

UTILISATION DE L'IMAGERIE RADAR TERRASAR-X THRS POUR LE SUIVI DE LA COUPE DE CANNE A SUCRE A L'ILE DE LA REUNION

Nicolas Baghdadi¹, Soizic Moinet¹, Pierre Todoroff², Rémi Cresson¹

1 : IRSTEA, UMR TETIS, 500 rue François Breton 34093 Montpellier cedex 5, France
nicolas.baghdadi@teledetection.fr

2 : CIRAD - Réunion, Ligne Paradis, 97410 Saint-Pierre, France

Résumé

L'objectif de cette étude est d'examiner le potentiel de l'imagerie radar TerraSAR-X (en bande X) pour le suivi de la croissance de la canne à sucre sur l'Île de la Réunion. Des données TerraSAR-X multi-temporelles acquises à différents angles d'incidence (31°, 37°, 47°) et polarisations (HH, HV, VV) ont été analysées pour étudier le comportement du signal radar en fonction de la hauteur de canne à sucre. Le potentiel de TerraSAR-X pour cartographier la récolte de canne à sucre a également été étudié. Notre étude démontre que le signal radar rétrodiffusé augmente rapidement avec la hauteur de la canne jusqu'à une hauteur de seuil, qui dépend de l'angle d'incidence et de la polarisation. Au-delà de ce seuil, le signal augmente légèrement, reste constant, voire diminue. La hauteur de seuil est légèrement plus élevée avec la polarisation croisée et aux forts angles d'incidence (47° en comparaison à 31°). Les résultats ont aussi montré que les polarisations parallèles (HH et VV) étaient bien corrélées. Des données TerraSAR-X ont montré qu'après des fortes pluies, la contribution du sol à la rétrodiffusion des parcelles de canne à sucre peut être conséquente pour des hauteurs de cannes inférieures à 50cm. Cette augmentation du signal radar après des fortes pluies pourrait impliquer une ambiguïté d'identification entre des cannes jeunes et des cannes matures à cause de la haute sensibilité du signal radar à l'humidité superficielle du sol. Finalement, les données TerraSAR-X à haute résolution spatiale se montrent utiles pour suivre la coupe de canne à sucre lorsque les champs sont de petites tailles et que la date d'acquisition de l'image est proche de la date de coupe. La comparaison entre les incidences de 37° et 47° montre que la première est plus appropriée pour suivre la récolte de canne à sucre. La coupe est facilement détectable sur des images TerraSAR-X pour des données acquises moins de deux ou trois mois après la coupe. Le signal radar diminue de 5 dB pour des images acquises quelques jours après la coupe et de 3 dB pour des données acquises deux mois après la coupe (VV-37°). La différence dans le signal radar devient négligeable (< 1 dB) entre les cannes à sucre matures et les champs récoltés depuis trois mois ou plus.

Mots clés : Signal SAR, TerraSAR-X, Canne à sucre, Coupe, Récolte, Surveillance, Île de la Réunion.

Abstract

The objective of this study is to investigate the potential of TerraSAR-X (X-band) in monitoring sugarcane growth on Reunion Island. Multi-temporal TerraSAR-X data acquired at various incidence angles (31°, 37°, 47°) and polarizations (HH, HV, VV) were analyzed in order to study the behaviour of SAR (synthetic aperture radar) signal as a function of sugarcane height. The potential of TerraSAR-X for mapping the sugarcane harvest was also studied. Results show that the backscattered radar signal increased quickly with crop height until a threshold height, which depends on polarization and incidence angle. Beyond this threshold, the signal increased only slightly, remained constant, or even decreased. The threshold height is slightly higher with cross polarization and higher incidence angles (47° in comparison with 31°). Results also showed that the co-polarizations channels (HH and VV) were well correlated. TerraSAR-X data showed that after strong rains the soil contribution for the backscattering of sugarcane fields can be consequent for canes with heights less than 50cm. This increase in radar signal after strong rains could involve an ambiguity in the detection of young and mature canes because of the high sensitivity of the radar signal to surface soil moisture. Finally, TerraSAR-X data at high spatial resolution were shown to be useful for monitoring sugarcane harvest when the fields are of small sizes and when the cut is spread out in time. The comparison between incidences of 37° and 47° shows that 37° is more suitable to monitor the sugarcane harvest. The cut is easily detectable on TerraSAR-X images for data acquired less than two or three months after the cut. The radar signal decreases of about 5 dB for images acquired some days after the cut and of 3 dB for data acquired two months after the cut (VV-37°). The difference in radar signal becomes negligible (<1 dB) between harvested fields and mature canes for sugarcane harvested since three months or more.

Keywords : SAR signal, TerraSAR-X, Sugarcane, Cut, Harvest, Monitoring, Reunion Island.

1. Introduction

Historiquement, la canne à sucre a façonné l'identité de La Réunion, elle constitue la culture la plus importante de l'île. Depuis le XVIII^{ème} siècle, c'est toute la vie économique et sociale qui s'organise autour de cette culture. La superficie consacrée à la canne en 2008 (25 000 ha) correspond à environ 60 % de la surface agricole utilisée de La Réunion (DAF, 2010). Près de 3 800 exploitations consacrent tout ou partie de leurs activités à la culture de la canne à sucre.

La filière « canne-sucre-rhum » est un pilier du développement durable. Elle possède des atouts majeurs au sein de l'économie en termes de complémentarité entre les productions agricoles, de contribution paysagère aux attentes du tourisme, de participation à la couverture des besoins énergétiques et de préservation de l'environnement (recyclage des effluents urbains, industriels et agricoles).

Cependant, La Réunion est un territoire exigu de 250 000 ha dont seulement un tiers est utilisable pour l'activité humaine. Les espaces naturels et ruraux subissent les effets combinés de la pression de l'urbanisation, du développement des infrastructures et des aménagements. Le processus du recul des terres exploitées en canne, reprend de l'ampleur depuis 2004 (1 570 ha de surfaces déclarées en moins sur 2004-2007). Pour la pérennité de la filière, il est donc important de lutter contre le mitage de l'urbanisation en préservant la culture de la canne à sucre et le paysage qu'elle crée. Le conflit entre l'urbanisation et la production de canne à sucre risque de s'intensifier dans les prochaines années avec la croissance démographique jusqu'en 2020 (où le seuil du million d'habitants est attendu). Pour concilier ces deux croissances, il va falloir d'une part densifier la population en zones déjà urbanisées, et d'autre part, améliorer la productivité de la canne à sucre. Cet article s'inscrit dans le deuxième point.

Pour que la filière reste compétitive dans les prochaines années, la Recherche accompagne les producteurs dans leurs efforts en développant des outils d'aide à la décision basés sur les nouvelles technologies de traitement de l'information. C'est ainsi que le CIRAD et SPOT Image ont mis en place entre 2002 et 2004 le projet SUCRETTE (SUivi de la Canne à sucRE par TélédéTEction). En effet, les industriels de la canne à sucre ont besoin de connaître les flux des récoltes pour gérer au mieux les arrivées massives de matière premières périssables à la saison des coupes. Notre objectif principal est donc d'avoir un suivi temporel des coupes avec un pas de temps court, surtout dans les premiers mois qui suivent la récolte. Plusieurs études ont démontré le potentiel d'images optiques multi-temporelles pour suivre la récolte de canne à sucre (Lebourgeois et al., 2007; Almeida et al., 2006; Fortes et al., 2006; Gers et Schmidt, 2001; Bégué et al., 2004). Cependant, l'utilisation d'images optiques est parfois

limitée à cause des conditions atmosphériques (nuages). En effet, l'intervalle entre deux images sans nuage est parfois trop long (plus de 2 mois), ce qui rend difficile la distinction entre une culture mature et la repousse dans un champ récolté au début de la saison. En télédétection active, le Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) fournit des mesures jour et nuit, indépendamment des conditions météorologiques. Avec ses revisites fréquentes, le capteur RSO est une source de données de télédétection très utile pour le suivi de l'agriculture dans les régions tropicales. De plus, le signal radar est très sensible aux paramètres du sol et de végétation (par exemple, Ulaby et al., 1986; Fung, 1994). Les courtes longueurs d'ondes RSO telles que la bande X (3cm) et la bande C (6cm) interagissent principalement avec la partie supérieure du couvert végétal tandis que les grandes longueurs d'ondes comme la bande L (20cm) et la bande P (100cm) ont une forte profondeur de pénétration et peuvent ainsi pénétrer dans la végétation et atteindre le sol (Ulaby et al., 1986). Cette profondeur de pénétration dépend des paramètres de la végétation (par exemple, contenu en eau, taille des feuilles, densité de tiges, LAI « Leaf Area Index »). La nouvelle génération de capteurs RSO tel que TerraSAR-X et Cosmo SkyMed permet l'acquisition d'images à très haute résolution spatiale (~1m). De plus, ces nouveaux capteurs ont une forte répétitivité temporelle (possibilité d'acquérir plusieurs images par semaine), ce qui permet de suivre la saison des coupes avec une grande fréquence temporelle.

