

**Département de géographie et de télédétection  
Faculté des lettres et sciences humaines  
Université de Sherbrooke**

**UTILITÉ DES IMAGES DE RADAR AÉROPORTÉ EN BANDE C  
POUR L'ÉVALUATION DU STADE DE CROISSANCE DE LA  
CANNE À SUCRE ET DES CULTURES MARAÎCHÈRES EN  
MILIEU TROPICAL, DANS UNE OPTIQUE DE CONSERVATION  
DES SOLS**

**par Nathalie Beaulieu,  
Étudiante au Doctorat en Télédétection**

*1998*

**Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor  
(Ph.D.) en télédétection**

**8 avril 1998**

**© Nathalie Beaulieu, 1998**



**National Library  
of Canada**

**Acquisitions and  
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada**

**Bibliothèque nationale  
du Canada**

**Acquisitions et  
services bibliographiques**

**395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada**

*Your file Votre référence*

*Our file Notre référence*

**The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.**

**The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.**

**L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.**

**L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.**

0-612-35756-2

**Directeur de recherche : Ferdinand Bonn**

**Codirecteur de recherche : Russell Keith Raney (Applied Physics  
Laboratory, Johns Hopkins University)**

**Membres du jury :**

**Goze Bertin Béné**

**Francis Ahern, (Centre canadien de télédétection)**

**Collette Anseau, (département de biologie, Université de Sherbrooke)**

Beaulieu, Nathalie (1998). Utility of airborne C-band radar images for evaluating the growth stage of sugar cane and root crops in tropical environments, in a soil conservation context. Thesis presented for the degree of Philosophiae Doctor (Ph.D.) in Remote Sensing, Département de géographie et de télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada.

## ABSTRACT

*This study aims at determining how images from an airborne Synthetic Aperture Radar System, in C-band and with two polarisation configurations, can help evaluate the degree of protection offered to soils by vegetation against erosion in tropical areas. With the objective of supplying information to improve the planning of images from the RADARSAT satellite for soil conservation projects, the study aims at establishing which incident angles and which climatic conditions improve contrasts between bare and protected soils. It also aims at comparing the discriminating capacities of the HH and VV polarisation configurations. It also studies the possibility of combining images acquired with HH and VV polarisations and at different incident angles to improve monitoring of crop growth. This thesis also presents, in an appendix, a glossary of technical terms and a short literature review on the use of remote sensing in soil conservation, the use of radar remote sensing in agriculture and the techniques used for correcting relief-induced radiometric distortions in radar imagery.*

*The study encompasses three sites in Costa Rica. Two of them are located in the central cordillera, in mountainous terrain: the Tierra Blanca site where root crops dominate, and the Juan Viñas site where sugar cane is cultivated. The third site is located in the Guanacaste province, in flat terrain: the Hacienda Taboga, where sugar cane and rice are cultivated. The study uses airborne images with high and intermediate resolutions (6 m x 6 m and 10 m x 20 m, respectively), acquired by the Canada Centre for Remote Sensing's C/X-SAR during the SAREX'92 mission and the "Proyecto Radar Costa Rica/Canada" project. Subsets of images from six flight lines are studied, covering the study sites with different incident angles.*



*The images have been prepared to allow the quantitative analysis of radar backscattering. This preparation included orthorectification, calibration, and the calculation of local incident angle and the correction of relief-induced radiometric distortions. The original method used to calculate local incident angle and to correct radiometric distortions is described in detail. The analysis of the radar images is founded on field measurements and on data provided by the companies that cultivate sugar cane.*

*The first stage of the analysis compares the discriminating capacities of images acquired on each site with different incident angles and polarisations. In general, the backscattering coefficient of crops has shown a lower tendency to diminish in function of local incident angle than that of bare soil. Results suggest that the contrast between bare soil and vegetated plots increase with incident angle in dry conditions, when vegetation produces higher backscatter than bare soil, except for very high incident angles. They also suggest that these contrasts can diminish with incident angle if soil moisture is very high and if bare soils are brighter than vegetated plots. For potatoes and sugar cane, the HH polarisation has shown a better capacity than the VV to discriminate ploughed bare soil from vegetated plots. However, for sugar cane in dry conditions, the VV polarisation produced a higher correlation between the mean backscattering coefficient of plots and the age of regrowth after harvest.*

*Results suggest that for sugar cane in relatively dry conditions, it is possible to distinguish plots of bare soil from vegetated ones on the basis of their average backscattering coefficient, except for very high incident angles (higher than 73°). The comparison of results obtained for the sites in dry and moist conditions showed that a high soil moisture can compromise the possibility of distinguishing growing stages in crops and identifying bare plots.*

*The second part of the analysis treats of the complementarity of the HH and VV polarisations and of images acquired with different incident angles. The sugar cane plots covered with moist residues showed a remarkably higher backscatter in the HH polarisation than in the VV. The difference between the mean backscattering coefficient per plot in HH and VV allowed to identify these plots for higher incident angles*

*(between 62° and 79°), but an automatic classification of pixels seems difficult because of the high variance of the backscattering coefficient within each plot, even after filtering. For the sugar cane site in relatively dry conditions, the combined use of an image acquired at grazing angles with another acquired at intermediate incident angles improved the discrimination between crop growing stages.*

*From the results of this study, we can draw recommendations for the acquisition of RADARSAT images even if the images studied here present a higher spatial resolution and higher incident angles, in many cases. For example, to avoid high soil moisture, it is recommended to acquire images at the end of the dry season to improve the identification of plots that remain bare when rains begin. For all-season acquisition, it is preferable to avoid rain events. With RADARSAT it is possible to cancel image processing and reprogram image acquisition if rainfall has been measured in the field during or before the original image acquisition.*

*Higher incident angles are recommended because they enhance contrasts between bare soil plots and vegetated ones. The very high incident angles at which we observed the opposite effect are not attainable with satellite radars. The possibility of acquiring images at different incident angles is also an advantage for RADARSAT. The results presented in this thesis show that the combination of images acquired at different incident angles can improve monitoring of crop growth. If the backscattering coefficient of bare soils diminishes faster in function of incident angle than that of the crops, the combination of different incident angles can also help identify bare soil plots. Radar satellites allow regular and all-season acquisition of images, and their potential for monitoring of agriculture is important. Because of their coarser resolution than that of airborne images, the applications based on the average brightness or backscattering coefficient per field will be more successful where fields are larger.*

*Relief causes important radiometric variations that must be corrected in order to appreciate the variations caused by changes in land cover. The correction method developed here can also be applied to satellite radar images. Its approach is to calculate the backscattering coefficient for a reference terrain that is flat, perfectly rough (producing isotropic backscattering) with the elevation considered for*

*calibration, supposing that the studied terrain is also perfectly rough. This method takes into account the variation of scattering area between the imaged terrain and the flat reference terrain, and also compensates for a decrease of the backscattering coefficient  $\sigma^\circ$  in function of the cosine of the local incident angle. With this model of angular dependence of  $\sigma^\circ$ , the effects of slope are least important for incident angles around  $45^\circ$ . This angle is possible to obtain with RADARSAT's imaging modes, but the fixed imaging geometries of the ERS and JERS-1 SARs produce boresight incidence angles of  $23^\circ$  and  $38^\circ$  respectively, which produce more important relief-induced radiometric distortions.*

Beaulieu, Nathalie (1998). Utilité des images de radar aéroporté en bande C pour l'évaluation du stade de croissance de la canne à sucre et des cultures maraîchères en milieu tropical, dans une optique de conservation des sols. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.) en télédétection, Département de géographie et de télédétection, Université de Sherbrooke.

## SOMMAIRE

*Cette étude vise à déterminer comment les images d'un système radar à ouverture de synthèse (ROS) aéroporté en bande C à double polarisation, peuvent contribuer à l'évaluation du degré de protection offert au sol par la végétation contre l'érosion en milieu tropical. Dans l'optique d'apporter de l'information permettant de mieux planifier l'acquisition d'images du satellite RADARSAT pour des projets de conservation des sols, elle vise à établir quels angles d'incidence et quelles conditions climatiques permettent d'augmenter les contrastes entre les sols protégés et les sols dénudés. Elle vise aussi à comparer les capacités discriminantes des polarisations HH et VV. Elle porte aussi sur la possibilité de combiner des images acquises avec les polarisations HH et VV et à angles d'incidence différents pour améliorer le suivi de la croissance des cultures. Cette thèse présente aussi en annexe un lexique des termes techniques ainsi qu'une brève revue de la littérature portant sur l'utilisation de la télédétection en conservation des sols, l'utilisation du radar en agriculture et la correction radiométrique des effets du relief dans les images radar.*

*L'étude porte sur trois sites au Costa Rica. Deux d'entre eux sont situés dans la cordillère centrale, en terrain montagneux : le site de Tierra Blanca où dominant les cultures maraîchères, et le site de Juan Viñas où est cultivée la canne à sucre. Le troisième est situé dans la province du Guanacaste, en terrain plat : la Hacienda Taboga, où la canne à sucre et le riz sont cultivés. L'étude utilise des images radar aéroportées à haute et à moyenne limites de résolution (6 m x 6m et 10 m x 20 m, respectivement) acquises par le capteur C/X-SAR du Centre canadien de télédétection dans le cadre de la mission SAREX'92 et du Proyecto Radar Costa Rica/Canada, lors de 6 lignes de vol couvrant les sites d'étude sous des angles d'incidence différents.*

*Les images ont été préparées pour permettre une analyse quantitative de la rétrodiffusion radar. Cette préparation inclut l'orthorectification, l'étalonnage, le calcul de l'angle d'incidence local et la correction des effets radiométriques du relief. La méthode originale de calcul d'images de l'angle d'incidence local et de correction des effets radiométriques du relief est décrite en détail. L'analyse des images radar est fondée sur des mesures effectuées sur le terrain et sur des données agronomiques fournies par les entreprises de culture de la canne à sucre.*

*La première partie de l'analyse compare les capacités discriminantes des images acquises sur chaque site avec différents angles d'incidence et polarisations. En général, le coefficient de rétrodiffusion des cultures a montré une tendance moins prononcée que celui des sols nus à diminuer en fonction de l'angle d'incidence local. Les résultats suggèrent que le contraste entre le sol nu et les cultures augmente avec l'angle d'incidence local en conditions sèches, sauf aux angles rasants, lorsque la végétation produit une rétrodiffusion plus élevée que celle du sol nu. Ils suggèrent aussi que ce contraste puisse diminuer en conditions humides, si la rétrodiffusion du sol est plus élevée que celle de la végétation. Pour la pomme de terre et la canne à sucre, la polarisation HH a montré une meilleure capacité que la VV pour distinguer le sol nu labouré des parcelles couvertes de végétation. Cependant, pour la canne à sucre en conditions sèches, la polarisation VV a produit une corrélation plus élevée entre le coefficient de rétrodiffusion moyen des parcelles et l'âge de la repousse après la récolte. Les résultats suggèrent que pour la canne à sucre en climat sec on puisse distinguer les parcelles de sol nu labouré des parcelles bien couvertes par la végétation à l'aide de leur coefficient de rétrodiffusion moyen, sauf aux angles rasants (supérieurs à 73°). La comparaison des résultats obtenus pour les sites en conditions sèches et humides a montré qu'une teneur en eau très élevée des sols peut compromettre la possibilité de distinguer les stades de croissance des cultures et d'identifier les parcelles de sol nu.*

*La seconde partie de l'analyse porte sur la complémentarité des polarisations HH et VV et des images acquises à des angles d'incidence différents. Les parcelles de canne à sucre couvertes de résidus humides ont montré un coefficient de rétrodiffusion remarquablement plus élevé en HH qu'en VV. La différence entre les coefficients de*

*rétrodiffusion moyens par parcelle en polarisation HH et VV a permis d'identifier ces parcelles couvertes de résidus pour des angles d'incidence locaux élevés (entre 62° et 79°), mais une classification automatique des pixels semble difficile à cause de la variance importante du coefficient de rétrodiffusion à l'intérieur de chaque parcelle, même après filtrage. L'utilisation combinée d'une image acquise à angles rasants et d'une autre à angles d'incidence moyens permettrait d'améliorer le suivi de la croissance, du moins pour la canne à sucre en conditions sèches.*

*À partir des résultats de cette étude, on peut établir des recommandations pour l'acquisition des images RADARSAT, même si images étudiées en diffèrent par leur résolution spatiale plus fine et par les angles d'incidence plus élevés de plusieurs d'entre elles. Par exemple, pour éviter une humidité élevée des sols, il est conseillé d'acquérir les images à la fin de la saison sèche pour repérer les parcelles qui seront dénudées au début de la saison des pluies. Pour une acquisition en toute saison, il est préférable d'éviter les événements de pluie. Dans le cas de RADARSAT, il est possible de reprogrammer l'acquisition si de la pluie a été mesurée avant ou pendant l'acquisition.*

*Les angles d'incidence plus élevés sont recommandés pour maximiser les contrastes entre les parcelles de sol nu et celles couvertes de végétation. Les angles d'incidence très élevés auxquels nous avons observé l'effet contraire ne sont pas atteignables avec des radars satellitaires. La possibilité d'acquérir des images à des angles d'incidence différents sur un même site est aussi un avantage pour RADARSAT. Les résultats présentés dans cette thèse montrent que la combinaison d'images acquises à différents angles d'incidence peut aider le suivi des cultures. Si le coefficient de rétrodiffusion des sols nus diminue plus rapidement en fonction de l'angle d'incidence que celui des cultures, la combinaison d'images acquises à angles d'incidence différents aiderait aussi à distinguer les parcelles de sol nu de celles couvertes de végétation. Les satellites radar permettent d'acquérir des images de façon régulière et toute l'année, et leur potentiel pour le suivi de l'agriculture est important. En raison de leur résolution plus grossière que celle des images aéroportées, les applications basées sur la brillance ou sur le coefficient de rétrodiffusion moyen des parcelles agricoles auront plus de succès là où les parcelles sont relativement grandes.*

*Le relief occasionne des variations radiométriques importantes qui doivent être corrigées pour permettre d'apprécier les variations dues aux différents types de couverture du sol. La méthode développée pour cette correction est aussi applicable aux images de satellites radar. Son objectif est de calculer le coefficient de rétrodiffusion que l'on aurait eu pour un terrain plat de référence, parfaitement rugueux (produisant une rétrodiffusion isotrope) et dont l'altitude est celle considérée pour l'étalonnage, en supposant que le terrain étudié est aussi parfaitement rugueux. Cette méthode tient compte de la variation de l'aire diffusante entre le terrain étudié et le terrain plat de référence, et compense aussi pour une diminution du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^{\circ}$  en fonction du cosinus de l'angle d'incidence local. Selon ce modèle de dépendance angulaire de  $\sigma^{\circ}$ , les effets du relief sont les moindres pour les angles d'incidence autour de  $45^{\circ}$ . Cet angle est permis avec les modes d'acquisition de RADARSAT, mais les ROS des satellites ERS-1 et JERS-1, dont la géométrie d'acquisition est fixe, ont des angles d'incidence moyens de  $23^{\circ}$  et  $38^{\circ}$  respectivement, produisant des distorsions radiométriques plus élevées.*

## **TABLE DES MATIÈRES**

<b><i>LISTE DES FIGURES</i></b>	<b>v</b>
<b><i>LISTE DES TABLEAUX</i></b>	<b>vii</b>
<b><i>LISTE DES SYMBOLES</i></b>	<b>viii</b>
<b><i>REMERCIEMENTS</i></b>	<b>x</b>
<b><i>1. THÈMES D'INTRODUCTION</i></b>	<b>1</b>
1.1 PROBLÉMATIQUE	1
1.2 PARTICULARITÉS DES IMAGES RADAR	3
1.3 OBSERVATIONS ET HYPOTHÈSES	6
1.4 OBJECTIFS	8
1.5 ORGANISATION DE LA THÈSE	9
1.6 CONTEXTE	10
<b><i>2. SITES D'ÉTUDE, IMAGES RADAR ET DONNÉES AUXILIAIRES</i></b>	<b>12</b>
2.1 DESCRIPTION DES SITES D'ÉTUDE	12
2.2 DESCRIPTION DES IMAGES UTILISÉES	13
2.3 DONNÉES DE TERRAIN ET DONNÉES AGRONOMIQUES	18
2.3.1 Mesures au champ	18
2.3.2 Données fournies par les entreprises agricoles	21
2.3.3 Image Landsat, photographies aériennes et cartes topographiques	23
2.3.4 Registres pluviométriques	24
<b><i>3. PRÉPARATION NUMÉRIQUE DES IMAGES</i></b>	<b>25</b>
3.1 GÉOCODAGE	25
3.2 ÉTALONNAGE	26
3.2.1 Sources de variations radiométriques dépendant de la portée oblique	26
3.2.2 Méthode d'étalonnage	28
3.2.3 Effets du relief sur la radiométrie des images radar	34
3.2.4 Facteur de correction radiométrique des effets du relief	34
3.2.5 Calcul des angles d'incidence locaux pour le terrain et pour la surface de référence	40
3.2.6 Application de la méthode de correction topographique	42



<b>3.3 DÉFINITION DE PARCELLES-ÉCHANTILLONS POUR L'EXTRACTION DE PARAMÈTRES DE L'IMAGE</b>	<b>47</b>
<b>3.4 RÉSULTATS DES TRAITEMENTS NUMÉRIQUES SUR LES IMAGES</b>	<b>48</b>
<b>4. COMPARAISON DES CAPACITÉS DISCRIMINANTES DES IMAGES ACQUISES AVEC DIFFÉRENTS ANGLES D'INCIDENCE ET POLARISATIONS</b>	<b>61</b>
<b>4.1 SITE DE TIERRA BLANCA</b>	<b>63</b>
4.1.1 Dépendance du coefficient de rétrodiffusion moyen sur chaque parcelle envers la hauteur des plants et la couverture végétale estimée	65
4.1.2 Effet de l'angle d'incidence local	67
4.1.3 Distinction entre catégories	71
4.1.4 Résumé des résultats pour le site de Tierra Blanca	72
<b>4.2 SITE DE JUAN VIÑAS</b>	<b>73</b>
4.2.1 Évolution de la rétrodiffusion avec la croissance des plants	73
4.2.2 Effet de l'angle d'incidence local	76
4.2.3 Discrimination entre catégories	80
4.2.4 Résumé des résultats obtenus pour le site de Juan Viñas	87
<b>4.3 SITE DE TABOGA</b>	<b>88</b>
4.3.1 Évolution de la rétrodiffusion avec la croissance des plants	88
4.3.2 Effet de l'angle d'incidence	92
4.3.3 Discrimination entre catégories	96
4.3.4 Résumé des résultats obtenus pour le site de Taboga	103
<b>4.4 DISCUSSION SUR L'EFFET DE LA TENEUR EN EAU SUR LES CAPACITÉS DISCRIMINANTES DES IMAGES</b>	<b>104</b>
<b>5. LA COMPLÉMENTARITÉ DES POLARISATIONS ET DES ANGLES D'INCIDENCE</b>	<b>105</b>
<b>5.1 CONTRASTES DE POLARISATION</b>	<b>105</b>
5.1.1 Discrimination entre catégories, basée sur l'indice de polarisation IP	106
5.1.2 Relation entre le IP et l'angle d'incidence local	108
5.1.3 Causes des contrastes de polarisation	110
<b>5.2 COMBINAISON D'IMAGES RADAR ACQUISES À ANGLES D'INCIDENCE DIFFÉRENTS</b>	<b>113</b>
5.2.1 Affichage combiné des images	113
5.2.2 Suivi de la croissance et discrimination entre catégories	117

<b>5.3 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS OBTENUS SUR LA COMPLÉMENTARITÉ DES POLARISATIONS ET DES ANGLES D'INCIDENCE</b>	<b>122</b>
<b>6. CONCLUSIONS</b>	<b>123</b>
<b>6.1 CERTAINS ANGLES D'INCIDENCE SONT-ILS PLUS AVANTAGEUX QUE D'AUTRES POUR AUGMENTER LES CONTRASTES ENTRE LES PARCELLES DE SOL NU ET CELLES COUVERTES PAR LA VÉGÉTATION ?</b>	<b>123</b>
<b>6.2 LA COMBINAISON D'IMAGES ACQUISES À ANGLES D'INCIDENCE DIFFÉRENTS PEUT-ELLE AMÉLIORER LA DISTINCTION DES STADES DE CROISSANCE ?</b>	<b>125</b>
<b>6.3 LA POLARISATION HH EST-ELLE PRÉFÉRABLE À LA POLARISATION VV POUR LA DISCRIMINATION ENTRE CERTAINES CATÉGORIES DE CROISSANCE ?</b>	<b>125</b>
<b>6.4 L'UTILISATION DES POLARISATIONS HH ET VV COMBINÉES PERMET-ELLE D'IDENTIFIER CERTAINES PRATIQUES DE CONSERVATION DES SOLS?</b>	<b>126</b>
<b>6.5 LA TENEUR EN EAU DES SOLS PEUT-ELLE ÊTRE UN ÉLÉMENT PERTURBATEUR POUR LA CARTOGRAPHIE DES ZONES PROPICES À L'ÉROSION ?</b>	<b>127</b>
<b>6.6 COMMENTAIRES SUR L'APPLICATION DE LA MÉTHODE DE CORRECTION RADIOMÉTRIQUE DES EFFETS DU RELIEF</b>	<b>128</b>
<b>7. BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>130</b>
<b>A. ANNEXE A : REVUE DE LITTÉRATURE SUR L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION EN CONSERVATION DES SOLS, DE LA TÉLÉDÉTECTION RADAR EN AGRICULTURE, ET SUR LA CORRECTION RADIOMÉTRIQUE DES EFFETS DU RELIEF</b>	<b>134</b>
<b>A.1. APPLICATION DE LA TÉLÉDÉTECTION OPTIQUE EN CONSERVATION DES SOLS</b>	<b>134</b>
A.1.1. Prévission de l'érosion hydrique ou cartographie des risques d'érosion	134
A.1.2. Identification de zones propices à l'érosion hydrique ou de sols dégradés	135
A.1.3. Surveillance de pratiques de conservation des sols	136
<b>A.2. APPLICATION DE LA TÉLÉDÉTECTION RADAR EN AGRICULTURE</b>	<b>139</b>
A.2.1. Identification ou classification des cultures	140
A.2.2. Identification du stade de croissance des cultures	143

