ÉTUDE DE LA SAISONNALITÉ DES MESURES DES DIFFUSIOMÈTRES SCAT : APPORT AU SUIVI DE LA VÉGÉTATION AU SAHEL, CAS DU FERLO AU SÉNÉGAL

Gayane FAYE[a,b], Pierre Louis FRISON[b*], Souléye WADE[a], Jacques André NDIONE[c], Aboubaker Chedikh BEYE[d], Jean Paul RUDANT[b]

[a]*Gayane FAYE : Laboratoire de Télédétection Appliquée-Institut des Sciences de la Terre – Faculté des Sciences et Techniques – Université Cheikh Anta Diop, BP 5396 Dakar-Fann (SENEGAL), +33 6 59 17 38 35,* gfayeaero@yahoo.fr

[b]*Pierre Louis FRISON : Equipe Géomatique Télédétection et Modélisation des Connaissances - Laboratoire d'Informatique Gaspard Monge– Université Paris-Est Marne la Vallée, 5 boulevard Descrates, 77454 Marne la Vallée Cedex 2 (FRANCE), +33 1 49 32 90 53, pierre-louis.frison@univ-mlv.fr*

[a]*Souleye WADE : Laboratoire de Télédétection Appliquée – Institut des Sciences de la Terre – Faculté des Sciences et Techniques – Université Cheikh Anta Diop, BP 5396 Dakar-Fann (SENEGAL), +221 33 825 25 30* wadesouleye@yahoo.fr

[c]*Jacques Andre NDIONE : Centre de Suivi Ecologique, Rue Léon Gontran Damas, Fann Résidence, BP 15532 Dakar (SENEGAL), +221 33 825 80 66 Fax +221 33 825 81 68,* jacques-andre.ndione@cse.sn

[d]*Aboubaker Chedikh BEYE : Laboratoire Groupe de Laboratoire de Physique des Solides et des Matériaux – Faculté des Sciences et Techniques – Université Cheikh Anta Diop de Dakar, BP 5396 Dakar-Fann (SENEGAL), +221 77 644 57 97,* acbeye@refer.sn

[b]*Jean Paul RUDANT : Equipe Géomatique Télédétection et Modélisation des Connaissances - Laboratoire d'Informatique Gaspard Monge– Université Paris-Est Marne la Vallée, 5 boulevard Descrates, 77454 Marne la Vallée Cedex 2 (FRANCE), +33 1 49 32 90 53, Jean-Paul.Rudant@univ-mlv.fr*

Soumis le 14 septembre 2010, accepté le 15 mars 2011, mis en ligne le 30 mai 2011 © *Revue Télédétection*, 2011, vol. 10, n° 1, p. 23-31

Résumé

Les études antérieures impliquant les données des diffusiomètres ERS ont montré le potentiel de ces instruments pour le suivi des paramètres de surface. Ces études tirent parti de la fréquence temporelle élevée de ces capteurs. Ces données pourraient être d'une importance capitale pour le suivi de la végétation dans la partie ouest du Sahel. En effet, cette région est caractérisée par une forte variabilité des paramètres au sol, passant d'un sol nu et sec en saison sèche à une biomasse herbacée dense pendant les saisons des pluies, ce qui influencerait énormément les réponses de ces capteurs. La continuité des mesures du diffusiomètre ERS est assurée depuis 2007 avec les acquisitions du diffusiomètre ASCAT à bord du satellite METOP. Ce capteur présente les mêmes caractéristiques (polarisation, longueur d'onde résolution et angle de mesure) que les diffusiomètres de ERS-1 et ERS-2. Notre étude consiste à regarder le potentiel des données SCAT (ERS et ASCAT) pour la surveillance d'une zone sahélienne semi-aride, la vallée du Ferlo, Sénégal.

Mots clés : Télédétection radar ; diffusiomètre ERS ; ASCAT ; Metop ; biomasse ; Sahel ; Ferlo.

STUDY OF SEASONALITY OF SCATTEROMETER MEASUREMENTS SCAT: CONTRIBUTION TO VEGETATION MONITORING IN THE SAHEL, EXAMPLE OF FERLO, SENEGAL

Abstract

Previous studies involving ERS scatterometer data have shown the potential of these instruments for monitoring surface parameters. The coarse spatial resolution of the data is widely compensated with the high temporal frequency of the measurements. These data could have a major importance for vegetation monitoring in western Sahel area. This region of Sahel is indeed characterized by a high variability of the parameters of the ground surface, changing from bare and dry soil surface in dry seasons to a dense herbaceous biomass during the rainy season. These changes should greatly influence the answers of scatterometer sensors. The continuity of ERS measures is obtained from the ASCAT scatterometer on board the METOP satellite. This sensor presents the same characteristics (polarization, wavelength resolution and angle of measure) as the ERS-1 and ERS-2 scatterometer. Our study consists in looking at the potential of the SCAT (ERS and ASCAT) data for the surveillance of a semi-arid Sahel zone, the Ferlo catchment, Senegal.

KeyWords : Radar remote sensing; wind ERS scatterometer; ASCAT; Metop; biomass; Sahel; Ferlo.

1. INTRODUCTION

Le Sahel, zone de 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. La production de végétation naturelle et des cultures est étroitement liée à la pluviométrie. Dans les pays de cette zone géographique, le développement est lié à la gestion et à l'exploitation des ressources naturelles (Prince *et al.*, 1990). Ces dernières subissent un processus de dégradation significative qui diminue leur productivité. En effet, 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 (Raynaut *et al.*,1997). Cette sécheresse est l'une des signatures de la variabilité du climat en Afrique de l'Ouest. Elle est à l'origine d'importants problèmes liés à la viabilité des arbres (Mainguet, 1990 ; Chamard et Courel, 1999), à la dégradation du sol (Le Houérou, 1989), à la sécurité alimentaire et à la raréfaction des ressources en eau dans la région. Cela représente une situation dramatique pour les conditions d'existence et de vie des populations et pour l'économie de cette région. Pour limiter ce phénomène, il est impératif d'entreprendre une politique de suivi et de gestion de ces ressources.