Depuis plusieurs années, de nombreuses études ont montré l'utilité des données radar pour l'extraction des paramètres sur les cultures (Le Toan et al., 1984; Bouman, 1991; Brisco and Brown, 1998; Shao et al., 2001; Inoue et al., 2002; Blaes et al., 2005; Chakraborty et al., 2005), mais très peu ont été appliquées à la canne à sucre (Baghdadi et al., 2009; Lin et al., 2009). La plupart de ces études ont porté sur l'utilisation de la bande C en raison de la disponibilité de cette fréquence radar avec la première génération de capteurs satellites RSO (ERS-1/2, RADARSAT-1, ASAR/ENVISAT). À partir de plusieurs analyses théoriques et observations expérimentales effectuées sur de la végétation, le coefficient de rétrodiffusion en polarisation HV s'est montré approprié pour suivre la croissance de la végétation (Baronti et al., 1995; McNairn et al., 2004). La comparaison entre le coefficient de rétrodiffusion en bandes C, L et P pour l'évaluation du LAI de certaines récoltes (luzerne, blé, maïs) a montré que le maximum d'information est inclus en bande L (Paloscia, 1998). De plus, les fortes incidences en bande C (RADARSAT-1) (>40°) étaient mieux corrélées à la hauteur de culture du riz que les faibles incidences (20°) (Shao et al., 2001; Chakraborty et al., 2005).

Les analyses par Inoue et al. (2002) des coefficients de rétrodiffusion dans cinq fréquences (Ka, Ku, X, C et L) sur le champ de riz ont montré (en polarisations HH et croisées) que le LAI était le mieux corrélé avec la bande

C et la biomasse était la mieux corrélée avec la bande L. Au contraire, les faibles longueurs d'ondes (Ka, Ku et X) étaient mal corrélées avec le LAI et la biomasse. Bouman (1991) a constaté que la possibilité d'évaluer les paramètres de culture à partir de mesures radar en bande X était très réduite. Ce faible potentiel est attribué à une saturation rapide du signal radar avec les paramètres de culture. Les mesures radar de culture de riz en bande X (Kim et al., 2000) ont montré que le coefficient de rétrodiffusion a atteint sa valeur maximale (~60cm) avant que la hauteur maximale de la plante ne soit atteinte (~100cm). Récemment, Lin et al. (2009) ont proposé une méthode pour cartographier la croissance de canne à sucre et estimer l'indice de végétation (LAI) en utilisant le ratio HV/HH de données ASAR (bande C). Une première étude sur le potentiel de données TerraSAR-X pour suivre la récolte de canne à sucre sur l'île de Réunion a été effectuée par Baghdadi et al. (2009). À partir de l'étude sur seulement deux images TerraSAR, les résultats ont montré une bonne corrélation entre le signal radar et les hauteurs de canne entre 0 et environ 100cm à 53° (en polarisation HH). De plus, les champs récoltés ont été facilement détectés quand l'acquisition d'image radar est proche de la date de récolte.

Notre étude a pour but d'évaluer les capacités du capteur TerraSAR-X pour le suivi de la coupe de canne à sucre à l'île de la Réunion. Elle consiste à diagnostiquer l'hétérogénéité intra-parcellaire, analyser la possibilité de détecter les coupes, et à suivre l'avancement de la récolte. La section 2 décrit le site d'étude et les données utilisées (images radar et optique et les mesures terrain). La sensibilité du signal radar rétrodiffusé à la hauteur de la canne et son potentiel de cartographie de la récolte de canne à sucre sont analysés en section 3. Finalement, les conclusions de l'étude et les perspectives sont présentées en section 4.

2. Site d'étude et données utilisées

2.1. Zone d'étude

Le site d'étude couvre une exploitation de canne à sucre localisée au sud de l'île de la Réunion, près de la ville de Saint Pierre (latitude : 21°19' S - longitude : 55°31' E ; Figure 1a). Quinze champs de canne à sucre d'une taille moyenne d'environ 9 ha ont été étudiés : {2, 3, 4, 5, 6.1, 6.2, 12.1, 12.2, 12.3, 15, 16, 18, 19.1, 19.2, 20} (Figure 1b). Ces parcelles d'étude s'étendent sur environ 5km de long environ, entre 100m et 500m d'altitude. Des images TerraSAR-X et SPOT4/5 ont été acquises sur notre site d'étude. Ces images appartiennent à la base de données KALIDEOS mise en place par le CNES (l'agence spatiale française) (DeBoissezon et Sand, 2006 ; CNES, 2007).

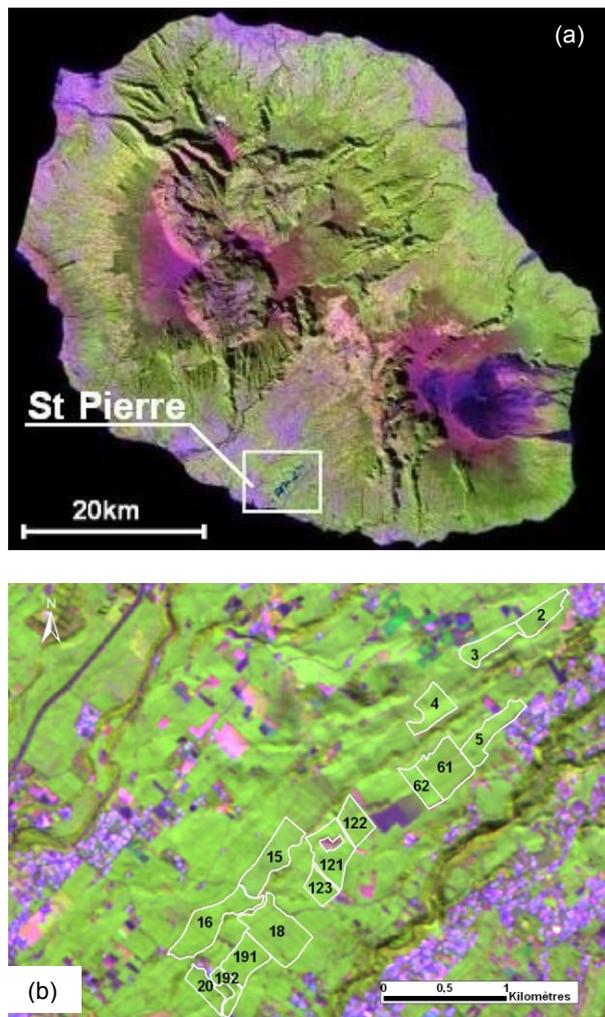


Figure 1 : Localisation du site d'étude sur l'île de La Réunion (a) et emplacement des parcelles témoins (b). Image SPOT4 acquise le 19/05/2009 (RGB= B4, B3, B2). Les coordonnées géographiques de la zone étudiée (parcelles témoins) sont : 21°19'29"S et 55°31'05"E.