A.2.3.	Évaluation des dommages ou du stress hydrique subi par les cultures	145
A.2.4.	Détermination des caractéristiques du couvert agricole	145
A.2.5.	Évaluation de la teneur en eau des sols	146
A.2.6.	Utilisation de différentes polarisations	148
<b>A.3.</b>	<b>CORRECTIONS DES EFFETS RADIOMÉTRIQUES DE LA TOPOGRAPHIE</b>	<b>151</b>
A.3.1.	Approches complètement empiriques	152
A.3.2.	Compensation de la variation de l'aire contribuant à la brillance d'un pixel (ou aire diffusante)	153
A.3.3.	Approches compensant à la fois la variation de l'aire diffusante et le comportement angulaire de la rétrodiffusion	155
<b>A.4.</b>	<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>159</b>
<b>B.</b>	<b>ANNEXE B: GLOSSAIRE</b>	<b>167</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des sites d'étude et des images des lignes de vol étudiées	14
Figure 2 : Photographie d'une portion du site de Tierra Blanca, prise à partir d'un petit avion	15
Figure 3 : Photographie d'une portion du site de Juan Viñas, prise à partir d'un petit avion	15
Figure 4 : Photographie d'une parcelle de pommes de terre jeunes au site de Tierra Blanca	20
Figure 5 : Photographie de canne à sucre d'un mois, site de Juan Viñas	20
Figure 6 : Paramètres d'étalonnage des images utilisées pour les sites de Tierra Blanca et Juan Viñas. a) 8.1HH, b) 8.1VV c) 8.2HH, d) 8.2VV e) 8.3 HH, f) 8.3 VV	30
Figure 7 : Compte numérique des images brutes entières et coefficient de rétrodiffusion des images étalonnées utilisées pour le sites de Tierra Blanca et Juan Viñas. a) 8.1HH, b) 8.1VV c) 8.2HH, d) 8.2VV e) 8.3 HH, f) 8.3 VV	31
Figure 8 : Paramètres d'étalonnage des images utilisées pour le site de Taboga. a) 4.1HH, b) 4.1VV c) 7.1HH, d) 7.1VV e) 7.2 HH, f) 7.2 VV	32
Figure 9 : Compte numérique des images brutes entières et coefficient de rétrodiffusion des images étalonnées utilisées pour le site de Taboga. a) 4.1HH, b) 4.1VV c) 7.1HH, d) 7.1VV e) 7.2 HH, f) 7.2 VV	33
Figure 10 : Géométrie de visée dans le plan transversal pour un terrain plat dont l'altitude est $h_{ref}$	35
Figure 11 : Géométrie de visée dans le plan azimutal pour un terrain avec une pente $\alpha$	37
Figure 12 : Géométrie de visée dans le plan transversal, pour un terrain de pente $\alpha$	37
Figure 13 : Effet d'une pente de $1^\circ$ vers le capteur sur le facteur de correction topographique $F_{corr}$	40
Figure 14 : a) image brute radar de la ligne 8.3, (HH en rouge, VV en bleu et en vert) et b) image synthétique de la portée oblique, pour le site de Juan Viñas	44
Figure 15 : Images géocodées : a) image radar et b) image synthétique de la portée oblique (site de Juan Viñas)	45
Figure 16 : Images de la pente maximale de la porté oblique $S$ , et de l'orientation de cette pente, calculées à partir de l'image synthétique de la portée oblique	46
Figure 17 : Portion du site de Tierra Blanca, illustrée par la sous-image de la ligne 8.1 ( $\theta_{ref}$ entre $75^\circ$ et $76^\circ$ ), a) avant et b) après la correction topographique; polarisation HH en rouge, VV en bleu et en vert	49
Figure 18 : Site de Tierra Blanca, illustré par la sous-image de la ligne 8.2 ( $\theta_{ref}$ entre $53^\circ$ et $64^\circ$ ), a) avant et b) après la correction topographique; HH en rouge, VV en bleu et en vert	50
Figure 19 : Site de Tierra Blanca, illustré par la sous-image de la ligne 8.3 ( $\theta_{ref}$ entre $68^\circ$ et $73^\circ$ ) a) avant et b) après la correction topographique; HH en rouge, VV en bleu et en vert	51
Figure 20 : Numérotation des parcelles étudiées pour le site de Tierra Blanca, sous-image de la ligne 8.2 ( $\theta_{ref}$ entre $53^\circ$ et $64^\circ$ ), après la correction topographique	52
Figure 21 : Site de Juan Viñas, illustré par les sous-images de la ligne 8.2 ( $\theta_{ref}$ entre $72^\circ$ et $75^\circ$ ), a) avant et b) après la correction topographique; HH en rouge, VV en bleu et en vert, délimitation des parcelles en jaune	53
Figure 22 : Site de Juan Viñas, illustré par la sous-image de la ligne 8.3 ( $\theta_{ref}$ entre $45^\circ$ et $59^\circ$ ). a) avant et b) après la correction topographique; HH en rouge, VV en bleu et en vert, délimitation des parcelles en jaune	54
Figure 23 : Masques utilisés pour l'extraction des moyennes pour chaque parcelle, a) ligne 8.2 et b) ligne 8.3, site de Juan Viñas	55
Figure 24 : Site de Taboga, illustré par la sous-image de la ligne 7.1 en composition colorée, HH en rouge, VV en bleu et en vert, délimitation des parcelles en jaune. ( $\theta_{ref}$ entre $62^\circ$ et $73^\circ$ )	57
Figure 25 : Site de Taboga, illustré par la sous-image de la ligne 7.2 en composition colorée, HH en rouge, VV en bleu et en vert, délimitation des parcelles en jaune ( $\theta_{ref}$ entre $13^\circ$ et $63^\circ$ )	58
Figure 26 : Site de Taboga, illustré par la sous-image de la ligne 4.1 en composition colorée, HH en rouge, VV en bleu et en vert, délimitation des parcelles en jaune ( $\theta_{ref}$ entre $70^\circ$ et $79^\circ$ )	59
Figure 27 : Masque utilisé pour l'extraction des paramètres des images du site de Taboga, appliqué à la sous-image de la ligne 7.1	60

- Figure 28** : Coefficient de rétrodiffusion après correction topographique en fonction de paramètres reliés au stade de croissance, site de Tierra Blanca. a)  $\sigma_{HH}^o$  vs. couverture végétale vivante, b)  $\sigma_{VV}^o$  vs. couverture végétale; c)  $\sigma_{HH}^o$  vs. hauteur des plants; d)  $\sigma_{VV}^o$  vs. hauteur des plants 66
- Figure 29** : Coefficient de rétrodiffusion avant la correction topographique en fonction de l'angle d'incidence local pour les sols nus et les cultures étudiées, site de Tierra Blanca. a) sols nus rugueux, b) sols nus lisses, c) pommes de terre, d) jachère, e) carottes, f) oignons. 69
- Figure 30** : Coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^o$  après correction radiométrique en fonction de l'angle d'incidence local pour les sols nus et les cultures étudiées, site de Tierra Blanca. a) sols nus rugueux, b) sols nus lisses, c) pommes de terre, d) jachère, e) carottes, f) oignons 70
- Figure 31** : Coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'âge de la canne récoltée, site de Juan Viñas. a) ligne 8.2HH b) ligne 8.2VV c) ligne 8.3HH d) ligne 8.3VV 75
- Figure 32** : Coefficient de rétrodiffusion moyen par parcelle,  $\sigma^o$ , avant la correction topographique, en fonction de l'angle d'incidence local  $\theta_{loc(t)}$ . a) sol nu en processus de rénovation, b) parcelles récemment brûlées, c) parcelles récemment récoltées couvertes de résidus, d) canne récoltée il y a entre 40 et 80 jours, e) canne récoltée entre 310 et 435 jours, f) canne récoltée il y a entre 570 et 660 jours 78
- Figure 33** : Coefficient de rétrodiffusion moyen par parcelle,  $\sigma^o$ , après la correction topographique, en fonction de l'angle d'incidence local  $\theta_{loc(t)}$ . a) sol nu en processus de rénovation, b) parcelles récemment brûlées, c) parcelles récemment récoltées couvertes de résidus, d) canne récoltée il y a entre 40 et 80 jours, e) canne récoltée entre 310 et 435 jours, f) canne récoltée il y a entre 570 et 660 jours 79
- Figure 34** : Distribution des parcelles appartenant aux différentes catégories pour le site de Juan Viñas 82
- Figure 35** : Moyenne du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^o$  en fonction de la catégorie pour les images avant la correction topographique. a) ligne 8.2, HH et VV, b) ligne 8.3, HH et VV. Fourchettes de valeurs représentées par la moyenne de  $\sigma^o$  plus ou moins un écart-type : c) ligne 8.2HH, d) ligne 8.3HH e) ligne 8.2 VV, f) ligne 8.3 VV 83
- Figure 36** : Moyenne du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^o$  en fonction de la catégorie pour les images après la correction topographique. a) ligne 8.2, HH et VV, b) ligne 8.3, HH et VV. Fourchettes de valeurs représentées par la moyenne de  $\sigma^o$  plus ou moins un écart-type : c) ligne 8.2HH, d) ligne 8.3HH e) ligne 8.2 VV, f) ligne 8.3 VV 84
- Figure 37** : Chi-carré évalué à partir du test de Kruskal-Wallis, pour la discrimination entre catégories à partir du  $\sigma^o$  moyen par parcelle (site de Juan Viñas). a) ligne 8.2, b) ligne 8.3 85
- Figure 38** : Divergence transformée entre les signatures spectrales des catégories comparées deux par deux (site de Juan Viñas). a) ligne 8.2 b) ligne 8.3 86
- Figure 39** : Graphique du coefficient de rétrodiffusion en fonction du nombre de jours de repousse pour les parcelles récoltées (site de Taboga). a) ligne 4.1 HH, b) ligne 4.1 VV, c) ligne 7.1 HH, d) ligne 7.1 VV, e) ligne 7.2 HH, f) ligne 7.2 VV 90
- Figure 40** : Graphiques du coefficient de rétrodiffusion en fonction du nombre de jours de repousse pour les parcelles rénovées (site de Taboga). a) ligne 4.1 HH, b) ligne 4.1 VV, c) ligne 7.1 HH, d) ligne 7.1 VV, e) ligne 7.2 HH, f) ligne 7.2 VV 91
- Figure 41** : Graphiques du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^o$  en fonction de l'angle d'incidence  $\theta_{ref}$  pour les parcelles de sol nu en processus de rénovation, site de Taboga. a) ligne 4.1 HH, b) ligne 4.1 VV, c) ligne 7.1HH, d) ligne 7.1 VV, e) ligne 7.2 HH, e) ligne 7.2 VV 94
- Figure 42** : Graphiques du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^o$  en fonction de l'angle d'incidence  $\theta_{ref}$  pour les parcelles de canne de plus de 100 jours, site de Taboga. a) ligne 4.1 HH, b) ligne 4.1 VV, c) ligne 7.1HH, d) ligne 7.1 VV, e) ligne 7.2 HH, e) ligne 7.2 VV 95
- Figure 43** : Distribution des parcelles appartenant aux différentes catégories étudiées pour le site de Taboga 97
- Figure 44** : Moyenne du coefficient de rétrodiffusion pour chaque catégorie, site de Taboga. a) ligne 4.1 ( $\theta_{ref}$  entre 73° et 78°), b) ligne 7.1 ( $\theta_{ref}$  entre 66° et 73°), c) ligne 7.2 ( $\theta_{ref}$  entre 35° et 59°) 98
- Figure 45** : Fourchettes correspondant à la moyenne du coefficient de rétrodiffusion plus ou moins un écart-type pour chaque catégorie (site de Taboga). a) ligne 4.1 HH, b) ligne 4.1 VV c) ligne 7.1 HH, d) ligne 7.1 VV, e) ligne 7.2 HH, f) ligne 7.2 VV 99

Figure 46 : Chi-carré ( $\chi^2$ ) estimé pour différentes comparaisons entre catégories. a) ligne 4.1 ( $\theta_{ref}$ entre 73° et 78°), b) ligne 7.1 ( $\theta_{ref}$ entre 66° et 73°), c) ligne 7.2 ( $\theta_{ref}$ entre 35° et 59°)	100
Figure 47 : Divergence transformée pour la comparaison des signatures des catégories comparées deux à deux. a) ligne 4.1 ( $\theta_{ref}$ entre 73° et 78°), b) ligne 7.1 ( $\theta_{ref}$ entre 66° et 73°), c) ligne 7.2 ( $\theta_{ref}$ entre 35° et 59°)	102
Figure 48 : Résultats du test de Kruskal-Wallis en utilisant l'indice de polarisation comme variable (site de Juan Viñas)	106
Figure 49 : Divergence transformée des signatures de catégories comparées deux par deux, a) en combinant HH et VV comme canaux séparés, b) en utilisant l'image de l'indice de polarisation	107
Figure 50 : Image de l'indice de polarisation IP pour la ligne 8.2 (site de Juan Viñas, $\theta_{loc(t)}$ entre 62° et 79°)	109
Figure 51 : Valeur de l'indice de polarisation IP en fonction de l'angle d'incidence local a) pour les résidus et b) pour les parcelles de canne entre 310 et 435 jours	110
Figure 52 : Combinaison de la polarisation HH des lignes 8.1 (rouge), 8.2 (vert) et 8.3 (bleu) pour une portion du site de Tierra Blanca	114
Figure 53 : Combinaison de la polarisation HH des lignes 8.2 (rouge) et 8.3 (vert et bleu) pour le site de Juan Viñas	115
Figure 54 : Combinaison de la polarisation HH des lignes 7.2 (rouge), 7.1 (vert) et 4.1 (bleu) pour le site de Taboga	116
Figure 55 : Différence entre les coefficients de rétrodiffusion des lignes de vol, en fonction de l'âge de la repousse des parcelles récoltées et renouvelées, site de Taboga. a) 4.1 et 7.1 parcelles renouvelées, b) 4.1 et 7.1, parcelles récoltées c) 4.1 et 7.2, parcelles renouvelées, d) 7.1 et 7.2, parcelles récoltées e) 4.1 et 7.2, parcelles renouvelées, f) 7.1 et 7.2, parcelles récoltées	118
Figure 56 : a) Résultats des tests statistiques de Kruskal-Wallis (approximation du Chi-carré) pour la distinction des catégories à partir de la différence du coefficient de rétrodiffusion entre les lignes de vol 4.1 et 7.1, (site de Taboga). b) Mesures de divergence des signatures utilisant les images des lignes 4.1 et 7.1	119
Figure 57 : Différence entre les coefficients de rétrodiffusion lignes 8.2 et 8.3 en fonction de l'âge de la repousse, site de Juan Viñas. a) polarisation HH, b) polarisation VV	120
Figure 58 : a) Chi carré évalué au moyen du test de Kruskal-Wallis pour le site de Juan Viñas en utilisant la différence entre des coefficients de rétrodiffusion des lignes 8.2 et 8.3 comme variable. b) mesures de divergence des signatures utilisant les images des lignes 8.2 et 8.3.	120

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des images utilisées et fourchette d'angles d'incidence sur les sites d'étude	17
Tableau 2 : Caractéristiques des parcelles étudiées pour le site de Tierra Blanca.	64
Tableau 3 : Coefficients de corrélation entre le coefficient de rétrodiffusion et l'âge de la repousse pour les parcelles récoltées d'entre 20 et 80 jours, et pour les parcelles renouvelées d'entre 20 et 100 jours (site de Taboga).	92
Tableau 4 : Nombre de parcelles des autres catégories qui se sont confondues avec les parcelles de sol nu avant semence (catégorie 1), en utilisant la valeur maximum du $\sigma^\circ$ moyen des parcelles de sol nu comme seuil	101

## LISTE DES SYMBOLES

- $A_{obl}$  : Aire d'une cellule de résolution en projection oblique.  $A_{obl} = \Delta S_a \times \Delta S_t$
- $A_{loc}$  : Aire d'une cellule de résolution sur le terrain (aire diffusante).  $A_{loc} = \Delta E_a \times \Delta E_t$
- $A_{ref}$  : Aire au sol d'une cellule de résolution pour la surface de référence pour laquelle l'image a été étalonnée.  $A_{ref} = \Delta G_a \times \Delta G_t$
- $\beta^\circ$  : Coefficient de brillance, estimation de la réflectance de la scène par unité de surface en projection oblique
- $c$  : Vitesse de la lumière,  $299.997 \text{ m} \cdot \mu\text{s}^{-1}$
- $CN$  : Compte numérique
- $CN_b$  : Compte numérique du bruit
- $f_{cal}$  : Facteur d'étalonnage dépendant de la portée oblique.
- $G$  : Portée au sol
- $H$  : Altitude de l'avion
- $H$  : Altitude du terrain
- $h_{ref}$  : Altitude de référence utilisée pour l'étalonnage ou pour la correction radiométrique des effets du relief.
- $IP$  : Indice de polarisation.  $IP (dB) = \sigma_{HH}^\circ - \sigma_{VV}^\circ$
- $S_t$  : Portée oblique pour un pixel donné
- $S_a$  : Distance selon l'axe azimutal
- $\alpha$  : Pente du terrain (angle entre le plan moyen s'ajustant au terrain et le plan horizontal)
- $\alpha_t$  : Pente du terrain, projetée dans le plan transversal (ou d'incidence)
- $\alpha_a$  : Pente du terrain, projetée dans le plan azimutal (ou longitudinal)
- $\chi^2$  : Chi-carré
- $\Delta E_a$  : Longueur d'une cellule de résolution de l'image projetée sur le terrain, dans l'axe azimutal
- $\Delta E_t$  : Longueur d'une cellule de résolution de l'image projetée sur le terrain, selon le plan transversal
- $\Delta G_a$  : Longueur d'une cellule de résolution de l'image en portée au sol, selon l'axe azimutal

- $\Delta G_r$  : Longueur d'une cellule de résolution de l'image en portée au sol, selon l'axe transversal
- $\Delta S_a$  : Longueur d'une cellule de résolution de l'image en portée oblique, selon l'axe azimutal
- $\Delta S_r$  : Longueur d'une cellule de résolution de l'image en portée oblique, selon l'axe transversal
- $\phi$  : Orientation de la pente (aspect)
- $\gamma$  : Section efficace de rétrodiffusion par unité de surface perpendiculaire à l'axe de la visée. ( $\gamma = \sigma^o / \cos \theta_i$ )
- $\theta_i$  : Angle d'incidence, angle entre l'axe transversal oblique (ou axe de la visée) et la verticale au terrain.
- $\theta_{loc}$  : Angle d'incidence local, angle entre l'axe transversal oblique (ou axe de la visée) et la verticale au terrain
- $\theta_{loc(r)}$  : Angle d'incidence local, projeté selon le plan transversal
- $\theta_{loc(a)}$  : Angle d'incidence local, projeté selon le plan azimutal
- $\sigma$  : Section efficace de rétrodiffusion (Sigma)
- $\sigma^o$  : Coefficient de rétrodiffusion. (Sigma zéro), section efficace de rétrodiffusion par unité de surface au sol
- $\sigma^o_{(dB)}$  : Coefficient de rétrodiffusion exprimé en décibels.  $\sigma^o_{(dB)} = 10 \log_{10}(\sigma^o_{(m^2/m^2)})$
- $\sigma^o_{(m^2/m^2)}$  : Coefficient de rétrodiffusion sans dimensions, section efficace de rétrodiffusion par unité de surface au sol, en mètres carrés par mètres carrés, et non en décibels. Les images de  $\sigma^o_{(m^2/m^2)}$  sont communément appelées "images de puissance" puisque leur valeur est proportionnelle à un rapport de puissances.
- $\sigma^o_{HH}$  : Coefficient de rétrodiffusion pour la polarisation HH, exprimé en décibels
- $\sigma^o_{VV}$  : Coefficient de rétrodiffusion pour la polarisation VV, exprimé en décibels



## REMERCIEMENTS

Je veux exprimer mes remerciements les plus sincères à Ferdinand Bonn et R. Keith Raney, directeurs de recherche, pour leur confiance et pour leur appui depuis le tout début de ce projet. Je tiens à remercier le Centre canadien de télédétection (CCT) et l'Instituto Geografico Nacional (IGN) du Costa Rica pour leur appui dans le cadre du *Proyecto Radar Costa Rica/Canada*, notamment pour la disponibilité des images radar. Je remercie particulièrement Frank Ahern et Robert Hawkins du CCT, et Carlos Elizondo de l'IGN. Je tiens à remercier Antonio Salazar de l'entreprise Hacienda Juan Viñas S. A. et Mario Berocal de Hacienda Taboga S.A. pour leur collaboration et les données agronomiques qu'ils ont fournies. La recherche a été réalisée au sein du Laboratoire d'Analyse Géographique du Cento Agronomico Tropical de Investigación (CATIE) où j'ai reçu un grand appui de la part de Sergio Velasquez, Jorge Faustino, Hernán Solís et Johnny Pérez. Je remercie aussi très fortement mon collègue et conjoint Grégoire Leclerc qui m'a grandement appuyée tant au niveau personnel qu'au niveau professionnel, avec ses idées originales pour la correction topographique des images et ses talents en programmation. Cette étude a été rendue possible grâce à une bourse de Jeune chercheur canadien du CRDI, au financement du Fonds de Développement Technologique du Québec, à travers le Projet de Recherche sur l'Exploitation des Images Radar (PREDIR), et de l'Agence de développement internationale des États Unis (US AID), à travers le projet RENARM/Cuencas du CATIE.

# 1. THÈMES D'INTRODUCTION

## 1.1 PROBLÉMATIQUE

L'érosion des sols est un des champs de bataille majeurs du développement durable, surtout en régions montagneuses mais aussi dans les plaines agricoles (Wicherek, 1994). En effet, l'érosion des sols est un problème grave occasionnant une perte de la ressource sol et la sédimentation dans les cours d'eau et les ouvrages hydrauliques. L'évaluation relative des aires qui sont plus propices à l'érosion hydrique ou éolienne est nécessaire pour la planification des efforts de conservation et de réhabilitation. L'évaluation quantitative des pertes de sol et du transport des sédiments est nécessaire à la conception des réservoirs hydroélectriques et des ouvrages hydrauliques.

Même sur des pentes élevées, l'agriculture peut être une activité durable à condition d'employer des pratiques agricoles et de conservation des sols adéquates et de maintenir une couverture végétale suffisante (Faustino, 1994), en autant que la ressource en sol le permette. L'utilité de la télédétection optique a été démontrée pour l'étude de la couverture végétale, en particulier de sa dégradation, sur de grands territoires (Hill, 1993, Skole et Tucker, 1993). Cependant, en raison de la couverture nuageuse qui persiste dans les régions tropicales humides pendant la majeure partie de l'année, les images de télédétection dans le domaine optique ont une disponibilité difficile à prévoir. Selon l'étude de Maraux et García (1990), les probabilités d'obtenir, pour un mois donné, une image sans nuages dans la zone atlantique et de cordillère du Costa Rica et du Panama est de moins de 20% toute l'année pour les images Landsat. Pour les images SPOT, cette probabilité est de moins de 20% entre mai et novembre, et entre 20% et 50% entre décembre et avril. Les images radar, pouvant être acquises même en présence de nuages, seront pour certaines études les seules images disponibles. Même lorsque des images optiques sont disponibles, elles pourraient bénéficier de l'information complémentaire apportée par une image radar.

La télédétection radar, grâce à sa visée latérale, son rayonnement dans le domaine des hyperfréquences, son caractère actif et la possibilité de polariser le signal, pourrait fournir certains renseignements nécessaires aux modèles de prévision de l'érosion des sols et qui sont difficiles à obtenir à l'aide d'images optiques. Par exemple, elle pourrait peut-être

aider à identifier les cultures agroforestières, les barrières vives, les champs couverts de résidus agricoles, aider à estimer la rugosité de surface et peut-être même la densité du couvert végétal, dépendant du choix de paramètres tels que l'angle d'incidence, la polarisation et la résolution spatiale. Dans plusieurs pays, certaines pratiques de conservation des sols sont subventionnées par le gouvernement. Par exemple, l'utilisation des jachères et le maintien de résidus agricoles sur le sol après la moisson sont des pratiques qui sont subventionnées aux États-Unis, au Canada (Mc Nairn and Protz, 1993, Smith *et al.*, 1995) et en Europe (Schadt *et al.* (1993), pour ce qui est des jachères). La possibilité de vérifier l'éligibilité des champs aux subventions, à l'aide d'images de satellites, pourrait améliorer les systèmes de vérification utilisés actuellement.

