}$  la résistance de la canopée aux échanges d'eau, fonction du potentiel hybride foliaire ( $\psi_l$ ) simulé par le modèle.
- $fs$  et  $fg$  sont respectivement la fraction de sol nu et du couvert herbacé.

#### **IV-1-1/ Module de croissance végétale**

La production herbacée totale représente la somme de la biomasse verte et sèche (paille et litière),  $B_{mt}(t) = B_{mv}(t) + B_{ms}(t) + B_l(t)$

Avec :

- $B_{mt}(t)$  : Biomasse totale présente à l'instant  $t$ .
- $B_{mv}(t)$  : Biomasse verte à l'instant  $t$  ;
- $B_{ms}(t)$  : Biomasse morte debout à l'instant  $t$  ;
- $B_l(t)$  : Biomasse de litière (biomasse au sol) à l'instant  $t$  ;

Ces différentes variables varient au cours de l'année. Cette croissance aérienne des plantes résulte d'un bilan effectué entre la production de matière issue de la photosynthèse  $P_g$ , les

pertes par respiration  $R_t$ , la sénescence  $S_{Bm}$ , la chute des pailles constituant la litière  $L_{Bm}$  et la décomposition de cette litière  $D_{Bm}$ .

La représentation mathématique de ces variations dans le temps donne :

$$\frac{dB_{mv}}{dt} = P_g - R_t - S_{Bm} \quad (\text{IV-2})$$

$$\frac{dB_{ms}}{dt} = S_{Bm} - L_{Bm} \quad (\text{IV-3})$$

$$\frac{dB_l}{dt} = L_{Bm} - D_{Bm} \quad (\text{IV-4})$$

Le taux de recouvrement de la végétation herbacée  $C_h$  et la hauteur du couvert  $h_c$  sont calculés à l'aide de relations empiriques établies à partir de mesures de terrain (Mougin *et al.*, 1995a). Les variables qui régissent la croissance de la biomasse aérienne (photosynthèse, respiration et sénescence) sont exposés en ANNEXE -V. La photosynthèse ainsi que le taux de sénescence dépendent de la disponibilité en eau dans la couche racinaire. Le développement de la végétation est donc étroitement liée à la disponibilité de l'eau dans le sol, qui est fonction de la capacité de rétention du sol et de la quantité d'eau pénétrant dans le sol jusqu'aux racines de la plante. La variation de la quantité d'eau disponible dans les différentes couches est décrite dans le paragraphe suivant.

#### **IV-1-2/ Module du bilan hydrique**

Le bilan hydrique dépend des pluies journalières et de la redistribution de l'eau tombée au sol suite aux phénomènes de ruissellement, percolation, drainage, évaporation et de transpiration. Le profil du sol est divisé en 4 couches caractérisées par leur texture et leur épaisseur : 2, 28, 70 et 200 cm. Le tableau IV-1 détaille les valeurs des paramètres utilisés dans le cas du Ferlo.

Tableau IV-1 : valeurs des paramètres de sol utilisé pour le cas du Ferlo.

Numéro couche	1	2	3	4
Épaisseurs des couches (cm)	2	28	70	200
Stock d'eau initial (Quantité d'eau contenue dans le sol exprimée en épaisseur de lame d'eau en millimètres)	0.02	3.5	4.3	5.6
Pourcentage argile	3.1	3.5	4.3	5.6
Pourcentage sable	95.0	94.4	93.9	93.0
Fraction biomasse racinaire (couches 1, 2, 3) en %	0.75	0.2	0.05	
Biomasse initiale verte et sèche (Kg.MS/ha)	0.0	0.0		

Pour chacune d'elles, le potentiel hybride, aussi appelé succion ou tension du sol (pression qu'il faut appliquer au sol pour libérer 1g d'eau)  $\psi_s$  est calculé

$$\psi_{s,i} = a_i * W_i^{-b_i} \quad (\text{bars}) \quad (\text{IV-5})$$

Où  $W_i$  représente la quantité d'eau dans la couche  $i$ .  $a_i$  et  $b_i$  deux constantes liées à la texture du sol.

Les variations de la quantité d'eau  $W_1$  dans la couche supérieure (couche numéro 1) est fonction du bilan entre les apports de la pluie ( $P$ ), les ruissellements ( $R$ ), les pertes (vers la couche inférieure) par drainage ( $D_1$ ), l'évaporation ( $E_1$ ) et la transpiration ( $Tr_1$ ), elles sont données par :

$$\frac{dW_1}{dt} = P - R - E_1 - Tr_1 - D_1 \quad (\text{IV-6})$$

Pour les autres couches, en plus de l'évapotranspiration, on peut rajouter les pertes (vers la couche inférieure) et les apports (de la couche supérieure) par drainage ( $D_i$ ). La variation de la quantité d'eau dans ces couches est donnée par :

$$\frac{dW_i}{dt} = D_{i-1} - E_i - Tr_i - D_i \quad (\text{IV-7})$$

La redistribution de l'eau de couche en couche suit un modèle de type réservoir (Manabé, 1969). Une fois la capacité au champ ( $F_c$ ) atteinte, la couche  $i$  se vide dans la couche  $i+1$  située en-dessous d'elle. Ainsi, si  $W_i > F_c$ , le drainage vers la couche inférieure est donné par :

$$D_i = \frac{(W_i - F_{c,i})}{Ak_i} \quad (\text{IV-8})$$

Avec  $Ak_i = e_i / K_i$  où  $e_i$  représente l'épaisseur de la couche et  $K_i$  la vitesse d'infiltration de l'eau dans la couche  $i$ .

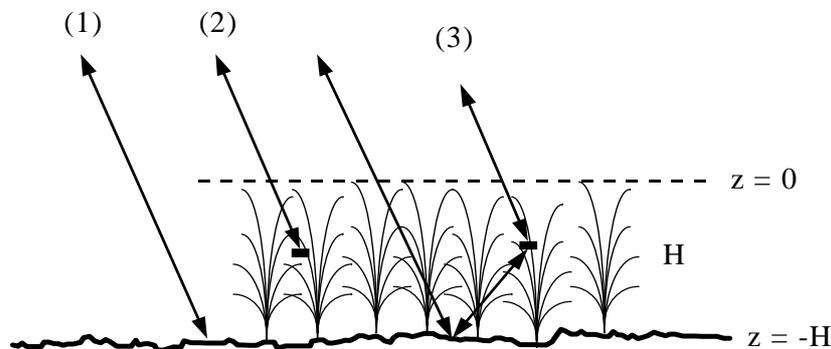
## **IV-2/ Modèle de rétrodiffusion radar (Interaction onde-matière)**

Lors de son interaction avec une surface naturelle, une onde électromagnétique est réfléchiée, réfractée ou absorbée. L'interaction dépend des paramètres du capteur (longueur d'onde, angle incidence et polarisation), du couvert (taille, forme, orientation, densité et constante diélectrique des diffuseurs élémentaires le constituant) et du sol (rugosité, constante diélectrique, pente locale).

La partie rétrodiffusée par ce milieu résulte de trois mécanismes (figure IV-1) :

- la diffusion par le sol (avec ou sans atténuation par la végétation) aussi appelée diffusion de surface et intervenant uniquement à l'interface sol air. Elle est fonction de la rugosité et de la constante diélectrique de la surface ;
- la diffusion de volume se produisant sur les multiples diffuseurs telle que les feuilles ou les inhomogénéités dans le sol ;
- la contribution provoquée par l'interaction sol-végétation.

Lorsque la végétation est peu dense, la diffusion de surface domine. Lorsque la végétation est suffisamment dense, la diffusion de volume apporte la contribution la plus importante.



**Figure IV-1** : Les différents comportements de l'onde émise sur un couvert végétal : 1) sol nu ; 2) couverture herbacée ; 3) interaction sol-couvert (Ulaby et El-Rayes, 1987).

### **IV-2-1/ La diffusion de surface**

#### **A/ interface plane**

Lorsqu'une onde arrive sur une interface plane idéale délimitant deux milieux homogènes, une partie de l'onde est réfléchiée au niveau de l'interface vers le milieu supérieur et une autre partie est transmise vers le milieu inférieur (figure IV-2).

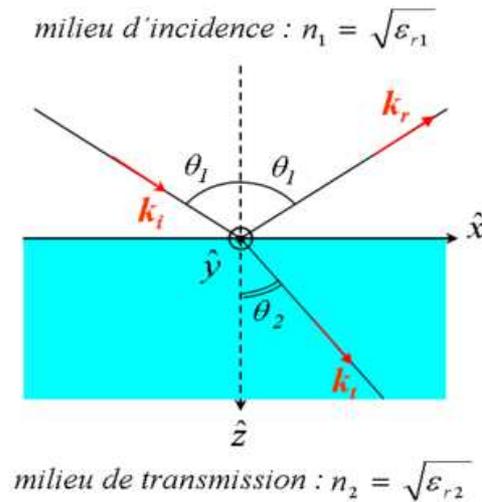


Figure IV- 2 : Schéma de la réflexion - transmission d'une onde plane.

Pour une onde incidente  $\vec{E}_i$  de polarisation  $p$  donnée, l'onde réfléchie  $\vec{E}_r$  et l'onde transmise  $\vec{E}_t$  sont données par les coefficients de réflexion  $r_p$  et de transmission  $t_p$  appelés coefficients de Fresnel.

$$\vec{E}_r = r_p \cdot \vec{E}_i \quad \vec{E}_t = t_p \cdot \vec{E}_i$$

$$r_h(\theta_i) = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad t_h(\theta_i) = \frac{2 * n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$

$$r_v(\theta_i) = \frac{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad t_v(\theta_i) = \frac{2 * n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2}$$

Les coefficients de réflectivité et de transmissibilité de Fresnel sont donnés par :  $\Gamma_p = (r_p)^2$  et  $T_p = (t_p)^2$

Par conservation de l'énergie,  $\Gamma_p$  et  $T_p$  sont liés par :  $\Gamma_p + T_p = 1$

Le détail mathématique sur les coefficients de Fresnel est développé dans l'ANNEXE VI. La figure IV-3 présente la variation de la réflectivité de Fresnel pour différentes constantes diélectriques en polarisation HH et VV en fonction de l'incidence. A noter qu'une polarisation HH respectivement VV vaut dire que le capteur émet des ondes en polarisation horizontale (verticale) et mesure la partie polarisé horizontalement (verticalement) de l'onde rétrodiffusée (voire ANNEXE II). On observe que la réflectivité augmente avec la constante diélectrique pour les deux polarisations pour les incidences comprise entre 20 et 60° (plage d'incidence des mesures utilisé dans notre étude). On note également que la polarisation HH donne toujours une réponse plus importante.

Gayane FAYE - 2012

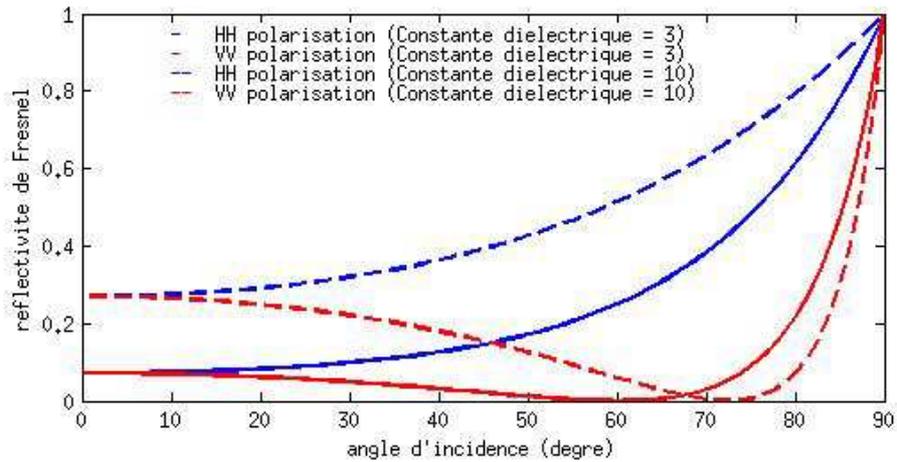


Figure IV-3 : variation de constante de Fresnel en fonction de l'angle d'incidence pour des constantes diélectriques différentes, en polarisation horizontale et verticale.

### **B/ Cas des surfaces naturelles**

La diffusion d'une onde sur les surfaces naturelles dépend étroitement de leurs caractéristiques (rugosité et constante diélectrique) ainsi que de celles de l'onde incidente. La constante diélectrique est étroitement liée à l'humidité du sol. La rugosité est décrite communément par deux paramètres (écart type des hauteurs et longueur et fonction d'auto corrélation), qui sont difficiles à mesurer même pour des parcelles de quelques ares.

Pour décrire le comportement du signal sur les surfaces naturelles, plusieurs modèles théoriques de rétrodiffusion du sol ont été développés. Ce sont des modèles théoriques asymptotiques basées sur des approximations, en fonction de la zone de rugosité relative à la longueur d'onde incidente. Les principaux sont les modèles dits GO (*Geometric Optic*), PO (*Physical Optics*) et SPM (*Small Perturbation Model*) de Ulaby *et al.*, (1982), et le modèle IEM (*Integral Equation Model*) de Fung *et al.*, (1992).

Le modèle IEM est le plus satisfaisant, les trois premiers étant limités par leur domaine de validité sur la rugosité. Cela d'autant plus que les données utilisées dans notre cas d'étude sont à des résolutions de 25 km et 50 km, couvrent une large gamme de rugosité. Grippa et Woodhouse (2002a) ont montré que les modèles théoriques ne peuvent présenter des surfaces dont les paramètres de rugosité sont caractérisés par leur hétérogénéité. C'est le cas des cellules de résolution des diffusiomètres. Ils montrent que le modèle semi-empirique de Oh *et al* (1992) est le seul capable de représenter une surface hétérogène avec une seule valeur de rugosité sur toute la gamme d'incidence. Nous avons dans le cadre de cette étude utilisé le modèle de Oh qui s'appuie sur les modèle de Hallikainen et de Fresnel (Hallikainen *et al.*, 1985).

Gayane FAYE - 2012

- **Modèle de Hallikainen**

Le modèle empirique de Hallikainen et al (1985) décrit la variation de la constante diélectrique du sol en fonction de son humidité. Notons que la constante diélectrique relative d'un milieu,  $\epsilon_r = \epsilon' + i\epsilon''$  est une grandeur complexe fondamentale qui régit les propriétés de réflexion (à travers la partie réelle  $\epsilon'$ ) et de transmission (à travers la partie imaginaire  $\epsilon''$ ) d'une onde interagissant avec ce milieu. Cette grandeur qui a une grande influence sur la réponse radar dépend principalement du contenu en eau du sol, et dans une moindre mesure, de sa composition minéralogique donnée en termes de pourcentage de sable et d'argile (Hallikainen et al., 1985). La figure IV-4 présente la variation de la constante diélectrique en fonction de l'humidité volumétrique du sol pour les bandes de fréquence C et Ku donnée par le modèle de Hallikainen (1985). L'augmentation de l'humidité du sol a pour effet d'augmenter la constante diélectrique et donc la réflectivité radar.

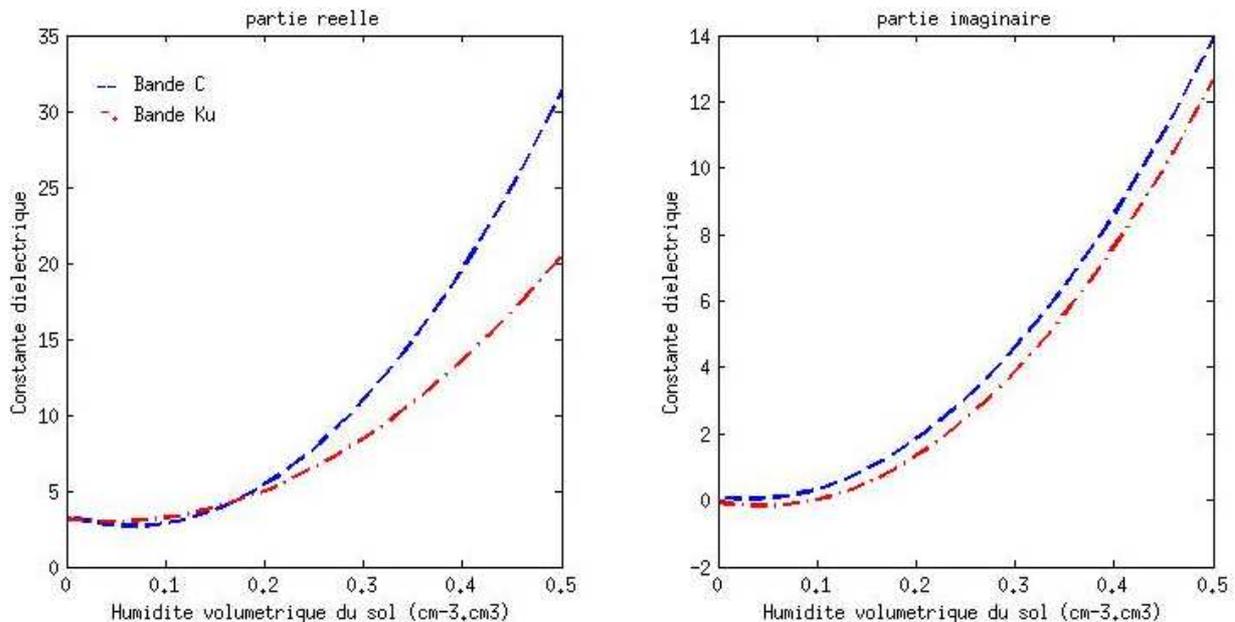


Figure IV-4 : variation de la constante diélectrique en fonction de l'humidité volumétrique du sol en bande C et Ku (Hallikainen et al., 1985).

- **Modèle de Oh**

Le modèle de Oh et al (1992) est un modèle qui simule la réponse radar d'un sol nu, en fonction de la rugosité et de l'humidité. Pour rappel, la rugosité d'un sol est qualifiée par rapport à la longueur de l'onde incidente. Une surface est considérée comme lisse si l'écart

type  $\sigma$  des hauteurs de la surface vérifie la condition  $\sigma < \frac{\lambda}{32 \cos(\theta)}$  (Ulaby et al, 1982).

Ce modèle donne le coefficient de rétrodiffusion du sol en fonction de la rugosité, de la constante diélectrique pour des angles d'incidences compris entre 20 et 90° pour différentes polarisations :

$$\text{Polarisation VV : } \sigma_{sol}^{\circ}(\theta_i, \epsilon_{r,s}, k, s) = \frac{g \cos^3(\theta)}{\sqrt{p}} [\Gamma_v(\theta_i) + \Gamma_h(\theta_i)] \quad (\text{IV-9})$$

$$\text{Polarisation HH : } \sigma_{sol}^{\circ}(\theta_i, \epsilon_{r,s}, k, s) = g \cos^3(\theta) * [\Gamma_v(\theta_i) + \Gamma_h(\theta_i)] * \sqrt{p} \quad (\text{IV-10})$$

$$\text{Polarisation HV : } \sigma_{sol}^{\circ}(\theta_i, \epsilon_{r,s}, k, s) = \frac{gq \cos^3(\theta)}{\sqrt{p}} [\Gamma_v(\theta_i) + \Gamma_h(\theta_i)] \quad (\text{IV-11})$$

Avec

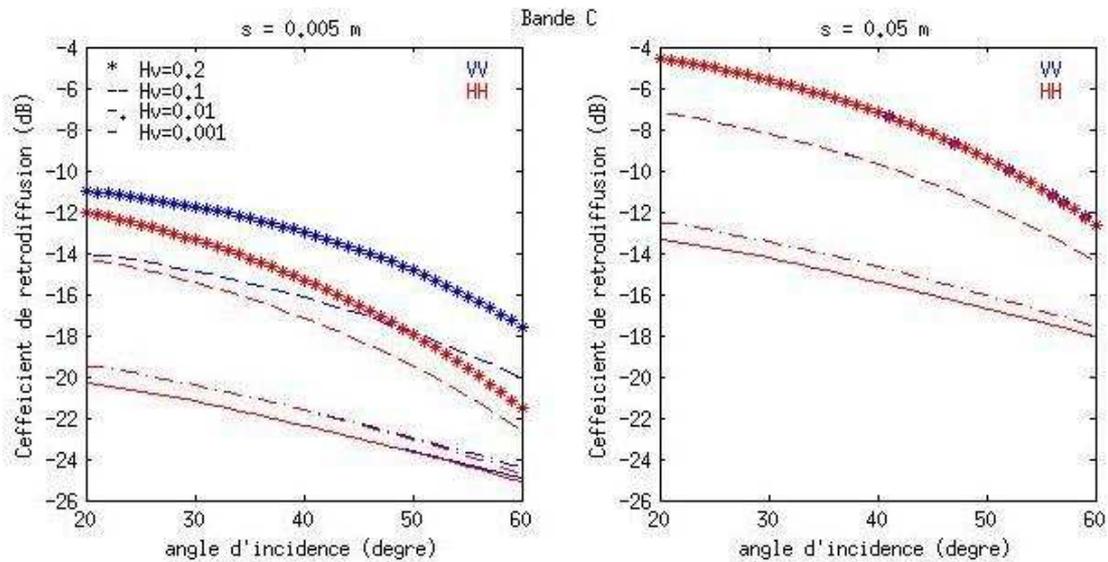
- $\epsilon_{r,s}$ , la constante diélectrique ;
- $k$  est le nombre d'onde  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  représente la longueur d'onde
- $s$  Ecart type des hauteurs de la surface.
- $\Gamma_u(\theta_i)$ , est la réflectivité de Fresnel de la surface pour la polarisation u (= v, h) ;
- $g$  est un facteur empirique donné par :  $g = 0.7 [1 - \exp(-0.65(k * s)^{1.8})]$
- $q$  est donné par :  $q = \frac{\sigma_{hv}^0}{\sigma_{vv}^0} = 0.23 [1 - \exp(-k * s)] * \sqrt{\Gamma_0}$
- $p$  le rapport de copolarisation :

$$p = \frac{\sigma_{hh}^0}{\sigma_{vv}^0} = \left[ 1 - \left( \frac{2\theta}{\pi} \right)^{\left[ \frac{1}{3} \Gamma_0 \right]} \exp(-k * s) \right]^2$$

$\Gamma_0$  est la réflectivité de Fresnel au nadir

La figure-IV-5 et IV-6 donnent respectivement la variation de la réflectivité radar en polarisation horizontale et verticale en fonction de l'angle d'incidence pour la bande C et Ku à partir du modèle de Oh. Les mêmes tendances sont observées pour la bande C et pour la bande Ku, le signal étant globalement plus élevé pour cette dernière. On observe d'autre part que l'écart entre les polarisations augmente avec l'humidité du sol, alors qu'il diminue lorsque la rugosité augmente.

De façon générale, on observe que la réponse radar augmente avec l'humidité du sol, la rugosité et décroît avec l'incidence



La figure IV-5 : Variation du coefficient de rétrodiffusion radar en polarisation VV et HH en fonction de l'incidence pour différentes rugosités et humidités du sol en bande C (modèle de Oh et al, 1992).

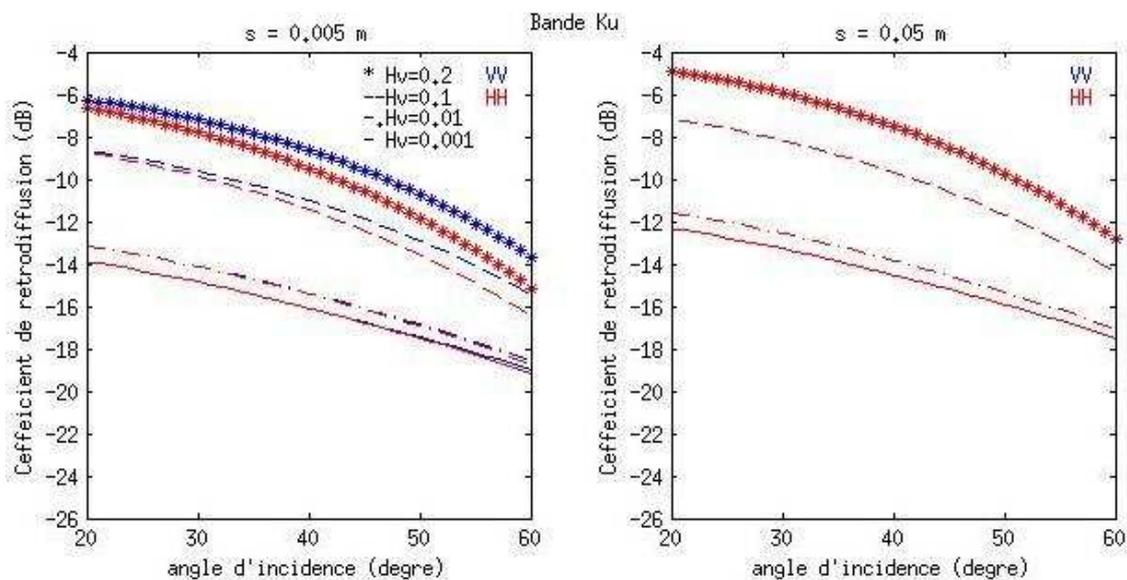


Figure IV-6 : Variation du coefficient de rétrodiffusion radar en polarisation VV et HH en fonction de l'incidence pour différentes rugosités et humidités du sol en bande Ku (modèle de Oh et al, 1992).

Dans notre étude, nous avons calibré la rugosité du sol à partir des mesures radar acquises sur la zone en saison sèche. Durant cette période, le sol pouvant être considéré comme une surface nue avec une humidité volumique très faible (inférieure à 0.1). Les pailles résiduelles qui tapissent les sols sahéliens pendant la saison sèche n'ont que peu d'influence sur le signal radar du fait de leur faible contenu en eau (de l'ordre de 5%).