2.2. Données TerraSAR

31 images TerraSAR-X (bande X ~ 9.65 GHz) ont été acquises entre le 14 décembre 2008 et le 20 janvier 2010, avec des angles d'incidence de 31°, 37°, et 47°. Les acquisitions ont été effectuées en polarisation simple (HH ou VV) ou double (HH/VV, HH/HV ou VH/VV). La taille de pixels des images TerraSAR-X utilisées était comprise entre 1 et 6m (modes SpotLight et Stripmap, respectivement). Les caractéristiques d'images TerraSAR-X utilisées dans cette étude sont récapitulées dans le Tableau 1.

La calibration radométrique des images TerraSAR-X (type MGD) a été effectuée en utilisant l'équation suivante (Fritz, 2007):

$$\sigma_i^{\circ} (dB) = 10 \log_{10} (K_S |DN_i|^2 - NEBN) + 10 \log_{10} (\sin \theta_i) \quad (1)$$

Cette équation transforme l'amplitude du signal rétrodiffusé de chaque pixel (DN_i) en un coefficient de rétrodiffusion (σ_i°) en décibels. Le coefficient de

calibration Ks (scaling gain value) est propre à la configuration d'antenne du satellite lors de l'acquisition de l'image radar et est donc généré en temps réel par le système d'acquisition en orbite. Il varie pour les images traitées de $1,5 \cdot 10^{-6}$ à $2,2 \cdot 10^{-5}$, selon l'angle d'incidence (θ) et la polarisation (faibles valeurs pour les polarisations croisées ou les grandes incidences). Le NEBN (*Noise Equivalent Beta Naught*) représente le bruit sur le signal. Il est décrit par un polynôme et dépend lui aussi de Ks. Toutes les images TerraSAR-X ont ensuite été géoréférencées en utilisant des images SPOT orthorectifiées (choix de points homologues sur les deux supports).

Pour les images à 31° , le NEBN varie de -26,8 à -23,9 dB pour les polarisations HH et VV en mode de polarisation simple et de -19,1 à -12,2 dB pour les polarisations HH, HV et VV en mode de polarisation double. Dans le mode SpotLight, le NEBN varie entre -26,8 et -18,6 dB tandis que dans le mode Stripmap, il varie entre -19,1 et -12,2 dB.

Les fortes valeurs de NEBN trouvées pour les images acquises en mode StripMap n'ont pas permis la calibration de certains pixels parce que le terme $Ks.DN^2$ était inférieur au bruit NEBN. Ce problème est très

fréquent pour des pixels correspondant à des surfaces lisses (réflexion spéculaire) telles que des champs récoltés. De plus, les résultats montrent que l'influence du bruit est plus forte pour les polarisations croisées que pour les co-polarisations parce que même si le NEBN est du même ordre de grandeur pour ces deux modes de polarisations, le terme $Ks.DN^2$ est plus faible pour les polarisations croisées.

En analysant de plus près les pixels impossibles à calibrer ($Ks.DN^2 < NEBN$), on observe une distinction au sein du mode StripMap. En effet, pour les images StripFar (sous-catégorie de StripMap caractérisée par une résolution de 6m au lieu de 3m), en moyenne 30% de pixels aberrants ont été trouvés (8% en StripMap en excluant les StripFar), et seulement 2% en SpotLight ce qui représente une forte perte d'informations. Chacune de ces images StripFar est en polarisation HH/HV ou VH/VV, et la proportion de pixels aberrants ne dépend pas de l'incidence.

Lors du calcul des statistiques sur l'image, nous veillons à exclure les pixels dont le bruit est supérieur au $Ks.DN^2$.

Angle d'incidence (°)	Polarisation	Mode d'acquisition	Date (jj/mm/aaaa)
31	HH	Spotlight	18/03/2009 ; 01/05/2009 ; 23/05/2009
	VV	Spotlight	25/06/09
	VH/VV	Stripmap	20/12/2008 ; 11/01/2009 ; 02/02/2009 ; 24/02/2009 ; 20/01/2010
	HH/HV	Stripmap	22/01/2009 ; 13/02/2009 ; 18/12/2009
37	VV	Stripmap	01/08/2009 ; 03/09/2009 ; 06/10/2009 ; 17/10/2009 ; 28/10/2009 ; 08/11/2009 ; 11/12/2009 ; 13/01/2010
47	HH	Spotlight	17/05/09
	VV	Spotlight	08/06/2009 ; 30/06/2009
	VH/VV	Stripmap	14/12/2008 ; 25/12/2008 ; 27/01/2009 ; 18/02/2008 ; 14/01/2010
	HH/HV	Stripmap	16/01/2009 ; 07/02/2009 ; 12/12/2009

Tableau 1 : Principales caractéristiques des images TerraSAR-X utilisées dans notre étude.

2.3. Données optiques

Quinze images SPOT-4/5 ont été acquises sur l'île de La Réunion entre le 24 juillet 2008 et le 22 décembre 2009 avec la résolution spatiale de 20 et 10m (Tableau 2). Toutes les images étaient géoréférencées dans le système de coordonnées UTM (zone 40 Sud) et avaient été corrigées de l'effet atmosphérique par l'entreprise CS (images de réflectance Top Of Canopy). Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) a été calculé à partir des images optiques pour chaque parcelle de référence pour déterminer l'état des parcelles au temps d'acquisition des images SPOT (parcelles matures ou récoltées).

Capteur	Date (jj/mm/aaaa)
SPOT-4	21/08/2008 ; 25/02/2009 ; 22/04/2009 ; 19/05/2009 ; 14/06/2009 ; 10/08/2009 ; 15/08/2009 ; 21/09/2009 ; 21/10/2009
SPOT-5	24/07/2008 ; 21/10/2008 ; 17/12/2008 ; 21/03/2009 ; 24/07/2009 ; 22/12/2009

Tableau 2 : Liste des images SPOT utilisées dans notre étude.

Le profil temporel du NDVI d'un champ de canne à sucre peut être divisé en deux périodes : une période dans laquelle la valeur du NDVI augmente, correspondant au développement végétatif de la canne à sucre et une autre période avec des valeurs stables ou décroissantes, correspondant à la phase maturation de la plante. La Figure 2 montre un exemple du profil

temporel de NDVI pour le champ de canne à sucre de référence 16. La faible valeur de NDVI le 21 octobre 2008 et le 21 septembre 2009 est corrélée avec les dates de coupe (01 septembre 2008 et 29 août 2009). Après ces dates, les augmentations de NDVI illustrent la reprise de croissance de la canne.

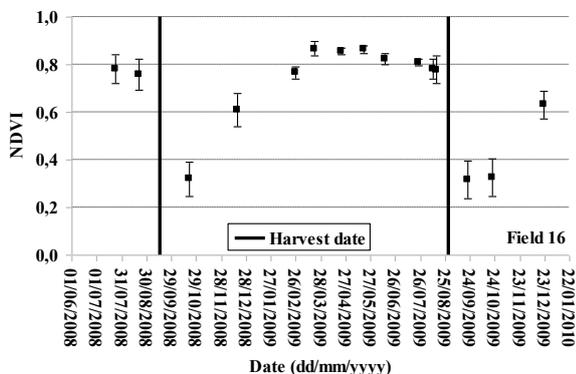


Figure 2 : NDVI en fonction du temps pour la parcelle 16. Les dates de coupes sont : 1 septembre 2008 et 29 août 2009.