Plusieurs études ont montré que les images radar peuvent fournir de l'information sur la couverture forestière et l'utilisation des sols en milieu tropical (Thompson and Dams (1990), Raney *et al.* (1990)). Plusieurs satellites radar auront été mis en orbite d'ici la fin de la décennie et la bande spectrale prédominante sera la bande C, utilisée par les satellites ERS-1, ERS-2 et RADARSAT. Cependant, jusqu'au lancement du satellite ERS-1 en 1991 et de la mission aéroportée SAREX en 1992, (voir Hoekman *et al.* (1993) pour un aperçu de cette mission), très peu d'études utilisant cette bande spectrale avaient été menées au-dessus de régions tropicales. La majorité des études tropicales ont porté sur les thèmes de la géologie et de la foresterie. La plupart des applications agricoles de l'imagerie radar ont été menées dans les régions tempérées, où les champs sont grands et de forme régulière, préférablement en terrain plat (Hollande, grandes plaines canadiennes, plaines de la mer Champlain en Ontario, prairies des États-Unis). Très peu d'études de télédétection radar ont porté sur les cultures tropicales, et aucune d'entre elles n'a été réalisée dans les régions montagneuses où la topographie occasionne des distorsions radiométriques et géométriques importantes. Le satellite canadien RADARSAT, lancé en novembre 1995, offre la possibilité de programmer l'acquisition d'images selon une multitude de modes d'acquisition différents, avec différentes résolutions spatiales et différents angles d'incidence. Tout comme avec les images aéroportées, l'angle d'incidence est devenu un paramètre qu'on peut choisir et optimiser pour améliorer le contenu informatif des images. Pour les applications agricoles, il existe encore peu de résultats d'études permettant de choisir l'angle d'incidence permettant de mieux extraire l'information recherchée. Comme on peut aussi choisir entre une acquisition à l'aube

(trajectoire descendante) et au crépuscule (trajectoire ascendante), et qu'on peut choisir la date d'acquisition de l'image, il est important de connaître les variations du climat et des conditions hydriques du sol dans la zone d'étude ; il est aussi important de connaître comment ces conditions affectent le contenu informatif de l'image, surtout en régions tropicales où elles peuvent être extrêmes. Il est plus facile de contrôler l'angle d'incidence que l'humidité du sol, par exemple, mais il est possible de choisir des périodes de l'année où les conditions climatiques sont plus favorables pour les observations que l'on cherche à réaliser.

L'annexe A présente une brève revue de la littérature, dressant l'état des connaissances sur l'utilisation de la télédétection en conservation des sols ainsi que sur l'application des images radar à l'agriculture en général. Cette revue aborde aussi le thème de la correction des distorsions radiométriques dues au relief. L'annexe B présente un lexique des termes techniques utilisés dans le texte auquel le lecteur est référé par un astérisque (\*) lorsqu'un terme est rencontré dans le texte la première fois.

## 1.2 PARTICULARITÉS DES IMAGES RADAR

Les capteurs radar sont actifs\*, c'est à dire qu'ils fournissent leur propre énergie ; on peut les imaginer comme des antennes émettrice et réceptrice incorporées dans un même appareil. L'antenne émettrice transmet une série d'impulsions de rayonnement électromagnétique qui sont réfléchies par la surface terrestre ; le système mesure l'intensité de la radiation captée par l'antenne réceptrice en fonction du temps. Chaque impulsion émise couvre le terrain correspondant à toute la largeur de l'image, mais la position qu'un objet particulier de la scène occupe dans l'image est déterminée en fonction du temps entre l'émission et la réception de l'impulsion de rayonnement. Ce délai dépend de la distance entre la cible et le capteur. Comme la visée est latérale, cette distance peut être reliée à la position horizontale de la cible.

Le rayonnement électromagnétique utilisé par les capteurs radar est dans le domaine des hyperfréquences, avec des longueurs d'onde pouvant varier entre 1 cm et 1 m, selon la bande\* spectrale utilisée. Ce rayonnement, dont la longueur d'onde est de l'ordre de 100 000 fois plus élevée que celle du visible, a la propriété de pénétrer davantage les surfaces. La profondeur de pénétration augmente avec la longueur d'onde et le rayonnement

interagit surtout avec des objets de taille comparable avec la longueur d'onde. Ceci implique que les images radar apportent de l'information se rapportant à des aspects différents d'une surface que ce qu'apportent les images du domaine optique, formées en captant du rayonnement dans les portions du spectre électromagnétique correspondant au visible, au proche et au moyen infrarouge. En effet, le rayonnement radar est sensible à la structure de la végétation, alors que le rayonnement du domaine optique réagit plutôt aux pigments des plantes. Cette grande longueur d'onde confère aussi au rayonnement radar la propriété de pénétrer la couverture nuageuse. Dans cette thèse, nous avons étudié des images de la bande\* C, avec une longueur d'onde de 5,6 cm et une fréquence de 5,3Ghz. Une autre des particularités du rayonnement radar est la possibilité de polariser le signal pendant son émission et de sélectionner la polarisation\* de réception. Ceci permet de mesurer la rétrodiffusion radar selon différentes combinaisons de polarisations émise et reçue. Les images étudiées dans cette thèse ont été acquises sous deux configurations de polarisation, soient la HH et la VV.

La rétrodiffusion radar dépend principalement des propriétés géométriques et diélectriques du milieu. Les propriétés géométriques incluent la rugosité, l'orientation de la surface et la présence de réflecteurs en coin. Lorsqu'une surface est lisse par rapport à la longueur d'onde utilisée, pour une visée latérale, le rayonnement est réfléchi de façon spéculaire en direction opposée à celle de l'antenne et la surface produit un ton sombre sur l'image. Avec une augmentation de la rugosité, le rayonnement réfléchi devient de plus en plus diffus jusqu'à devenir isotrope pour une surface très rugueuse, et la proportion du rayonnement qui est renvoyée vers l'antenne augmente. Lorsque les surfaces sont rugueuses, une augmentation de leur constante diélectrique occasionne une augmentation de la rétrodiffusion. Pour les sols nus, la constante diélectrique et la rétrodiffusion augmentent avec la teneur en eau. Lorsque le sol est couvert de végétation, le rayonnement rétrodiffusé est le résultat combiné de plusieurs mécanismes de diffusion. Une partie du rayonnement rétrodiffusé provient de la rétrodiffusion directe sur le sol, une autre de la rétrodiffusion directe sur le dessus du couvert végétal, une autre d'une diffusion volumique à l'intérieur du couvert végétal, et une autre de réflexions multiples entre le sol et la végétation. Les proportions représentées par ces différents types de rétrodiffusion et la rétrodiffusion totale mesurée dépendra de la structure de la végétation, de sa biomasse (et donc de son stade de croissance), et de la teneur en eau des plants et du sol. La

télétection radar sera sensible au stade de croissance des cultures à cause de la variation de la structure et de la quantité de végétation. Il faut cependant aussi tenir compte du fait que la rétrodiffusion varie aussi en fonction de la teneur en eau du couvert et du sol, et en fonction de la rugosité du sol. La sensibilité des images radar au stade de croissance dépendra aussi du type de plante, s'il s'agit de plantes à feuilles larges, étroites ou de graminées et si les feuilles contiennent beaucoup d'eau ou non.

L'inclinaison de la surface par rapport à la visée, affectant l'angle d'incidence local\*, influence beaucoup la rétrodiffusion radar. Cet effet est d'autant plus marqué que la surface est lisse. Les surfaces orientées vers le capteur apparaîtront plus claires que les surfaces orientées en direction opposée ; cet effet permet d'apprécier la topographie sur les images radar. Cependant, il doit être corrigé si l'on cherche à caractériser la couverture végétale.

Les surfaces formant des angles droits produisent des réflexions multiples pouvant diriger une bonne partie de la composante spéculaire de la réflexion vers le capteur. C'est pourquoi les bâtiments et les ponts produisent une rétrodiffusion très intense lorsque l'orientation de leurs composantes entraînent des réflexions en coin. La présence de rangées d'arbres et de terrasses agricoles est mise en évidence sur les images radar (en autant que la résolution le permette) par la combinaison d'une orientation d'une portion de la couronne des arbres ou du terrain vers le radar et de réflexions en coin entre le sol et les troncs. La visée latérale et l'illumination directe du radar facilitent l'identification de structures telles que les rangées d'arbre et les terrasses.

La forme particulière avec laquelle les images radar sont formées cause des distorsions géométriques qui sont aussi particulières. La position spatiale qu'un objet de la scène occupera dans l'image dépend de la distance entre la cible et le capteur, selon l'axe de la visée\* (ou axe transversal oblique\*). Cette distance est appelée portée oblique\*. Les images radar brutes sont présentées en portée oblique, c'est à dire que dans l'axe transversal la position de chaque objet sur l'image dépend de la distance entre le capteur et la cible, et ce dans la direction oblique de la visée. L'échelle de l'image formée sur cet axe est comprimée en portée proximale\*, et cette compression diminue avec une augmentation

de l'angle d'incidence\*. Pour obtenir une échelle constante sur la largeur de l'image, il faut passer de la projection oblique à la projection au sol.

En milieu montagneux, les pentes qui sont orientées vers le capteur subissent un raccourcissement apparent, dû au fait que la distance entre deux points sur ces pentes est, pour le radar, la différence entre les portées obliques mesurées pour chacun. Cette distance est en effet plus courte que la distance horizontale entre ces deux points. Le raccourcissement des pentes diminue avec une augmentation de l'angle d'incidence, au prix d'une augmentation des ombres portées. Si le relief est trop prononcé et que l'angle d'incidence est trop faible, il se produit un repli des pentes orientées vers le radar, puisque le sommet des montagnes est plus rapproché du capteur que le sont les pentes. Sur les images radar, ce phénomène produit des arcs très brillants près des sommets des montagnes. Ces arcs brillants sont dus à la concentration, dans de petites portions de l'image, du signal provenant d'une très grande surface de terrain.

Pour corriger géométriquement les images ayant subi une distorsion à cause du relief, il faut tenir compte de ce dernier et, à l'aide d'un modèle numérique d'altitude, recalculer la position horizontale des pixels de l'image. On peut aussi corriger les distorsions radiométriques qui sont entraînées par le relief, si un modèle numérique d'altitude est disponible. Nous verrons une méthode de correction au chapitre 3. Cependant, les zones affectées par les ombres ne peuvent être corrigées, puisque l'illumination ne leur est pas parvenue et il n'y a tout simplement pas de données sur ces zones. Les zones de repli ne peuvent pas non plus être corrigées puisque le compte numérique de chaque pixel est le résultat de l'accumulation du signal provenant de différentes parties du terrain.

### 1.3 OBSERVATIONS ET HYPOTHÈSES

Comme pour beaucoup de projets de recherche, les hypothèses qui sous-tendent cette thèse ont été développées au cours des premières phases de la recherche, pendant l'observation visuelle des images. Watts et Parson (1992), dans leur chapitre intitulé "Que fait un scientifique ?" développent: "Les scientifiques emploient des méthodes systématiques pour réaliser leur recherche. Premièrement, ils réalisent de soigneuses observations et les notent avec précision. Ensuite, ils utilisent ces observations pour élaborer des théories (ou hypothèses). Finalement, ils réalisent des expériences pour prouver ces théories". Le livre

de Watts et Parson, s'adressant aux enfants, résume bien les étapes de la démarche scientifique. L'analyse présentée dans cette thèse porte principalement sur la dernière partie de cette démarche, sur la série d'expériences pour vérifier certaines des hypothèses formulées lors de l'observation visuelle des images. Ces hypothèses sont les suivantes :

a) Le contenu en information des images radar varie avec l'angle d'incidence. Ceci implique que

a1) certaines fourchettes d'angle d'incidence sont préférables par rapport à d'autres pour distinguer les stades de croissance des cultures et identifier les parcelles de sol nu, et que

a2) la combinaison d'angles d'incidence différents peut améliorer la distinction entre les stades de croissance des cultures.

Ces dernières sous-hypothèses sont basées sur l'observation que les images acquises sous différents angles d'incidence montraient des contrastes différents entre les sols nus et les cultures.

b) Le contenu informatif des images radar varie avec la polarisation utilisée. Ceci implique que :

b1) l'une des polarisations (HH ou VV) est préférable par rapport à l'autre pour distinguer certains stades de cultures ou identifier les parcelles de sol nu, et

b2) l'utilisation des deux polarisations combinées, soit comme telles dans une classification ou au moyen d'un indice de polarisation, permet d'identifier certaines cultures.

Cette dernière sous-hypothèse est basée sur le fait que dans les compositions colorées des images, des contrastes de polarisation intéressants ont été observés pour la jachère et les pâturages abandonnés (VV supérieur à HH) ainsi que pour les résidus de canne à sucre et le riz (HH supérieur à VV). Dans le cas des jachères, les contrastes semblaient augmenter



avec l'angle d'incidence local. Cependant, comme nous le verrons plus tard, les données disponibles nous permettront de vérifier cette hypothèse seulement pour les résidus de canne à sucre.

- c) La teneur en eau peut être un élément perturbateur pour la cartographie des zones propices à l'érosion hydrique.

Cette hypothèse est basée sur l'observation de contrastes très marqués entre les parcelles de sol dénudé et les parcelles bien couvertes par la végétation pour des sites où le sol était sec, et l'absence de contrastes pour des sites où la teneur en eau des sols était élevée à cause d'une pluie récente.

- d) Le relief occasionne des distorsions radiométriques empêchant l'appréciation des stades de croissance des cultures sur les images. On peut corriger ces distorsions (sauf là où il se produit des ombres et des replis) pour améliorer les possibilités d'appliquer les images radar au domaine de l'agriculture en régions montagneuses.

#### 1.4 OBJECTIFS

Comme nous l'avons mentionné plus tôt, l'objectif général de cette thèse est d'établir dans quelles conditions on peut le mieux évaluer la protection végétale des sols contre l'érosion à l'aide d'images radar en milieu tropical.

Les objectifs spécifiques sont de vérifier les hypothèses formulées, soient de

- a) vérifier si le contenu en information des images radar varie avec l'angle d'incidence et
- a1) établir quelles fourchettes d'angle d'incidence sont préférables pour la distinction entre le sol nu et le sol protégé et pour le suivi de la croissance des cultures
  - a2) vérifier si la combinaison d'angles d'incidence différents peut améliorer la distinction entre les stades de croissance des cultures,

b) comparer les images acquises en polarisations HH et VV

b1) établir les conditions pour lesquelles une des polarisations peut être préférable à l'autre

b2) vérifier si l'utilisation des deux polarisations combinées, soit comme telles dans une classification ou au moyen d'un indice de polarisation moyen par parcelle, permet d'identifier les parcelles de canne à sucre récemment récoltées et couvertes de résidus,

c) vérifier si la teneur en eau est un élément perturbateur pour l'identification des zones propices à l'érosion hydrique,

et

d) développer une méthode simple pour la correction radiométrique des effets du relief, afin de pouvoir atteindre les objectifs a) à c).

## 1.5 ORGANISATION DE LA THÈSE

Ce chapitre présente la problématique, les hypothèses, les objectifs et le contexte de la recherche. Le chapitre 2 présente les sites d'étude, les images étudiées, les données agronomiques et les données auxiliaires. Le chapitre 3 décrit les étapes du traitement numérique des images qui ont été réalisées pour permettre leur analyse, soient le géocodage\* (au moyen d'une orthorectification\*), l'étalonnage et la correction des effets radiométriques dus au relief; il traite donc aussi l'objectif d). Le chapitre 4 traite les objectifs a1), b1) et c); il aborde la comparaison des images acquises sur différents sites, d'images acquises sur le même site mais avec différents angles d'incidence ainsi que la comparaison des polarisations HH et VV, au niveau de la discrimination qu'elles apportent entre différentes catégories de croissance. La discrimination entre catégories est évaluée d'une part à l'aide du calcul du coefficient de rétrodiffusion moyen par parcelle et d'une analyse de variance (évaluation du Chi-carré au moyen du test de Kruskal-Wallis). D'autre part, on évalue la discrimination entre les signatures\* formées à l'aide de tous les pixels des catégories au moyen du calcul de la divergence\* transformée pour chacune des images. L'explication de la différence entre les images

acquises à différents angles d'incidence est étayée par une observation de la dépendance du coefficient de rétrodiffusion envers l'angle d'incidence local.

Le chapitre 5 traite les objectifs a2) et b2) ; il porte d'abord sur la complémentarité des polarisations HH et VV pour l'identification des parcelles de canne à sucre récemment récoltées et couvertes de résidus. On y analyse la possibilité d'identifier ces parcelles par la différence entre le coefficient de rétrodiffusion moyen par parcelle en HH et en VV, et on évalue la divergence des signatures spectrales entre les résidus et les autres catégories lorsque l'on combine les polarisations HH et VV. Ensuite, il aborde la complémentarité des images acquises à angles d'incidence différents. On y évalue si la différence entre le coefficient de rétrodiffusion moyen par parcelle de deux lignes de vol produit une meilleure distinction entre certaines catégories que le coefficient de rétrodiffusion moyen par parcelle de chaque image prise séparément. On évalue aussi l'amélioration occasionnée par l'utilisation de deux images acquises à angles d'incidence différents dans la distance entre les signatures spectrales des différentes catégories.

Le chapitre 6 présente les conclusions générales de l'étude, les recommandations pour la planification d'images satellitaires, et une courte discussion de leurs implications. Le chapitre 7 présente les références bibliographiques citées dans le corps principal de la thèse. L'annexe A présente une revue de la littérature, dressant l'état des connaissances sur l'utilisation de la télédétection en conservation des sols, sur l'application des images radar à l'agriculture en général ainsi que sur les corrections radiométriques des effets du relief. L'annexe B présente un glossaire des termes techniques utilisés dans le texte, auquel on réfère le lecteur par un astérisque la première fois qu'on rencontre un terme qui y figure. Les symboles utilisés dans le texte sont définis au début du document, après la liste des tableaux.

## 1.6 CONTEXTE

Le Centre canadien de télédétection (CCT) a coordonné une série de survols en Amérique Latine qui ont été financés à travers l'Agence spatiale européenne (ESA). Ces survols, comportant des sites au Venezuela, au Brésil, en Guyane, en Guyane française, en Colombie et au Costa Rica, ont eu lieu en avril 1992 ; la mission portait le nom de *South*

*America Radar Experiment* (SAREX-92). Dans l'optique de faciliter l'utilisation de ces images, le CCT et l'*Instituto Geográfico Nacional* (IGN) du Costa Rica ont monté un projet de collaboration d'une durée de deux ans qui a été financé par le Centre de recherche pour le développement international (CRDI), projet appelé *Proyecto Radar/Costa Rica/Canada '92-'94* (Elizondo *et al.* (1993)). Dans ce projet, l'IGN a coordonné et stimulé l'utilisation des images radar acquises sur le Costa Rica et a également distribué de l'information et des données (cartes, photographies aériennes) à plus de 35 organismes qui ont soumis une proposition de recherche. Dans le cadre de ce projet, le CCT a financé l'acquisition d'une autre série de lignes de vol au Costa Rica, qui se sont ajoutées à la série de la mission SAREX-92.

La présente recherche a fait partie du projet PREDIR (Projet d'Exploitation Des Images Radar) coordonné par l'Université Laval, avec la collaboration de l'INRS-eau, de l'Université de Sherbrooke, de MIR Télédétection *inc.* et de VIASAT Géo-Technologies *inc.* Pendant les deux premières années de l'exécution de ce projet, elle a fait partie du module N. 7, portant sur les applications des images radar à la gestion des bassins versants tropicaux. La recherche a pris place au Costa Rica, au Département de gestion des bassins hydrographiques *du Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza* (CATIE). Elle a été menée en étroite collaboration avec la recherche post-doctorale du Dr Grégoire Lelerc portant sur les corrections radiométriques des images radar, parrainée par le Centre d'application et de recherche en télédétection (CARTEL) de l'Université de Sherbrooke.

## 2. SITES D'ÉTUDE, IMAGES RADAR ET DONNÉES AUXILIAIRES

Des sous-images de six lignes de vol ont été étudiées ; elles sont relatives aux trois sites d'étude au Costa Rica. Ce chapitre débute par une description de ces sites, suivie d'une description des images et des données complémentaires.

### 2.1 DESCRIPTION DES SITES D'ÉTUDE

La recherche porte sur trois sites ; leur localisation est montrée à la figure 1, ainsi que celle des images des lignes de vol utilisées, décrites à la section suivante. Le premier, Tierra Blanca, est compris entre les coordonnées du système de projection *Lambert Costa Rica Norte*  $X=548000$  m à  $552000$  m,  $Y=210000$  m à  $212864$  m. (longitude entre  $-83,8957^\circ$  et  $-83,8591^\circ$ , latitude entre  $9,9073^\circ$  et  $9,9333^\circ$ ) Il couvre  $11,5$  km<sup>2</sup>. Il est surtout dominé par des cultures labourées et par des pâturages. Son relief est vallonné, beaucoup moins escarpé que celui des territoires avoisinants. Il est situé sur le versant sud du volcan Irazú, et son altitude varie entre  $1980$  m et  $2500$  m. La précipitation moyenne annuelle est autour de  $1395$  mm ; pour le mois d'avril, le mois pendant lequel ont été acquises les images, elle se trouve autour de  $49$  mm (Leclerc *et al.* (1997)).

Le second site, Juan Viñas, est compris entre les coordonnées  $X=560000$  m à  $X=564000$  m, et  $Y=207000$  m à  $212000$  m de la projection *Lambert Costa Rica Norte* (longitude entre  $-83,7863^\circ$  et  $-83,7498^\circ$ , latitude entre  $9,8800^\circ$  et  $9,9253^\circ$ ). Il couvre  $20$  km<sup>2</sup>. L'altitude varie entre  $800$  m dans la rivière Quebrada Honda dont le canyon traverse le site du nord au sud, et  $1700$  m vers le nord du site. On retrouve des plateaux à une altitude d'environ  $1240$  m. La précipitation moyenne annuelle est autour de  $3130$  mm ; pour le mois d'avril, elle se trouve autour de  $182$  mm (Leclerc *et al.*, 1997). Ce site est majoritairement occupé par la culture de la canne à sucre sur les plateaux et les pentes modérées, et par la culture du café sur les pentes plus élevées. La Hacienda Juan Viñas cultive surtout des variétés de canne hawaïenne qui se prêtent aux altitudes de plus de  $1000$  m, et qui ont une durée de mûrissement de  $2$  ans. Les récoltes sont réparties irrégulièrement dans l'année, avec une plus forte concentration entre janvier et mai, lorsqu'il pleut légèrement moins. Alors que cette entreprise gère plus de  $1500$  ha de canne à sucre, notre étude s'est limitée à quatre

fermes couvrant une surface totale de 680 ha, les fermes Rohmoser, Duran, Mesas et Naranjo.