## IV-2-2/ La diffusion de volume

La diffusion de volume résulte principalement des discontinuités diélectriques à l'intérieur d'un volume inhomogène comme le couvert végétal et dans une moindre mesure les sols inhomogènes sec. Les multiples diffusions ainsi que l'absorption par les diffuseurs entraînent une atténuation de l'onde au fur et à mesure de sa pénétration dans le milieu. La profondeur de pénétration  $\delta_p$  de l'onde caractérise la hauteur de la couche intervenant dans la diffusion de volume, elle augmente avec la longueur d'onde  $\lambda$  alors elle diminue lorsque la partie imaginaire de la racine carrée de la permittivité diélectrique moyenne du milieu  $\text{Im}(\sqrt{\epsilon})$  augmente. Elle a pour expression approchée (Ulaby *et al.*, 1982):

$$\delta_p = \frac{\lambda}{4\pi \text{Im}(\sqrt{\epsilon})} \quad (\text{IV-12})$$

La capacité de pénétration d'une onde à travers une couche végétale dépend de la géométrie, de l'orientation, de la taille, de la densité ainsi que et de la constante diélectrique des diffuseurs élémentaires les constituant. Elle dépend également de la configuration d'acquisition (Ulaby *et al.*, 1982). La profondeur de pénétration varie en effet de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres.

Dans le cas de notre étude, les diffuseurs élémentaires sont représentés par des ellipsoïdes dont les dimensions correspondent aux dimensions moyennes des graminées sahéliennes (Frison *et al.*, 1998 ; Tableau IV-2). Les tiges sont négligées et la distribution statistique d'orientation des feuilles est érectophile, suivant l'inclinaison  $\beta$  et l'azimut de la normale à la feuille  $\alpha$  comme illustré sur la figure IV-7. Cette distribution de probabilité est donnée

$$P_m(h, a, \alpha, \beta) = \frac{1}{2\pi} P_m(h, a, \beta)$$

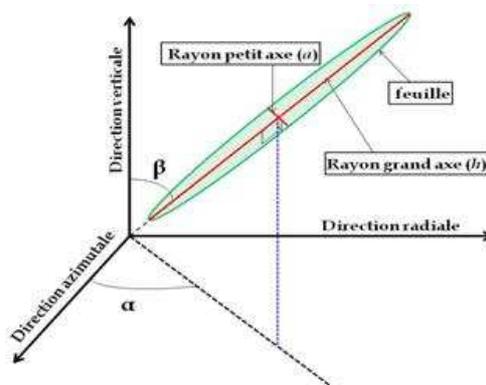


Figure IV-7 : modélisation des angles d'orientation et des dimensions d'une feuille d'herbe.

Contrairement à La largeur  $a$  et l'épaisseur des feuilles qui restent constantes pour une longueur d'onde donnée, la longueur des feuilles dépend de la biomasse totale, elle est

donnée par :  $h = 0.01 * (3.52614 + 0.07203377 * BMT - 0.00002426 * BMT^2)$ . Néanmoins, cette longueur ne doit pas excéder la hauteur du couvert, elle est bornée à 48 cm (Frison *et al.*, 1998). La distribution de probabilité de l'inclinaison est donnée par :

$$P(\beta) = \begin{cases} = A \cdot \cos^n \left[ \frac{\pi}{2} \cdot \left( \frac{\beta - \beta_m}{\beta_0 - \beta_m} \right) \right] & \dots \text{si} \dots \beta_1 \leq \beta \leq \beta_2 \\ = 0 & \dots \text{sin on} \end{cases}$$

Tableau IV-2 : récapitulatif des dimensions des feuilles dans notre modèle lors de cette étude.

Dimension des feuilles	Bande C	Bande Ku
Rayon grand axe	$h/2$	$h/2$
Rayon petit axe	0.3 cm	0.3 cm
Épaisseur 0	0.03 cm	0.09 cm
$\beta_1$	0	0
$\beta_2$	90	90

La constante diélectrique, qui dépend du contenu en eau de la plante, est calculée à partir modèle semi-empirique de Ulaby et El Rayes (1987). Son domaine de validité s'étend pour des fréquences de 0.2 à 20 GHz.

Dans le cas de la diffusion de volume, le comportement angulaire du signal rétrodiffusé est d'autant plus uniforme que la permittivité diélectrique moyenne  $\epsilon_r$  du milieu inhomogène est faible (figure-IV-8 ; Ulaby *et al.*, 1982)

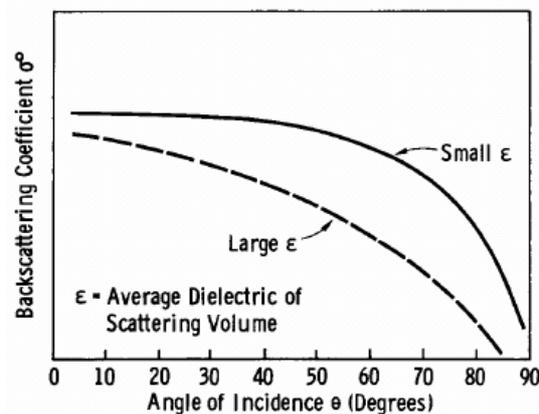


Figure IV-8 : Comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion pour deux valeurs moyennes de la constante diélectrique dans le cas d'une diffusion de volume. (Ulaby *et al.*, 1982).

Le modèle de Karam *et al.*, (1992) est un modèle de transfert radiatif, les diffuseurs de la strate herbacée sont considérés tous identiques en forme, dimensions, orientation et propriétés diélectriques. Les diffuseurs élémentaires de la strate herbacée sont représentés par des ellipsoïdes dont les dimensions et l'orientation correspondent aux caractéristiques

Gayane FAYE - 2012

moyennes typiques des graminées sahéliennes (Frison et al., 1998). Les tiges sont négligées et la distribution d'orientation est érectophile. Ces caractéristiques géométriques sont supposées ne subir aucune variation saisonnière et interannuelle. Le coefficient de rétrodiffusion de la canopée est calculé à partir de l'équation de transfert radiatif (Karam et al., 1989 ; 1992; 1995). Il est donné par :

$$\sigma^{\circ}_{herbe} = L^2 \times \sigma^{\circ}_{sol-atténué} + \sigma^{\circ}_{feuille} + \sigma^{\circ}_{interaction} \quad (IV-13)$$

- $\sigma^{\circ}_{sol-atténué}$  : la contribution du sol sous la couche herbacée ;  
 $\sigma^{\circ}_{interaction}$  : la contribution de l'interaction entre le sol et les feuilles.  
 $\sigma^{\circ}_{feuille}$  : la contribution des feuilles (biomasse) ;

Cette contribution des feuilles est donnée par :

$$\sigma^{\circ}_{feuille} = 4\pi \cos(\theta_i) \eta_0 \langle |f_{uu}(-\hat{i}, \hat{i})|^2 \rangle \left[ \frac{1-L^2}{2\kappa_e} \right] \quad (IV-14)$$

- $\theta_i$  : L'angle d'incidence ;  
 $\eta_0$  : La densité des diffuseurs par unité de volume, qui est le rapport entre la densité des feuilles et le volume de ces dernières calculé à partir du modèle STEP ;  
 $f_{uu}(-\hat{i}, \hat{i})$  : Amplitude de rétrodiffusion dans la direction de polarisation (u=h ou v)  
 $\kappa_e$  : Coefficient d'extinction (mesure la perte d'énergie du rayonnement électromagnétique traversant ce milieu) ;  
 $L$  : Atténuation de la couche herbacée ( $1-L$  étant le facteur de perte)

Elle est donnée par :

$$L = \exp\left(\frac{-\langle \kappa_e \rangle \times h_c}{\cos \theta_i}\right) \quad (IV-15)$$

$h_c$  : étant la hauteur de la biomasse simulé par le modèle STEP.

La constante diélectrique des feuilles est calculée à partir du modèle de dispersion de Ulaby and El-Rayes model (Ulaby and El-Rayes, 1987).

Le coefficient de rétrodiffusion de la scène étudié représente la somme incohérente de la contribution du sol (diffusion de surface) et celle de la végétation (diffusion de volume). Vu la faiblesse de la population d'arbre dans cette zone, leur contribution au coefficient de rétrodiffusion est négligée.

Le coefficient de rétrodiffusion de la scène est :

$$\sigma^{\circ}_{scène} = (1-V_c) \times \sigma^{\circ}_{sol,nu} + V_c \times \sigma^{\circ}_{herbe} \quad (IV-16)$$

Où  $V_c$  représente la fraction de couverture végétale.

Ce qui donne :

$$\sigma^{\circ}(\theta_i)_{scène} = [1-V_c(1-L^2)] \times \sigma^{\circ}_{sol} + V_c \times (\sigma^{\circ}_{feuille} + \sigma^{\circ}_{interaction}) \quad (IV-17)$$

# CHAPITRE V

## ANALYSE DES MESURES RADAR ET DES RESULTATS DE LA MODELISATION

## **V-1/ Les Mesures RADAR**

L'objectif de nos travaux est d'une part, de valider les recherches entreprises avec les données des capteurs à bord d'ERS et d'ENVISAT dans la zone pastorale du Ferlo, afin d'étendre le suivi à l'ensemble de la région sahélienne. D'autre part, ces travaux visent à prospector la capacité d'autres types de données en bande C (ASCAT de METOP) pour assurer la continuité, mais aussi en bande Ku pour estimer l'apport de données multi fréquences et multi polarisations au suivi des paramètres de surface au Sahel. Il s'agira pour nous d'étudier, en fonction des caractéristiques des capteurs, l'influence des différents paramètres de la surface, notamment la biomasse végétale et l'humidité du sol, sur le signal radar. Au Sahel, la densité de la végétation étant faible (quantité de biomasse inférieure à 2 tonnes par hectare), le sol nu et le sol sous la végétation ont une grande influence sur la réponse radar (Frison et Mougin, (1996a, 1996b) ; Frison et al., 1998 ; Abdel-Messeh et Quegan, 2000 ; Jarlan et al., (2002, 2003) ; Zine et al, 2004 ; Prigent *et al.*, 2005).

Ce travail permettra d'établir les configurations radars les plus sensibles à ces deux paramètres. Il peut se résumer en trois points :

- 1- l'analyse de la variabilité saisonnière du signal radar en fonction de la quantité de biomasse et de l'humidité du sol ;
- 2- l'étude de l'influence de la polarisation, de la fréquence sur le signal radar. Cela, afin de déterminer la configuration optimale de polarisation, de fréquence et d'incidence pour une meilleure estimation des paramètres de surface (végétation, humidité et rugosité du sol) ;
- 3- l'étude de l'apport de la combinaison de différents types d'observations (fréquence, polarisation, résolution spatiale et temporelle) pour une meilleure caractérisation des états de surface.

### **V-1-1/ Le diffusiomètre ESCAT**

Nous avons dans le cadre de cette thèse, analysé les données ESCAT (*European Radar Satellite Scaterometer*) acquises sur la zone pastorale du Ferlo. Les données radar sont fortement influencées par l'incidence de mesure surtout dans les zones à faible recouvrement végétal comme l'indique la figure V-1(a). Sachant que le capteur ESCAT effectue des mesures à des incidences comprises entre 18 et 59°, nous avons examiné les effets de l'incidence sur les données acquises sur le Ferlo (figure V-1(b)).

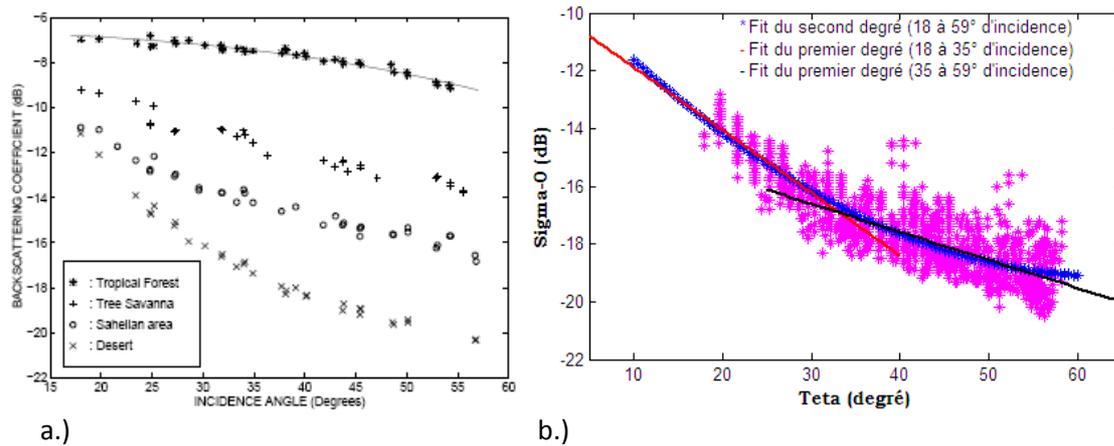


Figure V-1: Variation du coefficient de rétrodiffusion radar sur différents types de surface (a) ; (Frison et Mougin 1996a), et variation de la réponse radar en saison sèche en fonction de l'incidence (b) ; (Faye et al., 2011)

On observe que les mesures sont très sensibles à l'incidence. Une normalisation des coefficients de rétrodiffusion s'avère donc indispensable pour prendre en compte la dépendance angulaire du signal.

Comme pour les travaux réalisés sur les données ERS sur d'autres régions du Sahel, une normalisation angulaire à 25° et 45° respectivement pour les mesures comprises entre 15° et 30° et celles entre 30° et 59° est effectuée. Les figures V-2 (a) et (b) respectivement, présentent les signatures temporelles correspondant aux données sur le Ferlo, normalisées à 25° et 45° d'incidence. On s'aperçoit que la dynamique saisonnière des mesures normalisées à 45° est plus nette que celle à 25° d'incidence. Cela est surtout due au fait qu'aux grands angles on est plus sensible à la végétation. Le peu de données à faible incidence, acquises par une seule antenne contre 3 antennes pour des angles supérieurs à 25°, peut induire en effet de forts biais dans la procédure de normalisation. Rappelons que seule l'antenne *Midbeam* produit des données à faible incidence alors que les 3 antennes acquièrent quasi simultanément la réponse. Nous avons donc opté de poursuivre l'étude avec les données normalisées à 45° d'incidence.

A l'instar des observations obtenues précédemment au Gourma (Mali) et Fakara (Niger), on observe à 45° (figure V-2(a)) une forte dépendance saisonnière des données ESCAT acquises sur le Ferlo. Les mesures sont marquées par une réponse faible et constante en saison sèche,  $\sigma_{sec}$ . En période de saison humide, on assiste à une augmentation du coefficient de rétrodiffusion pour atteindre son ( $\sigma_{pic}$ ) maximum aux environs du pic de la biomasse. Ce changement résulte de deux effets couplés : augmentation de la teneur en eau du sol et

Gayane FAYE - 2012

évolution de la densité et du contenu en eau de la couche herbacée. Le signal décroît ensuite avec la sénescence de la végétation et l'assèchement du sol pour atteindre sa valeur minimale en saison sèche. L'amplitude annuelle  $\sigma_{amp}$  du signal représente l'écart entre les mesures en saison sèche et celles au pic de la biomasse ( $\sigma_{amp} = \sigma_{pic} - \sigma_{sec}$ ). On note un déphasage entre le début de la saison pluvieuse et l'augmentation du coefficient de rétrodiffusion. Cela montre que le signal à cette échelle (50 km) est peu sensible aux premiers événements pluvieux. À l'instar des sites du Nord Gourma où la variabilité de l'amplitude du signal (rapport entre l'écart type et la moyenne des amplitudes annuelles sur la période concernée) est de 16% au Séno et 11% à Hombori, on observe une variation interannuelle de 10,6% de l'amplitude annuelle du signal au Ferlo (Tableau V-1), ce qui reste faible comparé à certains sites qui sont dans le nord du Gourma où on note des variabilités de 44% et 29% respectivement à Rharous et Gossi (Frison et *al.*, 1998).

Tableau V-1 : récapitulatif des statistiques sur les mesures ESCAT.

Période	Maximum ( $\sigma_{amp}$ ; dB)	Minimum ( $\sigma_{amp}$ ; dB)	Moyenne ( $\sigma_{amp}$ ; dB)	Variabilité (%)
1993-1999 & 2004-2007	5,92	4.00	4.92	10.6

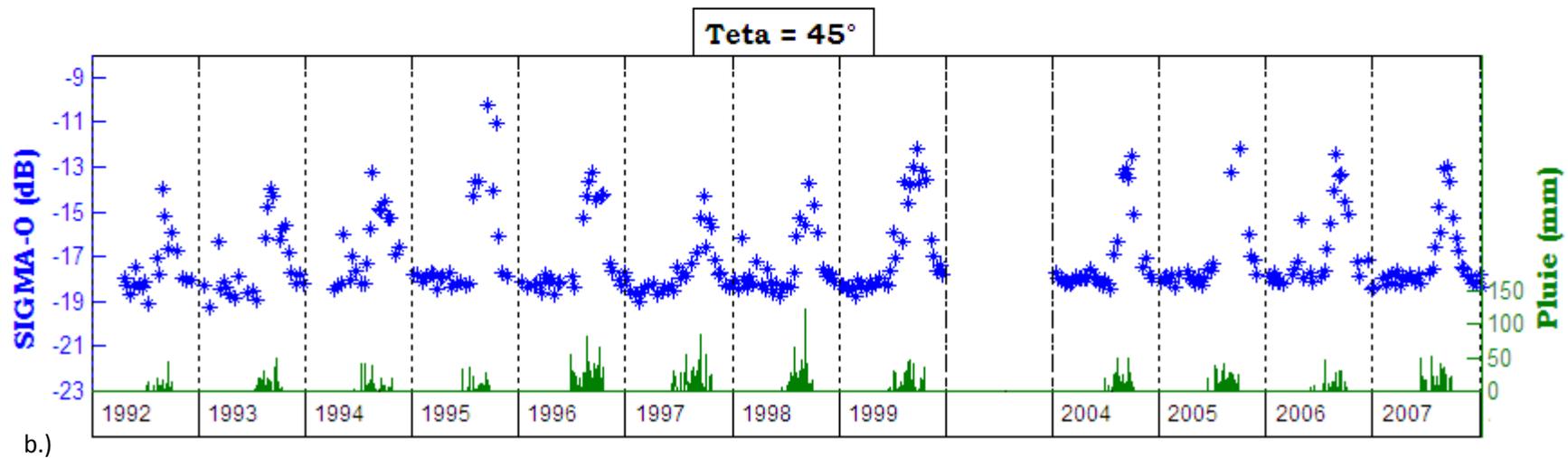
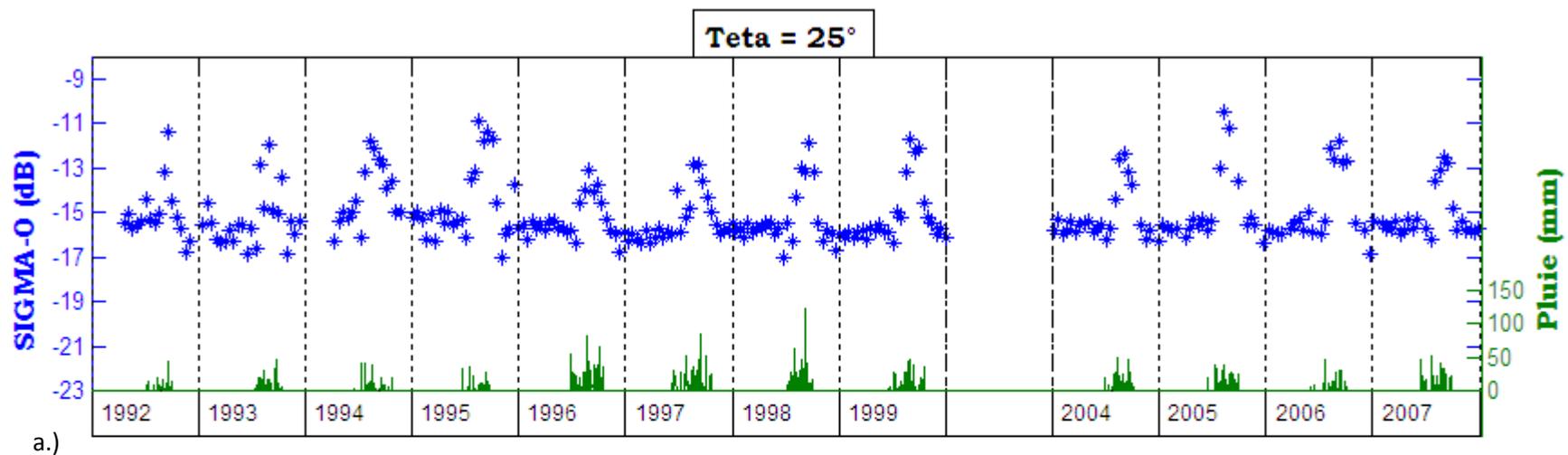


Figure V-2 : Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion radar mesuré par le diffuseur ESCAT calibré à 25° (a) et 45° (b) d'incidence et de la pluviométrie (1992-2008) au Ferlo.

L'amplitude du signal radar ne dépend pas du cumul annuel de la pluie comme l'indique la faible corrélation ( $R^2=0,023$ ) entre ces derniers. Ceci s'illustre également sur la figure V-2(b) où le pic plus élevé en 1995 qu'en 1997, alors qu'en 1997 on a enregistré 294.0 mm de pluie contre 233.2 mm en 1995. Cette situation peut résulter d'une distribution temporelle irrégulière de la pluie en 1997. On note une forte baisse des pluies au milieu de l'hivernage de 1997 avec seulement 17,7mm entre le 19 juin 1997 et le 21 août de la même année. En effet, le développement de la biomasse est fonction de la répartition spatiale et temporelle de la pluie au cours de la saison et non au simple cumul annuel. Donc une forte saison pluvieuse n'est pas forcément synonyme de forte production herbacée. Ceci est confirmé par la faible corrélation ( $R^2=0,0114$ ) entre la production biomasse annuelle et le cumul annuel de pluie.

En revanche, une plus forte corrélation est observée entre l'amplitude annuelle du signal radar et la production de biomasse ( $R^2=0,47$ ). Ainsi, une forte réponse radar doit être synonyme de la présence importante de végétation humide. Ce rapport n'est pas toujours vérifié. En effet, en comparant les données de l'année 1993, avec une production de biomasse de 895,7 kg.Ms/ha, avec l'année 2004 durant la quelle nous avons une production de 813 kg.Ms/ha, on peut voir que malgré une production plus importante en 1993, la réponse du signal reste nettement plus importante en 2004. Ces anomalies peuvent résulter d'une mauvaise estimation de la production si la mesure a été réalisée tardivement. En effet l'année 2004 a été marquée vers la fin de la saison des pluies (septembre - octobre), par une invasion de criquets pèlerins, dans la moitié nord du Sénégal (contenant notre zone d'étude), pouvant ainsi affecter fortement la production de biomasse avant la période d'échantillonnage de la biomasse.

### **V-1-2/ Le Diffusiomètre ASCAT**

Le diffusiomètre ASCAT, mis en orbite en 2007, est caractérisé par une répétitivité temporelle élevée, avec en moyenne une mesure tous les 5 jours et une résolution spatiale de 25 km. A l'instar des autres capteurs radar, les mesures du diffusiomètre ASCAT dépendent étroitement de l'angle de mesure comme l'indique la Figure V-3, présentant les signatures temporelles des données normalisées à 25°, 45° et 54° d'incidence. On observe là encore, de manière similaire à ESCAT, une plus grande dispersion du signal en saison sèche pour la normalisation à 25°. D'une manière générale, les dispersions sont moins importantes que pour les mesures acquises par ESCAT, du fait de la meilleure résolution spatiale et temporelle.

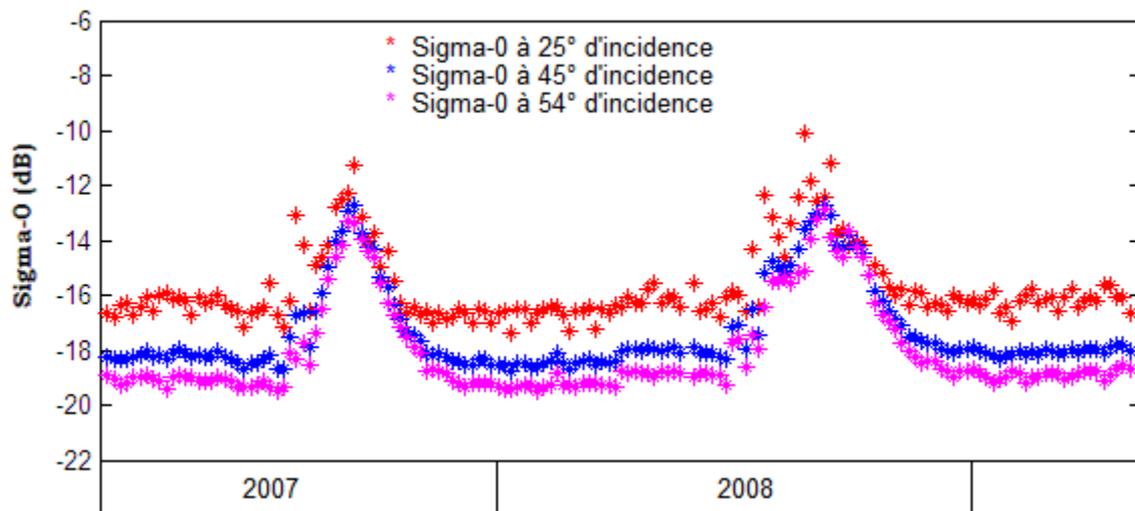


Figure V-3 : Coefficient de rétrodiffusion mesurées par le capteur ASCAT de MetOp et normalisé à 25° (rouge), 45° (bleu) et 54° (magenta), site du Ferlo .

Les figures V-4 et V-5 montrent les signatures temporelles obtenues avec les données ESCAT (période 1992 - 2007) et ASCAT (2007-2008). On observe une très bonne continuité entre les données, indiquant la bonne calibration des deux capteurs, assurant ainsi la continuité des observations ESCAT. Sa bonne résolution spatiale permet de réduire le bruit sur les données normalisées.