La télédétection est apparue comme un outil permettant de faire des observations de l'environnement à l'échelle régionale. Des travaux ont été réalisés dans le domaine des micro-ondes par plusieurs équipes, sur le sol et les végétaux (Ulaby *et al.*, 1978 ; Bradley *et al.*, 1981 ; Le Toan *et al.*, 1981 ; Bernard *et al.*, 1981 ; Jackson *et al.*, 1985 ; Bruckler *et al.*, 1988, Oh *et al.*, 1992).

C'est dans ce contexte que Kennett *et al.* (1989) ; Frison *et al.* (1996) ; Jarlan, (2001) ont étudié l'opportunité de l'utilisation des diffusiomètres spatiaux pour le suivi de la végétation. Ces capteurs radar, d'une résolution de 50 km, permettent de faire des observations à l'échelle d'une région, avec une répétitivité temporelle d'environ 5 jours. Le potentiel des diffusiomètres pour observer des secteurs semi- arides provient de la forte sensibilité des micro-ondes aux paramètres de surfaces relatifs à la biomasse (taille, densité, humidité), et au sols (humidité et rugosité ; Frison *et al.*, 1998).

L'objectif de notre étude vise à analyser la sensibilité des réponses des capteurs SCAT de ERS et METOP à l'évolution temporelle des paramètres au sol en particulier ceux de la végétation herbacée dans la région semi-aride du Ferlo. Il s'agit d'une part de continuer les investigations et d'autre part de transférer cette méthodologie déjà appliquée dans d'autres régions du Sahel par Frison *et al.*, (1998), et Zine (2005), au bassin versant du Ferlo (Sénégal) et enfin d'examiner la capacité des données ASCAT de METOP à prendre le relais de ERS pour le suivi de la végétation au Sahel en général et au Ferlo en particulier.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude, qui couvre une superficie d'environ 10 000 km² d'environ, est circonscrite dans le département administratif de Linguère. Elle se situe entre les latitudes 15°9' et 15°2' nord, et les longitudes - 15°48' et - 14°9' ouest et appartient à la région pastorale du Ferlo (Figure 1). Le Ferlo, espace inclus dans l'intérieur de la "boucle" du fleuve Sénégal, appartient à la zone bioclimatique sahélienne, il est caractérisé par des saisons des pluies courtes et instables (juillet à octobre) et des saisons sèches assez longues (novembre à juin).

Le développement de cette zone géographique est lié à la gestion et à l'exploitation des ressources naturelles (Prince *et al.*, 1990) qui restent dépendantes de la pluviométrie. Ces ressources subissent un processus de dégradation significative qui diminue leur productivité. Ce qui fait de ce territoire une zone instable avec la décadence la pluviométrie (Jacqueminet, 1991 ; Sarr, 2009). Cette pluviométrie reste faible et très instable avec une moyenne de 422,6 mm par an pour un coefficient de variation de 0,3 (sur la période 1951-2004).

La zone est caractérisée par des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés très sableux (plus de 95% de sables), et de sols subarides (sols deck) intergradés hydromorphes, des sols rouge brun, et des rugosols (MEPN, 1999).

La végétation est de type sahélien, passant d'une pseudo steppe arbustive à la savane arborée du Nord Ouest au Sud Est (MEPN, 1999 ; Figure 1). La végétation herbacée, essentiellement à base de graminées annuelles *(Schoeizefeldia gracilis* Kunth, *Cenchrus biflorus* Roxb. et *Aristida iizutabilis* Trin.), dépasse rarement 40 cm de hauteur (Akpo *et al.*, 1995).

On note une dégradation de la couverture végétale due aux effets conjugués de la nature (sécheresse et aridité) et de l'action de l'homme (pression des éleveurs, feux de brousse). Ceci se traduit par une réduction de la biodiversité (MEPN, 1999**)**.

Malgré la présence de sols pauvres et des aptitudes agricoles variables, l'agriculture qui est essentiellement pluviale y occupe une place assez importante notamment dans la zone sud (MEPN, 1999**)**.

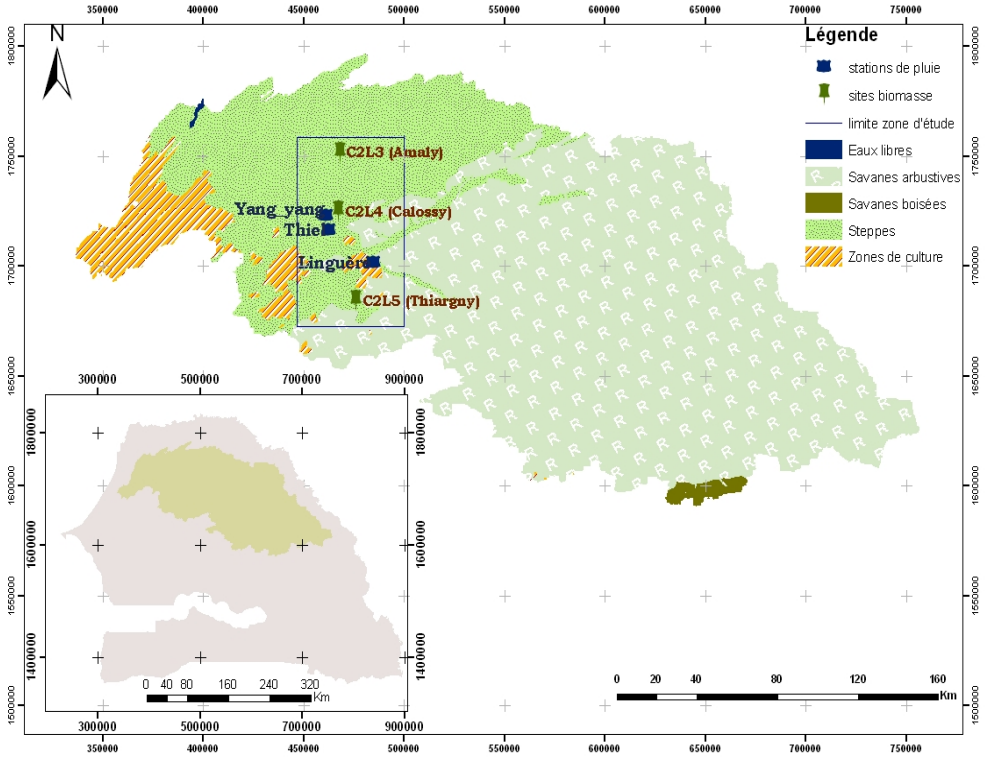


Figure 1 : Localisation géographique du Ferlo dans le Sénégal, occupation du sol ainsi que situation de la zone d'étude dans la région pastorale du Ferlo avec les stations de pluies et site de collecte de biomasse du CSE (PNAT, 1986).