Le troisième site, Taboga, est compris entre  $X=404000$  m à  $X=414000$  m et  $Y=252000$  m à  $Y=266000$  m de la projection *Lambert Costa Rica Norte* (longitude entre  $-85,2100^\circ$  et  $-85,1184^\circ$ , latitude entre  $10,2863^\circ$  et  $10,4131^\circ$ ). Il couvre  $140 \text{ km}^2$ . La ferme Hacienda Taboga est située près de la ville de Cañas, dans la province du Guanacaste, au Nord-ouest du Costa Rica. La canne à sucre et le riz y sont cultivés ; les variétés de canne à sucre cultivées ont un cycle d'un an. La récolte est effectuée entre décembre et avril, pendant la saison sèche. Le terrain est plat, sauf pour quelques collines peuplées par de la forêt et des pâturages. L'altitude varie entre 10 m et 15 m dans la partie plane et s'élève jusqu'à 137 m sur une petite chaîne de collines. On y pratique l'irrigation occasionnelle de la canne à sucre par canaux. Le riz est cultivé dans des parcelles inondées. La région subit une saison sèche marquée, qui en 1992 s'était prolongée au-delà du mois d'avril, au moment où ont été acquises les images. La précipitation moyenne annuelle est autour de 1685 mm ; pour le mois d'avril elle se situe autour de 46 mm (Leclerc *et al.* (1997)). Le site de Taboga a été ajouté à l'étude deux ans après l'acquisition des images, de manière à répondre à des questions qui sont survenues en étudiant le site de Juan Viñas, au sujet de l'effet de la teneur en eau du sol. En effet, le terrain est plat, ce qui élimine les effets de la topographie, et les conditions étaient sèches au moment de l'acquisition des images.

La figure 2 montre une portion du site de Tierra Blanca photographiée depuis un petit avion, et la figure 3 montre une portion du site de Juan Viñas avec, en avant-plan, des résidus de canne à sucre laissés sur le sol après la récolte, avant d'être brûlés.

## 2.2 DESCRIPTION DES IMAGES UTILISÉES

Les images étudiées ont été acquises dans le cadre de la mission SAREX'92 et du projet Radar Costa Rica/Canada, les 24 et 27 avril 1992, par le capteur Radar à synthèse d'ouverture (RSO) C/X-SAR, à bord du CONVAIR-580 du Centre canadien de télédétection, en bande C et avec les polarisations HH et VV. Les images ont été fournies en projection oblique et en format de 8 bits\*. Le niveau de gris est proportionnel à l'amplitude\* et donc à la racine carrée du coefficient de rétrodiffusion\*.

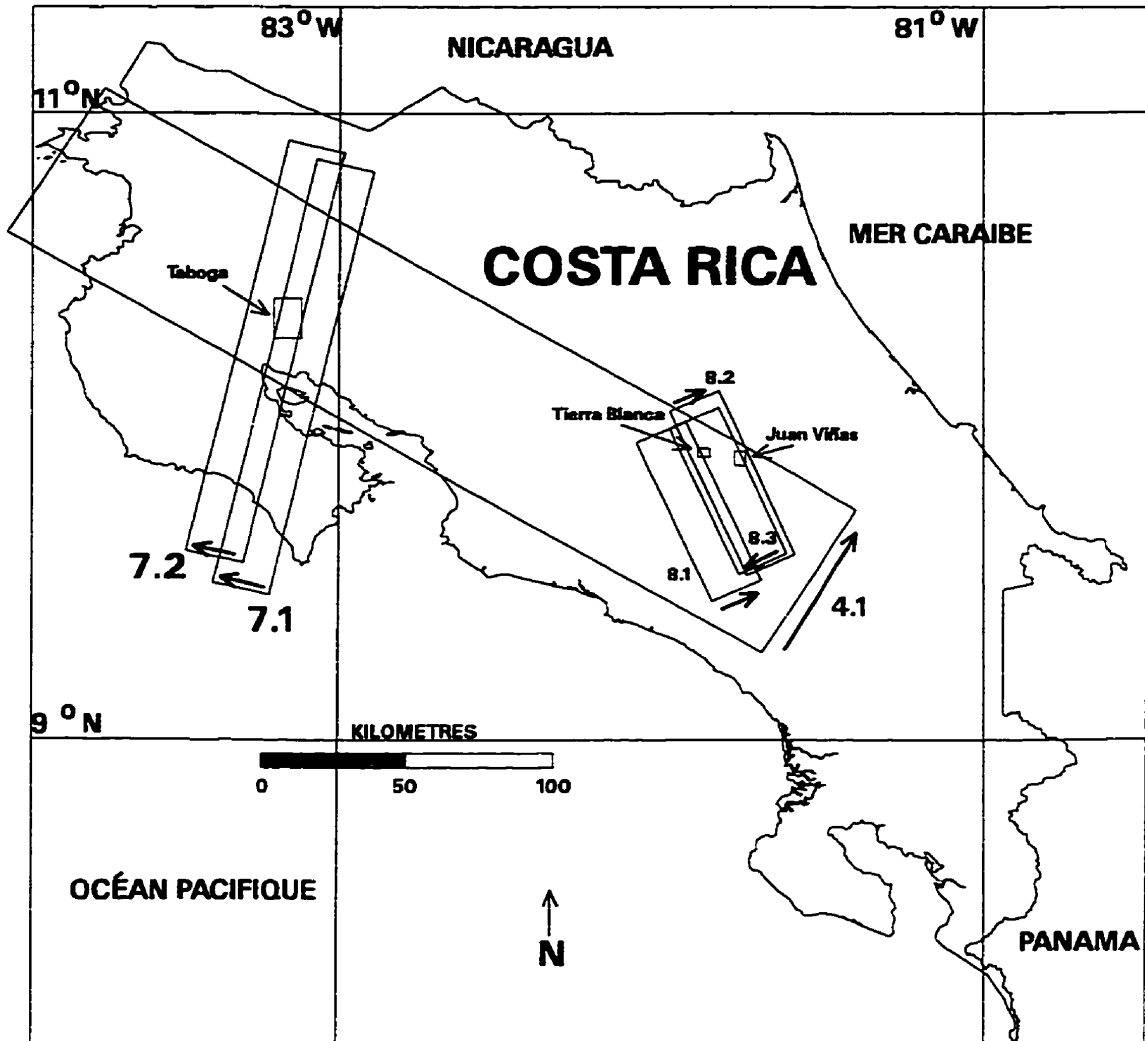


Figure 1 : Localisation des sites d'étude et des images des lignes de vol étudiées



Figure 2 : Photographie d'une portion du site de Tierra Blanca, prise à partir d'un petit avion



Figure 3 : Photographie d'une portion du site de Juan Viñas, prise à partir d'un petit avion



Des 21 lignes de vol qui ont été acquises au Costa Rica, 6 sont étudiées dans le cadre de cette thèse. Wooding *et al.* (1993) présentent une description des différents modes d'acquisition du capteur C/X-SAR 580 ainsi qu'une description générale des images acquises dans le cadre de la mission SAREX-92. Livingstone *et al.* (1988) présentent le capteur de façon plus détaillée

Les images des **lignes 8.1, 8.2 et 8.3**, couvrant le bassin versant supérieur de la rivière Reventazón, ont été acquises en mode étroit, avec des angles d'incidence\* variant entre 45° et 76°. La largeur de la ligne de vol est de 18 km au sol et l'espacement du pixel\* est de 4,31 m en azimut\* et de 4 m dans l'axe transversal oblique\*. La résolution\* est d'environ 6 m dans ces deux axes (la résolution dans l'axe transversal oblique est exprimée de façon approximative puisqu'elle dépend de la largeur de bande de l'impulsion\*, qui ne peut être qu'estimée. Cependant l'espacement entre échantillons de l'image est un paramètre de conception du capteur et est donc connu exactement). Ces trois lignes de vol couvrent une largeur de terrain totale de 33 km et une longueur moyenne de 83 km. Un ruban de terrain d'une largeur de 3,5 km est couvert par les trois lignes de vol et une largeur de 18 km est couverte par au moins deux lignes. La ligne 8.3 a une direction de visée opposée (antiparallèle) à celle des lignes 8.1 et 8.2. Environ un tiers du site de Tierra Blanca est couvert par ces trois lignes de vol, et le site entier est couvert par les lignes 8.2 et 8.3. Le site de Juan Viñas est couvert par les lignes 8.2 et 8.3.

Les images des **lignes 7.1 et 7.2**, couvrant le site de Taboga, ont été acquises en mode nadir, avec des angles d'incidence entre 0° et 74°. La résolution spatiale est également autour de 6 m, et le pixel est de 4 m en portée oblique et de 4,31 m en azimut. La **ligne 4.1**, acquise en mode large, couvre toutes les cordillères du Costa Rica selon leur axe longitudinal. La résolution est d'environ 20 m dans l'axe transversal oblique et de 10 m en azimut. L'espacement du pixel est de 15 m et 6,9 m, respectivement dans ces deux axes. Cette ligne n'est étudiée que pour le site de Taboga, à cause des ombres qui affectent les deux autres sites. Le tableau 1 résume les caractéristiques générales des 6 lignes de vol utilisées et présente la fourchette d'angles d'incidence au-dessus des sites d'étude.

Tableau 1 : Caractéristiques des images utilisées et fourchette d'angles d'incidence sur les sites d'étude

Ligne De Vol	Points sur la trajectoire de vol	Mode et fourchette d'angles de d'incidence pour l'image entière	Orientation de vol et direction de visée	Altitude (m)	résolution et espacement du pixel (en azimut et en dans l'axe transversal oblique)	Fourchette d'angles d'incidence sur le site ( $\theta_{ref}$ )		
						Tierra Blanca	Juan Vifias	Taboga
8.1	9°25'26", 83°54'07" 9°55'50", 84°07'56"	Étroit 45° à 76°	N335°41'26" v. à droite	5 618	6 x 6 m 4,31 x 4 m	75° à 76°		
8.2	10°01'49", 84°01'56" 9°30'23", 83°47'49"	Étroit 45° à 76°	N156°02'22" v. à gauche	5 612	6 x 6 m 4,31 x 4 m	53° à 64°	72° à 75°	
8.3	9°37'05", 83°34'20" 10°05'09", 83°46'55"	Étroit 45° à 76°	N335°46'26" v. à gauche	5 621	6x6 m 4,31 x 4 m	68° à 73°	45° à 59°	
7.1	9°27'36", 85°12'15" 10°48'40", 84°52'33"	Nadir 0° à 74°	N013°13'59" v. à gauche	6 581	6 x 6 m 4,31 x 4 m			62° à 73°
7.2	10°52'18", 84°58'03" 9°33'44", 85°17'18"	Nadir 0° à 74°	N193°43'14" v. à droite	6 558	6 x 6 m 4,31 x 4 m			13° à 63°
4.1	10°34'29", 86°04'01 9°14'10", 83°43'44"	Large 45° à 80°	N120°05'40" v. à gauche	6 019	20 x 10 m 15 x 6,9 m			70° à 79°

## 2.3 DONNÉES DE TERRAIN ET DONNÉES AGRONOMIQUES

### 2.3.1 Mesures au champ

Une importante campagne de mesures de terrain a été réalisée pendant la période de l'acquisition des images. La méthode est décrite dans Beaulieu *et al.* (1993 a). Elle portait sur 15 sites, pour un total de 75 parcelles. Plusieurs paramètres surtout qualitatifs ont été évalués pour chacune de ces parcelles, dont l'humidité des sols, la rugosité, et certaines caractéristiques des sols. On a aussi mesuré la hauteur des plants, l'espacement, l'orientation et la hauteur des billons (ou de toute autre structure périodique). Pendant une période de deux heures, depuis une heure avant jusqu'à une heure après l'acquisition des images, des échantillons de sol, de volume connu, ont été prélevés sur le terrain pour la détermination de la teneur en eau volumique (masse d'eau par volume de sol) et gravimétrique (pourcentage de la masse du sol attribuable à l'eau).

Suite à l'observation des images pour tous les sites, la recherche a été concentrée sur un nombre limité de sites, permettant de démontrer, par une analyse quantitative, les hypothèses formulées lors de l'analyse qualitative des images et des données de terrain. Seuls les sites de cultures maraîchères et de canne à sucre ont été conservés ; ensemble, les sites de Tierra Blanca et de Juan Viñas ne comprennent que 27 des parcelles échantillonnées à ce moment. Les sites de pâturages ont été laissés de côté puisqu'ils étaient trop peu nombreux pour permettre une analyse valable. Les sites de café étaient plus nombreux mais ont aussi été laissés de côté puisque lors de l'observation des images, les parcelles présentant différentes orientations, hauteurs et états de santé, et différentes quantités de résidus présentaient des tonalités tout à fait semblables sur les images. Pour le café, la gamme de stades de croissance disponibles était aussi bien moins étendue que pour la canne à sucre et les cultures maraîchères, ces dernières étant les seules pour lesquelles on retrouvait des parcelles de sol nu.

Quelques profils de rugosité ont été photographiés sur les parcelles de sol nu du site de Tierra Blanca, à l'aide d'un profilomètre à pailles. Les parcelles les plus rugueuses présentaient des variations de hauteur de plus de 30 cm et les mottes de terre atteignaient une taille de 20 cm. Le profilomètre a été perfectionné *a posteriori* (Beaulieu *et al.* (1995

a)). La rugosité a aussi été évaluée de façon approximative dans des parcelles de canne à sucre en processus de régénération, qui présentaient et dans certains des dénivellations de plus d'un mètre.

Le 29 avril, deux jours après le survol, des photographies, des diapositives et une vidéo ont été pris au-dessus de la zone à partir d'un petit avion.

Le site de Taboga ne faisait pas partie, à l'époque, des sites visés par l'étude. Aucune mesure de terrain n'y a été réalisée et, pour ce site, l'analyse est basée sur des données fournies par l'entreprise Hacienda Taboga S.A. Pour le site de Juan Viñas, l'analyse est aussi surtout basée sur les données fournies par les entreprises agricoles mais les observations et mesures de terrain ont servi à établir l'effet des différentes interventions (labour, récolte, brûlage des résidus) sur l'aspect de la surface de la parcelle. Elles n'ont pas été utilisées comme telles dans l'analyse quantitative. Les photographies prises depuis un petit avion ont joué un rôle important dans l'attribution des données des registres agronomiques aux parcelles précises où l'intervention avait été réalisée.

La mesure de la teneur en eau est celle qui a été le plus utile pour expliquer les différences entre les images de différents sites. Les sols des parcelles de Juan Viñas étaient tous qualitativement très humides (en moyenne,  $0,45 \text{ g.cm}^{-3}$ ), alors que les sols du site de Tierra Blanca étaient relativement secs en surface (en moyenne  $0,12 \text{ g.cm}^{-3}$ ), mais humides en profondeur (à partir d'environ 10 cm).

Les figures 4 et 5 montrent respectivement des photographies de pommes de terre jeunes au site de Tierra Blanca et de canne à sucre d'un mois au site de Juan Viñas.



**Figure 4 : Photographie d'une parcelle de pommes de terre jeunes au site de Tierra Blanca**



**Figure 5 : Photographie de canne à sucre d'un mois, site de Juan Viñas**

### 2.3.2 Données fournies par les entreprises agricoles

À Juan Viñas, la canne est récoltée tous les deux ans environ. Les feuilles sont épanchées sur le sol, séparées en bandes et brûlées pour faire place aux nouvelles pousses de la canne à sucre, qui émergent des racines de la récolte précédente. Selon la demande en matière première de l'usine de fabrication de sucre (appelée *ingenio*) de la Hacienda Juan Viñas, les parcelles sont parfois coupées au bout de 20 ou 22 mois. À toutes les 5 récoltes, donc environ à tous les dix ans, les parcelles sont renouvelées. Les racines de la canne sont arrachées, les 50 premiers centimètres du sol sont labourés à l'aide d'une houe profonde, dans le but d'augmenter la capacité d'infiltration du sol, et on réalise généralement des traitements divers tels que l'application de calcaire broyé. Le sol est ensuite préparé pour une nouvelle semence, au moyen de deux labours avec des disques de taille décroissante ; des sillons sont tracés dans lesquels est enterrée la semence constituée de petits segments de canne. Le sol reste parfois nu pendant plusieurs semaines avant la semence, puis les jeunes pousses mettent environ trois semaines avant d'émerger. Pendant la période de rénovation, le sol passe par différentes étapes de traitement qui lui confèrent différentes rugosités. Cependant, ces sols sont toujours perçus comme très rugueux à partir des données recueillies dans la bande C, sauf juste avant le creusage des sillons, où la surface est aplanie. Les processus de récolte et de rénovation sont semblables pour le site de Taboga, sauf que les variétés de canne à sucre cultivées atteignent la maturité après un an ; de nouvelles semences sont donc effectuées environ tous les cinq ans.

La société Hacienda Juan Viñas a fourni :

- l'inventaire annuel pour 1992, contenant les dates de récolte pour chaque champ, les aires et les variétés cultivées,
- les rapports hebdomadaires de travail effectué dans les champs, incluant l'application d'engrais et de pesticides, le nettoyage, le labour, la séparation et le brûlage des résidus,
- les rapports de rendement indiquant la date à laquelle la récolte du champ a été achevée, l'âge auquel la canne a été récoltée, la surface du champ en hectares, son rendement total en tonnes de canne et en sucre, son rendement par hectare et par mois de croissance.

Les cartes topographiques au 1:10 000 ont été utilisées comme plan de base ; elles ont été produites en 1989 à l'aide de photographies aériennes et contiennent une classification du type d'utilisation des sols (canne à sucre, café, pâturages, forêt), les routes principales et secondaires, le réseau hydrographique et tous les bâtiments. Comme les champs sont délimités par des chemins et, dans certains cas, des rivières, les limites des champs ont été indiquées sur cette carte par l'ingénieur agronome de la société. Cependant, les divisions actuelles sont le résultat du regroupement de plusieurs champs, effectué au cours des dernières années. Ce regroupement a posé des problèmes pour l'établissement de la base de données, puisque les récoltes continuent de se réaliser en fonction des parcelles originales, alors que les registres contiennent les données globales pour les parcelles regroupées. Les parcelles pour lesquelles les registres indiquaient plusieurs dates de récolte ont été divisées en leurs constituants originaux à l'aide d'un plan réalisé par la société en 1979. Les photographies prises à partir d'un petit avion, sur lesquelles on a identifié les parcelles à l'aide du plan de base, ont permis de déterminer à quelle sous-parcelle correspondait chaque date de récolte. Ces photographies ont aussi permis de mieux caractériser l'état de la surface, particulièrement dans le cas de champs récemment récoltés. Elles permettaient de déterminer si on était en présence de sol nu, de résidus frais, de résidus brûlés ou de canne en croissance. De plus, comme les registres indiquaient la semaine au cours de laquelle une récolte avait été achevée, certains champs pouvaient avoir été terminés en mai mais avoir des portions déjà récoltées en avril, au moment de l'acquisition des images. On a établi un fichier de données sur 99 parcelles dont l'âge de la repousse variait entre 0 et 22 mois, incluant des parcelles en rénovation (sol nu), récemment semées, récemment récoltées, certaines avec des résidus frais, d'autres avec des résidus brûlés.

Pour le site de Taboga, pour lequel nous avons étudié 199 parcelles, l'âge de la repousse de la canne à sucre (pour les parcelles rénovées et récoltées) a été calculé à partir des registres de récolte et de semence pour 1992, fournis par la Hacienda Taboga S.A. Comme cette entreprise ne cultive que des variétés à période de mûrissement d'un an et que la récolte s'effectue entre les mois de décembre et d'avril, l'âge maximal de la canne à sucre n'était que de quatre mois. Comme le site ne faisait pas encore partie de notre étude au moment de l'acquisition des images, aucun échantillon de sol n'a été prélevé pour la détermination de la teneur en eau du sol, et aucune mesure de la rugosité n'a été effectuée. On sait

cependant que les sols en préparation pour la semence de la canne à sucre sont toujours très rugueux, sauf juste avant le creusage des sillons, où la surface est aplanie. Ces sols n'étaient pas irrigués et, vu l'absence de pluie des derniers six jours on peut en déduire que leur teneur en eau était faible. Une irrigation est généralement pratiquée juste après la semence des parcelles rénovées. Les parcelles semées ou récoltées sont irriguées occasionnellement par écoulement en canaux durant la croissance de la canne. Contrairement à une irrigation par aspersion, seuls les sols sont touchés par l'irrigation, et il n'y a pas de gouttelettes d'eau sur les feuilles. Toutefois, des données permettant d'identifier les parcelles irriguées au moment de l'acquisition des images n'étaient pas disponibles.

### 2.3.3 Image Landsat, photographies aériennes et cartes topographiques

Une image Landsat TM du 3 avril 1992, soit vingt quatre jours avant l'acquisition des images radar, a été utilisée comme source de données complémentaires pour le site de Juan Viñas, surtout pour vérifier les limites des parcelles et l'attribution des interventions à chacune d'elles.

Des photographies aériennes à échelle du 1:20 000 ont été achetées auprès de l'IGN du Costa Rica ; elles ont été acquises en 1989 dans le cadre d'un projet financé par l'agence de coopération internationale du Japon (JICA), pour produire des cartes topographiques et d'utilisation des sols à échelle 1:10 000 pour la grande région métropolitaine. Ces photographies ont été d'un grand intérêt au stade de l'exploration générale des images, mais n'ont pas été utilisées comme telles dans l'analyse. Les feuillets topographiques qui ont été produits à partir de ces photographies par JICA en 1992 ont été d'une grande utilité pour la création de modèles numériques d'altitude au moyen de la numérisation des courbes de niveau, en particulier les feuillets Tierra Blanca, Birris et Capellades.

Le site de Tierra Blanca est couvert par le feuillet topographique Tierra Blanca, au 1:10 000, et par le feuillet Istarú au 1:50 000 (actualisé à partir de photographies aériennes de 1978). Le site de Juan Viñas est couvert par les feuillets topographiques Birris et Capellades au 1:10 000, et par le feuillet Istarú au 1:50 000. Pour ces deux sites, les courbes de niveaux des feuillets au 1:10 000, dont l'espacement altitudinal est de 5 m, ont été numérisées à la main pour la création du modèle numérique d'altitude, comme on le



verra au chapitre 3. Le tracé des routes et des rivières a aussi été numérisé pour permettre la collecte de points de contrôle pour le géocodage, décrit aussi au chapitre 3.

Le site de Taboga est couvert par les feuillets topographiques Cañas et Abangares, au 1:50 000 (actualisés à partir de photographies aériennes de 1971). Le modèle numérique d'altitude et la collecte de points de contrôle ont été réalisés à partir des courbes de niveau et des rivières et routes numérisés sur ces cartes. L'espacement altitudinal des courbes de niveau est de 20 m.

#### 2.3.4 Registres pluviométriques

*L'Instituto Costaricense de Electricidad (ICE)* nous a fourni les registres pluviométriques de ses stations météorologiques situées près des sites d'étude. La station de Juan Viñas a enregistré une précipitation totale de 207 mm pendant les trois jours qui ont précédé l'acquisition des images radar, et de 41 mm le jour même. La station San Blas, la plus rapprochée du site de Tierra Blanca, a enregistré une précipitation totale de 3 mm pendant les trois jours qui ont précédé l'acquisition des images radar, et de 13 mm le jour même. Lors de l'acquisition des images, le ciel était partiellement dégagé avec de fréquentes éclaircies au-dessus du site de Tierra Blanca.

La Hacienda Taboga gère cinq stations météorologiques situées à l'intérieur de la ferme et dont elle nous a fourni les registres pour le mois d'avril 1992 ; aucune précipitation n'a été enregistrée durant les six jours précédant l'acquisition des images.