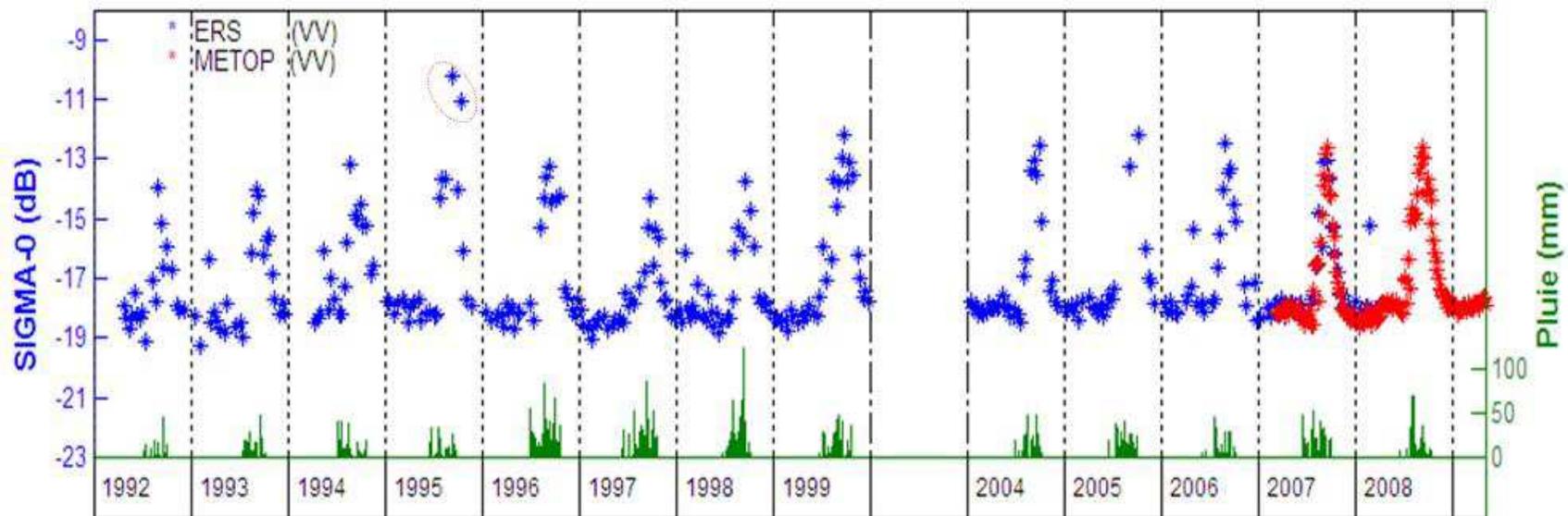


Figure V-4 : Coefficient de rétrodiffusion mesuré par les capteurs ERS (1992-2007) en bleu et ASCAT de MetOp (2007-2008) en rouge, site du Ferlo.

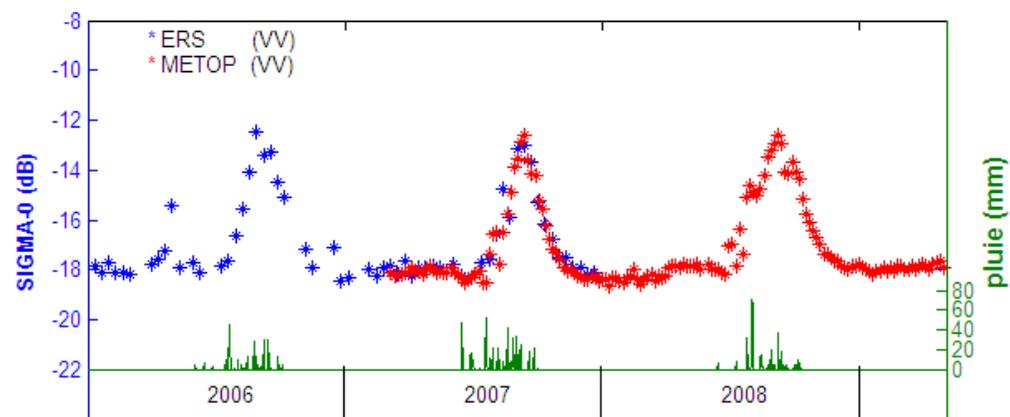


Figure V-5 : Coefficient de rétrodiffusion mesuré par les capteurs ERS (2006-2007) en bleu et ASCAT de MetOp (2007-2008) en rouge, site du Ferlo.

### **V-1-3/ Le diffusiomètre Seawind**

Le diffusiomètre SeaWind à bord de QuikScat, opérationnel depuis 1999, et profitant d'une meilleure répétitivité temporelle que ESCAT (de l'ordre de 2 jours), pourrait nous permettre de mieux apprécier l'évolution journalière de la réponse radar en fonction de l'évolution des paramètres au sol et notamment l'influence des événements pluvieux. De plus, du fait d'une meilleure résolution spatiale (25 km contre 50 km pour ERS), ces données sont plus adaptées à l'observation des surfaces terrestres. Cela d'autant plus qu'elles ne sont pas biaisées par la normalisation angulaire du fait de leur acquisition à une seule incidence. Ces données permettent également d'analyser l'influence de la polarisation sur le comportement du signal au Sahel, puisque les polarisations HH et VV sont acquises simultanément à une incidence de 45° et 54° respectivement. Enfin, acquise en bande Ku ( $\lambda=2.2\text{cm}$ ), ces données permettent d'analyser l'influence de la longueur d'onde par comparaison avec les données ESCAT et ASCAT acquises en bande C.

#### **A. Analyse des produits 1B et 2A**

Deux produits délivrés par EUMETSAT peuvent être utilisés pour les observations des surfaces terrestres faites par Quikscat : les produits de niveau 1B et 2A. Afin d'évaluer leur spécificité, une étude préliminaire a été faite pour les données acquises pendant l'année 2004. Les produits de niveau 1B ont été traités par le laboratoire MERS de l'université Brigham Young, aux Etats-Unis, et sont directement accessibles sur le site <http://www.scp.byu.edu> (voir annexe IV). Les produits utilisés sont appelés Browse (BRW), et consistent en des images globales d'une résolution spatiale de 25km, dont chaque pixel contient la valeur moyenne des mesures effectuées pour le jour correspondant. Les données de niveau 2A ont été délivrées directement par l'agence EUMETSAT. Les données en bande Ku étant sensibles à la vapeur d'eau, des données auxiliaires permettent de corriger l'atténuation du signal ont été calculées. Il s'agit du coefficient de transmissibilité de l'atmosphère donné par :

$$\tau(f) = \sec(\theta) \int_0^H \alpha_{liq}(f, z) dz.$$

$\alpha_{liq}(f, z)$  étant la somme des contributions des nuages et de la pluie pour une onde de fréquence  $f$  à l'altitude  $z$ , et  $\sec(\theta)$  la contribution de l'incidence à l'atténuation. Le coefficient de rétrodiffusion corrigé est donnée par :  $\sigma^0_{corrigé} = \sigma^0_{mesuré} + 2.\tau(f)$ . Ces coefficient correctifs sont extraits des cartes climatiques mensuelles (Wentz, 1996) obtenues à partir d'une combinaison de 8 années (1987 - 1994) de données du radiomètre SSM/I, qui a permis d'évaluer la vapeur d'eau moyenne mensuelle, et le contenu intégré en eau des nuages.

La figure V-6 présente la variation saisonnière des produits 2A (TOA : Top Of Atmosphère) avant et après corrections atmosphériques, ainsi que les données BRW observées sur le Ferlo. On observe, en polarisation HH et VV, des signatures temporelles identiques pour les trois produits, similaires aux signatures observées sur les surfaces sahéliennes en bande C. On peut noter toutefois un écart inférieur à 0.5 dB entre les produits BRW et les produits 2A en saison sèche, écart augmentant jusqu'à 1 dB à la fin de la saison des pluies. L'amplitude annuelle observée est inférieure de 1.5 dB pour les produits BRW comparés aux produits 2A avant et après correction atmosphérique (respectivement 7 dB, 7.5 dB, et 8 dB).

Enfin, il est à noter que pour ces données pour lesquelles, à la différence des données ASCAT ou ESCAT, aucune interpolation angulaire n'a été faite, le profil temporel apparaît très lisse sur l'ensemble de l'année, traduisant le peu de sensibilité de ces données à basse résolution spatiale aux événements pluvieux ponctuels. On peut toutefois noter une oscillation du signal sur une vingtaine de jours en fin de saison sèche (du jour julien 175 à 200) traduisant des pluies significatives pendant cette période (32.1 mm)

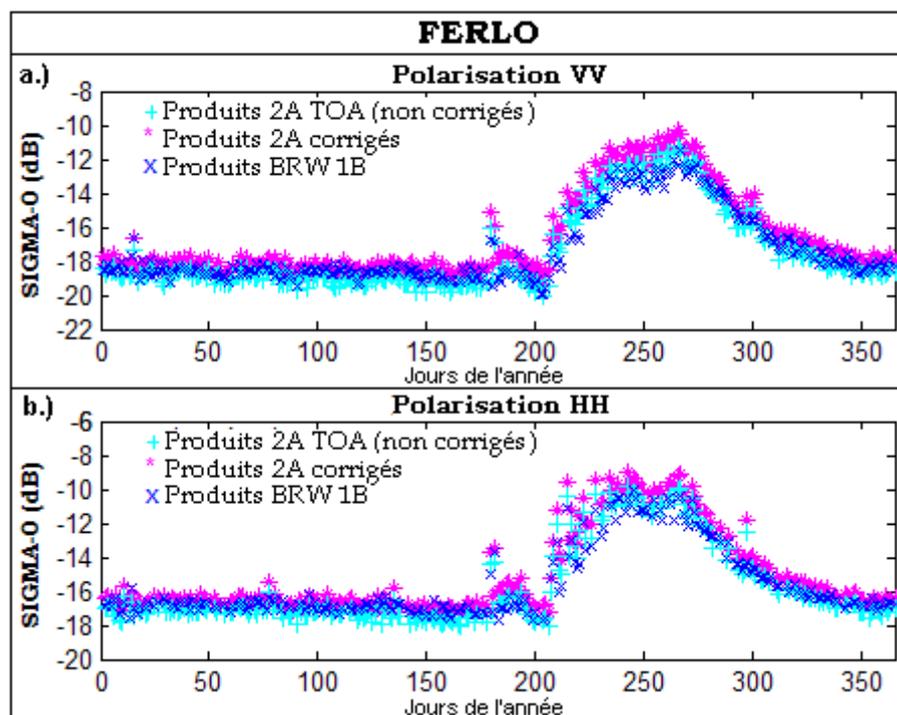


Figure V-6 : Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion radar SeaWinds de QuikScat (a.  $\sigma_{VV}$ , b.  $\sigma_{HH}$ ) obtenu à partir des produits 2A TOA (non corrigés), corrigés des effets atmosphériques, et des produits BRW. Année 2004, site Ferlo (Sénégal).

À titre de comparaison, les figures V-7 et V-8 présentent les signatures temporelles observées sur la région de Gossi, dans le Gourma malien et la région du Fakara au Niger. Des observations identiques aux profils sur le Ferlo peuvent être faites sur la région du Fakara. En revanche, de fortes différences de profils temporels sont observées entre les produits BRW et 2A sur le site de Gossi dans le Gourma. Dans ce cas, le profil temporel obtenu avec les produits BRW est même inversé (seule la chute du signal en fin de saison sèche est observée, alors que le maximum atteint généralement en fin de saison des pluies ne dépasse guère le niveau observé durant la saison sèche) avec celui plus classique observé avec les produits 2A.

Ces différences démontrent la mauvaise prise en compte des phénomènes atmosphériques dans ces jeux de données. Elles sont donc à utiliser avec précaution, car n'étant pas très adaptées au suivi de la saisonnalité des paramètres au sol dans certaines régions du Sahel, ou du moins nécessitent un certain nombre de traitement pour éliminer toutes les données mal corrigées.

Etant donné que les observations sur le Ferlo ne sont pas très affectées par les problèmes atmosphériques, ajouté au traitement laborieux des données de niveau 2A, nous avons opté pour continuer l'étude sur le Ferlo avec les données 1B. Pour les autres régions, vu les différences notées entre les données de niveau 1B et celles de niveau 2A corrigées (0.5 à 1dB environ), des analyses supplémentaires s'avèrent nécessaires.

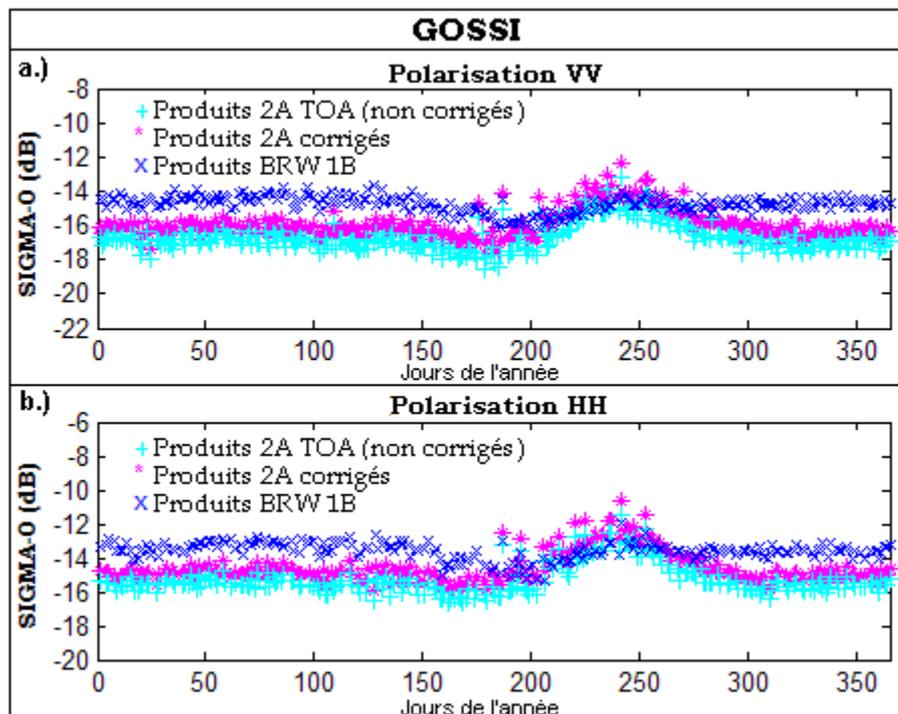


Figure V-7 :Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion radar SeaWinds de QuikScat(a.  $\sigma_{VV}$ , b.  $\sigma_{HH}$ ) obtenu à partir des produits 2A TOA (non corrigés), corrigés des effets atmosphériques, et des produits BRW. Année 2004, site Gossi au Gourma (Mali).

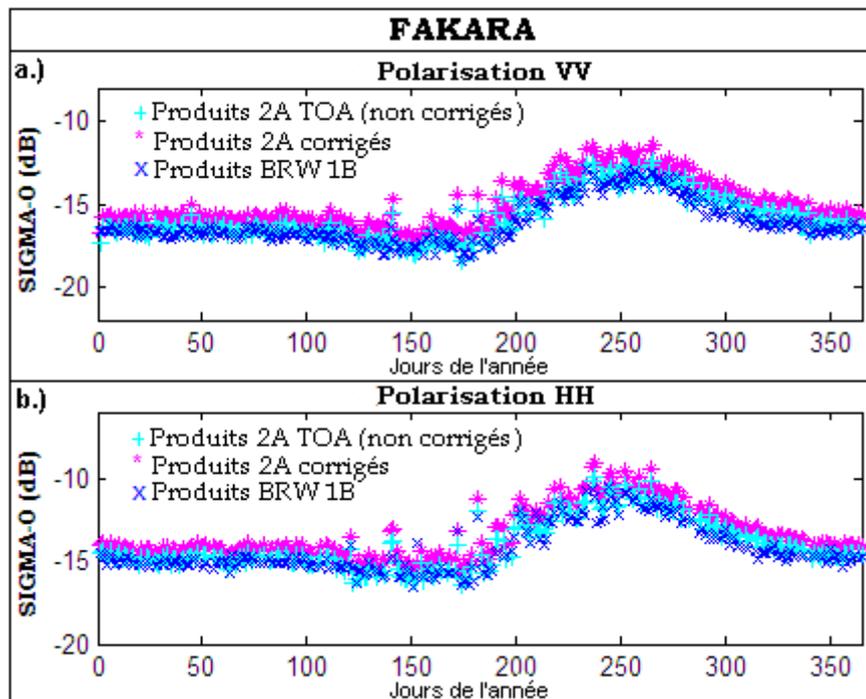


Figure V-8 : Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion radar SeaWinds de QuikScat(a.  $\sigma_{VV}$ , b.  $\sigma_{HH}$ ) obtenu à partir des produits 2A TOA (non corrigés), corrigés des effets atmosphériques, et des produits BRW. Année 2004.

### B. Analyse des signatures temporelles

La figure V-9 montre la dynamique saisonnière des données SeaWind sur la période 1999-2008 au Ferlo. De manière similaire à la bande C (figure V-4), on observe une faible variation interannuelle de l'amplitude du signal en bande Ku avec un taux de variation  $\sigma_{amp}$  de 11.04% pour la polarisation VV et de 7.48% pour HH.

La fig. V-10 c) met clairement en évidence les plus fortes valeurs observées en polarisation HH qu'en polarisation VV ( $\Delta\sigma = \sigma_{HH}(46^\circ) - \sigma_{VV}(54^\circ) > 1.5$  dB pendant la saison sèche avec un écart maximum d'environ 3dB en début de saison des pluies). Cette différence provient essentiellement de la différence d'angle d'incidence associé à ces acquisitions (45° contre 54° respectivement pour HH et VV).

Les simulations avec le modèle de Oh (figure V-11), montrent qu'effectivement, pour des sols secs ( $H_v = 0.01$ ) et lisses ( $\sigma = 1.4$  cm), la différence  $\sigma_{VV} - \sigma_{HH}$  pour une incidence. Cette différence augmente jusqu'à 1 dB pour des sols plus humides ( $H_v = 0.2$ ). En revanche pour la

configuration de Seawind, pour une surface lisse à la différence de  $\Delta\sigma = \sigma_{HH}(46^\circ) - \sigma_{VV}(54^\circ) = 1.5 \text{ dB}$  est atteinte pour un sol sec, cette différence diminuant pour des humidités plus élevées ( $\Delta\sigma = 0.8 \text{ dB}$  pour  $H_v = 0.2$ ) ; figure V-12 b. Les valeurs de  $\Delta\sigma$  sont maximales pour un sol lisse et humide ( $\Delta\sigma > 4 \text{ dB}$  pour  $\sigma = 0.6 \text{ cm}$  et  $H_v = 0.2$ ) et décroissent avec la rugosité et l'assèchement du sol ( $\Delta\sigma \approx 1 \text{ dB}$  pour  $\sigma = 2 \text{ cm}$  et  $H_v = 0$ ).

D'autre part, on observe également une évolution temporelle de  $\Delta\sigma = \sigma_{HH}(46^\circ) - \sigma_{VV}(54^\circ)$  liée aux variations saisonnières des états de surface (figure V-10). A la fin de la saison sèche ( $\Delta\sigma = 1.5 \text{ dB}$ ), la différence de polarisation  $\Delta\sigma$  augmente avec la croissance du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma$  pour atteindre son maximum quelques jours (jusqu'à 30 jours en 2000, 2001 et 2004 par exemple) avant  $\sigma_{pic}$ . Puis, une rapide décroissance de  $\Delta\sigma$  est observée pour atteindre son minimum ( $\Delta\sigma \approx 0 \text{ dB}$ ) quelques jours après  $\sigma_{pic}$  (jusqu'à 30 jours) durant la phase de décroissance de  $\sigma$ .  $\Delta\sigma$  augmente ensuite pour atteindre un palier pendant le reste de la saison sèche

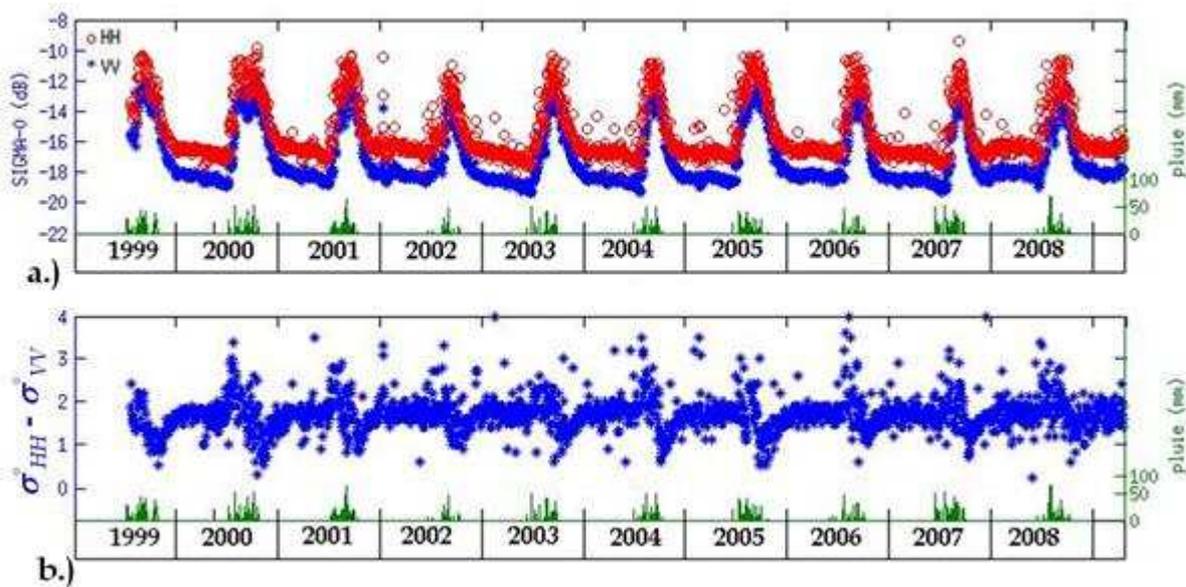


Figure V-9 : coefficient de rétrodiffusion mesuré par le Radar SeaWind de Quikscat en polarisation VV et HH et la différence entre les mesure HH et VV (1999-2007), site du Ferlo.

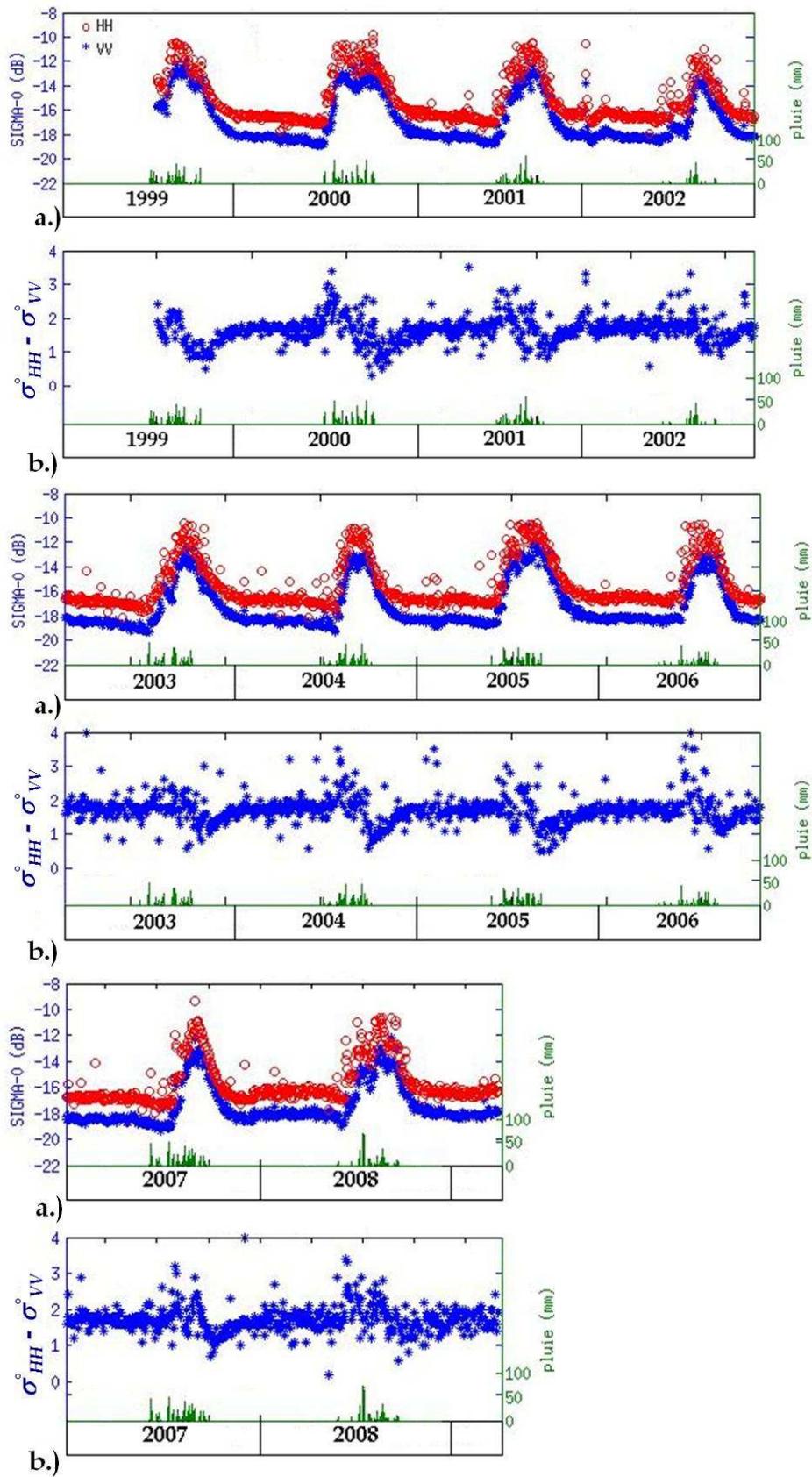


Figure V-10 : zoom sur l'année l'écart observé entre les mesures HH à 46° d'incidence et VV à 54° pour le site du Ferlo.