2.2. Description des données

Nous avons utilisé conjointement les données des diffusiomètre ERS-1 et 2 ainsi que les données du capteur ASCAT de Metop. Ces deux types de capteur fonctionnent en bande C (5,3 GHz) en polarisation VV. Les diffusiomètres ERS, avec des résolutions spatiales de 50 km effectue des mesures sur une large gamme d'incidence (de 18° à 59°) environ tous les 5 jours aux latitudes du Ferlo. Au cours de son déplacement, le diffusiomètre ERS balaye une bande 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 (*afterbeam*) à ouverture oblique. L'instrument ASCAT est à bord du satellite Metop qui est opérationnel depuis 2006. Son plus grand avantage reste sa répétitivité temporelle élevée avec en moyenne 2 mesures par jour. À l'instar du diffusiomètre ERS, le système géométrique de ASCAT est basé sur l'usage de trois paires d'antennes. Celles-ci balaient des fauchées de 550 km de large. Les données ASCAT sont prises à des incidences comprises entre 25 et 65 °. (34 à 65° pour les antennes *forebeam* et *afterbeam* et 25 à 55° pour l'antenne midbeam). Le capteur **ASCAT** délivre des mesures le long de deux fauchées de 500 km de large, de part et d'autre de sa trace. Dans le cadre de cette étude nous avons utilisé des données à 50 km de résolution spatiale.

On rappelle qu'en raison des longueurs d'ondes centimétriques auxquelles ils opèrent, les mesures de ces diffusiomètres sont peu perturbées par l'atmosphère, notamment les nuages et présentent une certaine sensibilité aux faibles masses végétales. Ce qui peut être très avantageux quant au suivi de la végétation herbacée au Ferlo qui reste faible et peut dense en début de saison des pluies.

Les deux types de capteurs exploités ici effectuent des mesures avec une large gamme d'incidence. Nous avons jugé nécessaire de faire une normalisation angulaire afin de minimiser les effets d'incidence. Pour ce faire, nous avons utilisé les données mesurées en saison sèche. En effet, durant toute cette période (octobre à mai) le sol reste sec et couvert d'une fine couche de biomasse sèche. Ces pailles qui tapissent le sol n'ont que peu d'influence sur le signal radar du fait de leur faible contenu en eau (de l'ordre de 5%). Ainsi toute différence entre les mesures résulte uniquement de la différence de l'angle de mesure. Pour éliminer cette influence, nous avons effectué comme dans le cas des travaux de Frison *et al.*, (1998), et Zine, (2005), une normalisation des mesures. La technique consiste à regrouper l'ensemble des mesures effectuées avec une incidence comprise entre 18 et 35° pour la normalisation à 25° et celle comprise entre 30 à 59° pour la normalisation à 45° et ceci sur des périodes de 15 jours pour ERS et 5 jour pour ASCAT. Nous effectuons ensuite une régression linéaire du premier ordre, et prenons la valeur de sigma (coefficient de rétrodiffusion) correspondant respectivement à 25 ou 45° sur la droite de régression obtenue. Le choix des 15 jours pour ERS est motivé d'une part par la répétitivité temporelle des mesure de ce capteur, et d'autre part du fait que dans la zone du Ferlo, le développement de la végétation sur une période de 15 jours est assez significatif pour pouvoir influencer la réponse du signal radar. Pour le capteur ASCAT, vu la fréquence plus élevée de ses mesures (en moyenne 2 mesures par jours), nous avons opté de faire une normalisation sur 5 jours. L'objectif principal consiste à prendre une période permettant d'avoir

assez de mesures pour une bonne estimation de la régression. En effet la régression sur un nombre faible de données peut donner un résultat aberrant. Après avoir éliminé l'effet d'incidence sur les mesures, nous allons faire une étude de l'évolution de la réponse de ces deux capteurs en fonction de la variation saisonnière et intra saisonnière des paramètres au sol dans la région du Ferlo.

Les données de pluie des trois stations de pluie ainsi que la production annuelle de biomasse des trois sites de collecte de biomasse se trouvant dans la zone d'étude (figure 1) ont été mises à notre disposition par le Centre de Suivi Ecologique. En effet, dans le but de suivre la végétation, le CSE a implanté sur l'ensemble du territoire national des sites de contrôle au sol. A la fin de chaque saison des pluies, des équipes procèdent à une campagne d'échantillonnage de la production primaire (www.cse.sn ; Diouf et al, 1998). La pluviométrie étant un élément clé du développement de la végétation au Ferlo, une analyse de sa répartition temporelle permettra de mieux expliquer la variation de la réponse radar. En effet, l'humidité du sol et la quantité de végétation constituent les paramètres qui influencent beaucoup la réponse radar.

3. RÉSULTATS

Une représentation de la réponse radar en fonction de l'angle de mesure des données prises en saison sèche permet de mettre en évidence la dépendance angulaire des coefficients de rétrodiffusion (figure 2). On peut observer une décroissance des mesures par rapport à l'incidence, avec une plus grande sensibilité à faible angle d'incidence. Cette sensibilité diminue pour les grands angles d'incidences.