2.4. Mesures terrain

Des mesures terrain de hauteur de canne à sucre ont été effectuées sur plusieurs champs de référence entre le 07 novembre 2008 et le 06 juin 2009. Sur chaque champ de référence, deux placettes expérimentales de 1,5m x 1,5m ont été utilisées pour mesurer la hauteur de canne à sucre, le nombre de tiges et de feuilles. Les mesures terrain ont montré que la canne à sucre dans notre site d'étude grandit d'environ 25cm par mois pendant les cinq premiers mois, 40cm entre le 6ème et 9ème mois et ensuite d'environ 10-20cm par mois jusqu'à atteindre la hauteur à maturité de la canne. Pour nos champs de référence, le nombre moyen de tiges et des feuilles était respectivement d'environ 17 et 77 par m², (avec respectivement, un écart-type d'environ 7 et 30).

Nous disposons des dates de coupe de chacune de nos parcelles de référence. Des données de précipitation quotidiennes, enregistrées par quatre stations météorologiques situées aux alentours de l'exploitation, ont été aussi utilisées : Bérive-2, Isautier-Bérive, Isautier-foyer et Isautier-Ringuin. L'effet d'humidité du sol a seulement été pris en considération dans cette étude par l'utilisation des données de précipitation. En effet, les mesures d'humidité du sol étaient difficiles à effectuer parce que le terrain est inaccessible par temps pluvieux et que le sol est couvert d'un épais paillis (formé par des feuilles mortes). Schoups et al. (1998) ont étudié la sensibilité du sol et des paramètres de culture sur la rétrodiffusion radar en bande C (5,3 GHz) de champs de betterave à sucre en utilisant les modèles de dispersion à micro-ondes de Lang et Karam (Lang, 1981; Karam et al., 1995). Les résultats ont montré que pour la betterave à sucre avec une hauteur de 15cm, les

paramètres du sol et de la canopée sont tous les deux importants. L'influence du sol devient faible pour une betterave à sucre entièrement mature (hauteur ≥ 50cm).

3. Résultats

3.1. Sensibilité du signal radar à la hauteur de canne

La sensibilité du signal TerraSAR-X a été analysée en fonction de la hauteur de canne à sucre. Les résultats montrent que le signal radar augmente avec la hauteur de canne à sucre pour les champs en début de croissance (avec des hauteurs de canne inférieures à 40cm environ, selon l'angle d'incidence et la polarisation) (Figure 3). La croissance de la canne à sucre se traduit par l'augmentation de sa hauteur et du nombre des tiges, du nombre et de la taille des feuilles. Cela implique à la fois, une augmentation du coefficient de rétrodiffusion du volume végétal, et une atténuation du signal radar (atténuation qui est due aux paramètres de la canne et qui augmente avec la biomasse végétale). Cependant, ces deux événements font saturer le signal radar et diminuent ensuite au-delà d'une hauteur de la canne de 50cm. En effet, le signal radar est la somme de trois composantes : a) diffusion de surface du sol, b) diffusion de volume de la végétation, et c) multiples interactions entre végétation et sol (négligeable). La contribution de chaque composante au signal radar total dépend des caractéristiques de la canne (biomasse ...), du sol (rugosité et humidité), et des paramètres instrumentaux (incidence et polarisation). La composante de surface décroît avec la hauteur de la canne (et donc avec la biomasse). Quant à la composante volumique, elle croît avec la hauteur puis décroît à partir d'un certain seuil de hauteur).

La dynamique du signal radar avec la hauteur de canne est légèrement plus importante à 47° qu'à 31°. Une dynamique de 5 dB pour 47° et 2,5 dB pour 31° est observée pour des hauteurs de canne entre 0 et environ 40cm. Les résultats montrent que σ° est fortement influencé par l'humidité du sol puisqu'une nette augmentation du signal radar est observée après des épisodes pluvieux, en particulier pour de jeunes cannes.

3.1.1. Données TerraSAR-X à 31°

Avec un angle d'incidence de 31°, le signal radar augmente de 2,5dB avec la hauteur de canne pour une canne inférieure à 30cm (1-2 mois). Cette augmentation ne semble pas dépendre de la polarisation (VV et HV). Après ce seuil, une diminution du signal radar est observée (Figures 3a, b, c).

L'augmentation du coefficient σ° pour l'image du 11 janvier 2009 pour les parcelles dont la hauteur de canne est inférieure à 30cm (2 dB en VV et 3 dB en HV) est cohérente avec les fortes précipitations enregistrées entre le 4 janvier et le 11 janvier 2009 (130 mm) (Figures 3a, c). Cette augmentation est due à l'augmentation de la contribution du sol (sous l'influence de l'humidité du

sol) dans le signal radar total, principalement causée par une forte humidité du sol. La faible incidence radar (31°) et la couverture végétale basse (jeunes cannes) ont permis cette forte contribution du sol. Au-delà de 30cm, les résultats montrent que le signal radar, en polarisation VV, est du même ordre de grandeur que les autres dates. Ceci s'explique par une faible contribution du sol, en raison d'une pénétration moindre de l'onde radar dans la couverture végétale. En polarisation HV, le signal radar du 11 janvier 2009 reste plus élevé (d'environ 1,5dB) que les autres dates pour des hauteurs de canne entre 30 et 65cm. Pour les cannes d'environ 100cm de hauteur, la contribution du sol au

signal radar devient très faible. Ce résultat montre que la polarisation croisée a un potentiel de pénétration dans le couvert végétal plus important que les polarisations HH et VV et que la contribution du sol est aussi plus importante.

L'image radar du 23 mai 2009 (HH- 31°) confirme que la contribution du sol devient négligeable pour des cannes matures (hauteur entre 150 et 230cm). En effet, le signal radar du 23 mai 2009 est du même ordre de grandeur que celui d'autres dates malgré 42mm de précipitations deux jours avant l'acquisition radar.