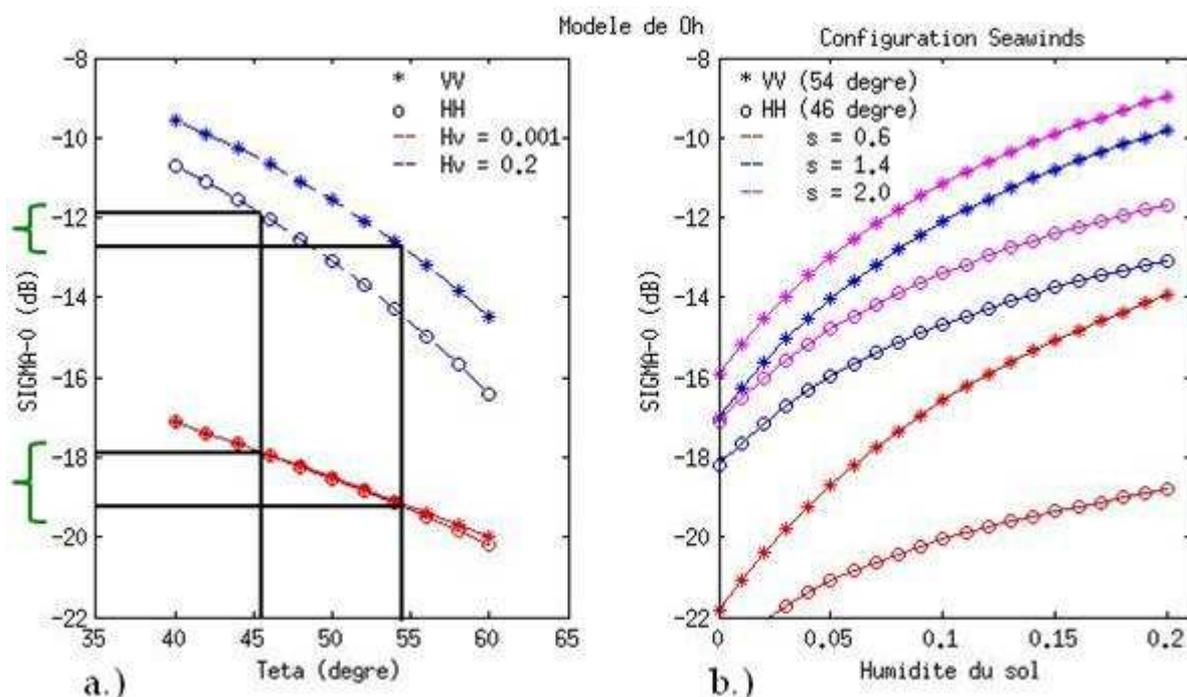


Figure V-11: a) Simulations de  $\sigma_{HH}$  et  $\sigma_{VV}$  pour un sol nu ( $s = 1,4$  cm) en fonction de l'angle d'incidence. b) Simulations de  $\Delta\sigma = \sigma_{HH}(46^\circ) - \sigma_{VV}(54^\circ)$  en fonction de l'humidité du sol pour différentes rugosités.

Nous déduisons de cette étude que les écarts observés entre les mesures en polarisation VV et celles en HH, respectivement à 54 et 46° d'incidence, en saison sèche résulte de la différence de l'incidence de mesure. L'augmentation de cette différence en début de saison des pluies est quand à elle liée à la différence de polarisation qui est sensible à l'humidité surfacique.

Une confrontation des mesures radar en début de saison des pluies, (période entre l'arrivée des pluies et l'apparition de la végétation environ 4 à 5 jours), avec l'humidité du sol donne une faible corrélation ( $R^2=0.01$ ). Nous en déduisons que la légère chute du signal observée en début de saison des pluies pourrait résulter d'une diminution de la rugosité. En effet, l'arrivée des pluies peut affecter la rugosité du sol, à cause des effets de ruissellements et l'impact des gouttes d'eau qui rendent le sol très lisse au début de l'hivernage. Des mesures de rugosités du sol et d'humidité dès les premières pluies pourraient permettre de mieux comprendre ce phénomène observé sur la réponse radar.

## V-1-4/ Le Capteur ASAR

La première génération de RSO opérait selon une seule polarisation (exemple, ERS-1/2 avec la polarisation VV et RADARSAT-1 avec la polarisation HH). De mars 2002 à avril 2012, le radar ASAR à bord du satellite ENVISAT a permis d'acquérir des images d'intensité avec deux polarisations simultanément et des configurations d'acquisition multiples pour une large gamme d'angles (voir paragraphe III-2-4). Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à l'aspect multi-polarisation des données ASAR. Nous avons analysé les mesures effectuées en mode *Wide Swath* (WS) et *Alternating Polarisation* (AP). Contrairement au mode WS qui effectue des mesures soit en HH ou en VV, le mode AP fonctionne de façon alterné, permettant ainsi d'acquérir simultanément l'intensité de la scène avec deux polarisations.

La figure V-12 présente la variation temporelle de  $\sigma^0$  de ASAR en mode *Alternating Polarisation* et *Wide Swath* en polarisation HH sur la zone d'étude (environ 120x80 km<sup>2</sup>). Ces deux modes sont caractérisés par une résolution spatiale respective de 30 et 150 m. On reconnaît la signature temporelle caractéristique des surfaces sahéliennes en bande C. De plus, un bon accord entre les données WS et AP est observé.

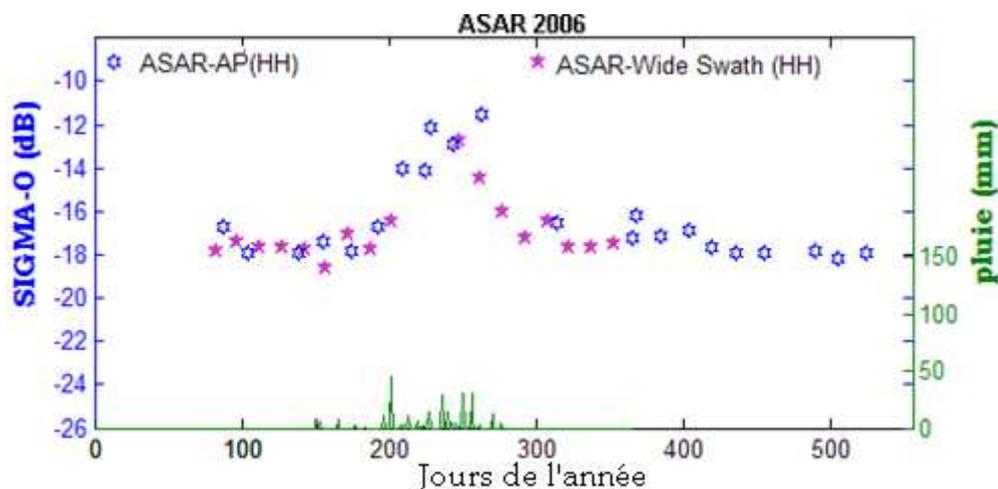


Figure V-12 : Coefficient de rétrodiffusion radar mesuré par le SAR ASAR d'ENVISAT en mode *Alternating Polarisation* et mode *Wide Swath* (polarisation HH), normalisées à 45° d'incidence moyennés sur la fenêtre 120x80 km<sup>2</sup>.

Les mesures en polarisation HH sont par contre nettement supérieures à celles en polarisation HV comme on peut le voir sur la figure V-13. On note également que le signal en polarisation HV est moins sensible aux variations saisonnières avec une amplitude annuelle de **3.54 dB** contre **5.63 dB** pour HH. Aucune tendance nette ne se dégage de l'évolution temporelle de la différence de polarisation  $\sigma_{HH}^0 - \sigma_{HV}^0$  (figure V-13(b)). Des observations sur une plus longue période permettraient de tirer des conclusions plus poussées.

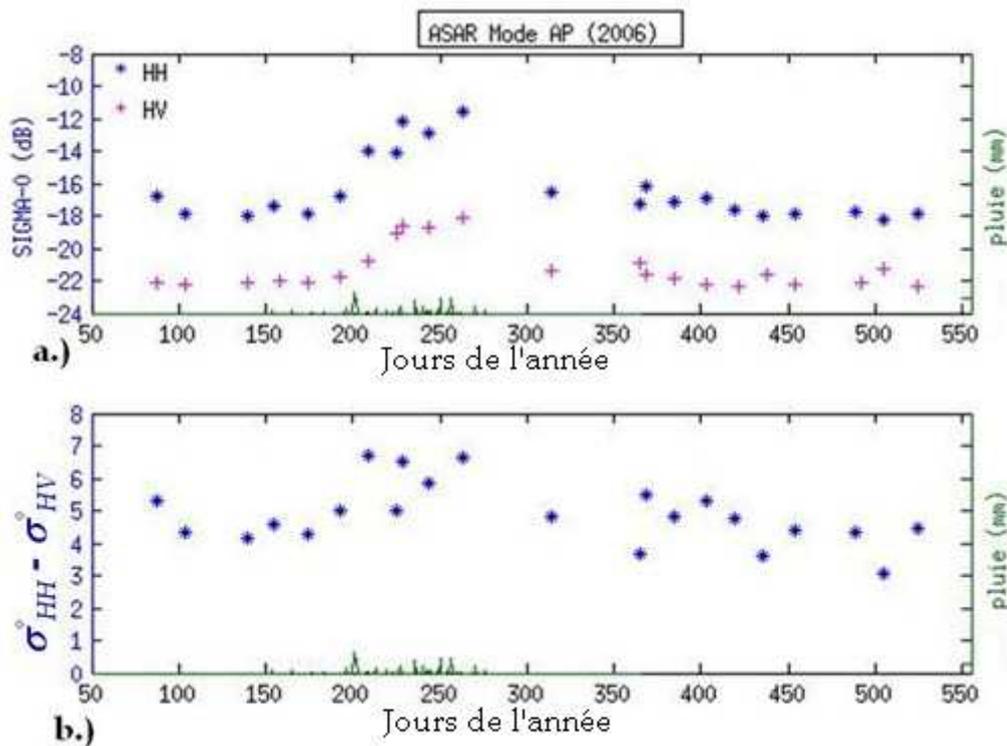


Figure V-13 :Coefficient de rétrodiffusion radar mesuré par le capteur ASAR d'ENVISAT en mode AP, en polarisations HH et HV. Ces mesures sont normalisées à 45° d'incidence.

### **V-1-5/ Comparaison entre capteurs**

Dans cette partie nous allons faire une étude comparative de la réponse radar en fonction de la fréquence radar et la polarisation. Cela pour mettre en évidence l'influence des différents paramètres du signal sur la réponse des surfaces sahéliennes du Ferlo.

#### **V-1-5-1/Comparaison bande C -bande Ku**

Dans ce paragraphe nous nous intéressons à l'influence de la fréquence sur la réponse radar au Sahel, en effectuant une étude comparative entre le signal en bande C et celui en bande Ku pour les polarisations HH et VV.

#### **Polarisation VV**

La figure V-14 présente la réponse radar en bande C et Ku. Elle montre un bon accord global entre les mesures en polarisation VV du capteur Seawind de QuikScat (bande Ku) et celles des capteurs SCAT de METOP (bande C). En particulier les signaux sont parfaitement en phase. On observe néanmoins un léger décalage entre les deux courbes en saison sèche. Cet écart résulte de la différence de sensibilité des deux bandes à la rugosité du sol, les grandes longueurs d'onde étant moins sensibles à la rugosité du sol. Cette différence se confirme au

pic de la biomasse où la bande Ku pénètre moins la végétation occasionnant ainsi une réponse plus importante. Mais compte tenu du type de végétation rencontrée au Ferlo, essentiellement composée d'herbe dont la hauteur est faible (entre 0 et 50 cm) avec une production en moyenne inférieure à 1000 kg.MS/ha, le phénomène de pénétration ne devrait pas être un paramètre discriminant.

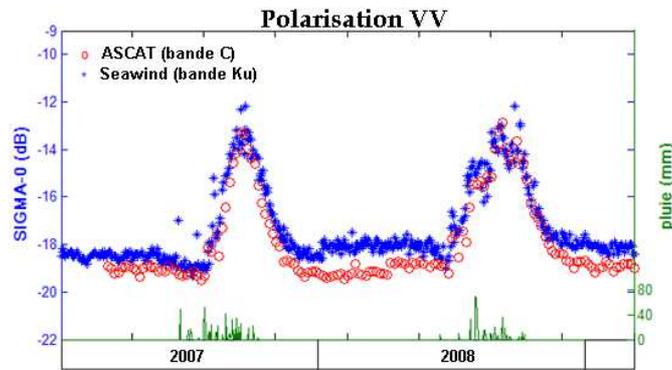


Figure V-14 : Coefficient de rétrodiffusion mesuré à 54° par les capteurs ASCAT (ERS et MetOp) et Seawind en polarisation VV.

### Polarisation HH

La figure V-15 présente les mesures pour les deux bandes (Ku et C) en polarisation HH. À l'instar de la polarisation VV, le signal en bande Ku reste globalement supérieur à celui en bande C en saison sèche. On observe un décalage de phase de chute du signal entre le mode *Wide Swath* et Quikscat. Le manque de données sur cette période pour le mode *Alternating Polarisation* fait qu'on n'a pas pu expliquer ce problème. Des observations sur une plus longue période pourrait permettre d'élucider le problème.

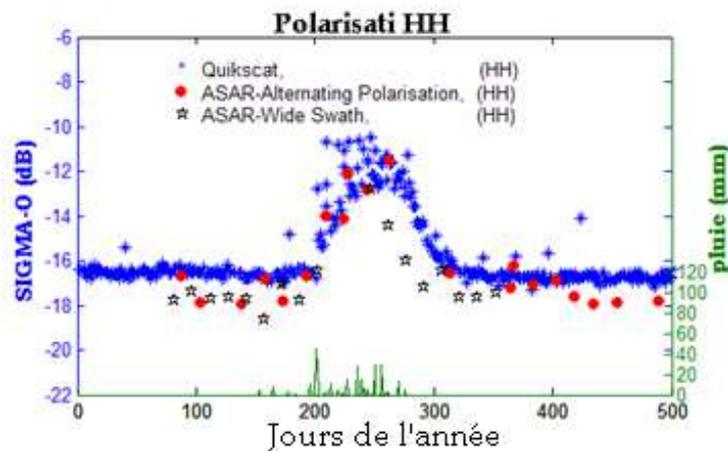


Figure V-15 : Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion radar mesuré par l'instrument *Seawind* de Quikscat et le capteur ASAR. Année 2006.

### V-1-5-2/ Comparaison des polarisations HH - VV

Les capteurs ERS et ASAR ont en commun la fréquence d'émission (Bande C) avec des incidences comprises entre 15 et 58° pour ERS et 15 à 45° pour ASAR-WS et Alternating Polarisation. La figure V-16 présente les données en polarisation HH et VV mesurées avec la même longueur d'onde. Nous constatons une bonne superposition des courbes, nous en déduisons que la sensibilité du signal est quasi identique pour les deux polarisations. Des observations sur des périodes plus longues permettraient de mieux appréhender l'évolution temporelle des différences de polarisations observées, en les comparant notamment aux profils observés avec Seawind (fig. 5.11 & 12).

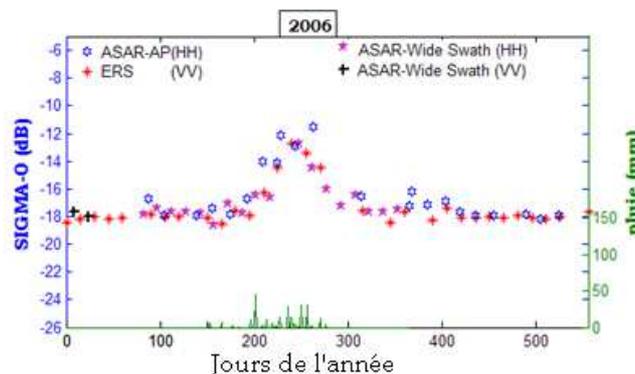


Figure V-16 : Coefficient de rétrodiffusion mesuré par le Wind Scaterometer de ERS (VV) et le SAR ASAR d'ENVISAT en mode Alternating Polarisation (HH) et Wide Swath (HH et VV).

La première partie de ce chapitre a montré la bonne concordance des mesures ESCAT et ASCAT avec un plus faible bruit sur les données de ce dernier, du fait surtout de sa meilleure résolution spatiale et temporelle. Le capteur ASCAT pourra donc assurer la continuité des observations en bande C. Les résultats sont en accord avec ceux obtenus dans d'autres régions du Sahel (Gourma au Mali et Fakara au Niger).

La bande Ku est sensible à l'atmosphère donc à analyser avec précaution notamment pour le Gourma où l'on note des différences entre les données avant et après correction. Toutefois, sur le Ferlo, on a observé peu de différences sur les données, ce qui nous a permis de les analyser.

Les signatures temporelles sur le Ferlo en bande Ku acquises par Seawind sont similaires à celles en bande C acquises par ESCAT et ASCAT. Cependant vu leur sensibilité à l'atmosphère, ces données sont à prendre avec précaution, ou du moins nécessitent un certain nombre de corrections.

Les différences  $\Delta\sigma^0$  observées entre les polarisations en bande Ku sont expliquées principalement par la différence d'incidence d'acquisition, néanmoins elles sont sensibles aux variations saisonnières.

## V-2 / Modélisation du signal radar

Le modèle de fonctionnement des surfaces sahéliennes STEP (Mougin et al., 1995) permettant de décrire l'évolution temporelle de la scène à un pas de temps journalier et le modèle de transfert radiatif (Karam et al., 1992) simulant l'interaction d'une onde avec une surface naturelle ont été présentés au chapitre IV. Les simulations de la réponse radar sont analysées dans cette partie.

### V-2-1/ Modélisation en bande C

La figure V-17 présente la comparaison des signatures temporelles observées avec le diffusiomètre ESCAT et les simulations.

Globalement un bon accord est observé entre les simulations et les mesures effectuées par les diffusiomètres ESCAT, avec une erreur moyenne de 10% entre les amplitudes  $\sigma_{amp}$  (Tableau V-2). Ces résultats viennent confirmer ceux obtenus dans les autres sites du Sahel (Gourma au Mali et Fakara au Niger), montrant que l'évolution temporelle des paramètres de surface (humidité du sol et biomasse) permet d'expliquer celle des signatures temporelles radar. On peut noter toutefois pour certaines années que l'amplitude  $\sigma_{amp}$  du signal simulé reste en dessous de celui des mesures. Plusieurs phénomènes peuvent être à l'origine de cette différence notamment les erreurs de mesures, le modèle utilisant des données *in situ* (production annuelle de végétation et pluviométrie journalière). Nous reviendrons sur l'analyse de ces différences dans la section V-2-2.

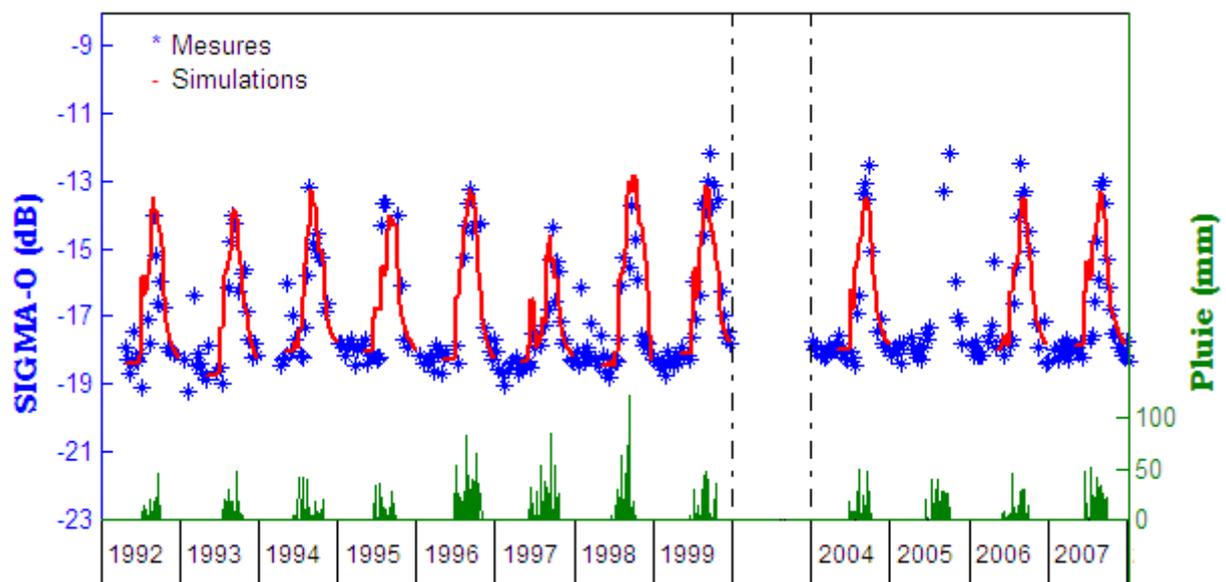
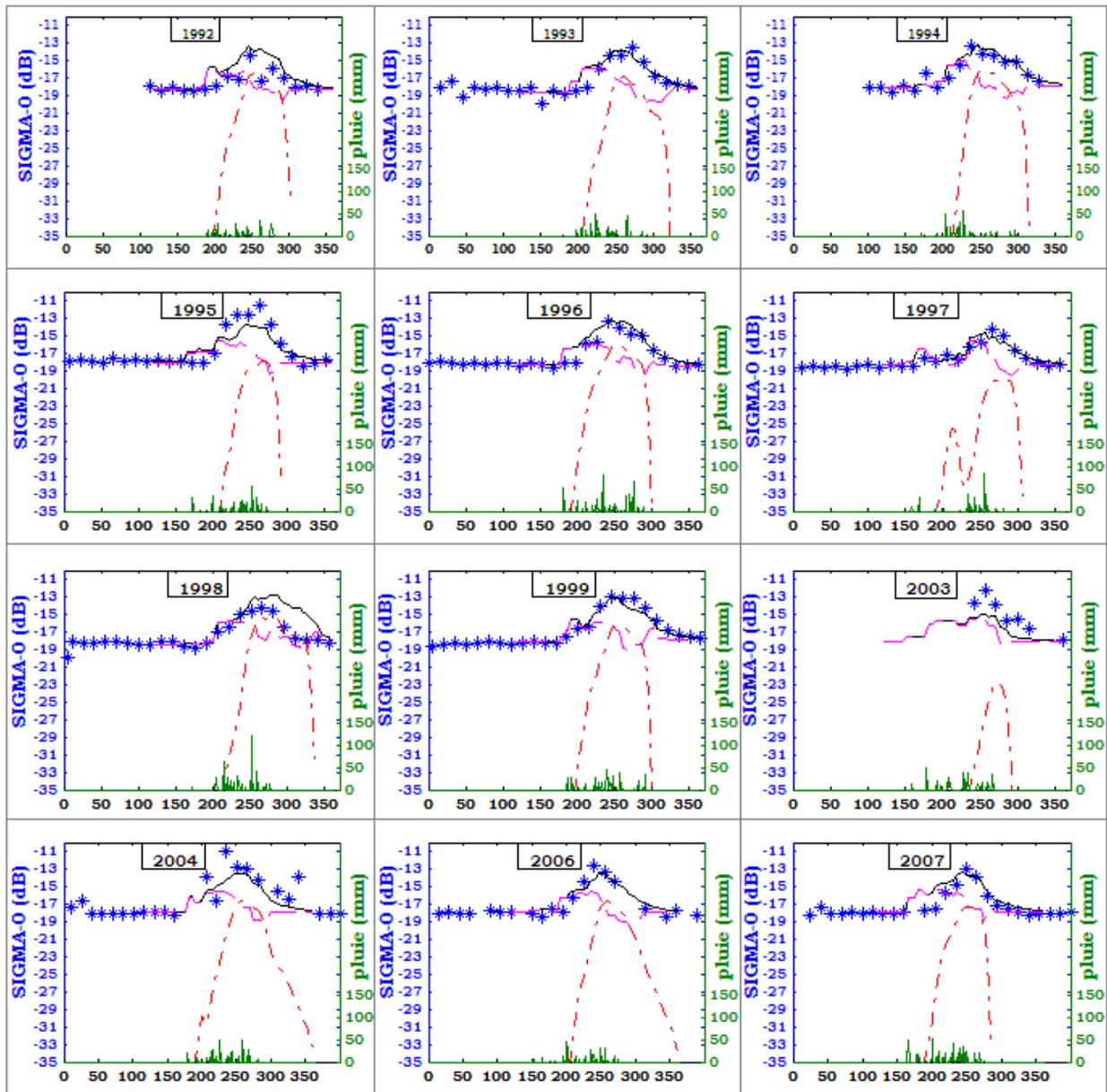


Figure V-17 : Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion simulé (-) et mesuré (\*) et de la pluie, site du Ferlo

Tableau V-2 : Amplitudes annuelles des coefficients mesurés et simulés.

Années	$\sigma_{\text{amp}}^{\circ}$ mesuré (dB)	$\sigma_{\text{amp}}^{\circ}$ simulé (dB)	Ecart relatif (%) (Mesures - simulations)/simulations
1992	4,37	4,91	11.00 %
1993	4,72	4,89	3.48 %
1994	4,83	4,78	1.05 %
1995	4,38	4,05	8.15 %
1996	5,08	5,05	0.59 %
1997	4,00	3,76	6.38 %
1998	4,73	5,66	16.43 %
1999	5,94	4,98	19.28 %
2004	5,46	4,49	21.60 %
2006	5,54	4,50	23.11 %
2007	4,87	4,57	6.56 %
<b>Moyenne</b>	<b>5,21</b>	<b>4,69</b>	<b>10.69 %</b>

La figure V-18 détaille les différentes contributions intervenant dans le signal (cf. équation IV-17). Elle, montre que le signal en saison sèche est uniquement fonction de la texture et de la rugosité du sol. À l'apparition de la couche herbacée suite aux premières pluies, on observe une diminution de la contribution du sol nu à la réponse radar au profit de celle des feuilles. Cette dernière devient importante avec le développement de la végétation et pouvant parfois dépasser celle du sol nu. L'effet conjugué de l'assèchement et de la disparition des plantes rend la contribution de la végétation au coefficient radar faible en fin de saison des pluies. A la fin de la saison des pluies, la faible couche herbacée sèche qui couvre le sol n'influe pas sur les mesures radar. Il est à noter que les contributions du sol et de la végétation interviennent à parts égales lorsque la végétation est à son maximum de développement. La contribution d'interaction entre le sol et la végétation est négligeable. Ces résultats sont identiques à ceux obtenus par Frison et al., 1998, sur le site pastoral du Gourma (Figure V-19). En revanche, sur le site agro-pastoral de Fakara, la contribution relative de la végétation est plus faible que sur les sites pastoraux du Ferlo et du Gourma (Zine 2004 ; figure V-20). Ceci est dû à un niveau en saison sèche plus élevé au Fakara, expliqué ici par la contribution des ligneux, et à un recouvrement plus faible de la végétation annuelle qu'en zone pastorale, du fait de la présence de champs et de brousse tigrée.