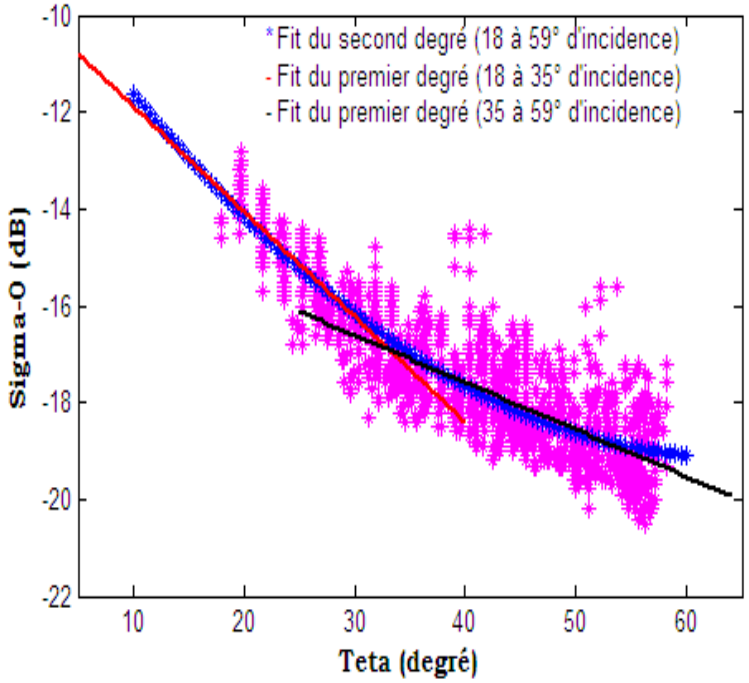


Figure 2 : Variation du coefficient de rétrodiffusion radar mesuré en saison sèche en fonction de l'angle d'incidence

Afin de d'éliminer l'effet de l'incidence sur les mesures nous avons effectué une normalisation angulaire à 25 et 45° (figure 3). On s'aperçoit que les mesures normalisées à 45° d'incidence donnent une nette variation saisonnière de la réponse radar. Dans notre étude, contrairement aux résultats obtenus dans les autres régions du Sahel, nous avons une nette variation saisonnière des données normalisées à 25° d'incidence. Néanmoins les résultats à 45° présente une meilleure précision surtout en saison sèche ou l'on peut observer quelques points isolés pour les données à 25. Sachant qu'on ne dispose pas assez de données à faible incidence, la droite de régression peut s'écarter de la normale et ainsi donner des résultats ne reflétant pas la réalité. Pour cela, et par mesure de prudence nous avons opté de poursuivre l'étude avec les données normalisées à 45° d'incidence. La figure 3 permet d'observer la saisonnalité de la réponse du radar qui reste faible et constante en saison sèche (environ - 18,5 dB), ensuite de plus en plus croissante avec l'arrivée de la pluie et le développement de la végétation. Cela résulte de l'augmentation de la teneur en eau du sol d'une part et d'autre part de l'évolution de la densité et du contenu en eau de la couche herbacée. Le coefficient de rétrodiffusion radar atteint un maximum correspondant au pic de la biomasse. Vers la fin de la saison humide, une partie de la biomasse atteint la sénescence et commence à disparaître. A cela s'ajoute l'assèchement du sol entraînant ainsi une diminution de la réflectivité du radar qui tend vers sa valeur initiale observée en saison sèche. On observe également un déphasage entre les premières pluies en avril/mai et l'augmentation du coefficient de rétrodiffusion traduisant qu'à cette résolution spatiale, le signal n'est pas sensible aux premiers événements pluvieux. Ces états de fait sont observés éga-

lement à travers les résultats des études entreprises dans d'autres secteurs du Sahel. Nous pouvons conclure qu'à l'instar des autres régions sahéliennes ou des travaux similaires ont été effectués, la variabilité saisonnière des paramètres de surface au Ferlo influence fortement la réponse du signal.

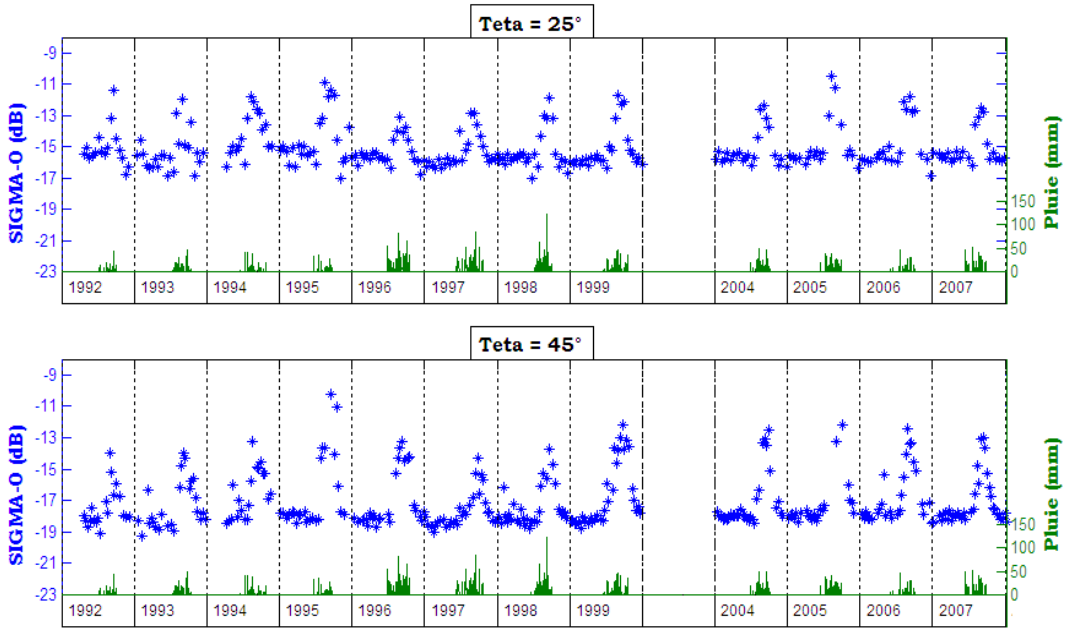


Figure 3 : Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion radar mesuré par ERS-1 et ERS-2 (calibré à 45° d'incidence) et de la pluviométrie (1992-2007).