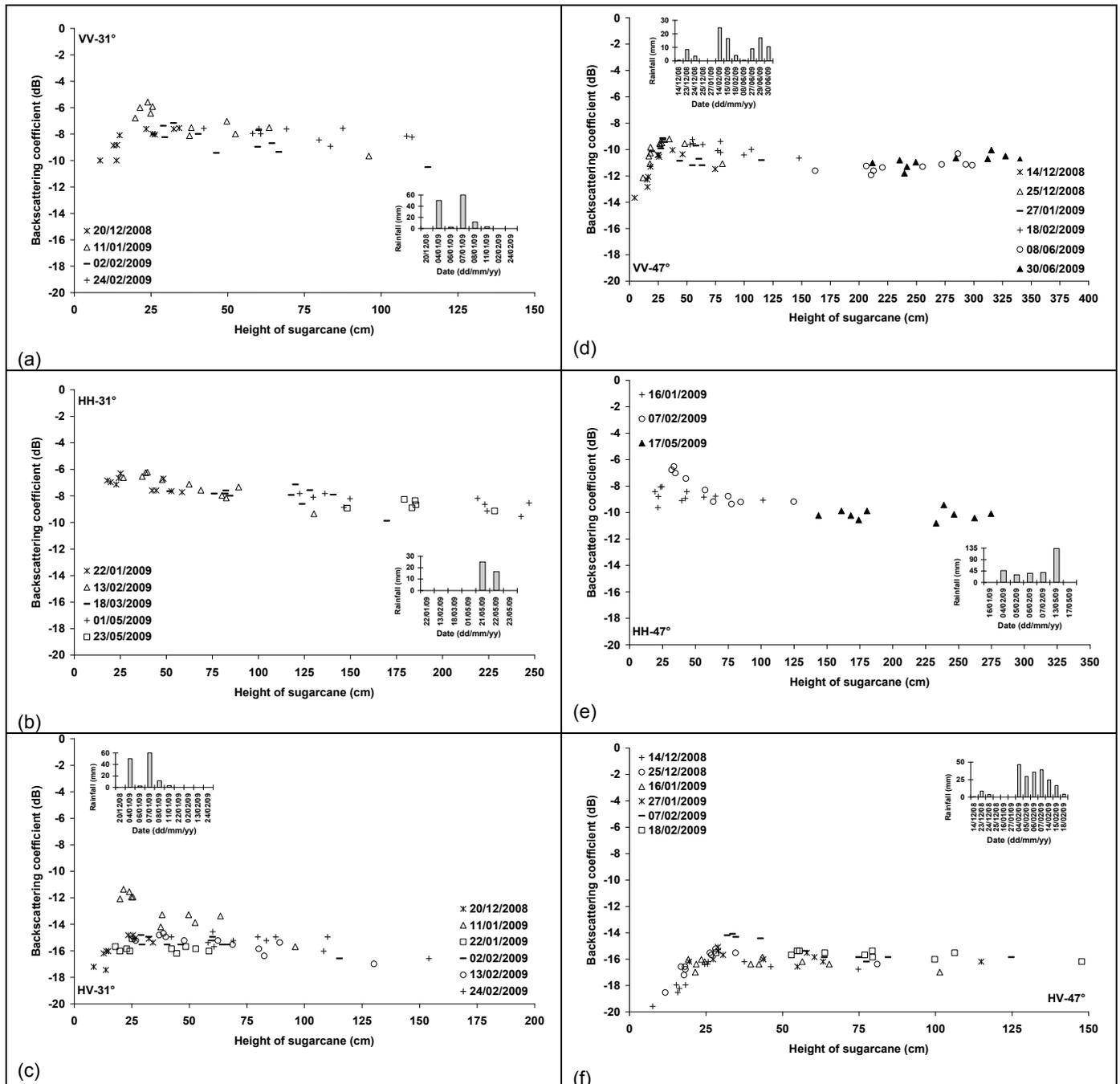


Figure 3 : Coefficient de rétrodiffusion radar en fonction de la hauteur de canne pour les polarisations VV, HH et HV et les angles d'incidence de 31° et 47° .

3.1.2. Données TerraSAR-X à 47°

Le signal radar augmente avec la hauteur de canne à sucre jusqu'à environ 40cm (2-3 mois) et diminue ensuite. Cette augmentation du signal d'environ 5 dB ne semble pas dépendre de la polarisation (Figures 3d, e, f). Les fortes pluies qui ont précédé les acquisitions TerraSAR-X du 18 février 2009 (45mm en 5 jours) et du 30 juin 2009 (38mm en 3 jours) n'ont pas entraîné d'augmentation notable du signal radar pour ces deux images. La hauteur de canne variait de 50 à 150cm le 18 février 2009 et de 210 à 340cm le 30 juin 2009. Une hauteur de canne d'environ 50cm combinée avec une forte incidence radar (47°) semble être la raison principale de la faible pénétration du signal radar dans la couverture végétale et par conséquent, de la faible contribution du sol au signal radar total.

Le signal radar de l'image TerraSAR-X du 07 février 2009 (HH et HV) montre qu'il dépend de l'humidité du sol pour les cannes de faibles hauteurs (< 40cm), avec une augmentation du signal d'environ 1,5 dB (cannes de 30-40cm). Au-delà de 40cm, la contribution du sol diminue avec la hauteur et le signal radar devient indépendant des caractéristiques du sol. En effet, à la date d'acquisition radar du 07 février 2009, le sol était très humide avec les pluies cumulées d'environ 150mm sur 4 jours. L'image du 17 mai 2009 a aussi été acquise dans des conditions très humides (133mm de pluie le 13 mai 2009). En revanche, l'analyse du signal radar montre une contribution du sol négligeable, puisque la hauteur de canne varie de 145 à 275cm. De plus, la contribution du sol semble être du même ordre de grandeur pour toutes les polarisations (différence de σ° , pour une hauteur de canne donnée, entre deux dates dont l'une avec un sol très humide suite à une forte pluie).

3.2. Comportement temporel du signal radar et détection des coupes

Dans cette partie, nous allons analyser le potentiel des données TerraSAR-X à suivre et cartographier les coupes de canne à sucre. L'importante base de données d'images TerraSAR-X à 31° et 37° (20 images pour la durée de 13 mois) rend possible l'analyse de comportement temporel du signal radar sur un cycle cultural complet. Comme le signal radar diminue avec l'angle d'incidence (θ), il était ainsi nécessaire d'évaluer la dépendance angulaire du signal TerraSAR, aux polarisations HH et VV pour des angles d'incidence entre 31° et 37°.

En échelle linéaire, le coefficient de rétrodiffusion radar σ° est relié à l'angle d'incidence θ par l'équation (Baghdadi et al., 2001, 2009; Beauchemin et al., 1995; Shi et al., 1994; Ulaby et al., 1982):

$$\sigma^\circ = \alpha \cos^\beta(\theta) \quad (2)$$

Pour une même cible (parcelle de canne à sucre) acquise à deux incidences différentes (θ_1 et θ_2), la différence du signal radar est :

$$\Delta\sigma^\circ(\text{dB}) = 10.\beta.\log_{10}\left(\frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1}\right) \quad (3)$$

Tout d'abord, le paramètre β a été calculé pour chaque parcelle de référence en utilisant tous les couples d'images acquises à un jour d'intervalle. En effet, pour chaque parcelle de référence, les couples (θ_1, σ°_1) et (θ_2, σ°_2) sont calculés et le paramètre β ainsi estimé en utilisant l'équation (3). Les images SAR acquises les jours de fortes précipitations ne seront pas utilisées. Ensuite, la valeur moyenne de β a été calculée pour chaque polarisation. Les résultats montrent des valeurs β de 1,2 pour HH et 1,45 pour VV (l'écart-type est de 0,43 et 0,33, respectivement). L'effet d'incidence est respectivement d'environ 0,37 dB et 0,45 dB pour des incidences entre 31° et 37° en HH et VV.

3.2.1. Détection des coupes inter-parcellaire

La Figure 4 montre une série temporelle d'images TerraSAR-X acquises entre le 01 août 2009 et le 13 janvier 2010 en polarisation VV et un angle d'incidence de 37°. L'interprétation des images montre que la différence entre la rétrodiffusion de canne mature et de canne coupée est bien prononcée. Les images montrent un fort coefficient σ° pour des cannes mures et un faible coefficient σ° pour des champs récoltés. À titre d'exemple, la parcelle 16 coupée le 29 août 2009 a une faible radiométrie (faible σ°) sur l'image du 3 septembre, 6 octobre, 17 octobre et 28 octobre. Au-delà (2 mois après la coupe), le signal devient du même ordre de grandeur que celui d'une canne mature.

La Figure 5 montre la variation temporelle de σ° pour trois dates (en VV-37°) : 01 août, 03 septembre et 06 octobre 2009. Sur l'image du 01 août, le signal radar moyen de chaque parcelle de référence était du même ordre de grandeur (~ -7 dB) puisque toutes les parcelles étaient des cannes à sucre mures. Le 03 septembre, seules les parcelles 15 et 16 voient leur signal radar diminué (de 5 dB) parce que ces champs ont été coupés la deuxième quinzaine d'août (respectivement, 15 et 29 août). Un mois plus tard, sur l'image du 06 octobre, le signal radar des parcelles 15 et 16 a légèrement augmenté (de 1 dB) tandis que celui des parcelles 20, 61 et 62 a fortement diminué (6-7 dB); elles ont été coupées le 04 septembre, le 10 septembre et le 03 octobre. Les résultats ont aussi montré que le coefficient σ° des images de septembre et d'octobre était en général plus faible qu'en août pour des cannes à sucre mures, ce qui pourrait être due à une déshydratation physiologique de la canne. Les signaux radar les plus faibles (<-11 dB) correspondent aux champs de canne à sucre récoltés (15, 16, 20, 61, 62) tandis que les valeurs les plus fortes (>-9 dB) correspondent aux cannes de mures ou aux champs récoltés depuis plus de deux

mois. Pour conclure, les valeurs basses de σ° correspondent aux champs récoltés et une différence

d'au moins 5 dB a été observée entre les champs récoltés et les champs matures.