\* Sigma-0 mesuré - Sigma-0 simulé -- Contribution du sol nu - Contribution des feuilles

Figure V-18 : contribution du sol nu (-. Magenta) et de la végétation (-- rouge) à la réponse radar (simulation ; - noir) et (mesures \* bleu), site du Ferlo.

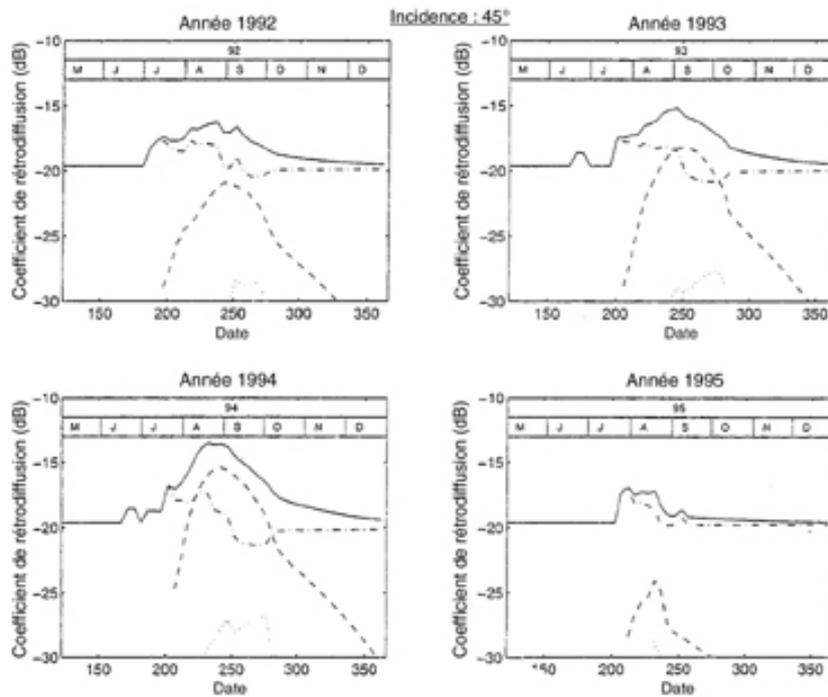


Figure V-19 : Évolution temporelle des contributions du sol nu (- -), de la végétation (· ·) et du sol sous la végétation (- ·) à la rétrodiffusion de la scène (-) à 45° d'incidence pour le site de Gourma Rharous (d'après Frison *et al.*, 1998).

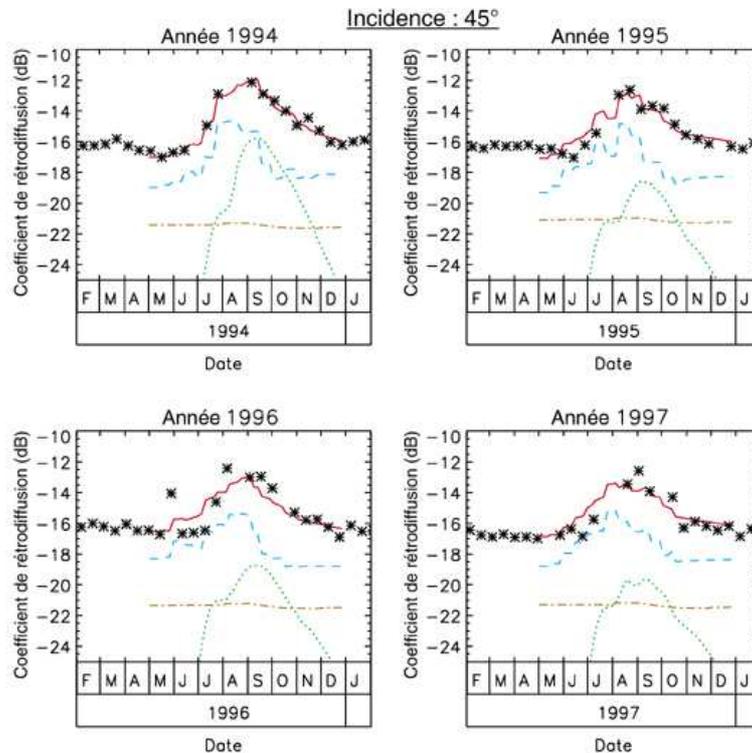


Figure V-20 : Contributions de la végétation annuelle (en vert), des ligneux (en brun) et du sol nu (en bleu) à la rétrodiffusion totale (en rouge) à 45° d'incidence. Les observations WSC (\*) sont aussi représentées (Zine 2004).

## V-2-2/ Modélisation en bande Ku

Les figures V-21 présentent les simulations en bande Ku et le signal radar mesuré par QuikScat. On observe comme pour la bande C, une bonne concordance, avec un écart relatif moyen des amplitudes annuelles de 10.68% en polarisation VV contre 16.67% en HH. Néanmoins, on peut constater une différence notable pour l'année 2002 avec un écart au pic de 27.81 et 72.66% respectivement en polarisation VV et HH comme l'indique le tableau V-3. Cette anomalie peut résulter de plusieurs phénomènes notamment une collecte tardive de la biomasse (La biomasse collectée en 2002 est de 16.6% inférieur à la moyenne). Cette zone pastorale du Sénégal étant fortement peuplée en ruminants, une campagne de stratification tardive peut entraîner une sous estimation de la production végétale. Une collecte mensuelle voire décadaire de la production de biomasse pourrait permettre de lever cette ambiguïté. Un coup d'œil sur la pluviométrie de 2002 permet de constater la faiblesse de son cumul annuel (188 mm pour une moyenne annuelle de 377.62 mm sur cette période). Rappelons qu'une quantité annuelle importante de pluie n'est pas forcément synonyme de bon hivernage, car ne prenant pas en compte le caractère spatial et temporel de la distribution de la pluie. Ainsi une saison avec un bon cumul annuel, mais parsemé de période de pauses pluviométriques entraînant le ralentissement voire l'arrêt du développement de la végétation.

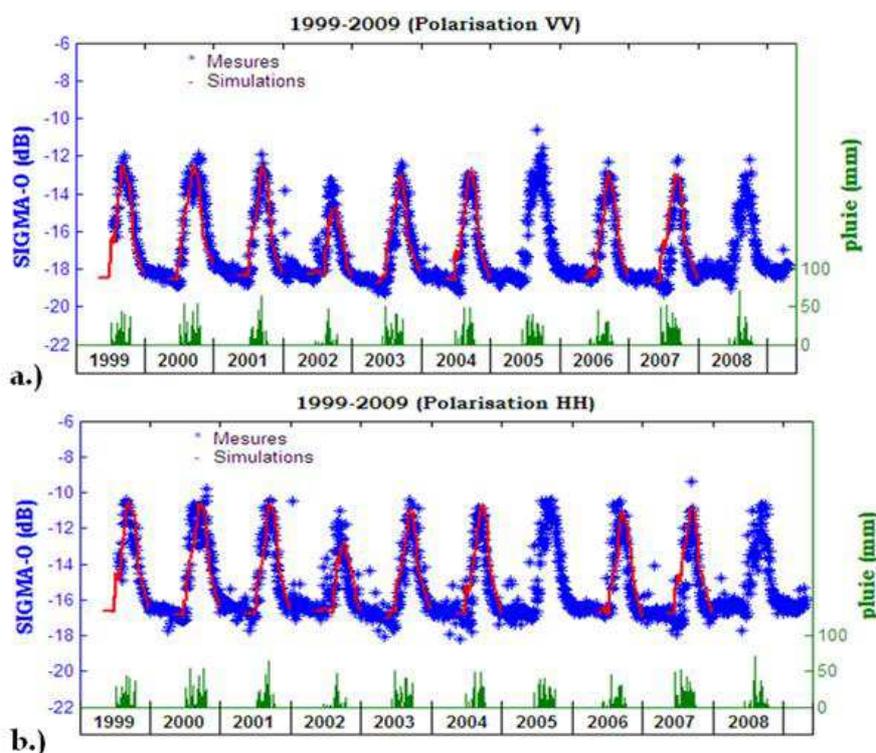


Figure V-21 : Signature temporelle des données SeaWind (bleu) en polarisation VV (a.) et HH (b.) et celui simulé (bleu) pour la période 1999 à 2007, site du Ferlo.

Tableau V-3 : Coefficients de rétrodiffusions mesurés par le radar Quikscat et ceux simulé par les modèle STEP et Karam.

Années	$\sigma^{\circ}_{amp}$ mesuré (dB)		$\sigma^{\circ}_{amp}$ simulé (dB)		Ecart relatif	
	VV	HH	VV	HH	VV	HH
1999	6,45	6,23	5,99	6,18	7.68%	0,81 %
2000	6,45	7,06	6,05	6,26	6.61 %	12.78
2001	6,45	6,38	5,92	6,24	8.95 %	2.24 %
2002	4,55	6,63	3,56	3,84	27.81 %	72.66 %
2003	6,37	6,63	5,81	6,16	9.64 %	7.63 %
2004	5,65	5,84	5,72	5,98	1.22 %	2.34 %
2006	6,15	6,28	5,56	5,72	10.61 %	9.79 %
2007	6,46	7,38	5,72	5,90	12.94 %	25.08 %
<b>Moyen</b>	<b>6,07</b>	<b>6,55</b>	<b>5,54</b>	<b>5,79</b>	<b>10.68 %</b>	<b>16.67 %</b>

La figure V-22 présente les écarts entre la polarisation HH et VV pour les mesures et les simulations. On observe que les résultats sont en opposition de phase durant la saison des pluies. Cela illustre bien les limites de l'approche utilisé. Ainsi des études polarimétriques plus poussées sur la sensibilité du signal radar au Ferlo seraient nécessaires pour une meilleure compréhension de ce phénomène.

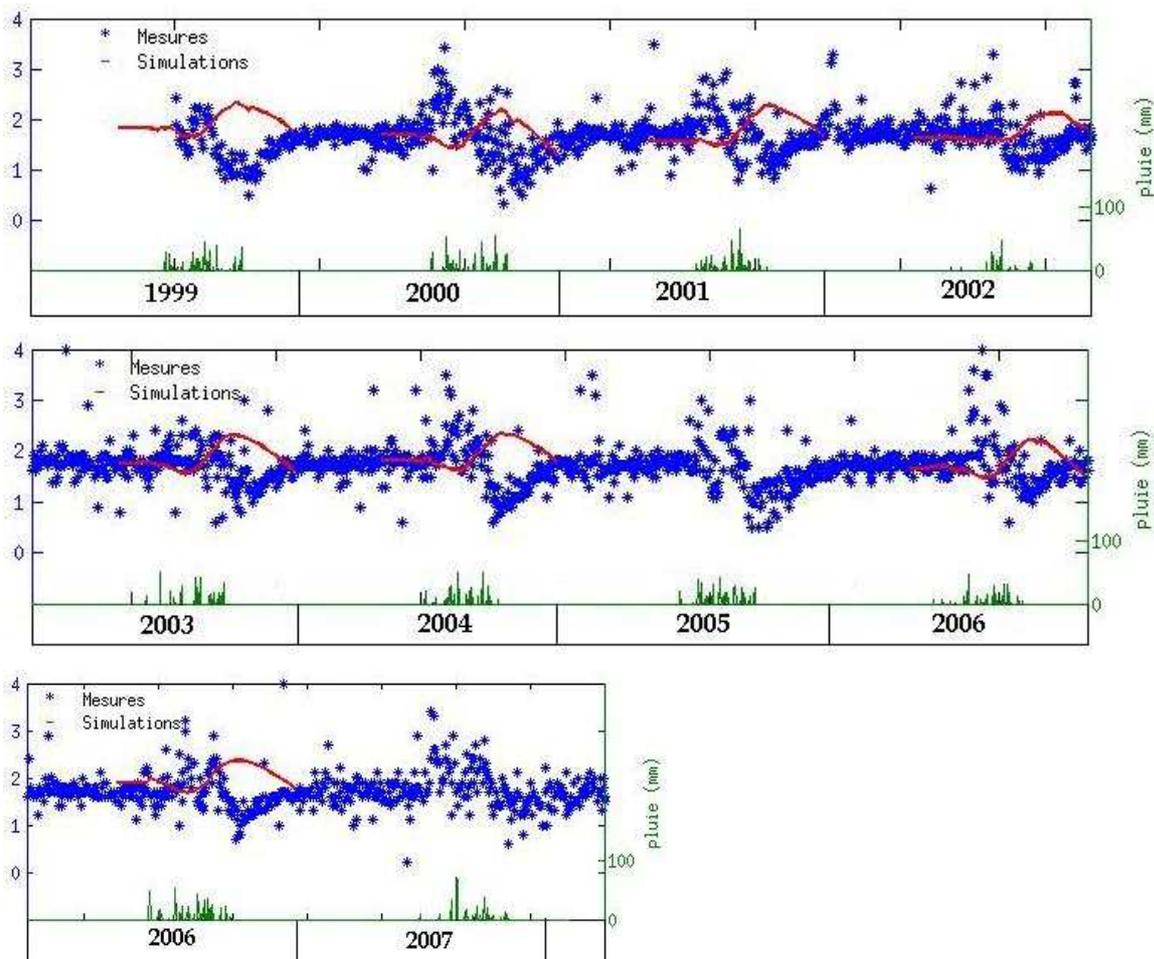


Figure V-22 : Ecart entre les données mesurées (simulées) en polarisation HH et VV.

Les figures V-23 et V-24 présentent les différentes contributions résultant des simulations en bande Ku. On observe comme pour le capteur ERS que le coefficient de rétrodiffusion en saison sèche reste faible et égal à la contribution du sol nu. Cependant la contribution de la végétation en bande Ku est très importante par rapport à celle en bande C. Ce qui s'explique par la différence des longueurs d'onde. En effet, les ondes à faible longueur d'onde ont beaucoup plus de mal à pénétrer les surfaces végétales, car la longueur d'onde est de l'ordre de la taille des feuilles et des branches. Ceci étant, le diffusiomètre Seawind de Quikscat qui fonctionne avec une longueur d'onde de 2,2 cm, sera plus sensible à la présence de végétation herbacée que ESCAT( 5,7 cm de longueur d'onde) qui sera beaucoup influencé par le sol nu.

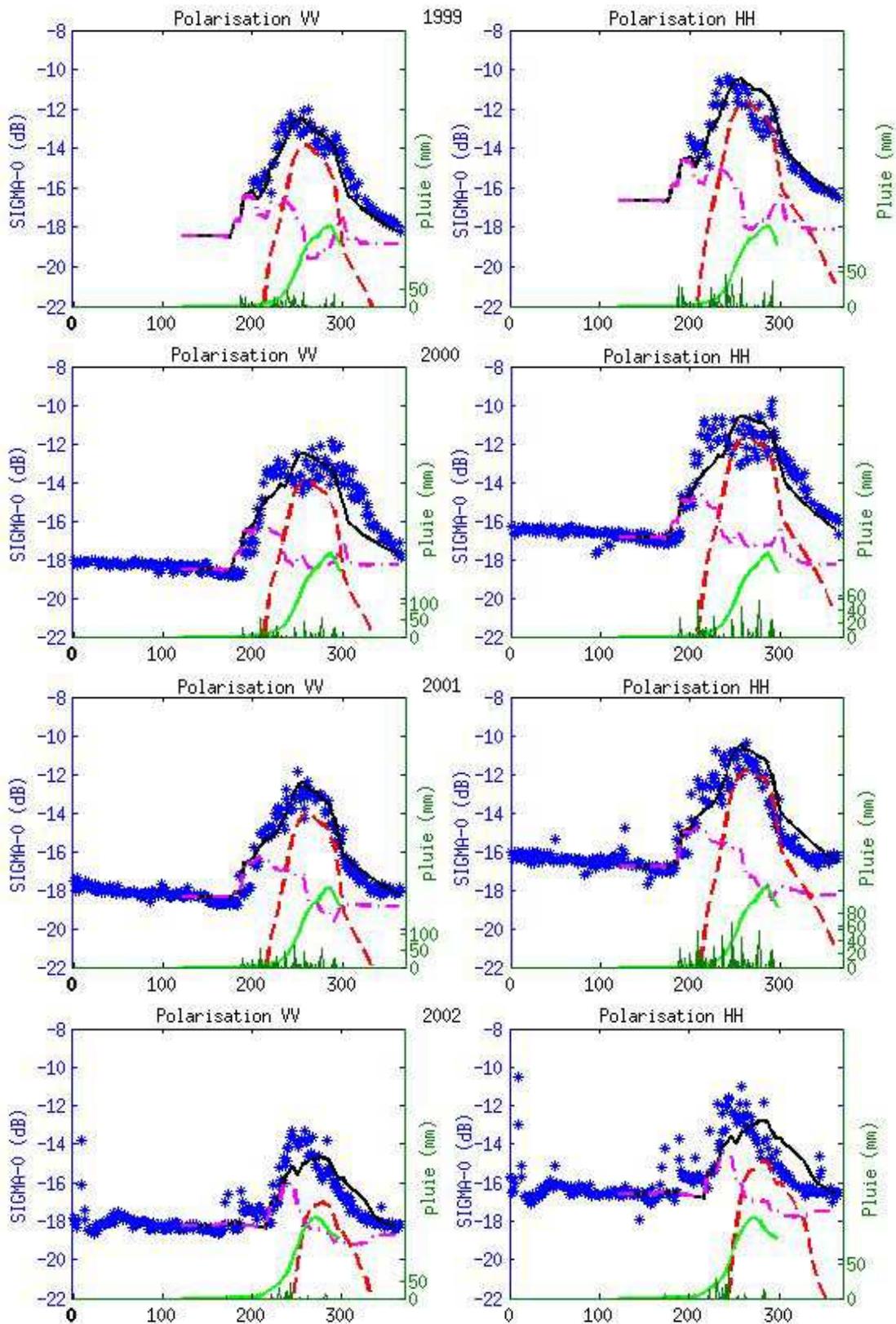


Figure V-23 : Coefficient de rétrodiffusion simulé (- noir) par rapport au coefficient mesuré (\* bleu) et la contribution du sol nu (-- magenta) et de la végétation (-. rouge), biomasse (vert clair) pour l'année 1999-2002, bande Ku (QuikScat).

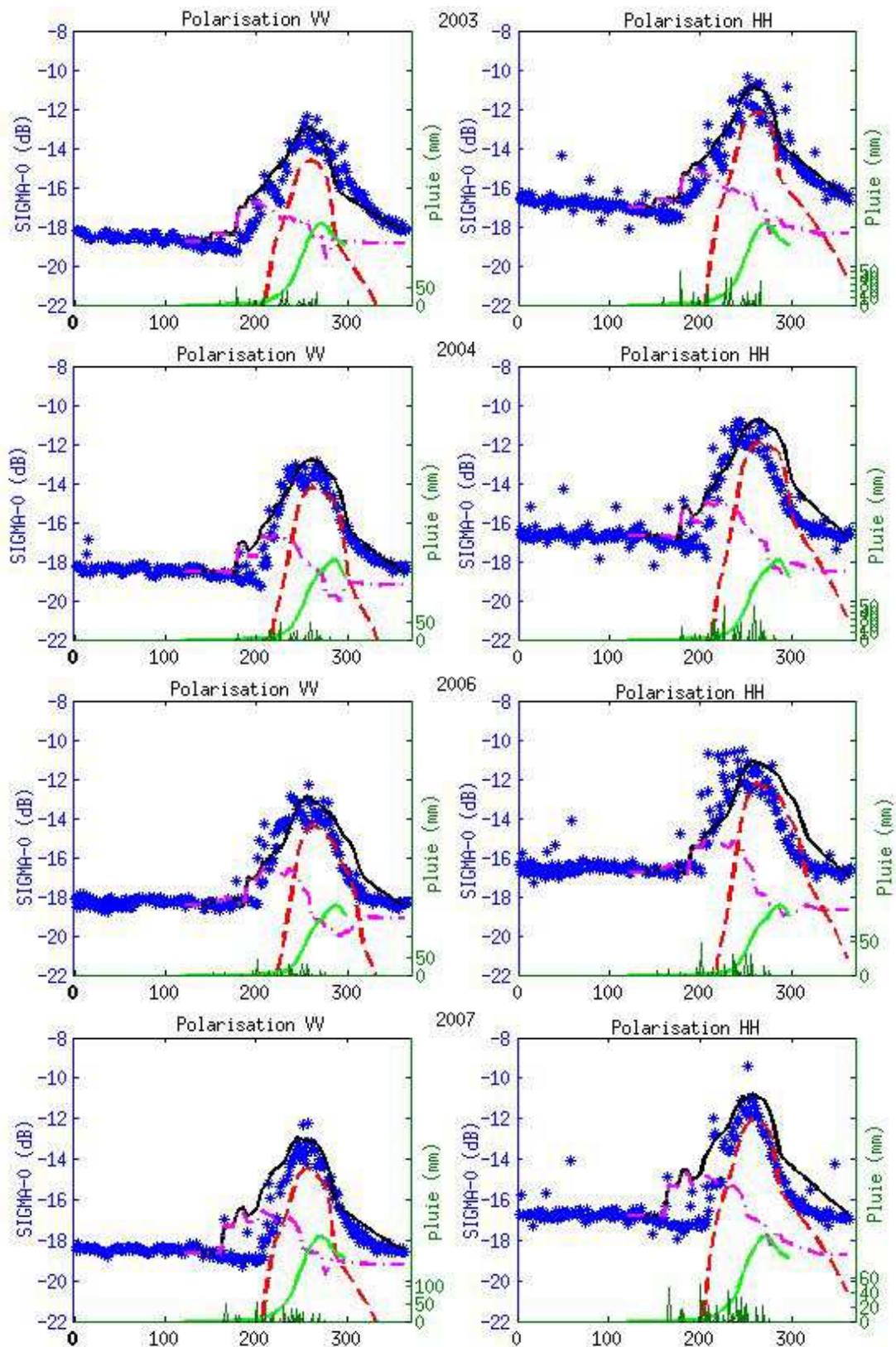


Figure V-24 : Coefficient de rétrodiffusion simulé (- noir) par rapport au coefficient mesuré (\* bleu) et la contribution du sol nu (-- magenta) et de la végétation (-. rouge), biomasse (vert clair) pour l'année 2003-2007, bande Ku (QuikScat).

Cette analyse montre une bonne concordance entre les simulations et les mesures, ce qui permet une validation des modèle STEP et de transfert radiatif sur la région pastorale du Ferlo. D'autre part, elle a permis de montrer que la bande Ku est plus sensible à la végétation au Ferlo et que la polarisation n'affecte pas vraiment la sensibilité du signal à la présence de la couche herbacée.

# **CONCLUSION & PERSPECTIVES**

Ce travail avait pour objectif d'évaluer l'apport des données en bande C et Ku à l'estimation de l'humidité du sol et la production de biomasse au Sahel. Il visait à valider l'approche développée sur d'autres sites sahéliens sur la région pastorale du Ferlo d'une part, et d'autre part à analyser la complémentarité des capteurs en bande C et Ku pour une meilleure estimation des paramètres étudiés.

À l'instar des régions du Gourma et du Fakara, on observe une bonne sensibilité saisonnière du signal en bande C. Les données du capteur ASCAT, en plus d'être en phase avec ceux du radar ESCAT, ont un réel avantage lié à leur meilleure résolution spatiale et temporelle. Cela permet d'assurer une continuité des observations en bande C à l'échelle régionale.

La signature temporelle en bande Ku est identique à celle en bande C. Néanmoins cette bande reste sensible aux perturbations atmosphériques, notamment sur les régions du Gourma et Fakara où l'on note des différences entre les mesures avant et après correction atmosphérique. Au Ferlo, ces données sont identiques, ce qui a permis une analyse de la signature temporelle du signal. On peut également signaler la faible sensibilité du signal à l'humidité du sol pour les premiers événements pluvieux. Ce capteur présente comme avantage sa bonne répétitivité temporelle (en moyenne une mesure tous les deux jours) ce qui peut être très utile quand aux détections des variations des paramètres au sol (humidité du sol et production végétale) au Sahel. D'autre part, les données du capteur Seawind permettent une analyse des polarisations HH et VV.

La signature temporelle du SAR ASAR est similaire avec celle des diffusiomètres ASCAT et ESCAT en bande C. Toutefois, en raison d'une fréquence temporelle d'acquisition moins grande que celle assurée par les diffusiomètres, les analyses des réponses observées par les SAR sont plus délicates. Des analyses plus fines nécessiteraient des observations sur une période de plusieurs années, ce qui représente un traitement d'une grande quantité de données.

En ce qui concerne les modélisations, on observe une bonne concordance entre les mesures et le signal modélisé tant en bande C qu'en bande Ku. Ce qui a permis de valider la méthode au cas de la région pastorale du Ferlo, et ainsi sur toute la ceinture sahélienne.

Les contributions du sol nu et de la végétation sont à part égale au pic de la biomasse en bande C, alors qu'en bande Ku la contribution de végétation est plus importante de celle du sol nu.

La différence observée en bande Ku entre les signaux en polarisation HH et VV n'a pu être expliquée par la modélisation, ce qui montre la limite de l'approche. Une analyse plus poussée avec les données ASAR pourrait être intéressante mais elle reste limitée par la résolution temporelle.

La différence de proportion des différentes contributions entre les bandes C et Ku pourrait être d'un grand apport pour l'inversion du signal pour l'estimation de l'humidité du sol et de la biomasse en s'affranchissant des mesures. Ce qui peut être une alternative à des données METEOSAT utilisées jusqu'ici. Des travaux sur l'exploitation de cette complémentarité pour une estimation de l'humidité du sol et de la production de biomasse avec uniquement les mesures radar sont en cours.

Le Ferlo, zone pastorale homogène présente un grand avantage quand à la validation du modèle. Il peut être un grand intérêt pour une approche multi capteur des diffusiomètres, altimètres Jason et radiomètres notamment SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) en bande L mis en orbite ces dernières années. Le radiomètre SMOS a pour objectif d'observer et de surveiller le taux d'humidité des sols et la salinité des océans serait d'un grand apport pour le modèle d'inversion. Ce qui permettrait des analyses plus poussées pour préparer la future mission SMAP (Soil Moisture Active-Passive), qui fait partie du programme Earth Observing System pour la collecte de données sur de longues périodes sur la surface de la Terre, la biosphère, l'atmosphère terrestre et les océans de la Terre. Il a pour mission de mesurer l'humidité du sol de la surface terrestre, ainsi que de leur état (gel-dégel) avec une bonne répétitivité temporelle (2 à 3 jours). Les mesures de SMAP seront couplées avec des modèles hydrologiques pour en déduire les conditions d'humidité au sol dans la partie racinaire. Ce satellite aura à son bord un radiomètre en bande L et un radar à ouverture réelle également en bande L.