### **3. PRÉPARATION NUMÉRIQUE DES IMAGES**

Ce chapitre décrit les traitements numériques qui ont été effectués sur les images pour permettre leur analyse quantitative. Ils visent à permettre la superposition des images avec les autres données géographiques et à assurer la consistance des données provenant de sites situés à différents endroits sur la largeur d'une image, sur différentes images, et dans différentes conditions topographiques. Les différentes étapes du traitement numérique des images comprennent le géocodage\* (incluant une orthorectification\*), l'étalonnage, le calcul de l'angle d'incidence local, la correction des effets radiométriques de la topographie et l'extraction des coefficients de rétrodiffusion moyens pour chaque parcelle. Le système de traitement d'images utilisé est le EASI/PACE version 5.3 de PCI inc., pour ordinateur personnel.

#### **3.1 GÉOCODAGE**

L'objectif du géocodage est de donner à chaque pixel de l'image sa coordonnée géographique selon un système de projection cartographique donné. Dans notre cas, il inclut l'orthorectification, qui permet de corriger les distorsions géométriques causées par le mode d'acquisition en portée oblique et par le relief.

Il implique la projection de l'image sur le modèle numérique d'altitude (MNA), en connaissant les paramètres de vol et la géométrie de visée. La trajectoire de vol est établie à partir d'une première approximation de l'orientation et de l'altitude de vol, et de la position d'un point sur la trajectoire, qui sont des paramètres inscrits sur les fiches accompagnant les images. Ces paramètres sont ajustés en fonction des points de contrôle pris sur l'image et du MNA. Pour cette étude, les routes et cours d'eau ont été numérisés à partir des cartes topographiques au 1:10 000, et les points de contrôle ont été localisés à l'écran en faisant correspondre ces traits avec l'image. Le géocodage s'effectue en cherchant, pour chaque pixel de l'image de sortie, le pixel qui lui correspond dans l'image originale, à partir de l'altitude du terrain et de la position du capteur. La méthode de rééchantillonnage utilisée est celle du plus proche voisin.

Les MNA utilisés pour le géocodage des images ont été réalisés à l'aide de courbes de niveau numérisées manuellement, à partir desquelles ont été établies les valeurs d'altitude sur une grille de 4 x 4 m par interpolation conique. Pour le site de Juan Viñas, les courbes de niveau ont été numérisées à partir des feuillets topographiques Birris et Capellades, et, pour le site de Tierra Blanca, du feuillet Tierra Blanca, tous au 1:10 000. Dans le cas de Taboga, les courbes de niveau ont été numérisées à partir des feuillets topographiques au 1:50 000 Cañas et Abangares. Les MNA ont ensuite été lissés au moyen d'un filtre de la médiane de taille 5 x 5 pour amortir les changements brusques d'altitude et pour éviter la formation de terrasses artificielles.

### 3.2 ÉTALONNAGE

L'objectif de l'étalonnage est de calculer le coefficient de rétrodiffusion\*  $\sigma^{\circ}$  à partir du compte numérique\* CN. L'étalonnage est nécessaire pour fournir des valeurs que l'on peut comparer avec celles de travaux antérieurs ou futurs, calculées à partir d'autres capteurs. Il est aussi nécessaire pour comparer la rétrodiffusion mesurée pour différentes lignes de vol, acquises avec des modes différents, et celle de parcelles situées à des positions différentes sur la largeur de l'image, donc à des portées obliques différentes. Il implique la correction de variations radiométriques qui dépendent de la portée oblique.

#### 3.2.1 Sources de variations radiométriques dépendant de la portée oblique

Les effets radiométriques qui dépendent de la portée oblique ont trois origines : les diagrammes de rayonnement et de réception de l'antenne (modifiés par une modulation de la dépendance du gain de réception en fonction de la portée oblique), l'atténuation selon la distance et l'effet de l'angle d'incidence.

Le diagramme de rayonnement de l'antenne produit une illumination hétérogène de la scène. Le gain\* de l'antenne réceptrice n'est pas uniforme lui non plus. Dans les deux cas, le gain est plus élevé au centre de la visée, et décroît de chaque côté. Cela cause une variation de l'intensité de l'image dans l'axe transversal, avec une brillance plus élevée au centre de l'image que vers les bords. Cependant, pour la réception, le gain est souvent modulé artificiellement au cours de l'acquisition des images dans le but de produire une plus grande uniformité radiométrique sur la largeur de l'image. Dans le cas du capteur

C/X-SAR du CCT, cette modulation est appelée contrôle temporel de sensibilité (STC). Malgré cette modulation, il reste dans l'image une importante variation de l'intensité selon la portée oblique, qui est particulièrement marquée pour les images acquises en mode nadir. Il faut la corriger pour pouvoir comparer les réponses des parcelles agricoles situées à différentes positions sur la fauchée de l'image, donc à différentes portées obliques.

L'intensité du rayonnement émis diminue en fonction du carré de la distance à la source, ce qui produit une atténuation du signal selon la distance. Pour les capteurs radar, le rayonnement doit parcourir deux fois le trajet entre le capteur et la cible (aller et retour), et cette atténuation devient fonction de la puissance 4 de la distance pour une impulsion simple. Cependant, dans le cas des radars imageurs, le nombre de signaux à intégrer pour former un seul pixel est une fonction de la distance, donc l'atténuation décroît en fonction du cube de la distance.

L'angle d'incidence\* augmente en fonction de la portée oblique, et l'aire diffusante\* du terrain diminue avec l'angle d'incidence. Les images sont plus brillantes en portée proximale\* puisque, entre autres facteurs, l'aire diffusante est plus élevée. L'étalonnage a pour objectif de corriger l'effet de l'aire diffusante, en calculant  $\sigma^{\circ}$ , la section efficace de rétrodiffusion par unité de surface au sol. Comme on le verra plus tard, même en tenant compte de l'aire diffusante, le coefficient de rétrodiffusion varie en fonction de l'angle d'incidence. En réalité, c'est l'angle d'incidence local\*, qui dépend du relief, qui détermine l'aire diffusante et le comportement de  $\sigma^{\circ}$ . Sans tenir compte du relief, on ne peut réaliser qu'un étalonnage approximatif en supposant que le terrain est plat et à une altitude de référence. On traitera de l'effet du relief à la section 3.3.

Dans plusieurs systèmes de traitement d'images, il existe des programmes qui prétendent réaliser la correction du diagramme de rayonnement (appelée en anglais "*antenna pattern*"). Il s'agit d'une normalisation plutôt que d'une correction, qui uniformise la brillance ou le compte numérique sur la largeur de l'image. L'effet de l'angle d'incidence est perdu dans le processus, ce qui n'est pas souhaitable dans le contexte de cette recherche. En effet, l'angle d'incidence varie beaucoup sur la largeur d'une même image et un des objectifs de cette étude est d'étudier son effet sur le contenu informatif des images.

### 3.2.2 Méthode d'étalonnage

La méthode d'étalonnage utilisée a été développée par Lukowski et Daleman (1991), et a été adaptée aux images SAREX par Hawkins et Teany (1993) du Centre canadien de télédétection. Avant et après l'acquisition des images, des données d'étalonnage ont été acquises par le CCT au-dessus d'un champ contenant environ 20 cibles ponctuelles (réflecteurs en coin) et transpondeurs\*. Ces données ont été utilisées pour établir et confirmer les paramètres d'étalonnage en fonction de la position du pixel dans l'axe transversal oblique, en d'autres mots, en fonction du numéro de la colonne. L'extrapolation des paramètres d'étalonnage pour toute la gamme des angles d'incidence disponibles pour les images du capteur C/X-SAR-580 a été réalisée en supposant que le coefficient de rétrodiffusion varie en fonction du cosinus de l'angle d'incidence (Hawkins and Teany, 1993)

Cette méthode d'étalonnage est aussi basée sur l'enregistrement du signal émis par une source interne très stable. Trois bandes d'image de bruit sont acquises après chaque image. La première, correspondant au bruit thermique, est acquise avec l'antenne émettrice éteinte. La seconde, correspondant à ce qu'on appelle le bruit "BITE" 1 (BITE est l'abréviation de *Built-In Test Equipment*), est acquise avec l'antenne émettrice éteinte mais avec l'utilisation d'une source de bruit blanc. La troisième correspond au bruit "BITE" 2, où on utilise la même source de bruit blanc mais avec un gain plus élevé. Ces bandes sont utilisées dans la détermination du bruit qui affecte l'image et qui varie selon l'axe transversal oblique. Dans sa forme la plus simple, l'équation d'étalonnage s'exprime comme suit (Hawkins and Teany, 1993):

$$\sigma_{ij}^o = (CN_{ij}^2 - \overline{CN_{b_j}^2}) \times f'cal_j \quad (3-1)$$

où  $CN_{ij}$  est la valeur du compte numérique de l'image brute au pixel de la ligne  $i$  et de la colonne  $j$ ,

$\overline{CN_{b_j}^2}$  est le niveau de bruit moyen en fonction de la position  $j$  du pixel, et

$f'cal_j$  est un facteur d'étalonnage dépendant de la portée oblique, donc de la colonne  $j$ .

Pour le calcul du coefficient de rétrodiffusion en dB, l'équation précédente devient :

$$\sigma_{ij(dB)}^o = 10 \times \log_{10}(CN_{ij}^2 - \overline{CN_{bj}^2}) + f'_{cal}_{j(dB)} \quad (3-2)$$

Le programme SARCAL développé et utilisé par le CCT produit un fichier de configuration contenant la valeur de  $\overline{CN_{bj}^2}$  et de  $f'_{cal}$  en dB, pour chaque numéro de colonne  $j$  de l'image. Ce fichier contient aussi la valeur de la portée oblique et de l'angle d'incidence. Les fichiers de configuration des six lignes de vol ont été rendus disponibles par le CCT et ont été utilisés pour étalonner les images.

La figure 6 présente les paramètres utilisés pour l'étalonnage des lignes de vol 8.1, 8.2 et 8.3, et la figure 7 présente la valeur moyenne du compte numérique des images brutes pour chaque colonne, pour les lignes de vol entières. L'étalonnage semble avoir produit une distribution légèrement décroissance du coefficient de rétrodiffusion en fonction du numéro de la colonne, sur la largeur de l'image. Les figures 8 et 9 présentent les mêmes relations pour les lignes 7.1, 7.2 et 4.1, mais ici subsistent des variations radiométriques près du nadir pour les lignes 7.1 et 7.2. On doit mentionner que les sous-images des lignes 7.1 et 7.2 ont été prélevées respectivement au 1897<sup>ième</sup> et au 152<sup>ième</sup> pixel à partir du nadir. Pour la ligne 7.2, les parcelles se trouvant à moins de 500 colonnes du nadir ont été retirées de l'analyse.

Les valeurs du coefficient de rétrodiffusion pour la ligne 7.2VV sont beaucoup plus élevées que ceux des autres lignes et que ceux de la ligne 7.2HH, il s'agit sans doute d'une erreur dans le calcul des paramètres d'étalonnage. On en tiendra compte dans l'étude de la relation entre le coefficient de rétrodiffusion et l'angle d'incidence local pour le site de Taboga, où cette image est utilisée. Néanmoins, cette situation n'affecte pas la possibilité de comparer cette image aux autres quant à sa capacité de distinguer différents stades de croissance.

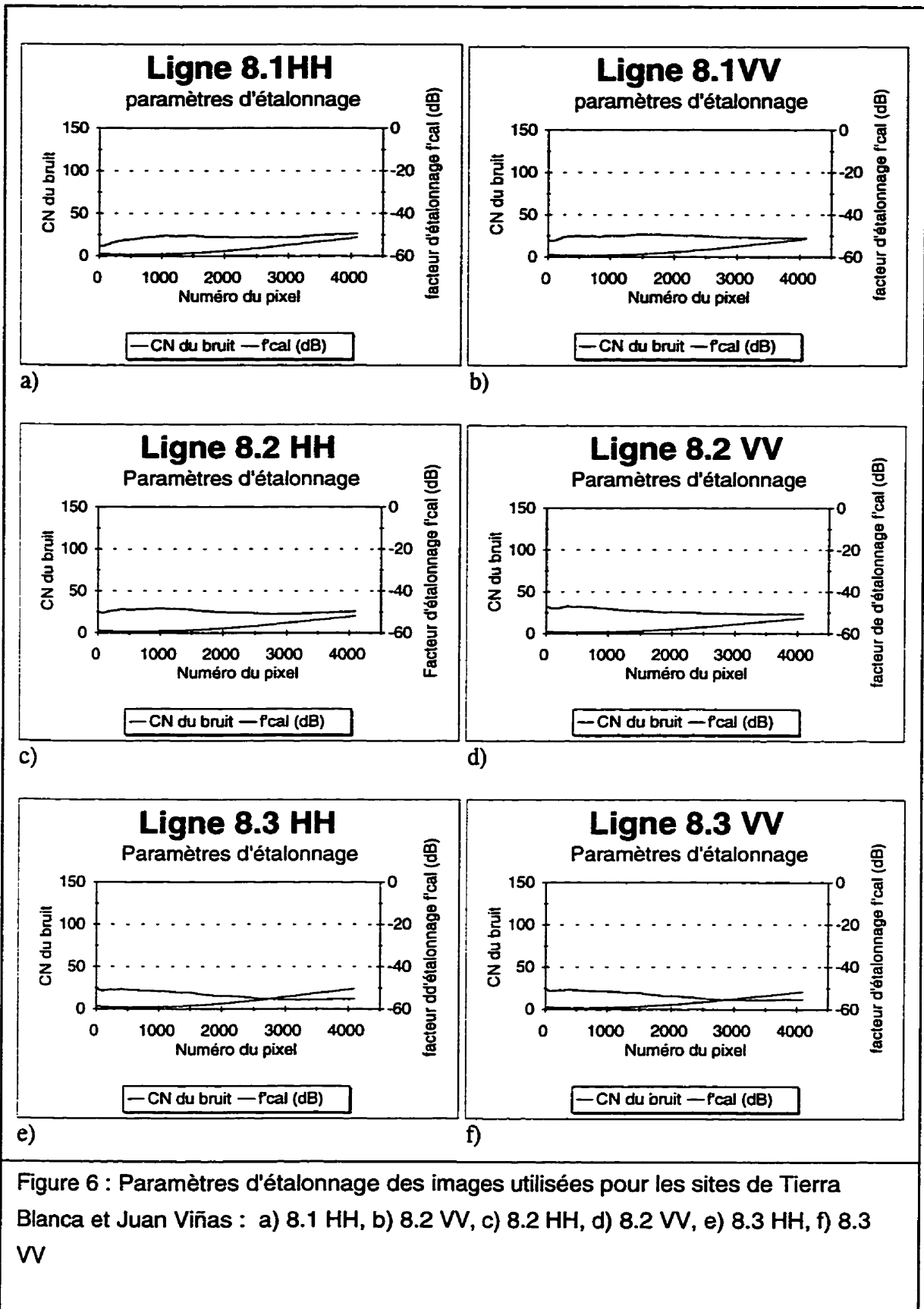


Figure 6 : Paramètres d'étalonnage des images utilisées pour les sites de Tierra Blanca et Juan Viñas : a) 8.1 HH, b) 8.2 VV, c) 8.2 HH, d) 8.2 VV, e) 8.3 HH, f) 8.3 VV

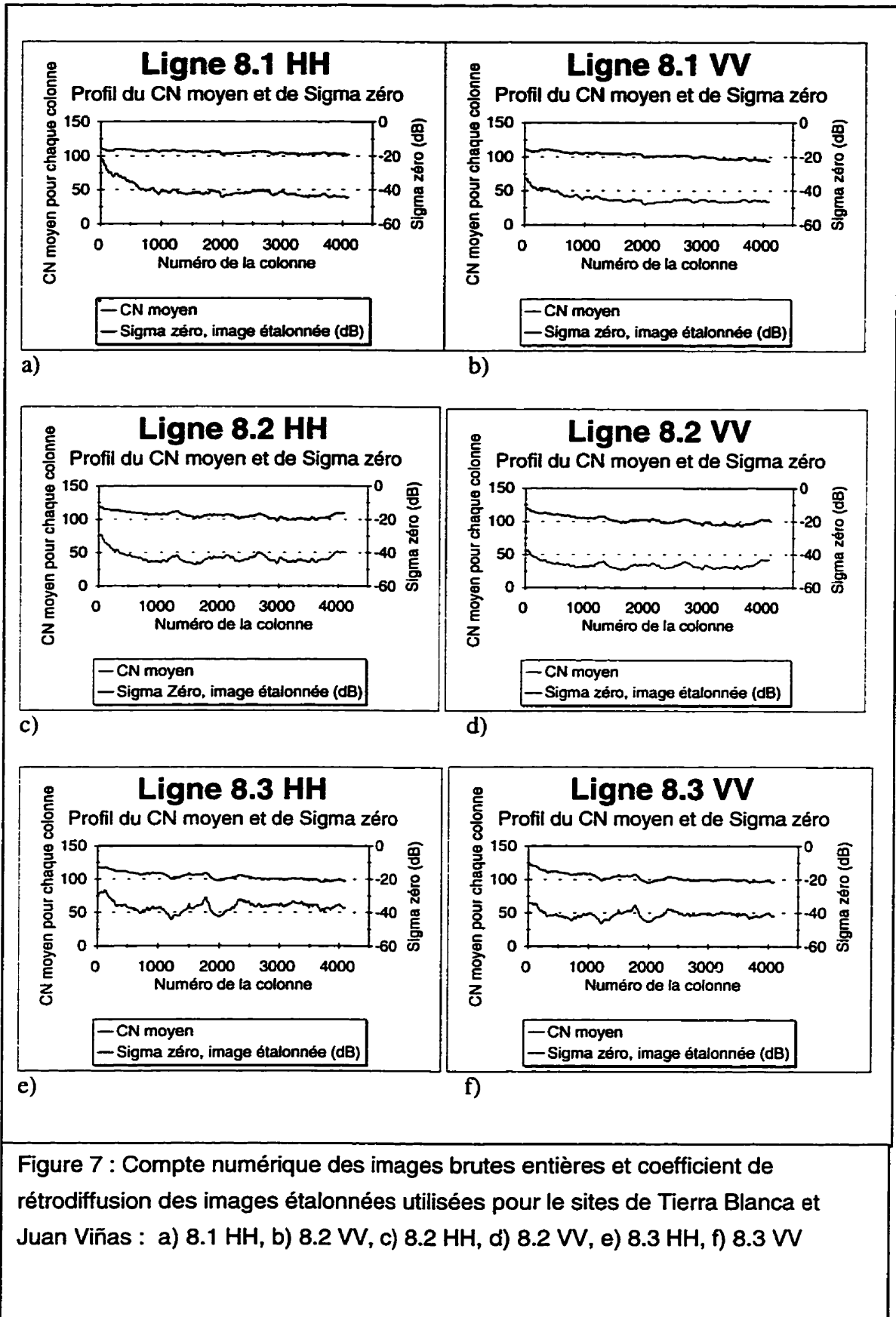


Figure 7 : Compte numérique des images brutes entières et coefficient de rétrodiffusion des images étalonnées utilisées pour le sites de Tierra Blanca et Juan Viñas : a) 8.1 HH, b) 8.2 VV, c) 8.2 HH, d) 8.2 VV, e) 8.3 HH, f) 8.3 VV



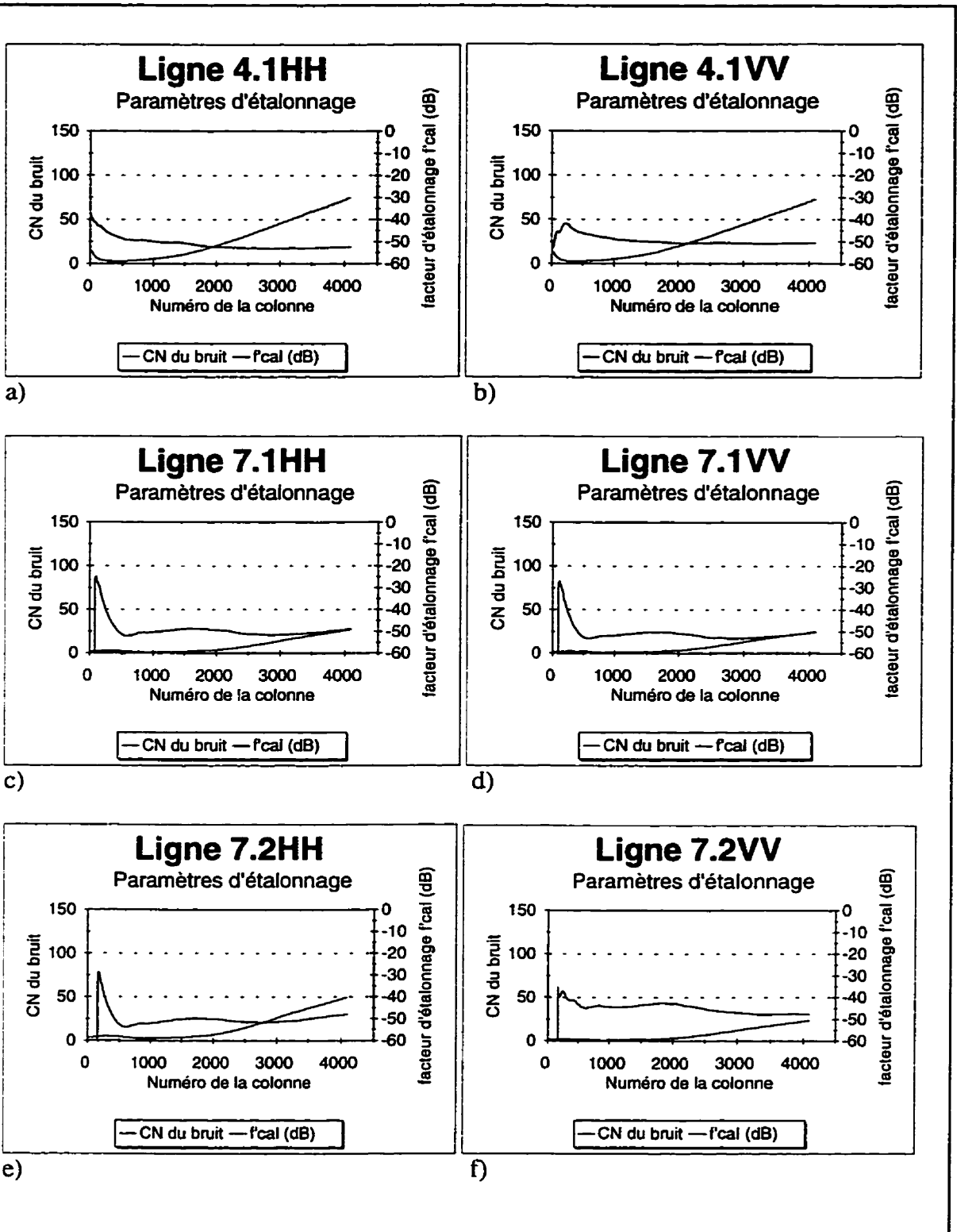


Figure 8 : Paramètres d'étalonnage des images utilisées pour le site de Taboga : a) 4.1 HH, b) 4.1 VV, c) 7.1 HH, d) 7.1 VV, e) 7.2 HH, f) 7.2 VV