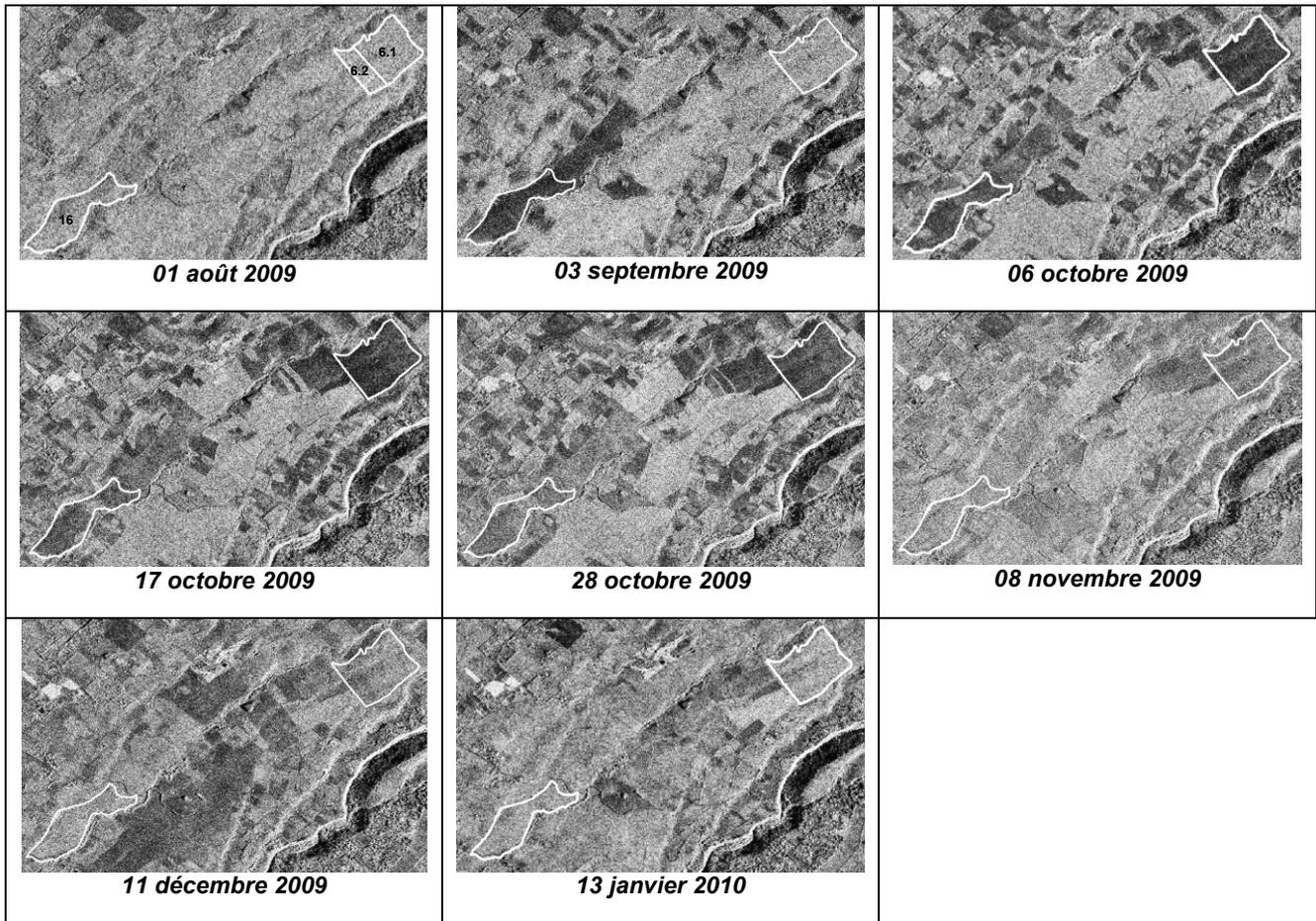


Figure 4 : Comparaison de plusieurs images TerraSAR-X (VV-37°) pour trois parcelles de canne à sucre (6.1, 6.2 et 16). Les champs 6.1, 6.2 et 16 ont respectivement été coupés le 10 septembre, le 03 octobre et le 29 août 2009.

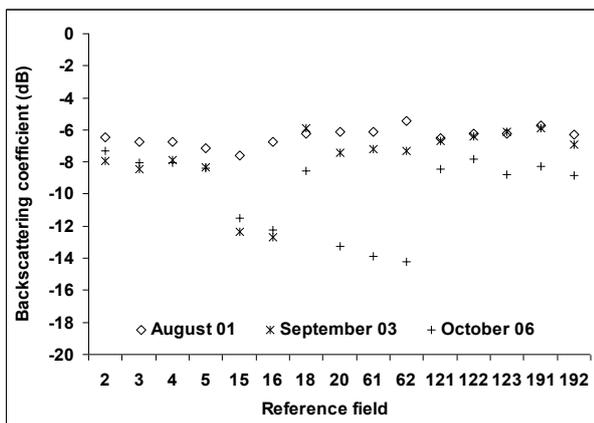


Figure 5 : Coefficient de rétrodiffusion extrait des images TerraSAR-X du 01 août, 03 septembre et 06 octobre 2009 (VV-37°). L'écart-type de coefficients de rétrodiffusion dans les parcelles d'étude varie entre 1,5 et 2 dB.

3.2.2. Détection des coupes intra-parcellaire

L'analyse d'images TerraSAR-X à l'échelle intra-parcellaire est très intéressante en polarisation VV et à

37° d'incidence. La progression de la récolte est visible lorsque les acquisitions TerraSAR-X sont proches (<2 mois) de la coupe et que celle-ci est étalée sur plusieurs jours. La figure 6 présente six images focalisées sur les parcelles 4 et 5, acquises sur trois mois. La faible radiométrie correspond à la coupe, la progression de la récolte s'effectue ici du nord au sud. L'image du 08 novembre 2009 montre bien l'influence de l'humidité du sol (importantes précipitations de 111mm entre le 6 et 8 novembre 2009). En effet, sur cette image le contraste entre les surfaces coupées et non coupées est plus faible que l'image du 11 décembre. Cependant, on distingue que la coupe est finie pour la parcelle 4, et est encore en cours pour la parcelle 5. La détection de la coupe n'est plus possible trois mois après la coupe comme l'illustre l'image du 13 janvier 2010.

Le potentiel des images TerraSAR-X pour le suivi de la coupe de canne à sucre est démontré pour des données acquises entre décembre 2008 et janvier 2010. La Figure 7 montre l'évolution temporelle du signal radar pour la parcelle 16. Une diminution du signal de 5 dB a été observée pour ce champ entre le

01 août 2009 (-7 dB) et le 03 septembre 2009 (-13 dB). En effet, ce champ a été coupé le 29 août 2009. Cette diminution est suivie par une faible augmentation entre le 03 septembre et le 28 octobre qui correspond à la croissance de la canne avec une hauteur de canne moyenne d'environ 40cm. Sur l'image du 28 octobre (2 mois après la coupe), le signal radar était de l'ordre de -10 dB comparativement à un niveau moyen du signal pour les cannes mures de -8 dB. Cette différence de 2 dB est la limite à partir de laquelle la coupe n'est plus facilement détectable. La forte valeur du signal observé le 08 novembre (-7 dB au lieu de -9,5 dB) peut s'expliquer par une semaine excessivement pluvieuse, avec 111mm de précipitation entre le 6 et 8 novembre 2009 (la valeur de « -9,5 dB » est obtenue si on suppose une évolution linéaire du signal radar entre le 28 octobre et le 11 décembre 2009 : humidité constante du sol et donc absence de pluies entre les deux dates,

et une augmentation du signal due à la croissance de la végétation). Ce résultat montre l'influence de la pluie et ainsi de l'humidité du sol sur le signal TerraSAR-X avec une augmentation de 2,5 dB pour la canne à sucre de deux mois et demi (soit 65cm de hauteur).