# ANNEXES

# ANNEXE -I : Méthode d'échantillonnage de la végétation par CSE

(www.cse.sn)

Le CSE, pour bien suivre la biomasse, a implanté sur l'ensemble du territoire national 36 sites de contrôle au sol (figure A-1). A la fin de chaque saison des pluies, des équipes procèdent à une campagne d'échantillonnage de la production primaire. Le but de cette campagne est de calibrer les NDVI (Indice de Végétation par la Différence Normalisée) pour ainsi produire une carte de biomasse afin de pouvoir simuler la production de biomasse sur l'ensemble du territoire à partir des images NOAA.

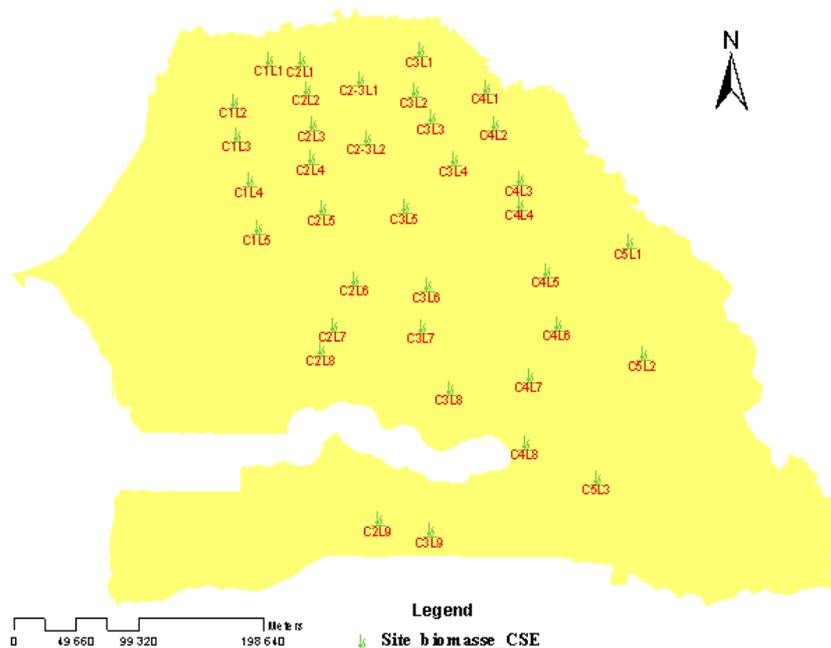


Figure A-1 : carte des sites de collecte de biomasse du CSE.

La méthode utilisée par le CSE a été développée au CIPEA pour suivre les écosystèmes pastoraux sahéliens du Gourma malien. Elle permet de minimiser les risques d'erreur liés à l'observateur. Cette méthode a ensuite été adaptée par les chercheurs du CSE, aux besoins du suivi de la végétation herbacée et ligneuse sur les sites de contrôle au sol implantés au Sénégal ([www.cse.sn](http://www.cse.sn) ; Diouf et al, 1998).

Chaque site d'une superficie de 3km X 3km est repéré par un arbre qui porte le chiffre 3 (photo A-1) matérialisant le début du transect.

Les sites sont choisis selon les critères suivants :

- éloignement par rapport aux points d'eau et aux terrains de culture ;
- homogénéité relative du milieu ;
- distance minimale de 30 km entre les sites ;
- bonne représentativité du milieu considéré.



Photo A-1 : Matérialisation du début du transect d'un site de contrôle au sol(www .cse.sn ; Diouf et al, 1998).

A la fin de chaque saison de croissance, une équipe est chargée de faire l'échantillonnage.

Cette équipe est composée, entre autres :

- d'un agent qui s'occupe de la stratification de la strate herbacée. Il devra être un cadre de niveau supérieur ayant une base en statistique pour apprécier correctement l'échantillonnage ;
- d'un autre ayant de bonnes connaissances en botanique qui s'intéresse au relevé de la composition floristique ;
- d'un agent patient et méthodique pour s'occuper de la pesée de la matière fraîche des échantillons ;
- de deux agents pour la coupe.

L'équipe aura d'abord pour mission de retrouver le site. Elle peut rencontrer des difficultés pour repérer le site avec les changements de piste d'année en année. Pour faciliter la tâche, l'équipe a sa disposition un guide, un GPS et une carte au 1/200 000, elle peut également poser des questions ou donner des détails aux populations rencontrées en cours de route.

Une fois le site retrouvé, on délimite le transect (photo A-2) de 1 km de long à l'aide d'une boussole, puis on procède à la stratification.

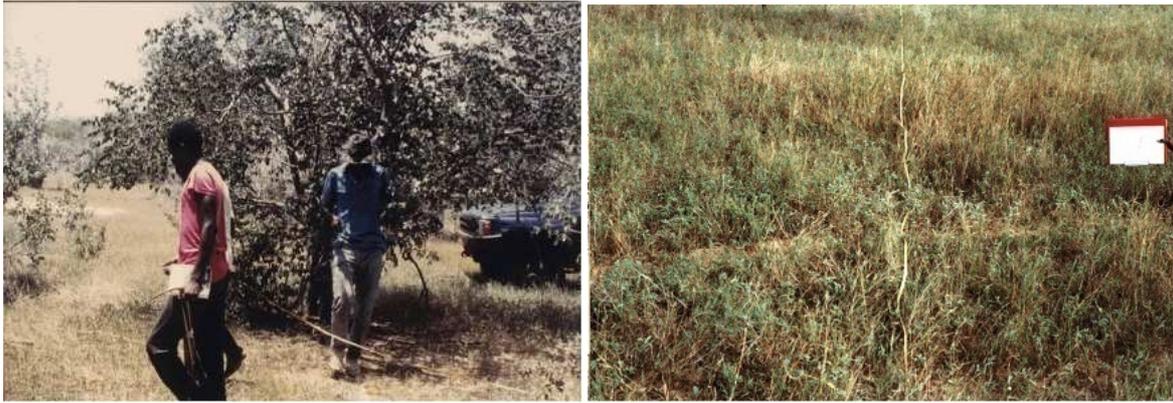


Photo A-2 : Stratification le long du transect (www .cse.sn ; Diouf et al, 1998).

Chaque mètre carré est coté par un niveau allant de 0 à 3 :

- la cote 0 correspond au sol nu ;
- la cote 1 correspond à une production relativement basse ;
- la cote 2 correspond à une production moyenne ;
- la cote 3 correspond à une production relativement élevée.

## ANNEXE -II : La polarisation

Une onde électromagnétique est caractérisée en tout point et à chaque instant par les quatre grandeurs vectorielles  $\mathbf{E}$  (champ électrique),  $\mathbf{D}$  (induction électrique),  $\mathbf{H}$  (champ magnétique) et  $\mathbf{B}$  (induction magnétique). Toutes les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière. La polarisation est une propriété d'une onde électromagnétique, elle désigne la géométrie tracée par la pointe du vecteur électrique ( $\mathbf{E}$ ) évoluant dans le temps. Les polarisations sont décrites par deux variables indépendantes : l'ellipticité et l'orientation (figure A-2). On obtient une polarisation circulaire pour une ellipticité ( $\chi = 90^\circ$ ). La polarisation est dite horizontale pour une ellipticité ( $\chi$ ) nulle, et une orientation  $\Psi$  égale à zéro ou de  $180^\circ$ , et verticale pour  $\chi = 0$  et  $\Psi = 90^\circ$ . Le plan d'incidence désigne le plan défini par la direction de l'onde incidente et la verticale.

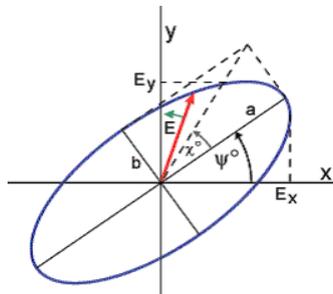


Figure A-2 : Géométrie d'une onde électromagnétique (<http://cct.mcan.gc.ca/glossary>).

Les Radar sont normalement conçus pour émettre soit des ondes polarisées verticalement (V : le champ  $\mathbf{E}$  est contenu dans le plan d'incidence), soit des ondes polarisées horizontalement (H : le champ  $\mathbf{E}$  est perpendiculaire au plan d'incidence), (figure A-3). Cela vaut dire que le champ électrique de l'onde est dans l'un des plans, soit vertical, soit horizontal. Le radar peut recevoir soit des ondes polarisées verticalement ou horizontalement. Lorsque la polarisation des ondes reçues est la même que celle des ondes émises, on dit que l'image résultante est copolarisée. Dans le cas où l'onde émise est orthogonale à celle reçue, on dit que l'image est orthopolarisée.

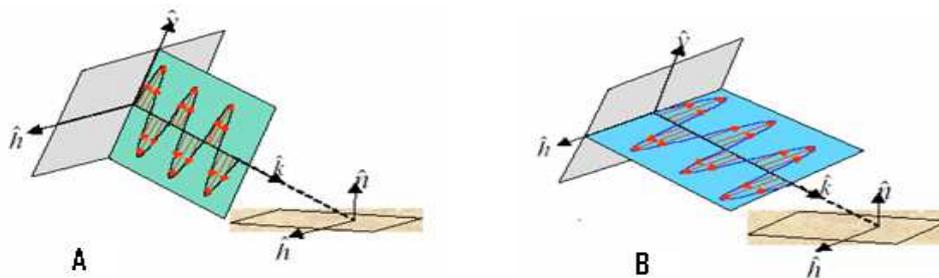


Figure A-3 : Polarisation verticale (A), horizontale (B) d'une onde électromagnétique (<http://cct.mcan.gc.ca/glossary>).

## ANNEXE -III : Traitement du speckle

Dans cette partie, nous nous intéressons au bruit présent sur les images radar, appelé speckle, qui entache leur lisibilité. Il est dû à la cohérence de l'onde radar et à l'interférence des champs rétrodiffusés par les diffuseurs élémentaires au sein de chaque cellule de résolution. Nous présentons les lois de ce bruit, ainsi que les filtres permettant de le réduire qui font toujours à l'heure actuelle l'objet de nombreuses recherches. En pratique, il n'existe pas de filtre universel adapté à tous les problèmes. Une opération de filtrage consiste à estimer la réflectivité radar idéale en fonction de l'observation bruitée.

La réponse d'une cellule de résolution est la somme des contributions complexes de chacun des  $N$  diffuseurs élémentaires (figure-A-4). Ainsi, la contribution totale pour chaque cellule

$$s'écrit alors : A \exp(j\phi) = \sum_{n=0}^N A_i \exp(j\phi_i) \quad (A-1)$$

Avec  $\phi_i$  et  $A_i$  respectivement la phase et l'amplitude du signal renvoyé par chaque diffuseur élémentaire au sein de la cellule de résolution.

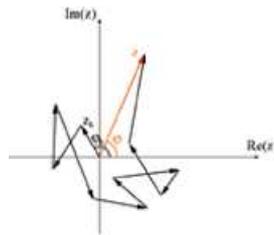


Figure A-4 : contribution des différents diffuseurs à la réponse radar.

Cette radiométrie est égale à l'amplitude du signal dans le cas d'une détection linéaire, et égale à l'intensité du signal dans le cas d'une détection quadratique. La figure A-5 montre l'aspect granulaire dû au speckle.

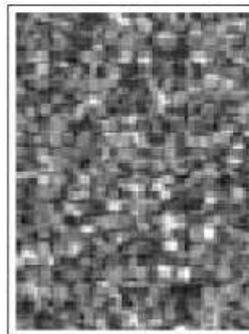


Figure A-5 : image radar ERS-1 montrant l'aspect granulaire dû au speckle.

Les propriétés fondamentales du speckle ont fait l'objet d'études de la part de plusieurs auteurs. On peut citer notamment Goodman (1976) qui a contribué dans une large mesure à la définition et à la caractérisation du speckle.

Vu les connaissances limitées concernant les détails de la structure de la surface réfléchissante, il est nécessaire de discuter les propriétés du bruit en des termes statistiques (Goodman, 1976). Ce dernier, pour modéliser le bruit, a posé au préalable deux hypothèses :

- Hypothèse H1: Le champ incident au point  $(x, y, z)$  est parfaitement polarisé.
- Hypothèse H2: Le champ incident au point  $(x, y, z)$  est parfaitement monochromatique.

En tenant compte de ces hypothèses, on représente le champ électromagnétique par un signal analytique de valeur complexe :

$$U(x, y, z, t) = A(x, y, z) \exp\{j2\pi w t\} \quad (A-2)$$

Où  $w$  représente la fréquence,  $t$  le temps et  $A(x, y, z)$  la fonction amplitude qui est elle-même une fonction complexe de coordonnées spatiales. Elle peut s'exprimer sous la forme :

$$A(x, y, z) = |A(x, y, z)| \exp\{j\phi(x, y, z)\} \quad (A-3)$$

$|A(x, y, z)|$  étant l'amplitude de cette fonction amplitude et  $\phi(x, y, z)$  la fonction phase, qui est une fonction de coordonnées spatiales.

Nous pouvons ainsi écrire la fonction amplitude sous forme complexe par :

$$A(x, y, z) = r + ji = A \cos \phi + jA \sin \phi = A^{(r)}(x, y, z) + jA^{(i)}(x, y, z) \quad (A-4)$$

Avec

$$A^{(r)}(x, y, z) = A \cos \phi$$

$$A^{(i)}(x, y, z) = A \sin \phi$$

D'autre part, le nombre  $N$  de réflecteurs élémentaires doit être suffisamment grand pour permettre d'utiliser le théorème central limite et d'utiliser des distributions gaussiennes. Ainsi, les parties réelles et imaginaires du speckle sont des variables aléatoires qui obéissent à la distribution gaussienne.

La contribution totale pour chaque cellule s'écrit alors :

$$A = \sum_{n=0}^{Nd} A_i \exp(j\phi_i) \quad (A-5)$$

Goodman a stipulé que :

- La phase  $\phi_i$  et l'amplitude  $A_i$  du signal renvoyé par chaque réflecteur  $i$  sont indépendantes entre elles. L'amplitude pouvant être constante ;
- Les phases  $(\phi_i, \phi_{i+1}, \dots)$  des réflecteurs, de même que leurs amplitudes, sont indépendantes entre elles ;
- Les phases  $\phi_i$  des contributions élémentaires sont uniformément distribuée sur  $[0, 2\pi[$

En tenant compte de toutes ces hypothèses, et en vertu du théorème de la limite centrale qui stipule que toutes les variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées tendent vers une variable aléatoire gaussienne, (aucune variable n'exerce une influence significative plus importante que les autres), nous pouvons dire que :

Les fonctions de densité de probabilité de la partie réelle (figure A-6) et imaginaire (figure A-7) sont données par :

$$P(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$P(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{i^2}{2\sigma^2}\right)$$

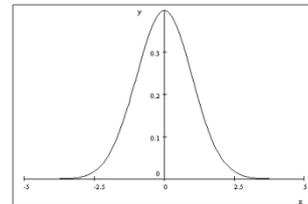


Figure A-6 : Distribution de la normale.

La phase étant répartie uniformément sur  $[0, 2\pi[$ , sa fonction densité de probabilité est donnée par :

$$P(\phi) = \frac{1}{2\pi}$$

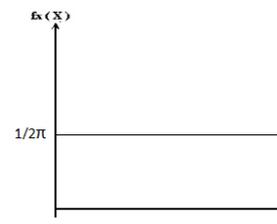


Figure A-7 : distribution uniforme.

Ainsi la densité de probabilité de l'image d'amplitude qui est en fait celle du speckle suit une loi de Rayleigh (figure A-8), elle est donnée par :

$$P(A) = \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A}{2\sigma^2}\right)$$

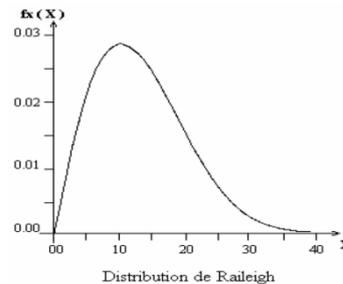


Figure A-8 : distribution de Rayleigh.

En remplaçant l'amplitude par son intensité ( $A(x, y, z) = \sqrt{I(x, y, z)}$ ), on obtient pour l'image intensité une densité de probabilité suivant la loi exponentielle (figure A-9):

$$P(I) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right)$$

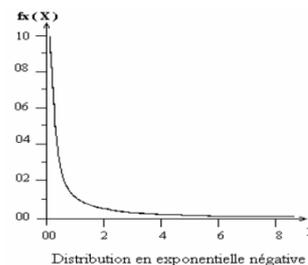


Figure A-9 : distribution exponentielle.

Les moyennes  $\mu_A$  et  $\mu_I$ , correspondant respectivement aux densités de probabilité  $P(A)$  et  $P(I)$ , ont pour expression :

$$\mu_A = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma \text{ et } \mu_I = 2\sigma^2$$

Les écarts-type normalisés (ou coefficient de variation)  $CA$  en amplitude, et  $CI$  en intensité sont donnés par :

$$C_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} = \sqrt{4/\pi - 1} = 0.5227 \text{ (A-6)}$$

$$C_I = \frac{\sigma_I}{\mu_I} = 1 \text{ (A-7)}$$

Nous remarquons dans ces résultats que la valeur du coefficient de variation du *speckle* est constante pour une image donnée. Ce qui signifie que la variance des radiométries de l'image radar sera d'autant plus grande que la moyenne du signal rétrodiffusé par la cible sera importante.

Le but donc est de diminuer l'écart type vers zéro en conservant la moyenne constante. Ceci se fait par la sommation de 2 ou plusieurs vues de la même scène de la surface observée par le radar. La formation d'une image multivues ou image « N vues » consiste à effectuer la moyenne de N échantillons indépendants.

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \text{ (A-8)}$$

En effet, la fonction de densité de probabilité de l'image en intensité pour une image N vues, qui est la somme de N lois exponentielles, sera une loi en  $\chi^2$  à 2N degrés de liberté :

$$f_I(I) = \frac{N^N}{(N-1)!} I^{N-1} \exp(-NI) \text{ (A-9)}$$

Nous pouvons remarquer que la moyenne d'une image radar « N vues » est égale à celle d'une image « 1 vue ». En effet :

$$E[I] = E\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i\right] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E[I_i] = E[I_i] \text{ (A-10)}$$

L'image en amplitude « Nlooks » s'exprime par :

$$A = \sqrt{I} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i\right]^{1/2} \text{ (A-11)}$$

Pour revenir au coefficient de variation pour des images « N vues », pour les deux types d'images, en amplitude et en intensité, la moyenne est identique à celle des images « 1 vue », et il est possible de montrer que l'écart-type, pour sa part, sera divisé par N. Pour une image N-vues, le coefficient de variation est donné par :

$$C_A = \frac{0.523}{\sqrt{N}} \quad \text{Image en Amplitude} \quad \text{(A-12)}$$

$$C_I = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad \text{Image en Intensité} \quad \text{(A-13)}$$

Où N représente le nombre de vues.

Ainsi, plus le nombre de vues est grand, plus le coefficient de variation ( $C_v$ ) est petit et donc l'écart type diminue, ce qui fait que le bruit diminue.

Un grand nombre de méthode de filtrage spatial permettant d'augmenter le nombre de vues ont été développées et quelques unes implantées dans les logiciels commerciaux. On peut en citer les filtres adaptatifs de Lee (Lee, 1980), Frost (Frost et al, 1982), Kuan (Kuan et al, 1987) ou Gamma-MAP (Lopez et al, 1990, 1993). Pour rappel, le moyennage diminue le bruit et tout en dégradant la résolution spatiale. Ainsi, pour des zones homogènes, la moyenne ne pose aucun problème contrairement aux zones hétérogènes.

On peut également augmenter le nombre de vues par filtrage temporel. Ce type de filtrage suppose que les variations d'intensité dans différentes images d'une même cible sont dues uniquement au chatoiement et pas à une variation de la réflectivité. Il faut également que les paramètres d'acquisition des images soient identiques ou du moins très semblables. Le produit de fusion temporelle obtenue présente une résolution radiométrique grandement améliorée pour une résolution spectrale inchangée (figure A-10). Plusieurs études sur les filtres temporels ont été effectuées, on peut notamment citer les travaux de Bruniquel (1996) et Fella (1997).

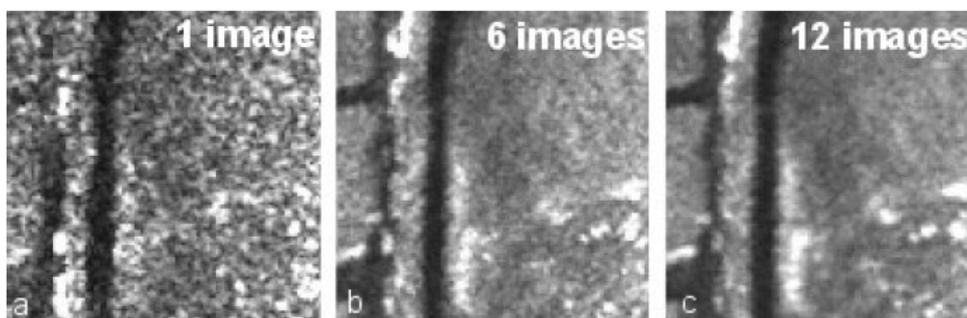


Figure A-10 : Gain en résolution radiométrique par sommation temporelle simple.

La réponse radar étant composée du signal et du bruit, un filtre serait idéal s'il est capable d'éliminer le speckle et restaurer parfaitement le signal original. En pratique, cela dépend de l'hétérogénéité de la surface observée.

## ANNEXE -IV : Les différents types de données du capteur SeaWind de Quikscat

Le satellite Quikscat est une propriété de la NASA, il est sous la surveillance et le commandement de la MOC (*Mission Operations Center*) de LAPS.

Le Centre de traitement et d'analyse du SeaWind (SeaPAC) au JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) est responsable de la réception et de l'analyse des données produites par Quikscat, avant de les transmettre à PODAAC pour la distribution. Le *Physical Oceanography Distributed Archive Center* (PODAAC) est chargé du traitement des données brutes et de la distribution des produits. Ces produits sont stockés dans des fichiers au format HDF (*Hierarchical Data Format*). Ce format permet de stocker une large gamme de type de données, et est reconnu par un grand nombre de logiciel.

Les produits de niveau 2A sont stockés par fenêtre de 25\*25 km appelées *Wind Vector Cell* (WVC). Un *Wind Vector Cell*, représente la surface balayée par le radar pour un déplacement du satellite de 25 km. Ainsi une orbite complète équivaut à 1624 WVC. Par convention, toutes les révolutions de Quikscat commencent et finissent à la latitude orbitale la plus au sud. Mais au moment du passage du satellite à la frontière orbitale, l'instrument tournant SeaWind prend des mesures de part et d'autre de celle-ci. Pour cela, le produit de niveau 2A doit inclure les WVC se prolongeant au delà des 1624, pour prendre en compte toutes les mesures prises au cours d'un tour orbital complet. Ainsi, 39 WVC sont ajoutés au début et à la fin de chaque orbite, ce qui fait un total de 1702 WVC par orbite. Les WVC supplémentaires couvrent 975 km de chaque côté de la frontière orbitale.

L'instrument SeaWind illuminant jusqu'à 900 km autour du nadir, un total de 72 WVC, soit 36 de chaque côté, devrait permettre de prendre en compte toutes les mesures pour une orbite. Mais compte tenu de l'altitude du satellite et la forme de la terre, des cellules de résolution peuvent se trouver à un peu plus de 950 km du nadir, ce qui fait que dans les produits de niveau 2A, on inclut 4 WVC supplémentaires. Avec la rotation de l'antenne radar de QuikSCAT, le nombre de mesures sigma-0 dans une cellule donnée dépend fortement de la localisation de celle-ci. Des études ont montré que les cellules situées à environ 700 km de la trace au sol du satellite peuvent contenir jusqu'à 40 impulsions ou plus. La plupart des cellules sont cependant susceptibles de contenir 12 à 30 impulsions.

En utilisant la vitesse de satellite et la fréquence de répétition des impulsions, on peut déterminer le nombre de mesures que l'instrument SeaWind peut acquérir pendant qu'il effectue un déplacement donné. Ces caractéristiques indiquent que QuikSCAT effectue

approximativement 709 mesures pour un déplacement de 25 km. Cette distance représente la largeur d'une WVC pour les données de niveau 2A. Pour s'adapter à la fréquence de pulsation la plus élevée en fonction des caractéristiques du SES (Sous-système Electronique du diffusiomètre), la conception des données de niveau 2A suppose que l'espace devrait être disponible pour 810 impulsions de mesure par WVC.

<http://winds.jpl.nasa.gov/missions/quickscat/quikindex.html>.

Presque tous les éléments des données de niveau 2A sont stockés au format HDF SDS. La seule exception reste le wvc-row-time, qui est stocké en format HDF Vdata. Parmi les produits de niveau 2A au format HDF SDS, seul les row-number et num-sigma0 sont unidimensionnels, tous les autres sont bidimensionnels. Dans chacun de ces produits, le premier indice représente le numéro du WVC, et le second la position du sigma0 dans le WVC.

Le coefficient de rétrodiffusion radar sigma0 ( $\sigma^0$ ) d'un pixel donné représente la moyenne des valeurs des 8 pixels qui l'entourent et appartenant à une même impulsion.