Vu la dépendance du coefficient de rétrodiffusion radar à l'humidité surfacique et de la biomasse, une saison pluvieuse devrait correspondre à un pic élevé de la courbe. En revanche, les résultats ne montrent pas de relation précise entre le signal radar et la quantité de pluie. Nous observons par exemple à la figure 3 que le pic est plus élevé en 1995 qu'en 1997, alors que la pluviométrie de 1997 est plus importante que celle de 1995 (294 mm contre 233mm en 1995). Cette situation peut résulter d'une distribution temporelle irrégulière de la pluie en 1997 avec une forte baisse des pluies au milieu de l'hivernage (seulement 17,7 mm entre le 19 juin 1997 et le 21 août de la même année) influençant fortement la production de biomasse. En effet, le développement de la biomasse est fonction de la répartition spatiale et temporelle de la pluie au cours de la saison des pluies. Donc une forte saison pluvieuse n'est forcément pas synonyme de grande production herbacée. Ceci est illustré par la figure 4 qui montre une corrélation quasi nulle (coefficient de corrélation $R^2 = 0{,}0114$) entre production annuelle de biomasse et la pluviométrie annuelle. Afin d'analyser le comportement annuel du signal en fonction de la pluie et de la production annuelle de biomasse, nous avons effectué des corrélations entre l'amplitude du signal radar et la production de biomasse (figure 5) ainsi que la pluie annuelle (figure 6). La comparaison des figures 5 et 6 montre une plus grande corrélation de l'amplitude annuelle du signal radar avec la production de biomasse ($R^2 = 0{,}470$), qu'avec les pluies annuelles ($R^2 = 0{,}023$), Néanmoins, la plus forte corrélation entre biomasse totale annuelle et l'amplitude du signal s'explique par la dépendance de la réponse radar à la densité et la hauteur de la biomasse humide. Ainsi une forte réponse radar doit être synonyme de la présence importante de végétation humide au sol. Néanmoins, nous pouvons constater des zones d'ombre. En comparant les données de l'année 1993, avec une production de biomasse de 895,7 Kg.Ms/ha (kilogramme de Matières Sèche par hectare), avec l'année 2004 durant la quelle nous avions une production de 813 Kg.Ms/ha, on peut voir que malgré une production quasiment équivalentes, la réponse du signal reste nettement plus importante en 2004. Ces anomalies peuvent résulter de phénomène ayant affecté la production végétale avant l'arrivée des équipes de collectes qui a lieu vers la fin septembre voire début octobre. En effet l'année 2004 a été marquée vers la fin des saisons des pluies (septembre - octobre), par une invasion de criquet pèlerin, dans la moitié nord du Sénégal (qui englobe notre zone d'étude), ce qui peut affecter fortement la production de biomasse avant l'arrivée des équipes de collecte. Ainsi, les mesures de biomasse de cette année ne sont pas représentatives de la production herbacée au moment du pic de la végétation herbacée. Par contre à la figure 6, on peut remarquer une faible corrélation ($R^2 = 0{,}023$) entre la quantité de pluie et l'amplitude du signal. Ce qui nous permet de constater que l'amplitude de la réponse radar n'est pas directement fonction de la quantité de pluie annuelle. Cela nous pousse à dire que dans cette zone, la quantité totale annuelle de pluie n'est forcément pas un bon indicateur de la production de biomasse.

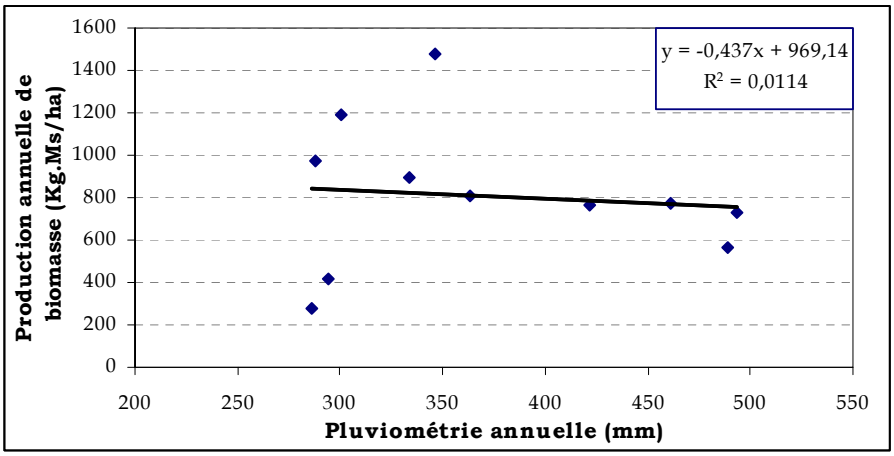


Figure 4 : Corrélation entre la production annuelle de biomasse et la pluviométrie totale annuelle.

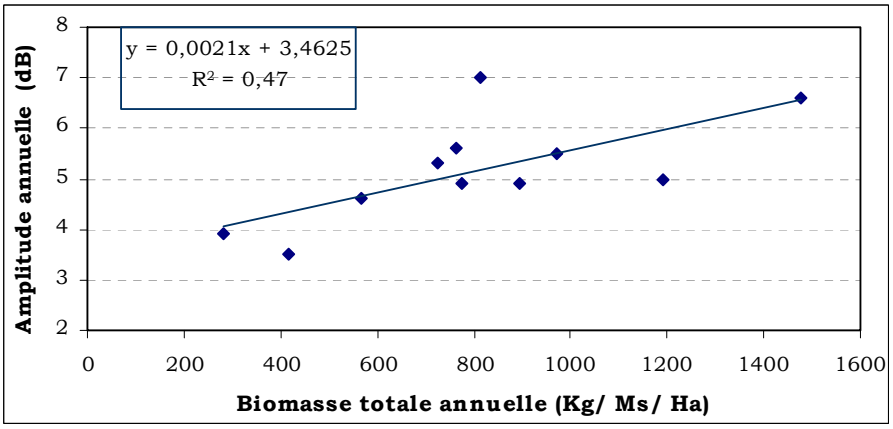


Figure 5 : Corrélation entre l'amplitude annuelle du coefficient de rétrodiffusion radar et la production annuelle de biomasse.