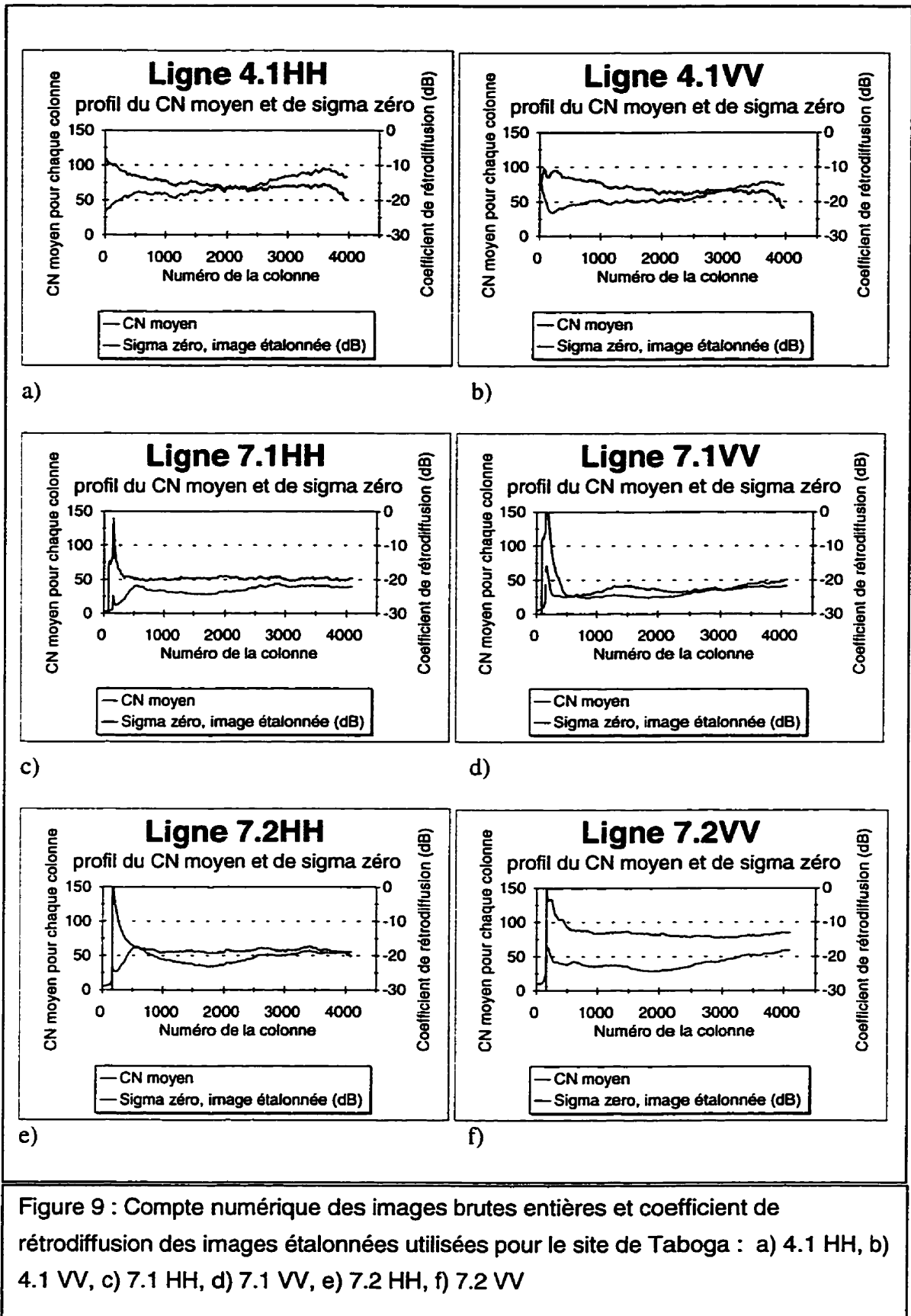


Figure 9 : Compte numérique des images brutes entières et coefficient de rétrodiffusion des images étalonnées utilisées pour le site de Taboga : a) 4.1 HH, b) 4.1 VV, c) 7.1 HH, d) 7.1 VV, e) 7.2 HH, f) 7.2 VV

### 3.2.3 Effets du relief sur la radiométrie des images radar

L'inclinaison du terrain par rapport à la visée radar affecte la brillance de l'image de deux manières. D'abord, l'aire au sol contribuant à la brillance de chaque pixel de l'image (l'aire diffusante\*) dépend de l'angle d'incidence local. Ensuite, le coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^{\circ}$ , calculé en tenant compte de l'aire diffusante, varie en fonction de l'angle d'incidence local.

Les images radar aéroportées sont généralement étalonnées en considérant que la surface terrestre est plane et à une altitude de référence  $h_{ref}$ . Une erreur dans le calcul de  $\sigma^{\circ}$  apparaît lorsque le terrain n'est pas plat ou s'il n'est pas à une altitude  $h_{ref}$ , à cause d'une erreur dans l'évaluation de l'angle d'incidence local et de l'aire diffusante. Pour l'interprétation visuelle des images ou pour une classification, il est souhaitable d'obtenir le coefficient de rétrodiffusion correspondant à un terrain plat.

La méthode présentée ici compense à la fois pour la variation de l'aire diffusante et pour la dépendance angulaire du coefficient de rétrodiffusion.

### 3.2.4 Facteur de correction radiométrique des effets du relief

La correction décrite ici consiste à simuler le coefficient de rétrodiffusion ou la brillance qui aurait été obtenue pour un terrain plat dont l'altitude est celle considérée pour l'étalonnage,  $h_{ref}$ , à l'aide d'un facteur de correction.

Raney (1998) définit la brillance  $\beta^{\circ}$  comme un facteur de réflectance par unité de surface en projection oblique. Dans notre cas, la brillance est proportionnelle au carré du compte numérique des pixels en projection oblique. D'autre part, le coefficient de rétrodiffusion est un facteur de réflectance par unité de surface au sol. L'aire diffusante dépend de la taille de la cellule de résolution\* et non de l'espacement entre pixels\*. Pour calculer  $\sigma^{\circ}$ , on doit multiplier  $\beta^{\circ}$  par le rapport entre l'aire d'une cellule de résolution en projection oblique,  $A_{obl}$ , et la surface correspondante au sol,  $A_{loc}$ , en plus de l'application d'autres facteurs instrumentaux pour réaliser un étalonnage absolu. La figure 10 présente la géométrie de visée pour un terrain plat d'altitude  $h_{ref}$ , selon le plan transversal.

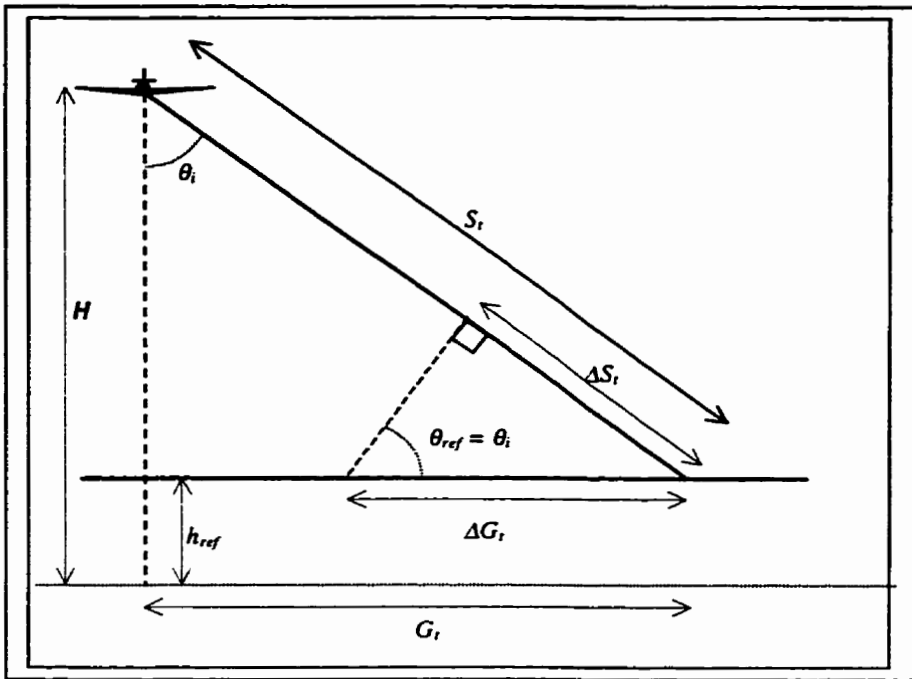


Figure 10 : Géométrie de visée dans le plan transversal pour un terrain plat dont l'altitude est  $h_{ref}$

Dans le plan transversal, l'échantillonnage de l'image se fait sur des intervalles réguliers de la portée oblique, correspondant à des intervalles de la distance entre le capteur et le terrain. Le rapport entre une distance donnée sur l'axe transversal oblique et la distance correspondante pour un terrain plat est, comme on peut le voir à la figure 10 :

$$\frac{\Delta S_r}{\Delta G_r} = \sin(\theta_{ref}) \quad (3-3)$$

Où  $\Delta S_r$  est la longueur d'une cellule de résolution dans l'axe transversal oblique et  $\Delta G_r$  est sa longueur correspondante au sol.

Dans le plan de l'azimut, la longueur d'une cellule de résolution,  $\Delta S_a$ , est égale à la longueur correspondante sur le terrain plat,  $\Delta S_a$ .

Il en suit que pour un terrain plat à une altitude  $h_{ref}$  et à un angle d'incidence  $\theta_{ref}$ , le rapport entre  $A_{obl}$  et  $A_{ref}$  est le suivant :

$$\frac{A_{obl}}{A_{ref}} = \frac{\Delta S_t \times \Delta S_a}{\Delta G_t \times \Delta G_a} = \sin(\theta_{ref}) \quad (3-4)$$

Le facteur  $f_{cal}$  utilisé dans l'équation 1 pour l'étalonnage des images de la mission SAREX'92 inclut ce rapport des aires  $A_{obl}/A_{ref}$  (Hawkins et Teany, 1993). Cependant, si le terrain étudié est en pente ou s'il n'est pas à l'altitude  $h_{ref}$ , l'aire diffusante n'est pas  $A_{ref}$ , ce qui produit une erreur d'étalonnage. Même si le terrain étudié est plat mais à une altitude différente de  $h_{ref}$ , l'angle d'incidence  $\theta_i$  pour une portée oblique donnée n'est plus égal à  $\theta_{ref}$  et l'aire de la cellule de résolution au sol,  $A_{loc}$ , n'est plus égale à  $A_{ref}$ . La figure 11 présente la géométrie de visée dans le plan transversal pour un terrain incliné et la figure 12 présente cette géométrie dans le plan de l'azimut. À cause du mode de formation de l'image radar, pour le calcul de  $A_{loc}$ , il est préférable de considérer séparément les angles d'incidence locaux dans les plans transversal et azimutal car l'inclinaison du terrain n'aura pas le même effet dans ces deux plans. Les expressions  $\theta_{loc(t)}$  et  $\theta_{loc(a)}$  correspondent respectivement aux projections de l'angle d'incidence local dans ces deux plans. Dans le plan transversal, la longueur au sol d'une cellule de résolution,  $\Delta E_t$ , varie en fonction du sinus de  $\theta_{loc(t)}$  alors que dans le plan azimutal,  $\Delta E_a$  varie en fonction du cosinus de  $\theta_{loc(a)}$ , (qui est égal à la projection de la pente du terrain dans ce plan).

Il en découle donc que :

$$\frac{A_{obl}}{A_{loc}} = \frac{\Delta S_a \times \Delta S_t}{\Delta E_a \times \Delta E_t} = \sin(\theta_{loc(t)}) \times \cos(\theta_{loc(a)}) \quad (3-5)$$

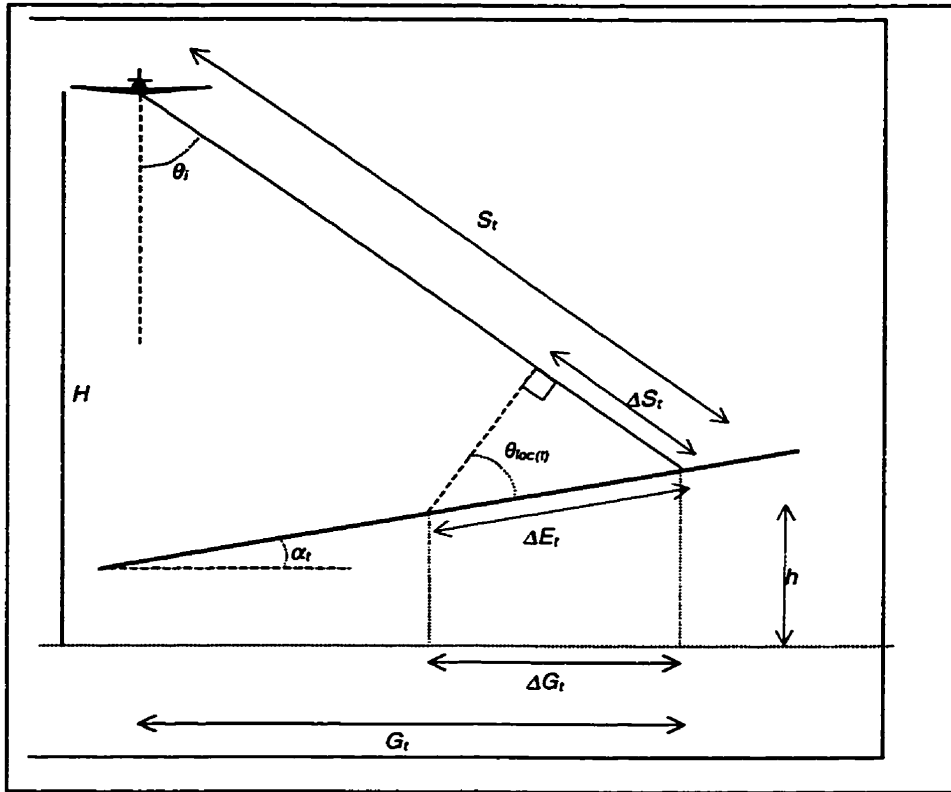


Figure 11 : Géométrie de visée dans le plan azimutal pour un terrain avec une pente  $\alpha$

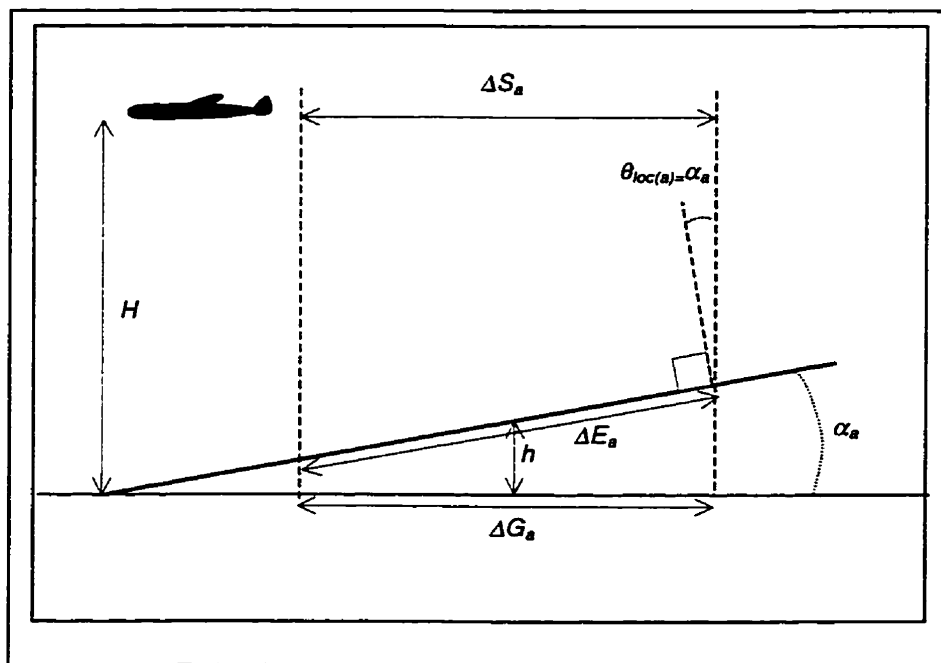


Figure 12 : Géométrie de visée dans le plan transversal, pour un terrain de pente  $\alpha$

Et

$$\frac{A_{ref}}{A_{loc}} = \frac{\sin(\theta_{loc(t)}) \times \cos(\theta_{loc(a)})}{\sin(\theta_{ref})} \quad (6)$$

Maintenant, développons l'expression du facteur de correction. On sait que le coefficient de rétrodiffusion dépend de l'angle d'incidence local. Nous exprimerons par  $\sigma^\circ(\theta)$  le coefficient de rétrodiffusion d'une surface pour un angle d'incidence local  $\theta$ . La brillance mesurée  $\beta^\circ_{mesuré}$  peut être exprimée par la relation de proportionnalité suivante :

$$\beta^\circ_{mesuré} \propto \left[ \sigma^\circ(\theta_{loc}) \times \frac{A_{loc}}{A_{obl}} \right] \quad (3-7)$$

et la brillance espérée pour la surface de référence par

$$\beta^\circ_{ref} \propto \left[ \sigma^\circ(\theta_{ref}) \times \frac{A_{ref}}{A_{obl}} \right] \quad (3-8)$$

La relation entre  $\sigma^\circ$  et  $\theta$  est différente selon le type de surface et, pour le sol nu, le facteur affectant le plus cette relation est la rugosité. Une surface lisse aura tendance à réfléchir le rayonnement de façon spéculaire ; la rétrodiffusion sera très élevée pour de faibles  $\theta_{loc}$  et baissera rapidement avec l'augmentation de ce paramètre. Une surface rugueuse aura tendance à rétrodiffuser le rayonnement dans toutes les directions et  $\sigma^\circ$  baissera plus doucement en fonction de  $\theta_{loc}$ . Au lieu de tenter d'effectuer un ajustement différent pour chaque type de surface rencontré dans une scène, on peut choisir d'appliquer une normalisation par rapport à une distribution théorique. La distribution angulaire considérée ici est dite en cosinus, c'est à dire :

$$\sigma^\circ(\theta) = \sigma^\circ(0) \times \cos(\theta) \quad (3-9)$$

Ceci implique que  $\gamma$ , défini comme étant la section efficace de rétrodiffusion par unité de surface perpendiculaire à l'axe de visée ( $\gamma = \frac{\sigma^\circ}{\cos\theta}$ , Cosgriff *et al.*, 1960) est indépendante de l'angle d'incidence local. Cette dépendance angulaire a été choisie car c'est celle qui s'ajuste le mieux aux données expérimentales rapportées par différentes équipes de recherche (Clapp, (1946), Cosgriff *et al.*, (1960) Ulaby and Dobson (1988), Stussi *et al.*, 1995). Une dépendance angulaire en cosinus a aussi été utilisée pour l'étalonnage des images de la mission SAREX-92 (Hawkins and Teany, 1993). L'annexe A présente, à la section A-3, un sommaire de différentes méthodes de correction radiométriques utilisées par d'autres auteurs pour compenser les effets du relief pour les images radar. Il présente aussi, à la section A-3-3, différents modèles simples de dépendance angulaire du coefficient de rétrodiffusion ainsi qu'une discussion appuyant le choix du modèle de dépendance en cosinus.

Si nous appliquons ce modèle à la surface de référence et au terrain, nous obtenons :

$$\sigma^\circ(\theta_{ref}) = \sigma^\circ(0) \times \cos(\theta_{ref}) \quad (3-10)$$

et

$$\sigma^\circ(\theta_{loc}) = \sigma^\circ(0) \times \cos(\theta_{loc(r)}) \times \cos(\theta_{loc(a)}) \quad (3-11)$$

Le facteur de correction topographique  $F_{corr}$  est le facteur à appliquer à la brillance mesurée pour obtenir la brillance de la surface de référence.  $F_{corr}$  est donc donné par :

$$F_{corr} = \frac{\beta^\circ_{ref}}{\beta^\circ_{mesuré}} = \frac{\sigma^\circ_{ref}}{\sigma^\circ_{loc}} \times \frac{A_{ref}}{A_{loc}} = \frac{\cos(\theta_{ref}) \times \sin(\theta_{loc(r)}) \times \cos(\theta_{loc(a)})}{\cos(\theta_{loc(r)}) \times \cos(\theta_{loc(a)}) \times \sin(\theta_{ref})} = \frac{\tan(\theta_{loc(r)})}{\tan(\theta_{ref})} \quad (3-12)$$

Les contributions selon l'azimut s'annulant exactement pour ce modèle de dépendance angulaire de la rétrodiffusion, le facteur de correction topographique se calcule donc seulement à partir des angles d'incidence locaux projetés selon le plan transversal. Guindon (1990) a d'ailleurs remarqué d'après son expérience expérimentale que l'inclinaison du terrain en direction de l'azimut avait un effet négligeable sur la brillance.



Cependant, le choix d'un autre modèle de dépendance angulaire de  $\sigma^0$  impliquera des contributions dans les deux plans.

La figure 13 montre l'effet d'une pente de  $1^\circ$  vers le capteur sur le facteur de correction topographique, pour différentes valeurs de  $\theta_{ref}$ . L'angle d'incidence impliquant une distorsion radiométrique minimale est de  $45^\circ$ .

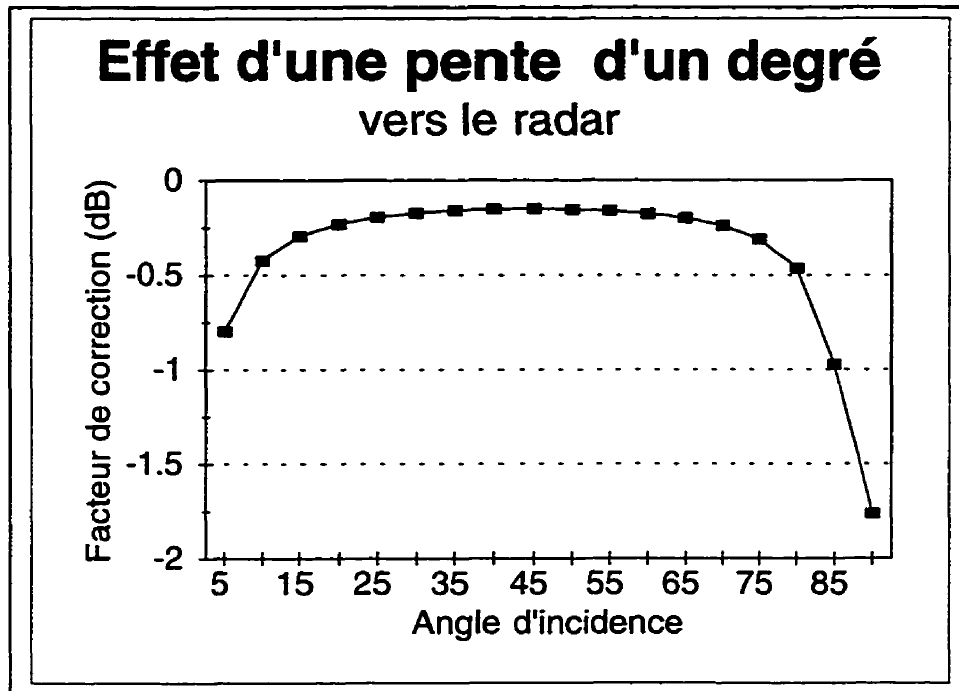


Figure 13 : Effet d'une pente de  $1^\circ$  vers le capteur sur le facteur de correction topographique  $F_{corr}$

Pour le calcul du facteur de correction topographique, il reste donc à calculer  $\theta_{(loc1)}$  et  $\theta_{ref}$ .