Baghdadi et al. (2009) ont observé un meilleur potentiel avec des images TerraSAR-X à 53° qu'à 39°. En effet, le terme NEBN n'avait pas été utilisé dans le processus de calibration d'images TerraSAR. Tous les pixels de faibles radiométries (pixels de coupe par exemple) et qui pourrait correspondre à $NEBN > KsDN^2$ n'avaient pas été exclus dans le calcul des coefficients de rétrodiffusion moyens des champs de référence. Ainsi, le signal moyen sur un champ coupé était plus faible que ce qu'il devrait être et ainsi la différence entre la canne mature et un champ coupé était plus grande.

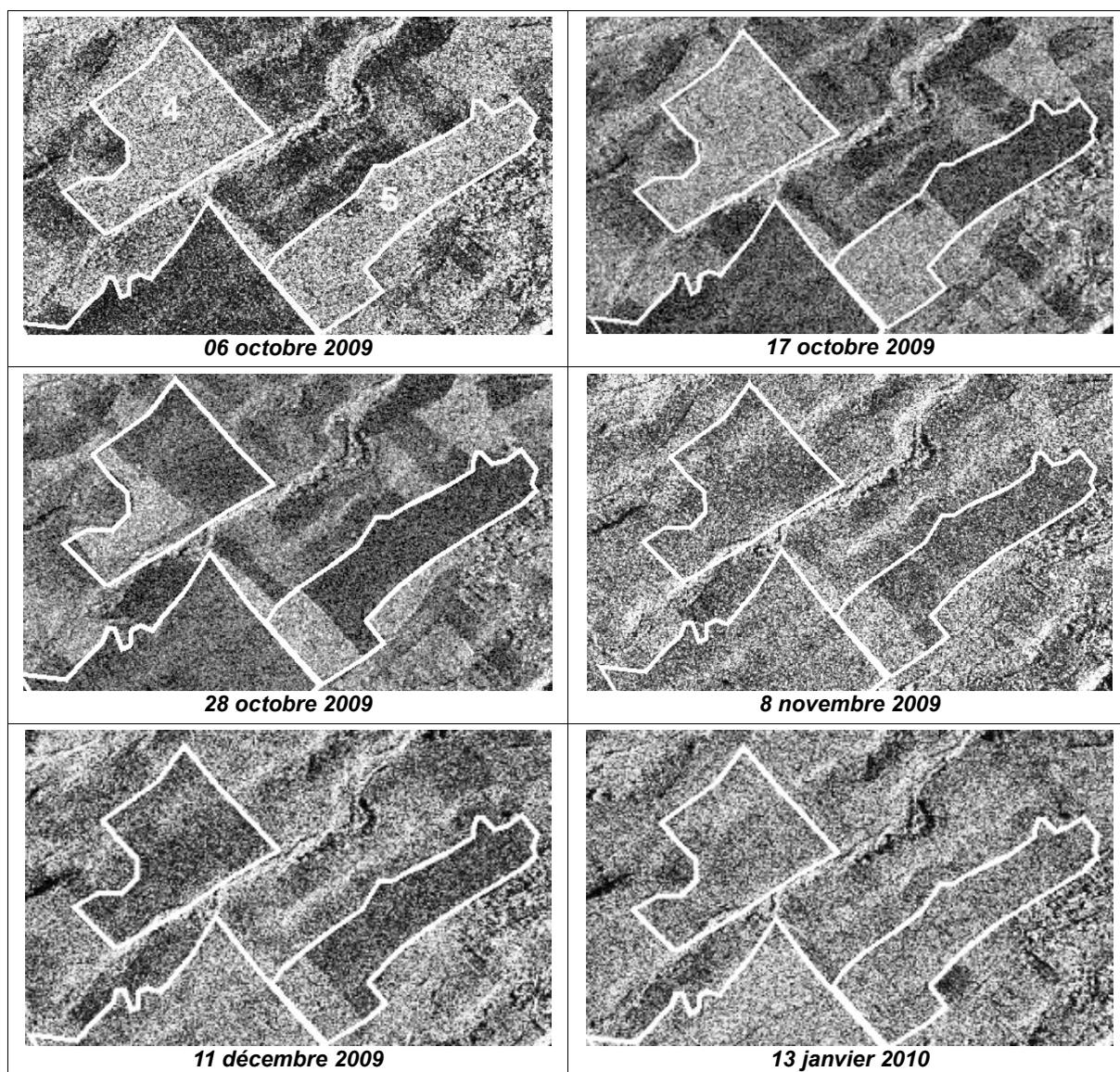


Figure 6 : Variations intra-parcellaire pour les parcelles 4 et 5. Les images TerraSAR-X sont acquises en VV-37°.

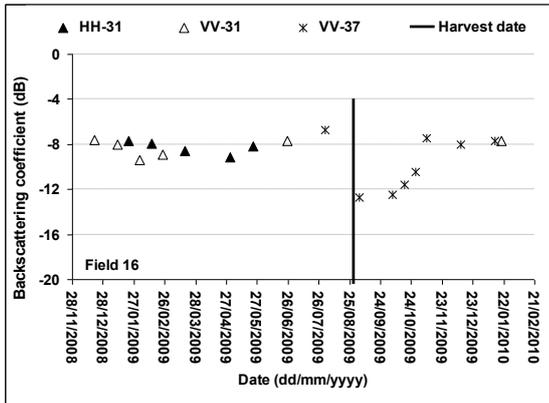


Figure 7 : Variation temporelle du signal TerraSAR-X pour la parcelle de canne à sucre n°16 en VV 31° et 37°. La parcelle 16 a été récoltée le 29 août 2009.

4. Conclusions et perspectives

L'objectif de cette étude était d'analyser le comportement de signal TerraSAR-X en fonction de la hauteur de canne à sucre. Le coefficient de rétrodiffusion radar des parcelles de références a été étudié en utilisant les mesures terrain de hauteur de canne à sucre, les images SPOT et les dates de coupe. La tendance croissante du coefficient σ^0 en fonction de la hauteur de canne à sucre est observée jusqu'à une hauteur d'environ 40cm (qui dépend de l'incidence et la polarisation). L'incidence de 47° a été identifiée comme légèrement plus sensible aux variations de la hauteur de canne à sucre au stade jeune (hauteur < 40cm). En bande X, le coefficient de rétrodiffusion parvient à une valeur maximale pour la hauteur de canne à sucre d'environ 40cm à 47°, tandis qu'à 31°, cette valeur est atteinte plus tôt (30cm). La discrimination entre des cannes jeunes et des cannes matures est limitée aux champs coupés depuis moins de 2 mois (hauteurs de canne entre 0 et 50cm). Ainsi, les champs coupés sont facilement détectés sur les images TerraSAR-X si la date d'acquisition est proche de la date de coupe (idéalement moins de deux mois). En effet, la récolte implique une diminution dans le signal qui peut atteindre 7 dB (VV-37°) si la date d'acquisition de l'image radar est relativement proche de la date de récolte (quelques jours).

Les résultats ont également montré que le signal radar pouvait être très dépendant de l'humidité du sol particulièrement aux faibles et moyens angles d'incidence et pour de jeunes cannes. En effet, aux faibles et moyennes incidences, la contribution du sol (influencée par l'humidité du sol) pouvait être importante pour des hauteurs de canne inférieures à 95cm. Les effets du sol sont faibles pour des images acquises aux grands angles d'incidence et pour des cannes à sucre avec une végétation bien développée. La diminution du signal radar pour des champs récoltés pouvait être réduite de 3-4 dB sur des images acquises après une période pluvieuse.