On fait correspondre à chaque sigma0 un coefficient d'atténuation. Ces coefficients d'atténuation sont estimés à partir de cartes climatiques globales produites sur plusieurs années. le coefficient de rétrodiffusion corrigé est donné par l'équation 11 (Tsai et al, 1999):

$$\sigma_{\text{corrigé}} = \sigma_{\text{non\_corrigé}} + \frac{2 * \sigma_{\text{atténuation}}}{\cos\left(\frac{2\pi\theta}{360}\right)} \quad (\text{A-14})$$

Avec :

- $\sigma_{\text{corrigé}}$  : Coefficient de rétrodiffusion radar corrigé (en décibel)
- $\sigma_{\text{non\_corrigé}}$  : Coefficient de rétrodiffusion radar non corrigé (brute) (en décibel)
- $\sigma_{\text{atténuation}}$  : Coefficient d'atténuation (en décibel)
- $\theta$  : L'angle d'incidence au sol (en degré)

Long (<http://podaac.jpl.nasa.gov>) a effectué des séries de traitement de ces images, les produits dérivés sont mis à la disposition de la communauté scientifique sur le site ([http://aspera.jpl.nasa.gov/download/pub/ocean\\_wind/quickscat/sigma0browse/](http://aspera.jpl.nasa.gov/download/pub/ocean_wind/quickscat/sigma0browse/))

Les produits images délivrés par Long se présentent ainsi :

- **BRW** (*Browse*) : ces produits correspondent aux données journalières et concerne le globe avec des pixels de 0.2° soit environ 22.5 km à l'équateur (900 l x1800 c), ou les pôles Nord et Sud (projection stéréographique), 22.5 km avec l'altitude de référence de 70°. Ces données sont disponibles aux adresses suivantes :

[http://podaac.jpl.nasa.gov/quikscat/sigma0browse/sigbrw\\_browse.html](http://podaac.jpl.nasa.gov/quikscat/sigma0browse/sigbrw_browse.html) (produits complets)

<http://www.scp.byu.edu/data/quikscat/sigbrw.html> (juste les  $\sigma^0$ );

- **GRD** (*Gridded*) : ils correspondent visiblement aux produits BRW mais sur différentes partie du globe dans des projections *Lamber equal area* ou *polaire stéréographique*. Ces données sont disponibles à l'adresse : <http://www.scp.byu.edu/data/quikscat/SIR>
- **SIR** related **AVE** algorithm: ils correspondent à des résolutions améliorées (<http://www.scp.byu.edu/docs/pdf/MERS0504.pdf>). Les détails sont donnés dans *Long, Hardin, Whiting, «Resolution enhancement of spaceborne scatterometer data», IEEE TGRS, vol. 31, n°3, pp700-715, 1993.*

Produits SIR avec Egg : pixel 4.5 km avec une résolution effective : 8-10 km

Produits SIR avec slice : pixel 2.225 km avec une résolution effective : 6-8 km

([http://www.scp.byu/docs/QSCAT\\_user\\_notes.html](http://www.scp.byu/docs/QSCAT_user_notes.html))

## ANNEXE -V : Description du module de croissance de la végétation du modèle STEP

### A- Photosynthèse :

La photosynthèse  $P_g$  (processus bioénergétique qui permet aux plantes de synthétiser de la matière organique en exploitant la lumière du soleil) est l'un des paramètres permettant de quantifier la production végétale. La photosynthèse comprend trois phases :

- De l'énergie électromagnétique, sous forme de lumière, est absorbée grâce à l'action de pigments dont le plus connu est la chlorophylle.
- Cette énergie est transformée en énergie chimique, sous forme de potentiel d'oxydoréduction.
- L'énergie chimique est utilisée pour réduire le  $\text{CO}_2$  et incorporer le carbone dans des composés organiques riches en énergie qui permettent grâce à l'anabolisme (synthèse organique) la croissance des êtres vivants et grâce au métabolisme (transformation) énergétique un apport en énergie

Elle est une fonction du gradient de  $\text{CO}_2$  (dioxyde de Carbone) qui représente la différence entre la pression ambiante ( $C_a$ ) et intra-cellulaire ( $C_i$ ) et qui est inversement proportionnelle à la résistance au transfert du  $\text{CO}_2$  (Gaastra, 1959 ; Jones, 1992). La photosynthèse est exprimée en absorption de  $\text{CO}_2$  ou dégagement de  $\text{O}_2$  par unité de temps ( $\Delta \text{O}_2 / \Delta t$ ), elle est donnée par:

$$P_g = \frac{(C_a - C_i)}{(1.64 * r_s + r_m + 1.39 * r_a)} \quad (\text{A-15})$$

Où  $r_a$ ,  $r_s$ , et  $r_m$  représentent respectivement la résistance du couvert à la diffusion de vapeur d'eau, la résistance stomatique (résistance des stomates aux échanges gazeux) et la résistance mésophyllienne de la couche limite (résistance rencontrée par la vapeur d'eau à son transfert de la surface du végétal dans l'air ambiant). Lorsque l'eau est disponible, la résistance stomatique est minimum ( $r_{m,\min}$ ) et la photosynthèse est maximale. En considérant la différence de pression comme constante (Werk et al., 1983), on obtient la relation suivante :

$$P_g = P_{\max} \frac{(1.64 * r_{s,\min} + r_m + 1.39 * r_a)}{(1.64 * r_s + r_m + 1.39 * r_a)} \quad (\text{A-16})$$

Ainsi en utilisant les conditions aux limites, la photosynthèse devient :

$$P_g = P_{\max} * f(\psi_l) * f(T_l) \quad (\text{A-17})$$

Avec  $f(\psi_l)$  une fonction du potentiel hybride de la feuille et  $f(T_l)$  une fonction de la température de la feuille.

On modélise  $P_{\max}$  par :  $P_g = PARa * \epsilon_{\max}$  ou  $PARa$  est le rayonnement photosynthétiquement actif absorbé entre 400 et 700 micromètres par les plantes et  $\epsilon_{\max}$  l'efficacité de conversion maximum du  $PARa$  en matière sèche.

La  $PARa$  est l'efficacité de conversion maximum, est donnée par :

$$PARa = I_0 * \epsilon_c * \epsilon_i \quad (A-18)$$

Avec  $I_0$  est le rayonnement global incident ( $W/m^2$ ) qui dépend des températures maximales  $T_{\max}$  et minimale  $T_{\min}$  ainsi que de l'altitude et de la latitude du milieu, il est donné par :

$$I_0 = \frac{T_{\max} + T_{\min} + 0.006 * Altitude}{60(100 - Latitude)} * 41855 \quad (Watt/ m^2) \quad (A-19)$$

$\epsilon_c$  l'efficacité climatique qui est le rapport entre rayonnement photosynthétiquement actif et rayonnement global et  $\epsilon_i$  l'efficacité d'interception par le couvert appelé aussi efficacité d'absorption du rayonnement par le feuillage. Sachant que l'efficacité d'interception par le couvert dépend de la quantité de matière végétale verte approchée par la valeur de l'indice foliaire noté  $LAI$  (*Leaf Area Index*) de la végétation verte. Elle est donnée par :

$$\epsilon_i = K_{PAR} * \text{Log}(1 + 9.808 * LAI) \quad (A-20)$$

$K_{PAR}$  étant le rapport entre le rayonnement incident et le rayonnement intercepté par le couvert végétal. Il dépend des propriétés géométriques du couvert et est égale à 0.466 dans le modèle STEP utilisé.

La photosynthèse peut s'écrire donc :

$$P_g = PARa * \epsilon_{\max} * f(\psi_l) * f(T_l) \quad (A-21)$$

**La fonction du potentiel hydrique** de la feuille étant considéré très faible par rapport aux autres résistances, Jones (1976) a jugé de le négliger.

L'effet de la disponibilité en eau sur la photosynthèse s'illustre à travers la relation entre la résistance stomatique et le potentiel hydrique de la feuille ( $\psi_l$ ) :

$$r_s = r_{s,\min} \left( 1 + \left( \frac{\psi_l}{\psi_{l/2}} \right)^n \right) \quad (A-22)$$

$\psi_{l/2}$  est le potentiel hydrique de la feuille lorsque les stomates sont formés à 50% est un paramètre empirique (Rambal et Cornet, 1982), il est égal à 5 dans le modèle de STEP utilisé dans notre étude. Ainsi, la fonction de stress exprimée par une fonction du potentiel hydrique de la feuille s'écrit :

$$f(\psi_l) = \frac{1.64 * r_{s,\min} + r_m}{1.64 * r_{s,\min} (1 + \left(\frac{\psi_l}{\psi_{l/2}}\right)^5) + r_m} \quad (\text{A-23})$$

**La fonction de la température de la feuille**, en tenant compte de l'hypothèse selon laquelle la photosynthèse journalière et la température moyenne journalière de la feuille sont liées par une relation linéaire (Angus et Wilson, 1976), est donnée par la relation :

$$f(T_l) = 1 - (T_{\max_p} - T_l) * 0.0389 \quad (\text{A-24})$$

$T_{\max_p}$  étant la température de la feuille au maximum de photosynthèse

### La respiration

La respiration totale est le processus de respiration qui a lieu dans une plante et qui se traduit par des échanges gazeux. Elle correspond à la somme des termes de photorespiration ( $R_p$ ) qui se déroule uniquement en présence de lumière, et de la respiration ( $R_d$ ) qui consiste pour la plante à absorber de l'O<sub>2</sub> en rejetant du CO<sub>2</sub>. Cette dernière est assurée par la chaîne respiratoire située dans la membrane des mitochondries, qui se déroule en permanence.

- La photorespiration est une fonction constante ( $pr$ ) de la photosynthèse brute pour les espèces de type C3 et reste négligeable pour les espèces de C4 (Ludlow et Wilson, 1972). La proportion en C3 et C4 est donc important à connaître pour un site donnée. Elle varie d'une année à une autre sur d'autres sites au Sahel.
- La respiration peut être dissociée en deux parties que sont la respiration de maintenance ( $R_m$ ) et respiration de croissance ( $R_c$ ) qui n'est rien d'autre que le coût de construction de nouveaux tissus (Mc Cree, 1970 ; Thornley, 1970).

La respiration de croissance est donnée par :

$$R_c = (1 - Y_G) * P_g * (1 - pr) \quad (\text{A-25})$$

$Y_G$  Étant un paramètre permettant de quantifier la proportion de carbone incorporée dans les nouveaux tissus ainsi que l'énergie consommée pour la synthèse (Farrar, 1985 ; Amthor, 1986), ei est égal à 0.75 dans le modèle STEP.

La respiration d'entretien quand à elle permet l'entretien des tissus de la plante. Elle nécessite une certaine consommation d'énergie due à la synthèse de protéine, la réparation des membranes et le maintien des gradients ioniques (Penning de Vries, 1975). Elle peut être illustré par l'équation suivante :

$$R_m = ms * Y_G * BM \quad (\text{A-26})$$

$ms$  étant le coefficient de maintenance qui est donné par :

$$ms = C_e * 2^{\frac{T}{10}-2}$$

$C_e$  étant le cout d'entretien qui est égal à 0.02 à 20° et  $T$  la température journalière

Ainsi la respiration totale qui est exprimé en (g.MS/m<sup>2</sup>) est donnée par :

$$R_t = R_d + pr * P_g = P_g [1 - Y_G(1 - pr)] + ms * Y_G * BM \quad (A-27)$$

### **B- La sénescence**

Elle dépend de l'âge de la plante, au taux d'apparition des nouvelles feuilles et aux conditions environnementales notamment la disponibilité en eau (Fisher et Turner, 1978). Elle est considérée comme dépendant principalement du stress hydrique à travers une relation de type Q10 avec le potentiel hydrique de la feuille. Le taux de sénescence est supposé constant jusqu'au pic de phytomasse. De plus, la sénescence peut débuter avant la date du pic lorsque le bilan carboné ( $P_g - R_t$ ) devient négatif. La sénescence peut donc être exprimée par :

$$S = s * BM \quad (A-28)$$

Ou  $s$  est le taux de sénescence qui est fonction du taux de mortalité. Ce dernier est égal à  $1.91 \times 10^{-3}$  dans le modèle STEP.

# Liste des figures

- Figure I-1 : Schéma de la circulation de Hadley (AMMA, 2002).
- Figure I-2 : Schéma conceptuel des phénomènes clés (A) et approche multi échelle (B).
- Figure I-3 : Schéma à trois dimensions du WAM. ITD, inter-tropical discontinuity; TEJ, tropical easterly jet; STWJ, subtropical westerly jet; AEJ, African easterly jet (Lafore et al., 2010).
- Figure I-4 : Schéma des échanges du cycle de l'eau global (source : [www.unep.org](http://www.unep.org)).
- Figure II-1 : Localisation géographique du Sahel (Courel 1984).
- Figure II-2 : Localisation géographique du bassin du Ferlo (PNAT, 1986).
- Figure II-3 : Carte du toit de la nappe du maestrichtien (CSE., 2006).
- Figure II-4 : Carte des mares du Ferlo (Sarr, 2009).
- Figure II-5 : Carte des sols du Ferlo (PNAT, 1986).
- Figure II-6 : Les variations interannuelles de la pluviométrie de 1920 à 1989 au Ferlo (Jacqueminet, 1991).
- Figure II-7 : Cmul mensuel de la pluviométrie de Linguère de 1987-2006.
- Figure II-8 : Variation interannuelle de la pluie à la station de Linguère de 1987 à 2006.
- Figure II-9 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude (PNAT, 1986).
- Figure II-20 : Carte des forages du Ferlo (Sarr, 2009).
- Figure II-11 : Zone d'étude, sites d'échantillonnage de biomasse du Centre de Suivi Ecologique (CSE) et les stations de l'Agence Nationale de la Météorologie du Sénégal (ANAMS ; PNAT, 1986, modifiée par Gayane, 2007).
- Figure III-1 : Quelques capteurs radar mis en orbite ces dernières années.
- Figure III-2 : Bandes de fréquences utilisées en télédétection radar (<http://cct.mcan.gc.ca/glossary>).
- Figure III-3 : Bande illuminée par le radar (fauchée) au cours de son déplacement.
- Figure III-4 : Impulsion rectangulaire illuminant trois points distincts (a) Configuration de la résolution radiale au sol (b).
- Figure III-5 : Largeur du pic d'auto-corrélation de l'impulsion.
- Figure III-6 : a) diffusiomètre à ouverture latérale - b) cellule de résolution.
- Figure III-7 : Les différentes formes de prise de vue des diffusiomètres spatiaux : a) visée avant, b) visée latérale, c) visée oblique, d) visée à balayage conique d'après Elachi et al (1987).
- Figure III-8 : Description géométrique des diffusiomètres radar.

- Figure III-9 : Principe de filtrage spatial.
- Figure III-10 : Géométrie d'acquisition du diffusiomètre Seawinds de Quikscat ( Spencer et al., 1997)
- Figure III-11 : Fauchée extérieure du diffusiomètre Quikscat.
- Figure III-12 : Surface balayée par le radar Quikscat durant la journée du 1<sup>er</sup> janvier 2001 (Dunbar, 2001).
- Figure III-13:** Surface balayée par le capteur Metop en une journée (Figa-Saldaña et al., 2002).
- Figure III-14 : Description physique du capteur ASCAT. (Figa-Saldaña et al., 2002).
- Figure III-15 :** Principe de l'acquisition des données par l'instrument ASCAT (Copyright EUMETSAT).
- Figure III-16 : Mode d'opération du capteur ASAR (source : <http://earth.esa.int/envisat>).
- Figure V-17 : Géométrie d'acquisition ASAR (Holah, 2005).
- Figure V-18 : Image ASAR acquise en mode ascendant (A) et en mode descendant (B).
- Figure IV-1 : Les différents comportements de l'onde émise sur un couvert végétal : 1) sol nu ; 2) couverture herbacée ; 3) interaction sol-couvert.
- Figure IV- 2 : Schéma de la réflexion - transmission d'une onde plane.
- Figure IV-3 : Variation de constante de Fresnel en fonction de l'angle d'incidence pour des constants diélectriques différents, en polarisation horizontale et verticale.
- Figure IV-4 : Variation de la constante diélectrique en fonction de l'humidité volumétrique du sol en bande C et Ku (Hallikainen et al., 1985).
- Figure IV-5 : Variation du coefficient de rétrodiffusion radar en polarisation VV et HH en fonction l'incidence pour différente rugosité et humidité du sol en bande C (modèle de Oh 1992).
- Figure IV-6 : Variation du coefficient de rétrodiffusion radar en polarisation VV et HH en fonction l'incidence pour différente rugosité et humidité du sol en bande Ku (modèle de Oh 1992).
- Figure IV-7 : Modélisation des angles d'orientation et des démentions d'une feuille d'herbe.
- Figure IV-8 : Comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion pour deux valeurs moyennes de la constante diélectrique dans le cas d'une diffusion de volume. (Ulaby et al., 1982).
- Figure V-1: Variation du coefficient de rétrodiffusion radar sur différents types de surface (a) ; (Frison et al., 1996a), et variation de la réponse radar en saison sèche en fonction de l'incidence (b) ; (Faye et al., 2011)
- Figure V-2 : Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion radar mesuré par le diffuseur ESCAT calibré à 25° (a) et 45° (b) d'incidence et de la pluviométrie (1992-2008).

- Figure V-3 : Coefficient de rétrodiffusion mesurées par le capteur ASCAT de Metop et normalisé à 25° (rouge), 45° (bleu) et 54° (magenta) d'incidence.
- Figure V-4 : Coefficient de rétrodiffusion mesuré par les capteurs ERS (1992-2007) et ASCAT de Métop (2007-2008).
- Figure V-5 : Coefficient de rétrodiffusion mesuré par les capteurs ERS (2006-2007) et ASCAT de Métop (2007-2008).
- Figure V-6 : Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion radar (a.  $\sigma_{VV}$ , b.  $\sigma_{HH}$ ) obtenu à partir des produits 2A TOA (non corrigés), corrigés des effets atmosphériques, et des produits BRW. Année 2004, site Ferlo (Sénégal).
- Figure V-7 : Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion radar (a.  $\sigma_{VV}$ , b.  $\sigma_{HH}$ ) obtenu à partir des produits 2A TOA (non corrigés), corrigés des effets atmosphériques, et des produits BRW. Année 2004, site Gossi au Gourma (Mali).
- Figure V-8 : Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion radar (a.  $\sigma_{VV}$ , b.  $\sigma_{HH}$ ) obtenu à partir des produits 2A TOA (non corrigés), corrigés des effets atmosphériques, et des produits BRW. Année 2004.
- Figure V-9 : Coefficient de rétrodiffusion mesuré par le Radar SeaWind de Quikscat en polarisation VV et HH et la différence entre les mesure HH et VV (1999-2007).
- Figure V-10 : Zoom sur l'année l'écart observé entre les mesures HH à 46° d'incidence et VV à 54°.
- Figure V-11 : a) Simulations de  $\sigma_{HH}$  et  $\sigma_{VV}$  pour un sol nu en fonction de l'angle d'incidence ( $s = 1,4$  cm). b) Simulations de  $\Delta\sigma = \sigma_{HH}(46^\circ) - \sigma_{VV}(54^\circ)$  en fonction de l'humidité du sol pour différentes rugosité.
- Figure V-12 : Coefficient de rétrodiffusion radar mesuré par le SAR ASAR d'ENVISAT en mode Alternating Polarisation et mode Wide Swath (polarisation HH), normalisées à 45° d'incidence.
- Figure V-13 : Coefficient de rétrodiffusion radar mesuré par le capteur ASAR d'ENVISAT en mode AP, en polarisations HH et HV. Ces mesures sont normalisées à 45° d'incidence.
- Figure V-14 : Coefficient de rétrodiffusion mesuré à 54° par les capteurs SCAT (ERS et Metop) et Seawind en polarisation VV.
- Figure V-15 : Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion radar mesuré par l'instrument *Seawind* de Quikscat et le capteur ASAR. Année 2006.
- Figure V-16 : Coefficient de rétrodiffusion mesuré par le Wind Scaterometer de ERS (VV) et le SAR ASAR d'ENVISAT en mode Alternating Polarisation (HH) et Wide Swath (HH et VV).
- Figure V-17 : Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion simulé (-) et mesuré (\*) avec la pluie.
- Figure V-18 : Contribution du sol nu et de la végétation à la réponse radar pour.

- Figure V-19 : Évolution temporelle des contributions du sol nu (- ·-), de la végétation (- -) et du sol sous la végétation (··) à la rétrodiffusion de la scène (-- à 45° d'incidence pour le site de Gourma Rharous (d'après Frison *et al.*, 1998).
- Figure V-20 : Contributions de la végétation annuelle (en vert), des ligneux (en brun) et du sol nu (en bleu) à la rétrodiffusion totale (en rouge) à 45° d'incidence. Les observations WSC (\*) sont aussi représentées (Zine 2004).
- Figure V-21 : Coefficient de rétrodiffusion mesuré par le Radar SeaWind de Quikscat en polarisation et celui simulé en polarisation VV (a.) et HH (b.) ; (1999 2007).
- Figure V-22 : Ecart entre les données mesurées (simulées) en polarisation HH et VV.
- Figure V-23 : Coefficient de rétrodiffusion simulé (- noir) par rapport au coefficient mesuré (\* bleu) et la contribution du sol nu (-- magenta) et de la végétation (-. rouge), biomasse (vert claire) pour l'année 1999-2002.
- Figure V-24 : Coefficient de rétrodiffusion simulé (- noir) par rapport au coefficient mesuré (\* bleu) et la contribution du sol nu (-- magenta) et de la végétation (-. rouge), biomasse (vert claire) pour l'année 2003-2007.
- Figure A-1 : Carte des sites de collecte de biomasse du CSE.
- Figure A-2 : Géométrie d'une onde électromagnétique (<http://cct.rncan.gc.ca/glossary>).
- Figure A-3 : Polarisation verticale (A), horizontale (B) d'une onde électromagnétique (<http://cct.rncan.gc.ca/glossary>).
- Figure A-4 : Contribution des différents diffuseurs à la réponse radar.
- Figure A-5 : Image radar ERS-1 montrant l'aspect granulaire dû au speckle.
- Figure A-6 : Distribution de la normale.
- Figure A-7 : Distribution uniforme.
- Figure A-8 : Distribution de Rayleigh.
- Figure A-9 : Distribution exponentielle.
- Figure A-10 : Gain en résolution radiométrique par sommation temporelle simple.

## Liste des photos

- Photo II-2 : Mare asséchée (1), mare aménagée à Dahra qui contient encore une grande quantité de l'eau (2), (octobre - novembre ; clichés Faye, 2007).
- Photo II-2 : Vues de la végétation au Ferlo en fin de saison des pluies (novembre ; clichés Faye, 2007).
- Photo II-3 : Transhumants Peuls (clichés Faye, 2007).
- Photo II-4 : Peuls sédentaires (clichés Faye, 2007).
- Photo II-5 : Troupeaux de vache au forage dans la réserve de Doly (clichés Faye, 2007).
- Photo A-1 : Matérialisation du début du transect d'un site de contrôle au sol(www .cse.sn ; Diouf et al, 1998).
- Photo A-2 : Stratification le long du transect (www .cse.sn ; Diouf et al, 1998).

## Liste des tableaux

- Tableau II-1 : Coordonnées géographique des stations pluviométriques de l'ANAMS dans la zone d'étude.
- Tableau II-2 : Coordonnées géographique des sites de biomasse du CSE dans la zone d'étude.
- Tableau III-1 : Les sept fauchées et l'angle d'incidence correspondant pour l'image Mode d'ASAR.
- Tableau IV-1 : Valeurs des paramètres de sol utilisé pour le cas du Ferlo.
- Tableau IV-2 : Récapitulatif des dimensions des feuilles dans notre modèle lors de cette étude.
- Tableau V-1 : Récapitulatif des statistiques de  $\sigma_{amp}$  obtenue sur le Ferlo.
- Tableau V-2 : Amplitudes annuelles des coefficients mesurés et simulés.
- Tableau V-3 : Coefficients de rétrodiffusions mesurés par le radar Quikscat et ceux simulé par les modèle STEP et Karam.

# **BIBLIOGRAPHIE**

Abdel-Messeh M. and Quegan S., 2000 : Variability in ERS scatterometer measurements over land. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 38 (4), 1767-1776.

AEO-2, 2006 : Africa Environment Outlook 2006. Programme des Nations Unies pour l'environnement (UNEP), 36 pages, ([www.unep.org](http://www.unep.org)).

Akpo L.E., 1992 : Influence du couvert ligneux sur la structure et le fonctionnement de la strate herbacée en milieu sahélien. Les déterminants écologiques. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 183 p.

Akpo L.E. et Grouzis M., 1992 : Effets de l'arbre sur la production et la qualité des pâturages sahéliens. Séminaire : Bilan sur les recherches relatives au sylvo-pastoralisme au Sahel. UNESCOIRCS - Sahel/ République d'Allemagne, Dakar, 7-12 mai 1992.

Akpo L.E., Grouzis M., BA T.A., 1995 : L'arbre et l'herbe au Sahel : effets de l'arbre sur la composition chimique des pâturages naturels du nord - Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Revue Médicale Vétérinaire*, 146 (10) : 663-670.

Akpo L.E. et Grouzis M., 1995 : Structure spécifique d'une végétation sahélienne. Cas de Wiidu Thiengoli (Ferlo, Sénégal). *Bull Mus Natl Hist Nat*, 4e sér, 17, section B, *Adansonia*, no 1-2 : 39-52.

Akpo L.E., Goudiaby V.A., Grouzis M., Le Houerou H.N., 2005 : Savane arborée ; couvert végétal ; aptitude du sol ; propriété physicochimie ; humidité du sol ; microclimat ; température ; rayonnement solaire global Sénégal ; zone sahélienne/ Ferlo. *West African Journal of Applied Ecology*, 2005, 7, p. 41-52.

AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analyses), 2002 : Table Of Contents (African Monsoon Multidisciplinary analyses), [http://amma.mediasfrance.org/france/livre\\_blanc.pdf](http://amma.mediasfrance.org/france/livre_blanc.pdf).

Amthor J.S., 1986 : *Evolution and applicability of a whole plant respiration model*, *J. Theor. Biol.* 122:473-490.

Angus J.F. and Wilson J.H., 1976 : Photosynthesis of barley and wheat leaves in relation to canopy models, *Photosynthetica*, 10: 367-377.

ANNONYME 1988 : Introduction au projet Ecosystèmes pastoraux sahéliens. GEMS Sér. SAHEL. PNUE/FAO: AG:EP/SEN/001, Rap. techn., Rome: 146 p.

Aubreville A., 1949 : Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Soc. Et. Géogr. Maritimes et Coloniales, Paris, 351 p.