### 3.2.5 Calcul des angles d'incidence locaux pour le terrain et pour la surface de référence

Rappelons que la géométrie de visée pour un terrain plat et un terrain inclinée est montrée aux figures 10 à 12. Dans le plan transversal, l'angle d'incidence par rapport à la verticale,  $\theta_i$ , peut être calculé comme suit :

$$\theta_i = \cos^{-1} \left( \frac{H - h}{S_i} \right) \quad (3-13)$$

où  $S_i$  est la portée oblique pour un pixel donné,  
 $h$  est l'altitude du terrain et  
 $H$  est l'altitude de l'avion.

Il est théoriquement suffisant de calculer  $\theta_{loc(t)}$  ainsi que  $\theta_{ref}$  de la façon suivante :

$$\theta_{loc(t)} = \theta_i - \alpha_t \quad (3-14)$$

$$\theta_{loc(a)} = \alpha_a \quad (3-15)$$

$$\theta_{ref} = \cos^{-1} \left( \frac{H - h_{ref}}{S_i} \right) \quad (3-16)$$

où  $\alpha_t$  est positive si orientée vers le capteur et  $\theta_i$  et  $\theta_{ref}$  sont nuls dans le plan azimutal.

Cependant la réalité est autre. Les variations d'altitude de l'avion peuvent occasionner des erreurs importantes dans l'évaluation de  $\theta_i$  et  $\theta_{ref}$ , comme le font remarquer van Zyl *et al.* (1993). Les variations de la trajectoire de l'avion produisent des distorsions géométriques qui accompagnent celles qui sont causées par le relief. Dans les lignes qui suivent, nous proposons une méthode alternative du calcul de  $\theta_{loc(t)}$ , à partir de la distorsion géométrique que le relief a infligée à l'image.

Comme nous avons vu aux équations 3-13 à 3-16, la portée oblique  $S_i$  est nécessaire pour le calcul de  $\theta_i$ ,  $\theta_{ref}$  et  $\theta_{loc(t)}$ . Dans l'image brute, la portée oblique est très facile à calculer, étant une fonction du numéro de la colonne. Son calcul se complique pour une image géocodée, qui requiert la prise en compte de la trajectoire de vol, de la position géographique du pixel et de son altitude. Or, il est nécessaire de travailler avec une image géocodée, superposable au MNA, pour le calcul de l'angle d'incidence local. Ce problème peut être résolu en préparant une image synthétique de la portée oblique, à laquelle est

appliquée la même méthode de géocodage qu'à l'image radar. Le géocodage de l'image synthétique de la portée oblique a comme fonction de permettre de suivre les "distorsions" que le géocodage a fait subir à la séquence des colonnes, et d'obtenir une image à partir de laquelle on peut calculer la portée oblique pour chacun des pixels de l'image géocodée. Si l'on utilise des nombres réels pour exprimer les valeurs de la portée oblique géocodée et une méthode de rééchantillonnage qui permet de conserver les subtilités de la transformation géométrique, par exemple par interpolation bilinéaire, on peut aussi calculer  $\theta_{loc(t)}$  à l'aide de cette image synthétique (Leclerc et Beaulieu, 1996).

En effet, comme on peut le voir à la figure 11,

$$\frac{\Delta G_t}{\Delta E_t} = \cos(\alpha_t) \quad (3-17)$$

où  $\alpha_t$  est la pente du terrain, projetée dans le plan transversal, et

$$\frac{\Delta S_t}{\Delta E_t} = \sin(\theta_{loc(t)}) \quad (3-18)$$

donc

$$\theta_{loc(t)} = \sin^{-1} \left( \frac{\Delta S_t}{\Delta G_t} \times \cos(\alpha_t) \right) \quad (3-19)$$

La valeur de  $\frac{\Delta S_t}{\Delta G_t}$  pour chaque pixel est évaluée en calculant la pente de l'image synthétique de la portée oblique géocodée, projetée dans le plan transversal. Cette méthode est aussi applicable aux images des satellites radar, en tenant compte du fait que celles-ci sont généralement livrées en projection au sol.

### 3.2.6 Application de la méthode de correction topographique

Cette méthode a été appliquée dans EASI/PACE au moyen d'une procédure très simple. Les figures 14, 15 et 16 illustrent les premières étapes de la correction topographique pour

le site de Juan Viñas. La méthode débute par la création d'une image synthétique de la portée oblique, que l'on géocode selon la même procédure que l'image radar brute, en utilisant le même MNA, avec un algorithme de rééchantillonnage bilinéaire. À partir de l'image résultante de  $S_r$  en nombres réels, les images de la pente maximale de  $S_r$  et de l'orientation de la pente sont calculées. L'orientation de la pente est utilisée pour calculer la projection de la pente de  $S_r$  dans l'axe transversal, soit le terme  $\frac{\Delta S_r}{\Delta G_r}$  dans l'équation 3-

18, permettant de calculer  $\theta_{loc(t)}$ . Les images de la pente maximale du terrain et de son orientation sont calculées pour permettre le calcul de la projection de la pente dans l'axe transversal,  $\alpha_r$ . À partir de  $\frac{\Delta S_r}{\Delta G_r}$  et de  $\alpha_r$ ,  $\theta_{loc(t)}$  est obtenu au moyen de l'équation 3-19.

Ensuite, à l'aide de l'équation 3-16,  $\theta_{ref}$  s'obtient à partir de la portée oblique  $S_r$  et de l'altitude de l'avion par rapport à la surface de référence,  $H-h_{ref}$ ; cette altitude relative est spécifiée avec les paramètres d'étalonnage. L'équation 3-12 permet de calculer le facteur de correction pour chaque pixel de l'image. Comme on l'a noté plus tôt, la correction topographique vise à simuler la brillance  $\beta^{\circ}_{ref(dB)}$  correspondant à la surface de référence considérée pour l'étalonnage, à partir de la brillance mesurée  $\beta^{\circ}_{mesuré(dB)}$  :

$$\beta^{\circ}_{ref(dB)} = \beta^{\circ}_{mesuré(dB)} + [10 \times \log_{10}(F_{corr})] \quad (3-19)$$

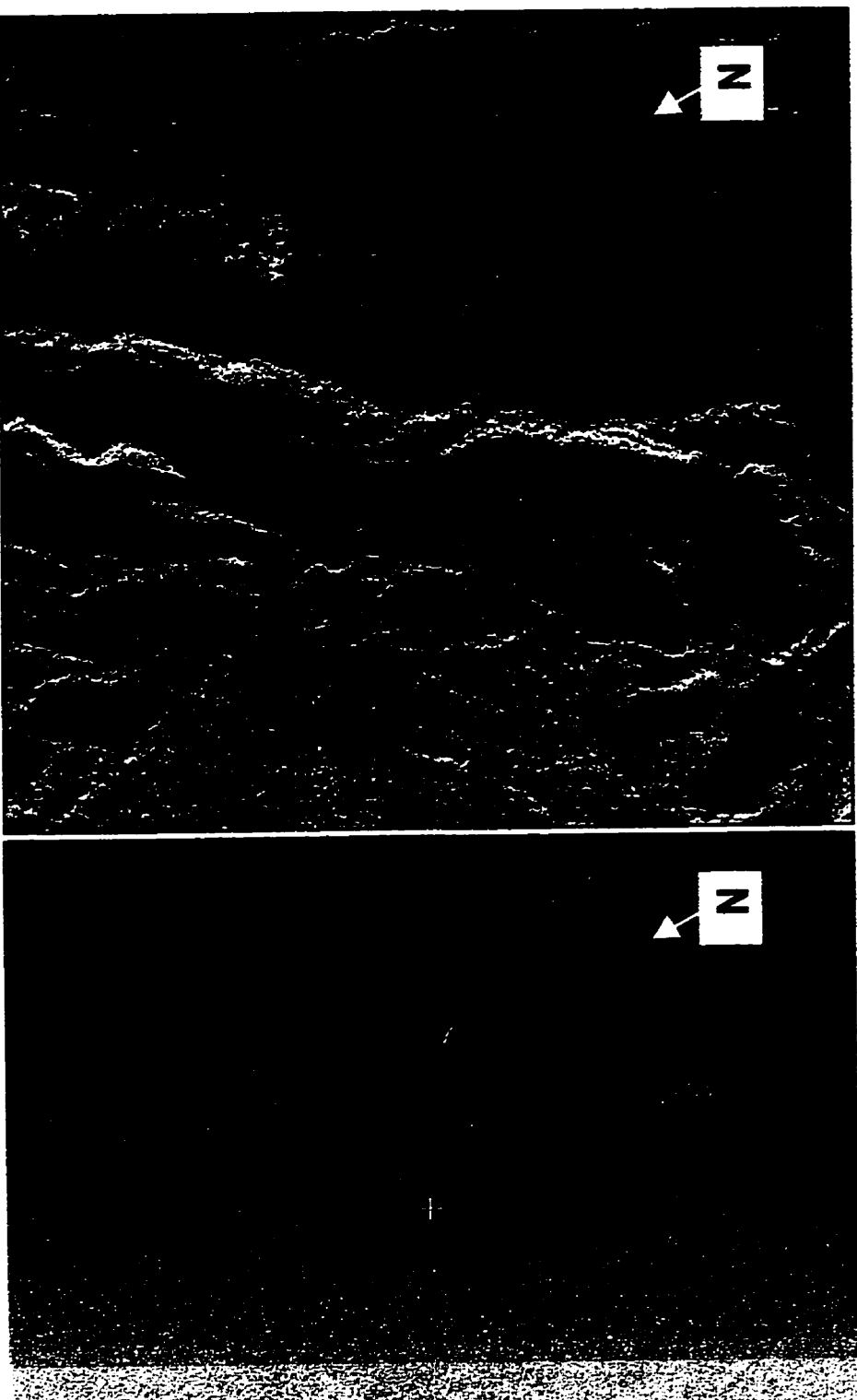
On peut appliquer le même facteur de correction aux coefficients de rétrodiffusion étalonnés. Le coefficient de rétrodiffusion corrigé en dB,  $\sigma^{\circ}_{corr(dB)}$ , se donne :

$$\sigma^{\circ}_{corr(dB)} = \sigma^{\circ}_{(dB)} + [10 \times \log_{10}(F_{corr})] \quad (3-20)$$

L'utilisation d'images du compte numérique proportionnel à l'amplitude du signal entraînerait l'utilisation de la racine carrée du facteur de correction avant sa conversion en décibels, puisque pour nos images le coefficient de rétrodiffusion est proportionnel au carré du compte numérique.

Les résultats de l'application de la méthode aux sites de Juan Viñas et de Tierra Blanca sont montrés à la section 3.5.

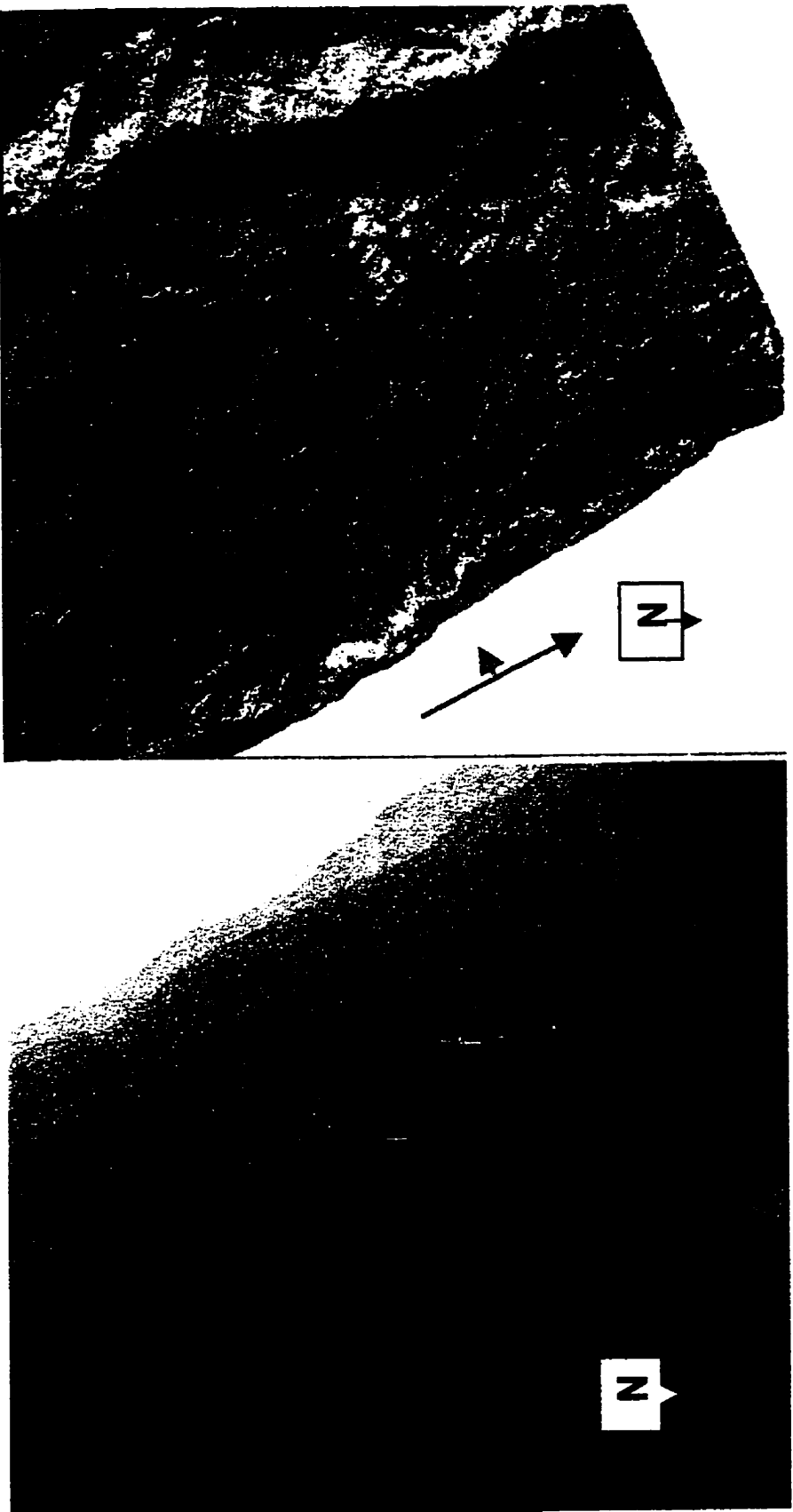
Note : La direction de vol est indiquée par la longue flèche de couleur orange, et la direction de visée par la courte flèche.



a)

b)

Figure 14 : a) image brute radar de la ligne 8.3, (HH en rouge, WV en bleu et en vert) et b) image synthétique de la portée oblique, pour le site de Juan Viñas



a)

b)

Figure 15 : Images géocodées : a) image radar et b) image synthétique de la portée oblique (site de Juan Vñas)

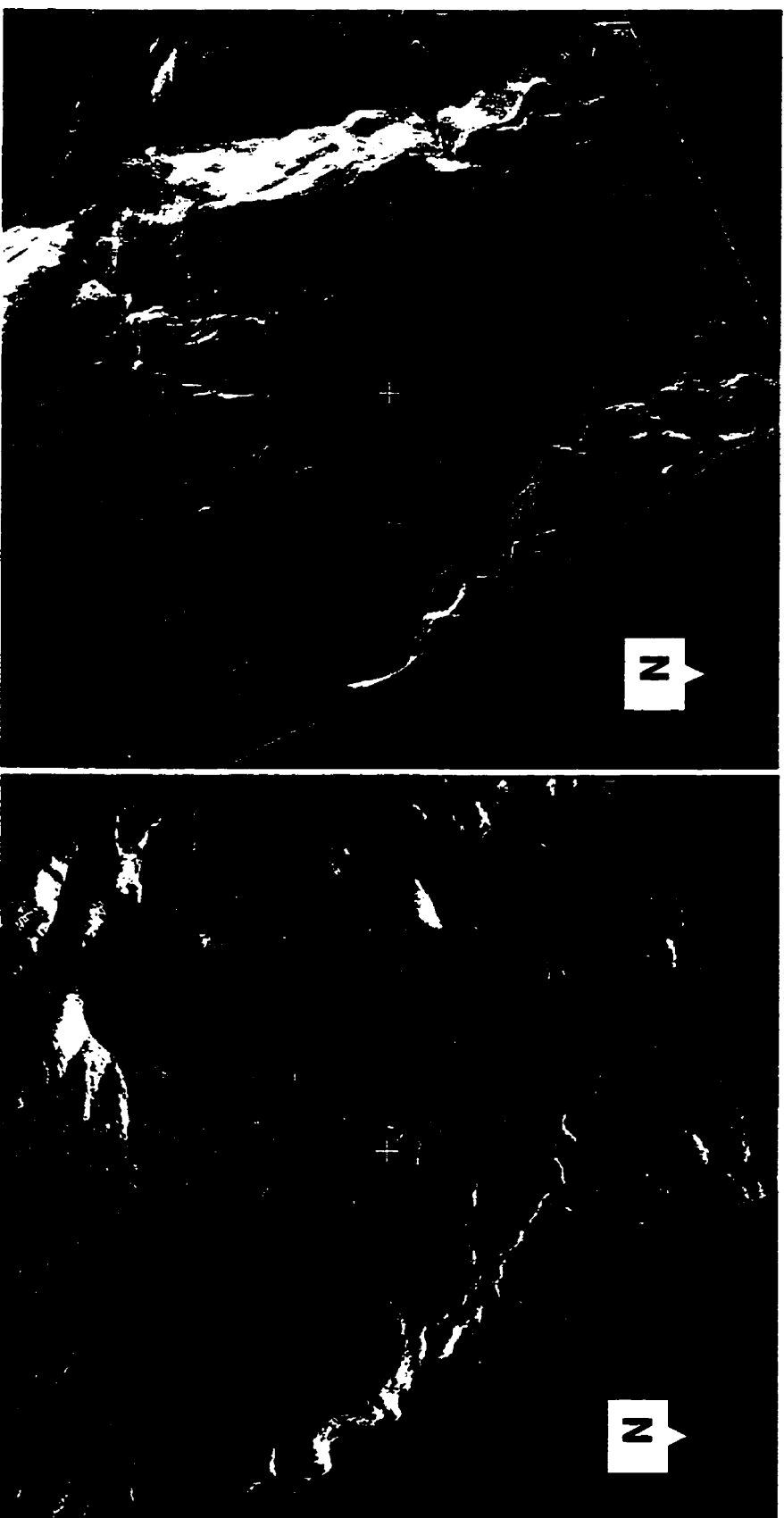


Figure 16 : Images de la pente maximale de la porté oblique  $S_1$  et de l'orientation de cette pente, calculées à partir de l'image synthétique de la porté oblique

### 3.3 DÉFINITION DE PARCELLES-ÉCHANTILLONS POUR L'EXTRACTION DE PARAMÈTRES DE L'IMAGE

La définition des parcelles pour l'extraction des paramètres de l'image a été réalisée à partir du plan des parcelles numérisé manuellement, pour les sites de Juan Viñas et de Taboga, et elles ont été tracées sur l'image à l'écran pour le site de Tierra Blanca. Les polygones des parcelles ont été convertis en mode matriciel et pour les sites de Juan Viñas et de Taboga, une zone d'amortissement a été prévue de chaque côté des limites des parcelles, pour éviter les chemins et les effets de bord. L'épaisseur de la zone d'amortissement était de 4 pixels pour le site de Juan Viñas et de 12 pixels pour Taboga. La zone d'amortissement est plus étroite pour Juan Viñas puisque les parcelles sont plus petites et que le géocodage des images a été réalisé à partir de cartes plus précises, au 1:10 000. D'autre part, le géocodage des images de Taboga a été réalisé à partir de cartes topographiques au 1:50 000, et les parcelles sont beaucoup plus grandes, ce qui permet d'utiliser des zones d'amortissement plus larges. Les valeurs moyennes du coefficient de rétrodiffusion ont été calculées sur les images de  $\sigma^{\circ}_{(m2/m2)}$  puis ont été transformées en valeurs correspondantes de  $\sigma^{\circ}_{(dB)}$ . Les valeurs moyennes de l'angle d'incidence local ont aussi été calculées pour chaque parcelle.

Pour l'extraction des valeurs moyennes de chaque parcelle, les images n'ont pas été filtrées pour réduire le chatoiement. Cependant, une partie de l'analyse des chapitres suivants consiste à comparer les capacités discriminantes de différentes images et leurs combinaisons à partir d'une analyse de divergence transformée\*. Ce type d'analyse est fortement affecté par le chatoiement qui augmente la variance de l'image même à l'intérieur de zones homogènes, et qui peut mener à une conclusion erronée sur l'impossibilité d'utiliser les images pour une classification automatique, par exemple. Les classifications ou segmentations d'images radar sont généralement précédées d'un filtrage pour la réduction du chatoiement. Des filtres adaptatifs n'ont pas été utilisés ici car ceux-ci produisent des résultats différents selon la variance rencontrée dans l'image. Comme le but de l'analyse est de comparer les images et leurs combinaisons, il fallait choisir un filtre qui produirait le même effet pour toutes les images étudiées. Le filtre de la médiane a été choisi puisqu'il préserve mieux les bords que ne le fait le filtre de la moyenne, et que l'image résultante est moins affectée par la présence de valeurs extrêmes isolées dans

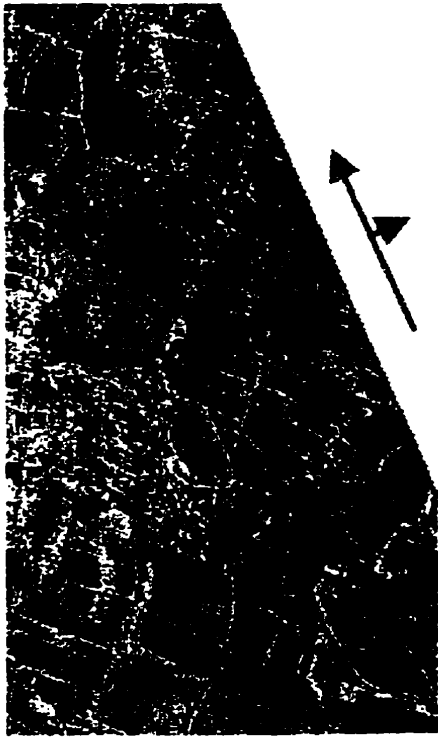


l'image. Une fenêtre de taille 5x5 a été choisie puisqu'elle produisait l'amélioration visuelle la plus satisfaisante des images.