L'imagerie radar satellitaire offre un grand potentiel pour cartographier les récoltes de canne à sucre grâce à la très haute résolution spatiale et temporelle des nouveaux capteurs. En effet, TerraSAR-X et Cosmo-SkyMed peuvent acquérir des images tous les 11 et 4 jours respectivement sur un site donné avec la même incidence, ce qui correspond à plusieurs images par semaine à différentes incidences. Ces nouveaux capteurs SAR fourniront un diagnostic intéressant pour des parcelles de petites tailles. La résolution spatiale des images TerraSAR-X (1 à 6m) est bien adaptée à l'île de Réunion où les champs ont des surfaces moyennes de 1 ha. Ces résultats apparaissent prometteurs pour le développement d'algorithmes simplifiés pour suivre, la récolte de canne à sucre indépendamment des conditions météorologiques, qui sont la limitation principale des capteurs optiques.

Dans nos prochains travaux, nous proposerons d'analyser les simulations utilisant les modèles de rétrodiffusion (Karam, MIMICS) pour étudier la dépendance du signal radar en bande X aux paramètres de canne à sucre selon l'angle d'incidence et la polarisation. De plus, il serait très utile de comprendre le niveau de contribution du sol et de la couche de végétation (des feuilles, des tiges, ...) au coefficient de rétrodiffusion total.

Références

- Almeida, T.I.R., De Souza Filho, C.R., Rossetto, R. (2006). ASTER and Landsat ETM+ images applied to sugarcane yield forecast. *International Journal of Remote Sensing* 27(19), 4057-4069.
- Baghdadi, N., Boyer, N., Todoroff, P., El Hajj, M., Bégue, A., 2009. Potentiel of SAR sensors TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT, and PALSAR/ALOS for monitoring sugarcane crops on Reunion Island. *Remote Sensing of Environment* 113(8), 1724-1738.
- Baghdadi, N., Bernier, M., Gauthier, R., Neeson, I., 2001. Evaluation of C-band SAR data for wetlands mapping. *International Journal of Remote Sensing* 22(1), 71-88.
- Baronti, S., Del Frate, F., Ferrazzoli, P., Paloscia, S., Pampaloni, P., Schiavon, G., 1995. SAR polarimetric features of agricultural areas. *International of Remote Sensing* 16(14), 2639-2656.
- Beauchemin, M., Thomson, K., Edwards G., 1995. Modelling forest stands with MIMICS: implications for calibration. *Canadian Journal of Remote Sensing* 21(4), 518-526.
- Bégue, A., Degenne, P., Pellegrino, A., Todoroff, P., Baillarin, F., 2004. Application of remote sensing technology to monitor sugar cane cutting and planting in Guadeloupe (French West Indies). Dans: *Geomatica, La Havane, Cuba*.

- Blaes, X., Vanhalle, L., Defourny, P., 2005. Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time series. *Remote Sensing of Environment* 96(3-4), 352-365.
- Bouman, B.A.M., 1991. Crop parameter estimation from ground-based X-band (3-cm wave) radar backscattering data. *Remote Sensing of Environment* 37(3), 193-205.
- Brisco, B., Brown, R. J., 1998. Agricultural applications with radar. In: F. M. Henderson, & A. J. Lewis (Eds.), *Principles and applications in imaging radar* (pp. 381-406). New York, Etats-Unis: Wiley.
- Chakraborty, M., Manjunath, K.R., Panigrahy, S., Kundu, N., Parihar, J.S., 2005. Rice crop parameter retrieval using multi-temporal, multi-incidence angle RADARSAT SAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59(5), 310-322.
- CNES, 2007. Images Spot: copyright CNES, Distribution Spot image, <http://kalideos.cnes.fr>
- DAF, Direction de l'Agriculture et de la Forêt de La Réunion, 2010, http://www.daf974.agriculture.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=284
- DeBoissezon, H., Sand, A., 2006. Reference remote sensing data bases: Temporal series of calibrated and ortho-rectified satellite images for scientific use. Dans: *Proceedings of recent advances in quantitative remote sensing*. Valencie, Espagne.
- Fortes, C., Dematte, J.A.M., 2006. Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data. *International Journal of Remote Sensing* 27(7), 1395-1412
- Fritz, T., 2007. TerraSAR-X Ground Segment Level 1b Product Format Specification (10.12.2007), Doc.: TX-GS-DD-3307, Issue 1.3, 257 pages,
- Fung, A.K., 1994 *Microwave scattering and emission models and their applications*; Artech House, Inc., Boston, Londres, Royaume-Uni.
- Gers, C., Schmidt, E., 2001. Using SPOT4 satellite imagery to monitor area harvested by small scale sugarcane farmers at Umfolozi. Dans: 75th South African Sugar Technologists' Association (SASTA), Durban, Afrique du Sud, pp. 28-33.
- Inoue, Y., Kurosu, T., Maeno, H., Uratsuka, S., Kozu, T., Dabrowska-Zielinska, K., Qi, J., 2002. Season-long daily measurements of multifrequency (Ka, Ku, X, C and L) and full-polarization backscatter signatures over paddy rice and their relationship with biological variables, *Remote Sensing of Environment* 81(2-3), 194-204.
- Karam, A.M., Amar, F., Fung, A.K., Mougin, E., Lopes, A., Levine, D.M., Beaudoin, A., 1995. A microwave polarimetric scattering model for forest canopies based on vector radiative transfer theory. *Remote Sensing of Environment* 53(1), 16-30.
- Kim, S.B, Kim, B.W., Kong, Y.K., Kim, Y.S., 2000. Radar backscattering measurements of rice crop using X-band scatterometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38(3), 1467-1471.
- Lang, R.H., 1981. Electromagnetic backscattering from a distribution of lossy scatterers. *Radio Science* 16(1), 15-30.
- Lin, H., Chen, J., Pei, Z., Zhang, S., Hu, X., 2009. Monitoring sugarcane growth using ENVISAT ASAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47(8), 2572-2580.
- Lebourgeois, V., Bégué, A., Degenne, P., Bappel, E., 2007. Improving sugarcane harvest and planting monitoring for smallholders with geospatial technology: The Reunion Island experience. *International Sugar Journal* 109, pp. 109-117.
- Le Toan, T., Lopes, A., Huet, M., 1984. On the relationship between radar backscattering coefficient and vegetation canopy characteristics. Dans: *Proc. IGARSS, Strasbourg, France*, pp. 155-160: publication spécial.
- McNairn, H., Hochheim, K., Rabe, N., 2004. Applying polarimetric radar imagery for mapping the productivity of wheat crops. *Canadian Journal of Remote Sensing* 30(3), 517-524.
- Paloscia, S., 1998. An empirical approach to estimating leaf area index from multifrequency SAR data. *International Journal of Remote Sensing* 19(2), 359-364.
- Schoups, G., Troch, P.A., Verhoest, N., 1998. Soil moisture influences on the radar backscattering of sugar beet fields. *Remote Sensing of Environment* 65(2), 184-194.
- Shao, Y., Fan, X., Liu, H., Xiao, J., Ross, S., Brisco, B., Brown, R., Staples, G., 2001. Rice monitoring and production estimation using multitemporal RADARSAT. *Remote Sensing of Environment* 76(3), 310-325.
- Shi, J., Dozier, J., Rott, H., 1994. Snow mapping in alpine regions with synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32(1), 152-158.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K., Fung, A.K., 1986. *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, From Theory to Applications*; Artech House, Inc.: Norwood, Etats-Unis, Vol. 3.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K., Fung, A.K., 1982, *Microwave Remote Sensing, vol. II*, New York, Etats-Unis: Addison-Wesley.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) et le DLR (l'Agence spatiale allemande) pour nous avoir fourni des images SPOT et

TerraSAR-X. Ces images ont été obtenues dans le cadre du projet Kalideos, soutenu par le CNES. Nos remerciements s'adressent aussi à Nathalie Boyer et Louis Paulin pour leur participation dans les campagnes de mesure, Sébastien Garrigues (CNES), Thierry Rabaute (CS), Christophe Proisy (IRD) pour leur aide et leurs conseils. Sans oublier l'exploitant Richard Isautier pour nous avoir fourni les dates de récolte des parcelles de référence et autorisé à faire des mesures sur ces plantations.