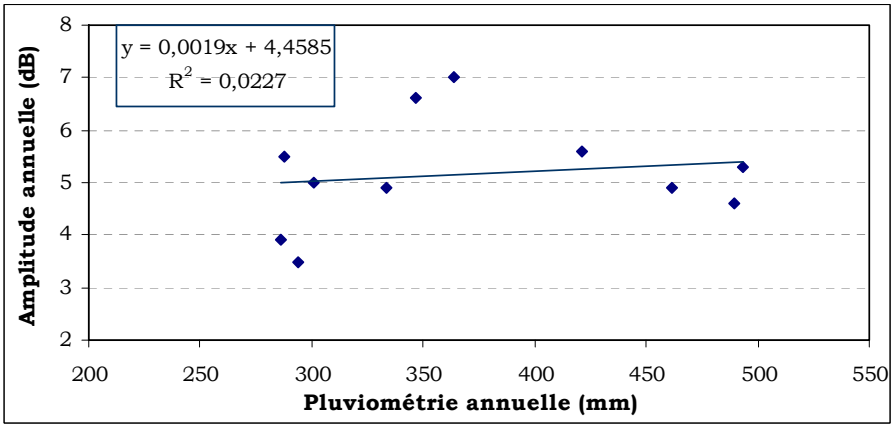


Figure 6 : Corrélation entre l'amplitude annuelle du coefficient de rétrodiffusion radar et la pluviométrie totale annuelle.

Comme pour les données ERS, les valeurs du coéfficient de rétrodiffusion de ASCAT sont décroissantes avec l'angle d'incidence (figure 7). Dans le cadre de cette étude, nous allons toujours utiliser les coefficients normalisés à 45° d'incidence.

On observe une signature temporelle similaire à celle observée pour les mesures acquises par le diffusiomètre ERS, avec notamment des variations des données en saison sèche pour la normalisation à 25° d'incidence (figure 8). Néanmoins on observe une plus faible dispersion pour les mesures de Metop en raison de la meilleure résolution spatiale et temporelle réalisée par ce capteur.

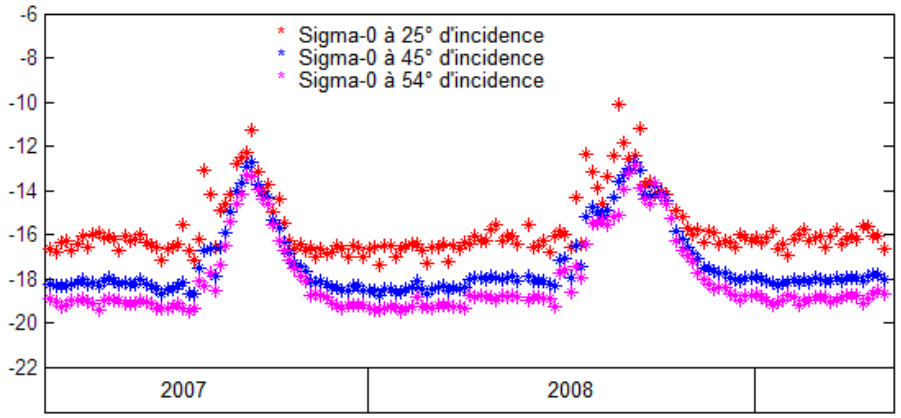


Figure 7 : Coefficient de rétrodiffusion mesurées par le capteur ASCAT
de Metop et normalisé à 25° (rouge), 45° (bleu) et 54° (magenta) d'incidence.

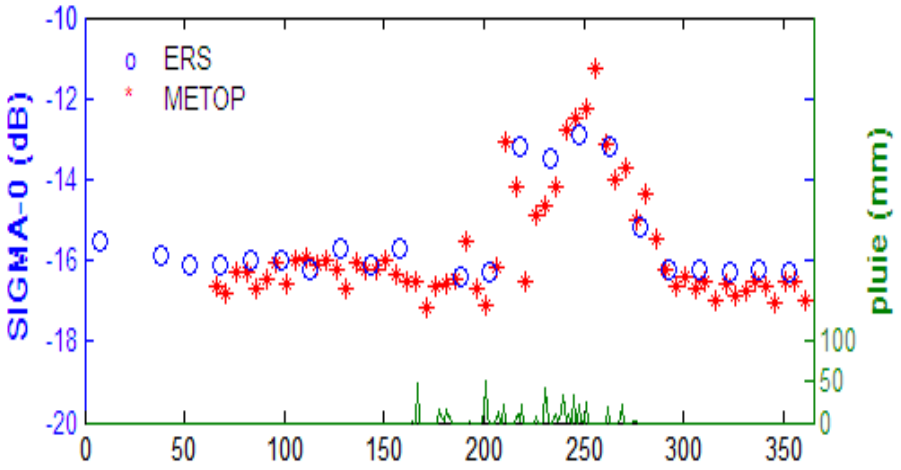


Figure 8 : Comparaison des mesures de ERS et METOP à 25° d'incidence (année 2007).

Les figures 9 et 10 qui montrent une nette superposition entre les mesures du diffusiomètre ERS et celles du diffusiomètre ASCAT (en 2007), indiquent en première approche une bonne calibration des deux capteurs. En effet, ces deux capteurs ayant les mêmes caractéristiques (polarisation, longueur d'onde, taille des pixels), le capteur ASCAT pourra ainsi servir de relais au diffusiomètre ERS et permettre un suivi continuel des paramètres du sol dans le Sahel.