- Baghdadi N., Gaultier S. and King C., 2002c : Retrieving surface roughness and soil moisture from SAR data using neural network. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 28, no. 5, pp. 701-711.
- Barral H., 1982 : Le Ferlo des forages. Gestion ancienne et actuelle de l'espace pastoral. ORSTOM éd.: 85 p.
- Barral H., Benefice E., Boudet G., Denis J.P., DE Wispelaere G., Diaite I., Diaw O.T., Dieye K., Doutre M.P., Meyer J.F., Noel J., Parent G., Piot J., Planchenault D., Santoir C., Valentin C. et Valenza J., 1983 : Systèmes de Production d'élevage au Sénégal dans la région du Ferlo. Rapport ACC-GRIZA-LAT, GERDAT-ORSTOM, Paris, 172 p.
- Baup F., Mougin E., De Rosnay P., Timouk F., Chênerie I., 2007 : Surface soil moisture estimation over the AMMA Sahelian site in Mali using ENVISAT/ASAR data. *Remote Sensing of Environment* 109 (2007) 473-481
- Bernard R., Vauclim M. et Vidal-Madjoar D., 1981 : Possible use of active microwave remote Sensing data for prediction of regional evaporation by numerical simulation of soil water movement in the unsaturated zone. *Water Resour. Res.*, 17(6), p. 1603-1610.
- Bock O., Guichard F., Meynadier R., Gervois S., Agustí-Panareda A., Beljaars A., Boone A., Nuret M., Redelsperger J.L., Roucou P., 2011 : *The large-scale water cycle of the West African monsoon*, *Atmospheric Science Letters* 12, 1 (2011) 51-57.
- Bradley G.A. et Ulaby F.T., 1981 : *Aircraft radar response to soil moisture*. *Remote Sensing Environment.*, 11, p. 419-438.
- Bruckler L., Wittono H. and Stengel P., 1988 : Near surface moisture estimation from microwave measurements. *Remote Sensing of Environment*, vol. 26, pp. 101-121.
- Bruniquel J., 1996 : Contribution des données multi-temporelles à l'amélioration radiométrique et à l'utilisation d'images radar à synthèse d'ouverture, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, No. 2245.
- Chamard P.C. and Courel M.F., 1999 : La forêt sahélienne menacée, *Sécheresse*, 10(1) : 11-18.
- Charney J., Stone H. and Quirk W.J., 1975 : Drought in the Sahara : a Biogeophysical Feedback Mechanism, *Science*, vol 187, p. 434-435.
- Courel M., 1984 : Etude de l'évolution récente des milieux Sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse de doctorat d'Etat, Université Paris I, 407 p.
- CSE., ROSELT/OSS., 2002 : Synthèse des études diagnostiques des sites de l'observatoire du Ferlo, 10p.

- CSE, 2006 : Cartographie multi dates des zones humides du Sénégal. Rapport final, 25p.
- Curlander J.C. and McDonough R.N., 1991 : Synthetic aperture radar: systems and signal processing. New York: John Wiley & Sons, Inc. 647 p.
- DEFCCS 1999 : Ministère de l'Environnement et de la protection de la nature (MEPN), Code forestier. 1ère édition Dakar, DEFCCS, mars 1999, 42p.
- Diedhiou A., 1998 : Étude des régimes d'ondes d'est et de leurs interactions avec la convection en Afrique de l'Ouest et sur l'Atlantique tropical. Thèse de Doctorat, Université Paris-Est Créteil Val de Marne. 220 p.
- Diop A.T., Ndione J.A., Dacosta., 2010 : Les pratiques pastorales selon les saisons en Zone sylvopastorale du Sénégal. RGLL, N°08 déc. 2010. 33p.
- Diouf A., Sall M., Wele A., Drame M., 1998 : Méthode d'échantillonnage de la production primaire sur le terrain, CSE, 9p.
- Dobson M.C. and Ulaby F.T., 1986 : Active microwave soil moisture research. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-24, no. 1, pp. 23-36.
- D'Orgéval T., 2006 : Impact du changement climatique sur le cycle de l'eau en Afrique de l'Ouest : Modélisation et incertitude, thèse de doctorat de l'Université, Paris 6. 191p.
- Dubois P. C., Van Zyl J. and Engman T., 1995 : Measuring soil moisture with imaging radars. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 33, pp. 877-895.
- Dunbar R.S., et Long D.G., 2001 : QuikSCAT Science Data Product User's Manual, Version 2.0, JPL Document D-18053, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA. 31p
- Elachi C., 1987 : Introduction to the physics and techniques of remote sensing. New York : John Wiley & Sons. 413 p.
- Elachi C., 1988 : Spaceborne Radar and Remote Sensing : Applications and Techniques, New-York, NJ : IEEE Press.
- Faye G., 2005 : Suivi de la biomasse au Ferlo (Sénégal) à partir de la télédétection Radar, Mémoire de DEA de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar.
- Faye G., Frison P.L., Wade S., Ndione J.A., Beye A.C., Rudant J.P., 2011: Etude de la saisonnalité des mesures des diffusiomètres SCAT : apport au suivi de la végétation au Sahel, cas du Ferlo au Sénégal. Télédétection Vol. 10, No. 1, pp. 23-31.
- Farrar J.F., 1985 : *The respiratory source of CO<sub>2</sub>*, *Plant Cell Environ.*8:427-438.

Fellah K., 1997 : Mesures des paramètres des sols à partir de données des satellites radar pour les applications hydrologiques, Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, mention Doctoral Européen.

Figa-Saldaña J., Wilson J.J.W, EAttema, E., Gelsthorpe R., Drinkwater M.R., and Stoffelen A., 2002 : The advanced scatterometer (ASCAT) on the meteorological operational (Metop) platform : A follow on for European wind scatterometers. *Remote Sensing*, Vol. 28, No. 3, pp. 404-412.

Fisher R.A. and Turner N.C., 1978 : *Plant productivity in the arid and semiarid zones*, *Ann. Rev. Plant Physiol.* 29: 277-317.

Frison P.L. and Mougin E., 1996a : Use of the ERS-1 Wind scatterometer data over land surfaces. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 34 (2), 550-560.

Frison P.L. and Mougin E., 1996b : Monitoring global vegetation dynamics with ERS-1 wind-scatterometer data, *International Journal of Remote Sensing*, 17, pp. 3201-3218.

Frison P.L., 1997 : *Potentialités du diffusiomètre vent du satellite ERS-1 pour l'étude de la biosphère continentale*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 140 p.

Frison P.L., Mougin E. and Hiernaux P., 1998 : *Observations and interpretation of seasonal ERS-1 wind scatterometer data over Northern Sahel (Mali)*. *Remote Sensing of Environment*, 69, 233-242.

Frost V., Stiles J., Holtzman J., 1982 : *A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise*, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 4 (2), 156-166.

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

Gaastra P., 1959 : Photosynthesis of crop plants influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance. *Moded Landb. Hoogesh. Wageningen* 59 (13).

GEO-4, 2007 : *Global Environment Outlook 2007; environment for development*, ISBN 978-92-807-2836-12-1 (UNEP paperback), 978-92-807-2872-9 (UNEP hardback), 540 pages ([www.unep.org](http://www.unep.org)).

GIEC 2001 : *Rapport final du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat 2001*.

GIEC 2007 : *Rapport final du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat 2007*.

Goodman J.W., 1976 : Some fundamental properties of speckle. *Journal of optical society of america*, 66, 11, pp.1145-1149.

Grippa, M. et Woodhouse I.H., 2002a : *Validation of surface scattering models across large footprints for global scatterometer applications*. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 40 (10), 2229-2233.

Grouzis M., 1988 : Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (mare d'Oursi, Burkina Faso). Collection Etudes et Thèses, Editions de l'ORSTOM, Paris, 336 p.

Grouzis M., Albergel J., 1989 : Du risque climatique à la contrainte écologique. Incidence de la sécheresse sur les productions végétales et le milieu au Burkina Faso: 243-254, in "Le risque en Agriculture", Eldin M. et Milleville P. eds., ORSTOM, Paris: 620 p.

Hallikainen M.T., Ulaby F.T., Dobson M.C., El-Rayes M.A. and Wu L.K., 1985 : Microwave dielectric behavior of wet soil. Part I: Empirical models and experimental observations, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 23:25-34

Hao W.M., Ward D.E., Olbu G. and Baker S.P., 1996 : Emissions of CO<sub>2</sub> , CO and hydrocarbons fires in diverse African savanna ecosystems, *J. Geophys. Res.*, 101, 23 577-23 584.

IPCC, 2007 : Intergovernmental Panel on Climate Change. Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse, 113 pages.

Jackson T.J. and O'Neill, P.E., 1985 : *Aircraft scatterometer observations of soil moisture on rangelands watersheds*. *Int. J. Remote Sens.*, 6(7), p. 1135-1152.

Jacqueminet C., 1991 : Analyse de la structure spatiale du couvert ligneux en milieu sahélien sur image satellitaires Spot (Etude appliquée au secteur dunaire d'Oursi au Burkina Faso et au Ferlo sableux au Sénégal). Thèse de doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales. 225 P.

Janicot S., 1990 : Variabilité des précipitations en Afrique de l'Ouest et circulation quasi stationnaires durant une phase de transition climatique. Thèse de Doctorat, Université Paris-6. 287 p.

Janicot S., Mounier F., Hall N., Leroux S., Sultan B. and Kiladis G., 2009 : Dynamics of the west african monsoon. Part IV : analysis of 25-90-day variability of convection and the role of the indian monsoon, *Journal of Climate*, 22, 1541-1565.

- Jarlan L 2001 : Inversion des données des diffusionmètres spatiaux pour le suivi de la végétation en zone semi-aride : Application au Sahel Africain. Thèse de Doctorat de l'université Paul Sabatier de Toulouse III, 235 p.
- Jarlan L., Mougin E., Frison P.L., Mazzega P. and Hiernaux P., 2002 : Analysis of ERS wind scatterometer time series over Sahel (Mali). *Remote Sensing of Environment*, 81, 404-415.
- Jarlan L., Mazzega P., Mougin E., Lavenu F., Marty G., Frison P. L., 2003 : Mapping of Sahelian vegetation parameters from ERS scatterometer data with an evolution strategies algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 87, 72-84.
- Jones H.G., 1976 : *Crop characteristics and the ratio between assimilation and transpiration*, *J. Appl. Ecol.* 13:605-622.
- Jones H.G., 1992 : *Plants and Microclimate. A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*, 2<sup>nd</sup> ed., Cambridge University Press, Cambridge, 428 pp.
- Karam M.A. and Fung A.K., 1989 : Leaf-shape effects in electromagnetic wave scattering from vegetation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 27:687-697.
- Karam M.A., Fung A.K., Lang R.H. and Chauhan N.S., 1992 : Microwave scattering model for layered vegetation, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30:767-784.
- Karam M.A., Fung A.K., Amar F., Mougin E., Lopes A., Levine D.M., and Beaudoin A., 1995 : A microwave polarimetric scattering model for a forest canopy based on vector radiative transfer theory. *Remote Sens. Environ.*, 53:16-30.
- Kennet R.G. and Li F.K., 1989a : Seasat over land scatterometers data, Part I : Global overview of the Ku-band backscatter coefficients, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 27, n° 5, p. 592-605.
- Koster R.D., Dirmeyer P.A., Guo Z., Bonan G., Chan E., Cox P., Gordon C.T., Kanae S., Kowalczyk E., Lawrence D., Liu P., Lu C.H., Malyshev S., McAvaney B., Mitchell K., Mocko D., Oki T., Oleson K., Pitman A., Sud Y. C., Taylor C. M., Verseghy D., Vasic R., Xue Y. and Yamada T., 2004 : Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Sciences*, 305, 1038-1040.
- Kuan D., Sawchuk A., Strand T., Chavel P., 1987 : *Adaptive restoration of images with speckle*, *IEEE Transactions ASSP*, Vol. 35 (3), 373-383.
- Lacaux J.P., Tourre Y.M., Vignolles C., Ndione J.A., Lafaye M., 2007: Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment* 106 (2007) 66-74.

- Lafore J.P., Flamant C., Giraud V., Guichard F., Knippertz P., Mahfouf J.F., Mascart P., Williams E., 2010 : Introduction to the AMMA Special issue on “Advances in understanding atmospheric processes over West Africa through the AMMA field campaign”. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **136**: 2-7. DOI: 10.1002/qj.583.
- Lafore J.P., Flamant C., Guichard F., Parker D.J., Bouniol D., Fink A. H., Giraud V., Gosset M., Hall N., Holler H., Jones S. C., Protat A., Roca R., Roux F., Saïd F. and Thorncroft C., 2011 : Progress in understanding of weather systems in West Africa *Journal of the Royal Meteorological Society, Atmos. Sci. Let.* **12**: 7-12, DOI: 10.1002/asl.335.
- Landsea C.W. and Gray W.M., 1992 : The strong association between Western Sahelian monsoon rainfall and intense Atlantic hurricanes. *J. Climate.*, 5, 435-453.
- Le Barbé L., Lebel T., Tapsoba D., 2002 : “Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990”, *J. Climate*, **15(2)**, 187-202.
- Le Hégarat Mascle S., Zribi M., Alem F., Weisse A. and Loumagne C., 2002 : Soil moisture estimation from ERS/SAR data: toward an operational methodology. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 12, pp. 2647-2658.
- Le Houérou H.N., 1989 : *The Grazing Land Ecosystems of the African Sahel*, Ecological Studies 75, Springer-Verlag, Berlin, 282 pp.
- Le Toan T., Paulsader M., Flouzat G. and Fluhr A., 1981 : *Soil moisture content and microwave backscatter in the 1.5-9 GHz region. Invited paper, Int. Geosci. Remote Sensing. Symp.*, Washington, DC, juin.
- Lee J., 1980 : *Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics*, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.
- Leprun J.C., 1971 : Nouvelles observations sur les formations dunaires sableuses fixées du Ferlo Nord Occidental. *Ass. Sénégal. Et. Quatern. Ouest afr.*, Bull. liaison 31, p. 69-78.
- Leroux M., 1980 : Le climat. In : *Atlas du Sénégal*, pp. 12-17, 11 cartes, Paris Ed Jeune Afrique, 1980, 2<sup>ème</sup> Ed., 72p.
- L'Hôte Y., Mahé G., Some B., Triboulet J.P., 2002 : Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues, *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 47(4),563-572.
- Lo Seen D., Mougin E., Rambal S., Gaston A. and Hiernaux P., 1995 : A regional Sahelian grassland model to be coupled with multispectral satellite data. II. Towards the control of its simulations by remotely sensed indices. *Remote Sens. Environ.* 52:194-206.

Lopes A., 1983 : Etude expérimentale et théorique de l'atténuation et de la rétrodiffusion des micro-ondes par un couvert de blé. Application à la télédétection. Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier de Toulouse.

Lopez A., Touzi R., Nezry E., 1990 : *Adaptative speckle filters and scene heterogeneity*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28 (6), 992-1000.

Lopez A., Nezry E., Touzi R., Laur H., 1993 : *Structure detection and statistical adaptative speckle filtering in SAR images*, *International Journal of Remote sensing*, Vol. 14 (9), 535-544.

Lopez A., Nicolas J.M., Tupin F. et Trouvé E. 2001 : *Traitement des images de RSO*. Paris : Hermès Sciences Publications. 351 p.

Ludlow M.M. and Wilson G.L., 1972 : Photosynthesis of tropical pasture plants. IV. Basis and consequences of differences between grasses and legumes. *Aust. J. Bio. Sci.*, 25 : 1133-1145.

Magagi R.D. and Kerr Y.H., 1997 : Retrieval of soil moisture and vegetation characteristics by use of ERS-1 wind scatterometer over arid and semiarid areas. *Journal of Hydrology*, 188-189, 361-384.

Maignien R., 1965) : *Cartes pédologiques du Sénégal au 1/1.000.000 et Notice explicative*. ORSTOM, Dakar, 63 p.

Mainguet M., 1990 : La Desertification : une crise autant socio-économique que climatique, *Sécheresse*, vol. 1, n°3, p. 187-195.

Maître H., Adragna F., Ducrot D., Garello R., Le Caillec J.M., Le Hégarat-Masclé S., Ulaby F.T., Moore R.K. and Fung A.K., 1982 : *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*. Norwood: Artech House, Inc. 2162 p.

Maître H., (sous la direction de), 2001 : *Traitement des images de radar à synthèse d'ouverture*. Paris, Hermès Science Publications.

Manabé S., 1969 : Climate and the ocean circulation 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon. Weth. Rev.* 97, 739-774.

Mc Cree K.J., 1970 : An equation for the rate of respiration of white clover plants grown under controlled conditions in *Prediction and Measurements of Photosynthetic Productivity* (I. Setlik, Ed.) Pudoc, Wageningen, pp. 221-229.

MEPN, 1997 : Communication initiale du Sénégal dans le cadre de la Convention cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), novembre 1997, 118 pages.

MEPN, 1999 : Schéma directeur de la zone éco-géographique sylvopastorale 20 pages.

MEPN, 2010 : Deuxième communication nationale à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques ; 2010, 177 pages.

Michel P., 1974 : Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : Etude géomorphologique. Mémoire ORSTOM N°63. 810p

Milleville P., (1989). Activités agro-pastorales et aléa climatique en région sahélienne. Le risque en agriculture, Editions de l'ORSTOM, Paris 1989, p. 233-241.

Mougin E., Lopes A., Le Toan T., 1990 : *Microwave propagation at X band in cylindricalshaped forest components: attenuation observations*. IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sensing, vol.28, n° 1, pp 60-68.

Mougin E., Lo Seen D., Rambal S., Gaston A., et Hiernaux P., 1995a :A regional sahelian grouland model to be coupled with multispectral data.Description et validation. *Remote Sens. Environ.* 52:181-193.

Ndione J.A., 2002 : Bilan climatique de l'observatoire ROSELT du FERLO (SENEGAL), 37p.

Ndione J.A., Lacaux J.P., Tourre Y., Vignolles C., Fontanaz D., Lafaye M., 2009 : Mares temporaires et risques sanitaires au Ferlo : contribution de la télédétection pour l'étude de la fièvre de la vallée du Rift entre août 2003 et janvier 2004. *Sécheresse* 2009 ; 20 (1) : 153-60

Ndong J.B., 1996 : L'évolution du climat du Sénégal et les conséquences de la sécheresse récente sur l'environnement. Th. Doct. Univ. Lyon III, 501p., 89 fig., 104 tab.

Oh Y., Sarabandi K., and Ulaby F.T., 1992 : An empirical model and inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30: 370-381.

Oh Y., 2004 : Quantitative retrieval of soil moisture content and surface roughness from multipolarized radar observations of bare soil surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42 , no. 3 , pp. 596 - 601.

Olivry J.C., 1983 : Le point en 1982 sur la sécheresse en Sénégal et aux îles du Cap Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). *Cah. ORSTOM, sér. hydrol.*, XX, 1: 47-69.

Penning de Vries F.W.T., 1975 : The cost of maintenance processes in plant cells. *Ann. Bot.*, 39 : 77-92.

Penning de Vries F.W.T. et Djiteye M.A., 1982 : La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle, *Agric. Res. Rep.* 918, Pudoc, Wageningen, 525 pp.

- PNAT, 1986 : Cartographie et télédétection des ressources de la république du Sénégal. Etude de la géologie, de l'hydrologie, des sol, de la végétation et des potentiels d'utilisation des sols. SDSU-RSI-86-01, p 653.
- Polcher J., 2003 : Les processus de surface à l'échelle globale et leurs interactions avec l'atmosphère. Habilitations à Diriger des Recherches (HDR) soutenues au Laboratoire de Météorologie Dynamique.
- Poupon H., 1980 : Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au nord du Sénégal. Editions de l'ORSTOM, Collections Travaux et Documents no115, 351 p.
- Prigent C., Tegen I., Aires F., Marticorena B. and Zribi M., 2005 ; Estimation of the aerodynamic roughness length in arid and semi-arid regions over the globe with the ERS scatterometer. *Journal of Geophysical Research*, 110, D09205, doi : 10.1029/2004JD005370.
- Quesney A., Le Hégarat-Masclé S., Taconet O., Vidal-Madjar D., Wigneron J.P., Loumogne C. and Normand M., 2000 : Estimation of watershed soil moisture index from ERS/SAR data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 72, pp. 290-303.
- Rambal S., 1980 : Modélisation de l'utilisation de l'eau et de la production végétale d'une steppe à Ranthérium suaveloens Desf de la zone aride sud Tunisienne. Thèse Doct. Sc. Univ. du Languedoc, Montpellier, 188 p.
- Rambal S. et Cornet A., 1982 : Simulation de l'utilisation de l'eau et de la production végétale d'une phytocénose sahélien du Sénégal. *Acta Oecologica Oecol. Plant* 3(17), 4 : 381-397.
- Raynaud C., Grégoire E., Janin P., Koechlin J. and Lavigne-Delville P., 1997 : Sahels : Diversité et dynamique des relations sociétés-nature, *Edition Karthala*, Paris, p 430.
- Riou C., 1980 : Aspects climatiques de la sécheresse de part et d'autre du Sahara (de l'Afrique centrale sèche à la Tunisie). *Cah. ORSTOM, sér. biol.*, 42: 43-51.
- Sagna P., 1988 : Etude des lignes de grains en Afrique de l'ouest, Th. 3eme cycle, *Univ. Dakar*, 291 p.
- Sagna P., 2000a : Le climat. In : *Atlas du Sénégal*, Editions Jeune-Afrique, pp. 16-19.
- Sagna P., Ndour N., Lake L.A., 2000b : Bilan climatique. In : *Ecographie du Sénégal subsaharien et développement.*, pp. 47-83, 20 fig., 11 tab.
- Sarr M.A., 2009 : Evolution récente du climat et de la végétation du Sénégal (cas du bassin versant du Ferlo). Thèse de doctorat en cotutelle entre l'Université Jean Moulin Lyon 3 et l'Université de DAKAR (Sénégal). 401p.

- Semazzi F.H., Burns B., Lin N.H. and Schemm J.K., 1996 : A MCG study of teleconnections between the continental climate of Africa and global sea surface temperatures anomalies. *J. Climate*, 9(10), 2480-2497.
- Semazzi F.H. and Sun L., 1997 : The role of orography in determining the Sahelian climate. *Int. J. Climatol.*, 17, 581-596.
- Sharman M., 1987 : Végétation ligneuse sahélienne - *The global environment monitoring system*. Centre d'Activité du Programme du Système Mondial de Surveillance Continue de l'Environnement, *United Nations Environment Programme, Food and Agricultural Organization*, Série GEMS Sahel, n°7, 85 p.
- Snidjers T.A.B., 1986 : *Interstation correlation and non stationarity of Burkina Faso rainfall*. *Journal of Climate and applied meteorology*, 25: 524 – 531.
- Srivastava H.S., Patel P., Manchanda M.L. and Adiga S., 2003 : Use of multiincidence angle of radarsat-1 SAR data to incorporate the effect of surface roughness in soil moisture estimation. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, vol. 41, no. 7, pp. 1638-1640.
- Sultan B., 2011 : L'étude des variations et du changement climatique en Afrique de l'Ouest et ses retombées sociétales. Habilitations à Diriger des Recherches (HDR) soutenues au Laboratoire d'Océanographie et de Climatologie par Experimentation et Approche Numérique (LOCEAN).
- Thornley J.H.M., 1970 : Respiration, Growth and Maintenance in plants. *Nature*, 22(18) : 304-305.
- Torres R., Buck C., Guijarro J., Suchail J.L., and Schonenberg A., 1999 : The Envisat ASAR instrument verification and characterisation. ESA, COES SAR workshop, 2-29 October, SP450.
- Tsai W., Graf J.E., Winn C., Huddleston J.N., Dunbar R.S., Freilich M.H., Wentz F.J., Long D.G. and Jones W.L., 1999 : "Postlaunch Sensor Verification and Calibration of the NASA Scatterometer," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 37, pp. 1517-1542, May 1999.
- Ulaby F.T., Batlivala P.P. and Dobson M.C., 1978 : Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture, Part 1, Bare soil. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 16, pp. 286-295.
- Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K., 1982 : *Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Tomes 1, 2 et 3, Addison -Wesley, Reading, MA.*

- Ulaby F.T., El-Rayes M.A., 1987 : *Microwave Dielectric Spectrum of Vegetation - Part II: Dual Dispersion Model*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. GE-25, n° 5, pp 550-557.
- UICN (Alliance mondiale pour la Conservation de la Nature), 1989 : *Etudes sur le Sahel*. UICN Ed., Gland, 1989, 152 pages.
- Vacher J., 1984 : *Les pâturages de la Sierra Norte. Analyse Phyto et agroécologique des dehesas pastorales de la Sierra Norte (Andalousie occidentale, Espagne)*. Thèse USTL, Montpellier: 195 p.
- Valenza J., Diallo K., 1972 : *Etude des pâturages du Nord Sénégal. Et. agrostol.*, IEMVT Maisons-Alfort: 311 p., 3 cartes.
- Van Keulen H., 1975 : *Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen, 176 pp.
- Wagner W. and Scipal, K., 2000 : *Large-scale Soil moisture mapping in western Africa using the ERS Scatterometer*. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 38, 1777-1782.
- Wane A., Ancey V., Grosdidier B., 2006 : « *Les unités pastorales du Sahel sénégalais, outil de gestion de l'élevage et des espaces pastoraux. Projet durable ou projet de développement durable* ». Développement Durable & Territoires, Dossier 8 : Méthodologies et pratiques territoriales de l'évaluation en matière de développement durable, 18p. (<http://developpementdurable.revues.org/index3292.html>).
- Wang G. and Eltahir E.A.B., 2000 : *Biosphere-atmosphere interactions over West Africa. II: Multiple climate equilibria*. Q. J. R. Meteorol. Soc., 126, 1261-1280.
- Werk K.S., Ehleringer J., Forseth I.N. and Cook C.S., 1983 : *Photosynthetic characteristics of Sonoran Desert winter annuals*. *Oecologia* (Berlin) 59 : 101-105.
- Woodhouse I.H. and Hoekman D.H., 2000 : *Determining land surface parameters from the ERS-1 wind scatterometer*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38, 126-140.
- Zheng X. and Eltahir E.A.B., 1998 : *The role of vegetation in the dynamics of west African monsoons*. *J. Climate*, 11 : 2078-2096.
- Zine S., 2004 : *Contribution de la télédétection satellitale radar pour le suivi des paramètres de surface d'une zone sahélienne agro-pastorale*, thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée.
- Zribi M. and Dechambre M., 2002 : *A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from C-band radar data*. Remote Sensing of Environment, vol. 84, pp. 42-52.