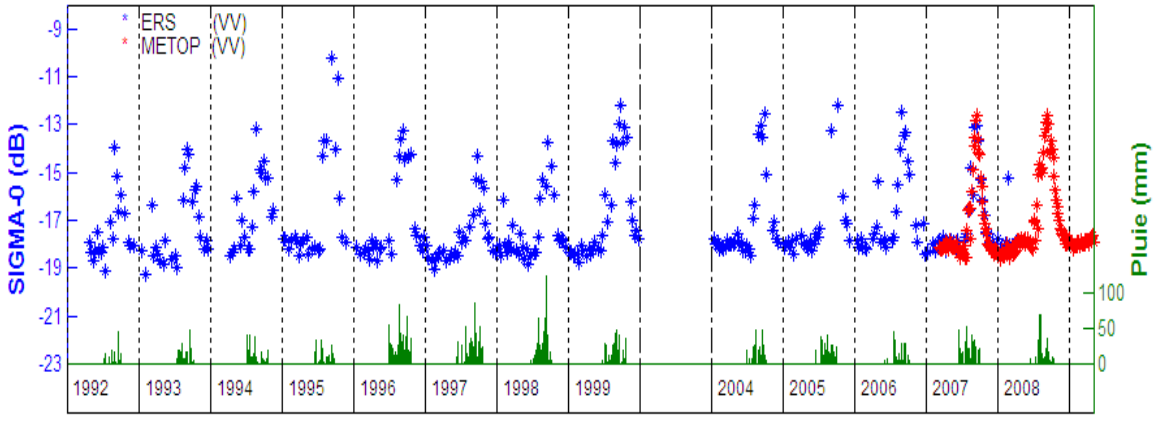


Figure 9 **:** Coefficient de rétrodiffusion mesuré par les capteurs ERS (1992-2007)
et ASCAT de Metop (2007-2008) à 45° d'incidence.

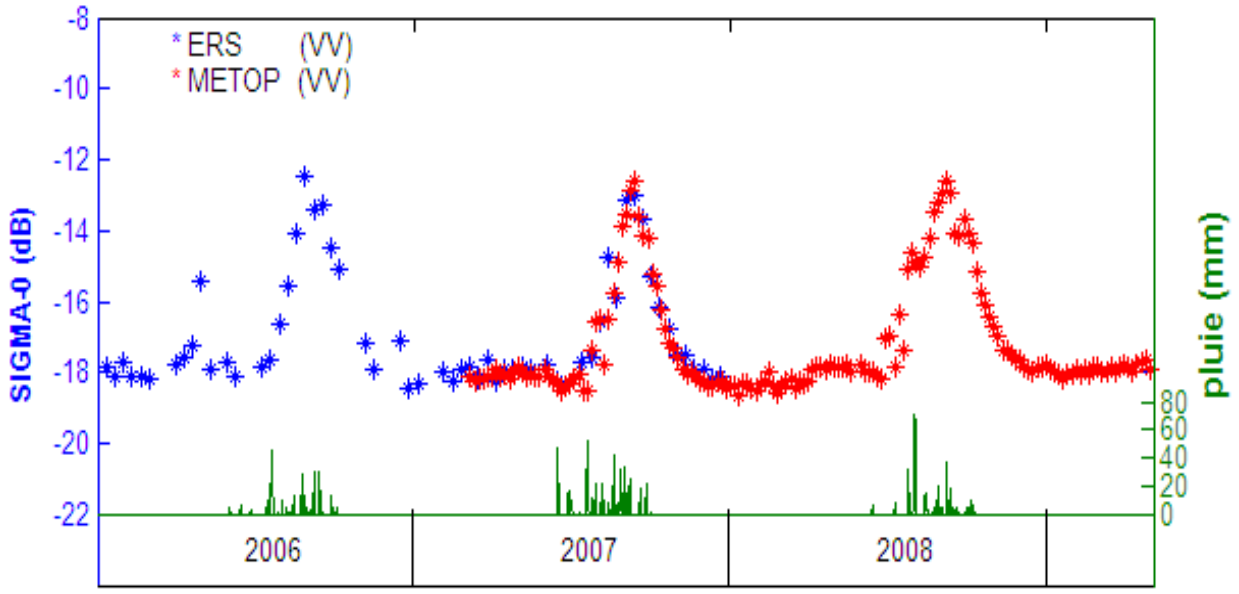


Figure 10 : Coefficient de rétrodiffusion mesuré par les capteurs ERS (2006-2007) et ASCAT de Metop (2007-2008) à 45° d'incidence.

4. DISCUSSION

L'analyse des résultats obtenus au cours de cette étude permet de voir qu'à l'instar des études effectuées dans autres régions du Sahel, la réponse radar est très sensible aux variations saisonnières au Ferlo. On obtient des réponses faibles et constantes en saison sèche, puis, avec l'arrivée des pluies et le développement de la végétation, on assiste à une augmentation de la réponse radar, qui est le résultat de l'augmentation de la teneur en eau du sol d'une part, et de l'évolution de la densité et du contenu en eau de la couche herbacée d'autre part. Cela s'illustre par la bonne corrélation de l'amplitude du coefficient de rétrodiffusion avec la production de la végétation. Par ailleurs, on observe une faible corrélation entre l'amplitude de la réponse radar et la pluviométrie annuelle. Ce phénomène s'explique par l'irrégularité de la distribution temporelle et spatiale de la pluviométrie. On peut avoir une saison avec une faible quantité de pluie mais bien répartie dans le temps, ce qui donne une bonne production de végétation et donc une grande amplitude du signal radar. A l'inverse, on peut avoir une année avec une quantité importante de pluie, mais marqué par des pauses pluviométriques importantes, ce qui affectera la production herbacée et ainsi le coefficient radar. D'autre part, la faible pénétration des ondes radar en bande C à la végétation peut aussi expliquer une telle situation. En effet, avec le développement de la végétation, la contribution du sol nu à la réponse radar devient de plus en plus faible. Ainsi la qualité des événements pluvieux (hauteur de pluie) n'est plus un paramètre influent mais plutôt leur quantité (nombre d'événement pluvieux) et surtout leur répartition afin d'assurer un bon développement de la végétation.

Les résultats obtenus dans cette étude ont permis de montrer que le capteur ASCAT de METOP peut servir de relais pour ERS et ainsi assurer le suivi à long terme de la variabilité saisonnière du signal radar au Sahel.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude, basée sur l'utilisation des données du diffusiomètre radar, constitue un complément aux travaux réalisés par plusieurs auteurs dans différents secteurs du Sahel, permettant ainsi d'étendre ces travaux à l'ensemble de la bande sahélienne. Les résultats obtenus sont en phase avec les résultats précédemment obtenus dans d'autres secteurs du Sahel.

Nous avons au cours de cette étude recensé les mêmes problèmes rencontrés dans les études précédentes, notamment une insensibilité du signal radar aux premiers événements pluvieux. L'apport de nouvelles données radar multi fréquence, multi polarisation et à différentes résolutions spatiales devrait permettre d'améliorer la compréhension de l'influence des différents paramètres de surface au sein d'une cellule de résolution radar et ainsi déterminer les caractéristiques optimales pour un bon suivi de la végétation au Sahel avec l'imagerie radar.

Une étude plus poussée sur la composition de la masse herbacée, la texture du sol ainsi que des mesures in situ de la teneur en eau du sol en période d'hivernage permettraient d'avoir une meilleure approche sur la contribution des différents paramètres de surface.

REMERCIEMENTS :

Nous remercions le *Laboratoire de Télédétection Appliquée-Institut des Sciences de la Terre* (FST-UCAD, Sénégal), l'équipe Géomatique Télédétection et Modélisation des Connaissances du Laboratoire d'Informatique Gaspard Monge (GTMC-LIGM, Univ. Paris-Est Marne la Vallée, France) et le *Laboratoire Groupe de Laboratoire de Physique des Solides et des Matériaux* (FST-UCAD, Sénégal) et le *Centre de Suivi Ecologique* (Sénégal) pour la mise à disposition des données de biomasse collectées sur les sites de contrôles au sol. Nos remerciements vont aussi aux évaluateurs qui grâce à leurs contributions ont permis d'améliorer ce papier. Enfin, notre profonde gratitude va au Projet CORUS « *"Gestion des catastrophes naturelles par Télédétection et SIG (GESCAN)* » du Ministère français des Affaires Etrangères qui a financé une partie de ces travaux de recherche.

Bibliographie

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

Bernard, R. Vauclin, M. et Vidal-Madjar, 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.

Bradley, G.-A. et Ulaby, F.-T. (1981): Aircraft radar response to soil moisture. Remote Sensing. Environment., 11, p. 419-438.

Bruckler, L. Witono, H. et Stengel, P. (1988): Near surface soil moisture estimation from microwave measurements. Remote sensing. Environment, 28, p. 101-121.

Chamard, P.C. and Courel, M.F, (1999) : La forêt sahélienne menacée, Sécheresse, 10(1) : 11-18.

Diouf, A. Sall, M. Wele, A. et Drame, M. (1998) : Méthode d'échantillonnage de la production primaire sur le terrain, CSE, 9p., site internet www.cse.sn .

Frison, P.-L. et Mougin, E. (1996a) : Use of ERS-1 wind scatterometer data over land surfaces. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 34:1–11.

Frison, P.-L. Mougin, E. et Hiermaux, P. (1998): Observations and interpretation of seasonal ERS-1 wind scatterometer data over Northern Sahel (Mali). Remote Sensing of Environment, 693, 233– 242.

Jackson, T.-J. et 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.

Jarlan, L. (2001) Inversion des données des diffusiomètres spatiaux pour le suivi de la végétation en zone semi-aride : application au Sahel africain. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 263 p.

Kennett, R.-G. et Li, F.-K., (1989) Seasat over land scatterometer data: Part I. Global overview of the Ku-band backscatter coefficients. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 27, 592– 605.

Le Houérou H.N. (1989) The Grazing Land Ecosystems of the African Sahel, Ecological Studies 75, Springer-Verlag, Berlin, 282 p.

Le Toan, T. Paulsader, M. Flouzat, G. et 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, june 1981.

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

MEPN. (1999) Schéma directeur de la zone éco-géographique sylvopastorale.

Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F.T., 1992: An empirical model and inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sensing, vol.30, n° 2, pp 370-381.

PNAT, (1986) Cartographie et télédétection des ressources de la république du Sénégal. Etude de la géologie, de l'hydrologie, des sols, de la végétation et des potentiels d'utilisation des sols. SDSU-RSI-86-01, 653 p.

Prince, S.-D. Justice, C.-O. et Los, S.-O. (1990) Télédétection et Environnement, Revue de l'état actuel et des projets futurs. Commission des communautés Européennes. Direction Générale du Développement (DG VIII). Centre Commun de Recherche Etablissement d'ISPRA.

Sarr, A. (2009) Évolution récente du climat et de la végétation au Sénégal (cas du bassin versant du Ferlo) Thèse de doctorat en cotutelle, Université Jean Moulin Lyon 3 (France), Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), 403 p.

Raynaut, C. Grégoire, E. Janin, P. Koechlin, J. and Lavigne-Delville, P. (1997) Sahels : Diversité et dynamique des relations sociétés-nature, Edition Karthala, Paris, 430.p

Ulaby, F.-T. Batlivala, P.-B. et Dobson, M.-C. (1978) : Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture: Part I-Bare soil. IEEE Trans. Geosci. Electron. GE-16(4), p. 286-295.

Zine, S. Jarlan, L. Frison, P.-L. Mougin, E. Hiernaux, P. Rudant, J.-P. (2005) Land surface parameter with ERS scatterometer data over the Sahel : A comparison between agro-pastoral and pastoral areas. Remote Sensing of Environment, 693, 438– 452.