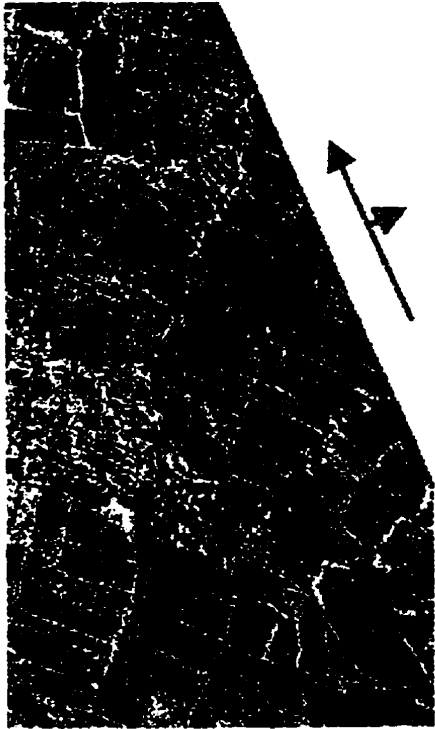
### 3.4 RÉSULTATS DES TRAITEMENTS NUMÉRIQUES SUR LES IMAGES

Les figures 17 à 19 présentent les sous-images des lignes de vol 8.1, 8.2 et 8.3 sur le site de Tierra Blanca. La polarisation HH est affichée en rouge, la VV en bleu et en vert, et la définition des parcelles étudiées, telles que définies sur le plan de base, en jaune. La direction de vol (et non la trajectoire de l'avion) est indiquée par une longue flèche de couleur oranger, et la direction de visée par une courte flèche de la même couleur. Le cadre du haut représente l'image étalonnée avant la correction topographique alors que le cadre du bas présente la même image après correction. La figure 20 présente la numérotation des parcelles pour ce site. Les figures 21 et 22 présentent les sous-images des lignes de vol 8.2 et 8.3 sur le site de Juan Viñas, et la figure 23 présente les masques utilisés pour l'extraction des valeurs moyennes pour chaque parcelle, pour les lignes 8.2 et 8.3. Pour la ligne 8.2, tous les pixels pour lesquels l'angle d'incidence local était égal ou supérieur à  $82^\circ$  ont été enlevés. Les parcelles qui présentaient encore de l'ombre ou dont le nombre de pixels était inférieur à 100 ont été retirées de l'analyse.

Ici, on voit beaucoup mieux l'effet de la correction topographique. Même si les ombres subsistent obligatoirement, les zones claires qui sont orientées vers le radar prennent une tonalité semblable aux zones planes avoisinantes, sauf celles qui étaient saturées dans l'image brute. On pourra mieux évaluer l'effet de la correction topographique en étudiant la relation entre le coefficient de rétrodiffusion moyen des parcelles étudiées en fonction de l'angle d'incidence local, avant et après la correction. Cependant, on remarque déjà une nette amélioration visuelle des images, qui permettrait une meilleure interprétation du type d'utilisation des sols.

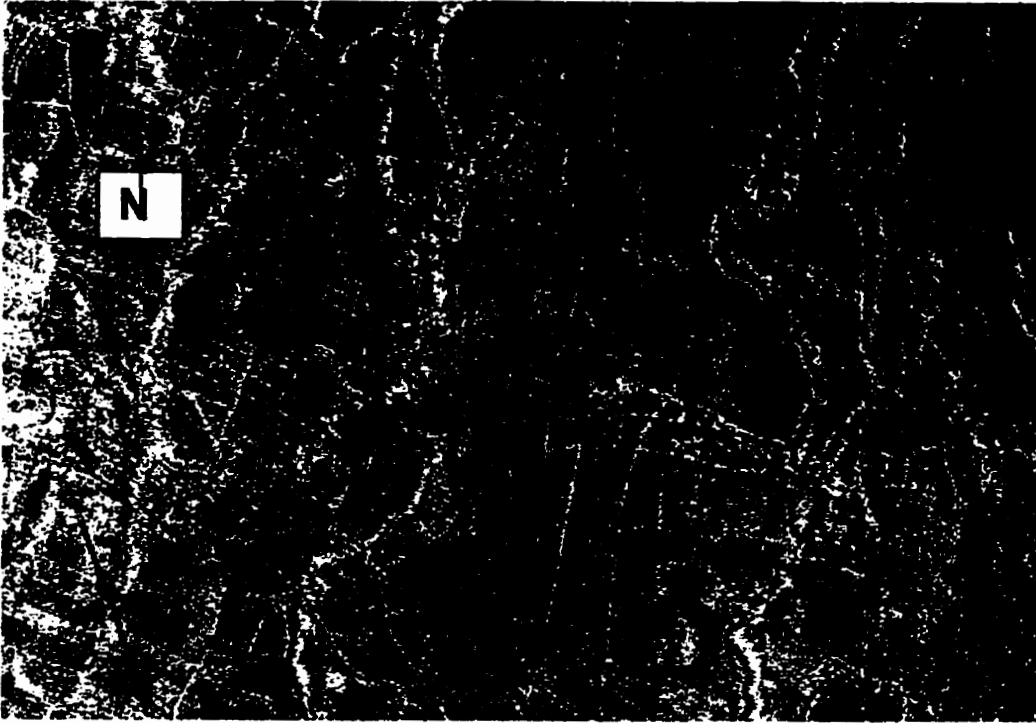


a)

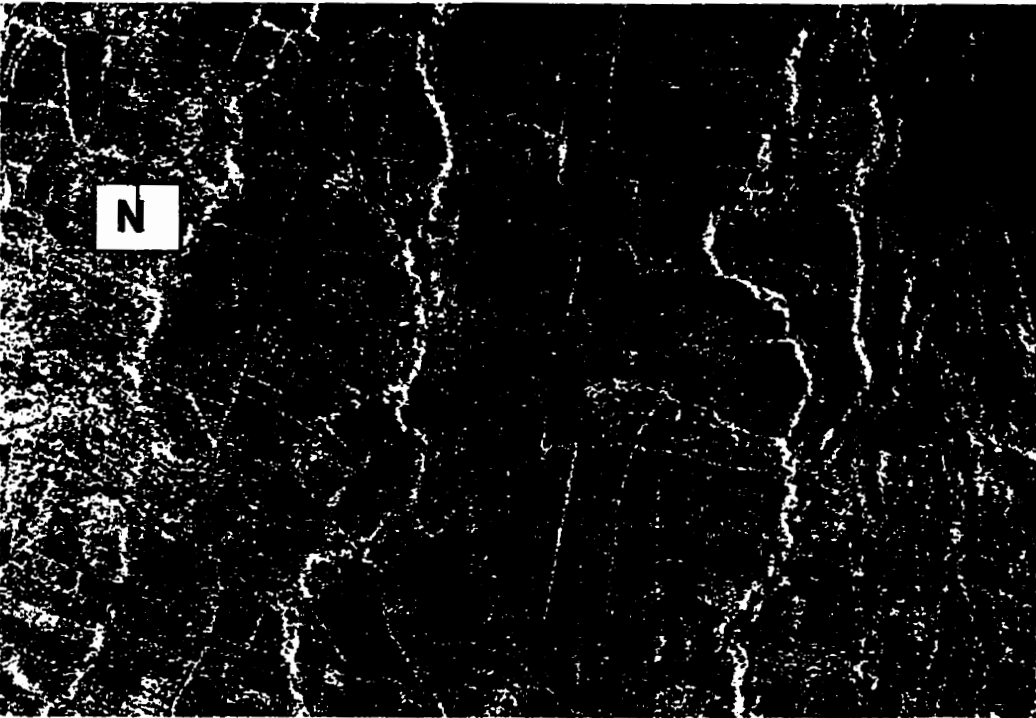


b)

Figure 17 : Portion du site de Tierra Blanca, illustrée par la sous-image de la ligne 8.1 ( $\theta_{ref}$  entre  $75^\circ$  et  $76^\circ$ ), a) avant et b) après la correction topographique; polarisation HH en rouge, VV en bleu et en vert



a)



b)

Figure 18 : Site de Tierra Blanca, illustré par la sous-image de la ligne 8.2 ( $\theta_{ref}$  entre  $53^\circ$  et  $64^\circ$ ), a) avant et b) après la correction topographique; HH en rouge, VV en bleu et en vert



a)



b)

Figure 19 : Site de Tierra Blanca, illustré par la sous-image de la ligne 8.3 ( $\theta_{ref}$  entre  $68^\circ$  et  $73^\circ$ ) a) avant et b) après la correction topographique; HH en rouge, VV en bleu et en vert

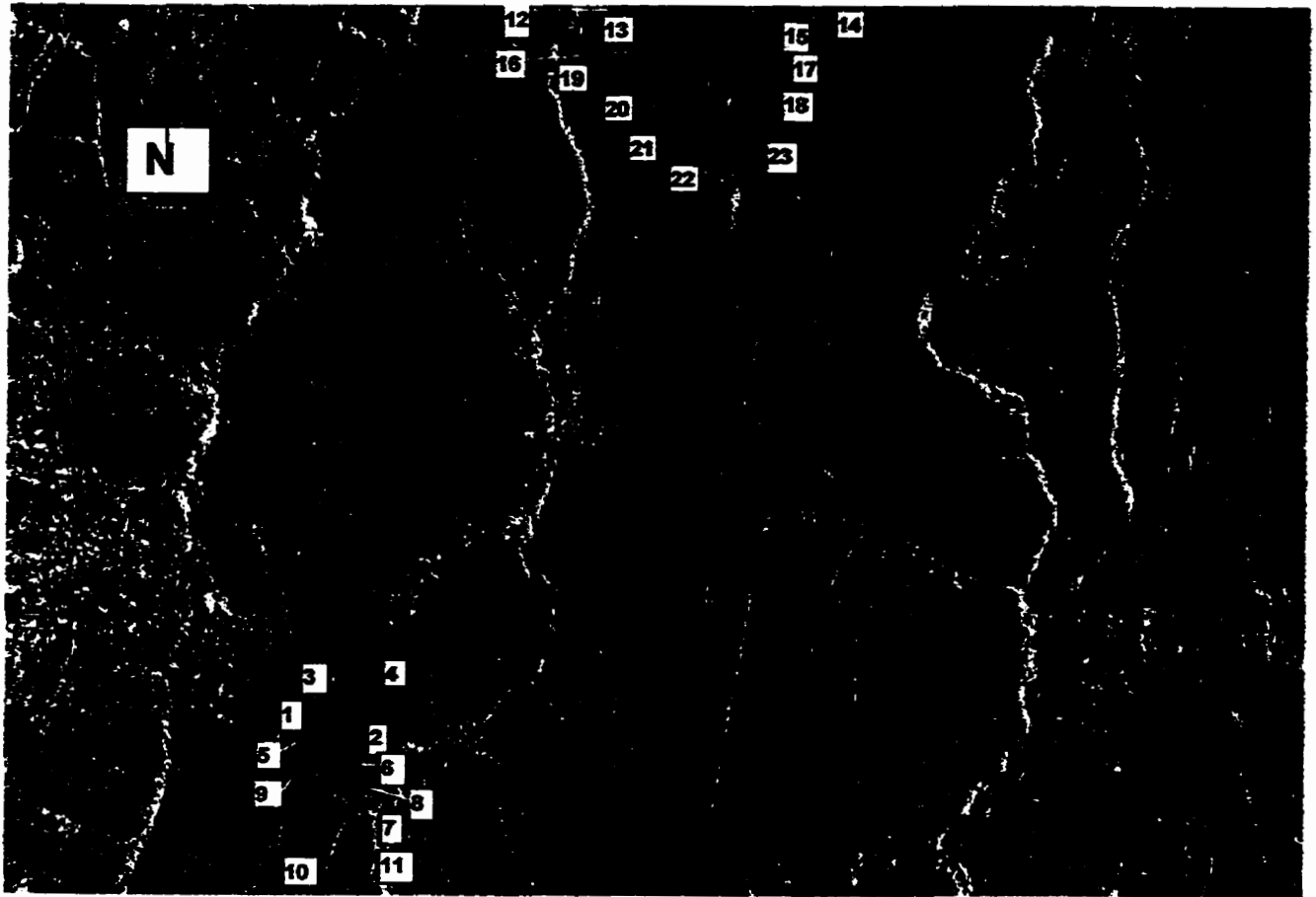
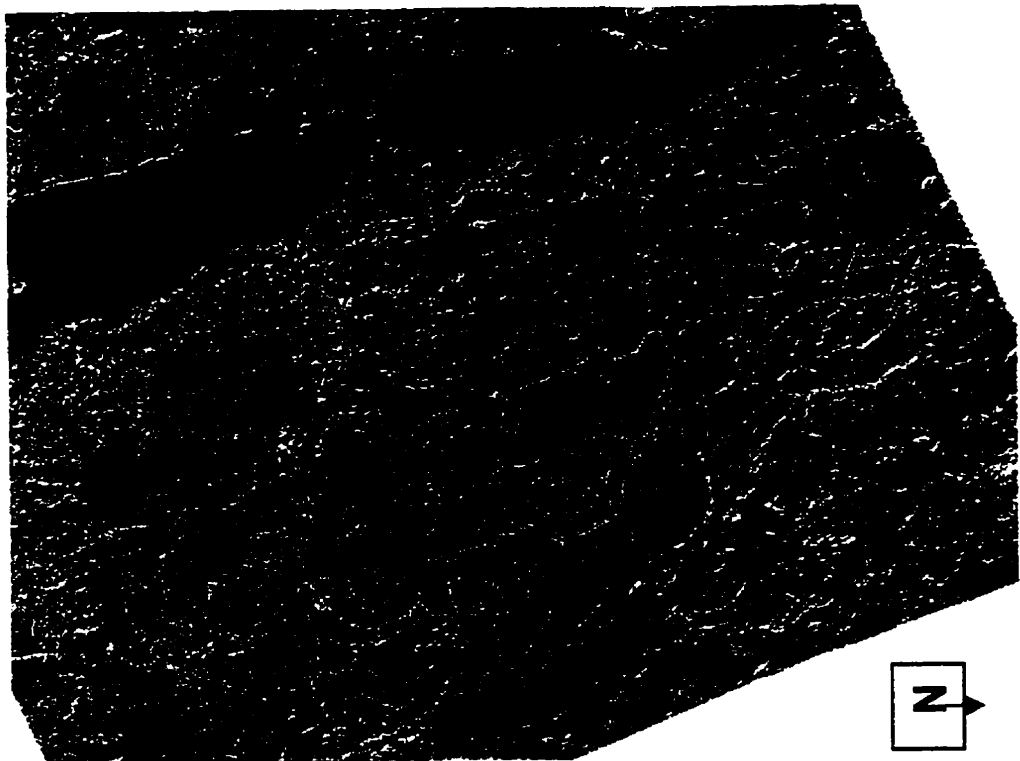
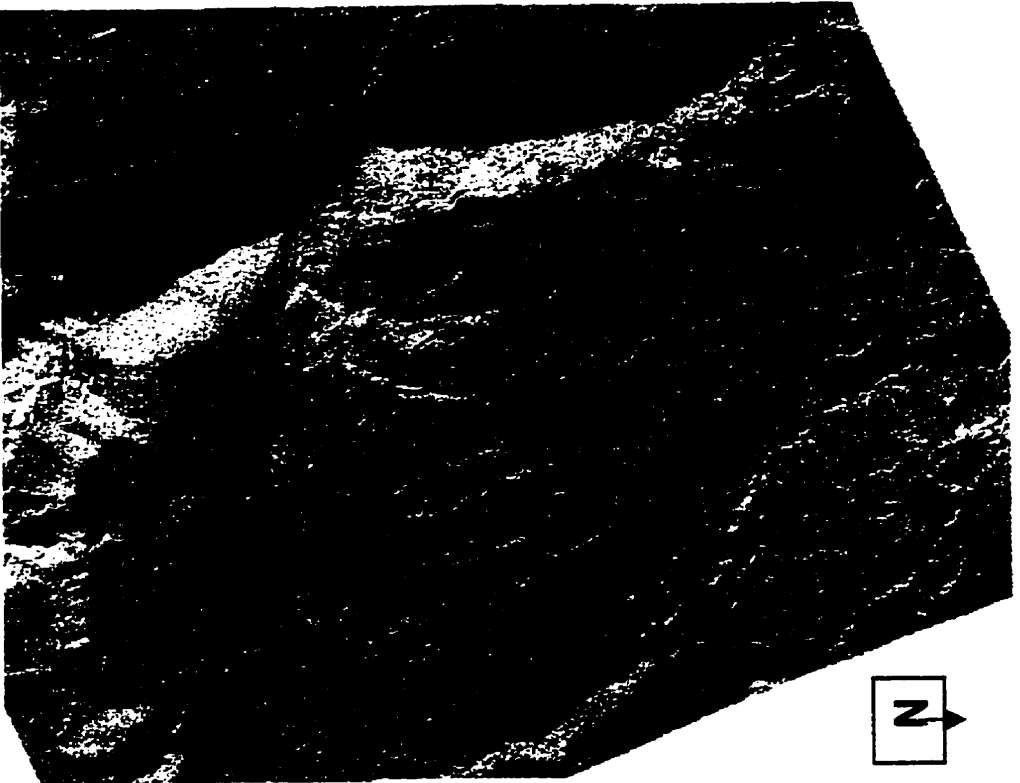


Figure 20 : Numérotation des parcelles étudiées pour le site de Tierra Blanca, sous-image de la ligne 8.2 ( $\theta_{ref}$  entre  $53^\circ$  et  $64^\circ$ ), après la correction topographique



a)  
Figure 21 : Site de Juan Viñas, illustré par les sous-images de la ligne 8.2 ( $\theta_{\text{sat}}$  entre  $72^\circ$  et  $75^\circ$ ). a) avant et b) après la correction topographique; HH en rouge, V en bleu et en vert, délimitation des parcelles en jaune

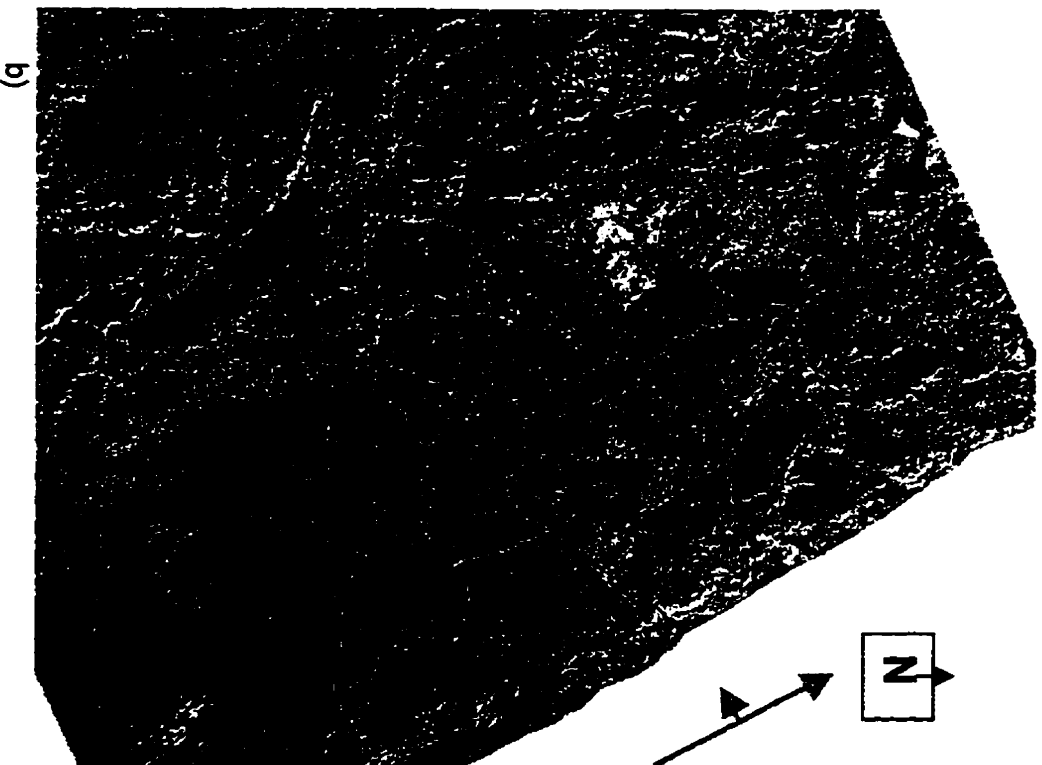
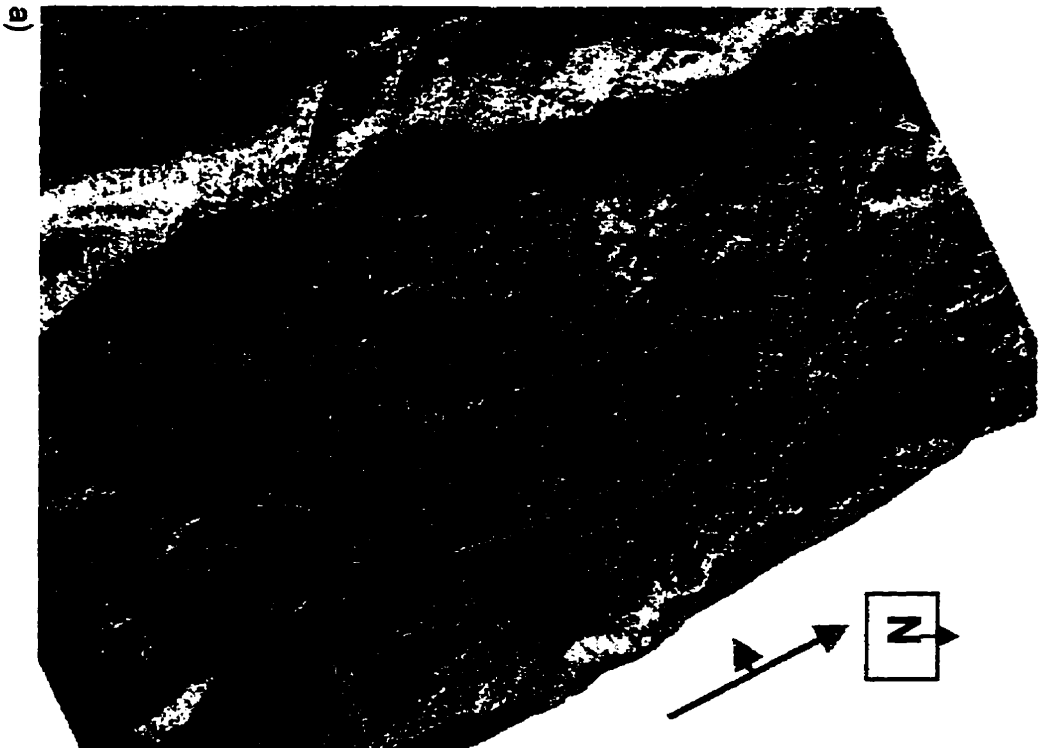


Figure 22 : Site de Juan Vinas, illustré par la sous-image de la ligne 8.3 ( $\theta_{sc}$  entre  $45^\circ$  et  $59^\circ$ ). a) avant et b) après la correction topographique; HH en rouge, VV en bleu et en vert, délimitation des parcelles en jaune



a)  
b)  
Figure 23 : Masques utilisés pour l'extraction des moyennes pour chaque parcelle, a) ligne 8.2 et b) ligne 8.3, site de Juan Viñas



Les figures 24, 25 et 26 présentent le site de Taboga, illustré par les images des lignes de vol 7.1, 7.2 et 4.1. Ces trois images diffèrent principalement l'une de l'autre par les angles d'incidence avec lesquels elles couvrent le site d'étude. Rappelons que la ligne 7.2 présente des angles d'incidence intermédiaires, entre  $13^\circ$  et  $63^\circ$ , la ligne 7.1 des angles élevés, entre  $62^\circ$  et  $73^\circ$ , et la ligne 4.1 des angles très élevés, entre  $70^\circ$  et  $79^\circ$ . Les fourchettes d'angles d'incidence couvrant les parcelles étudiées sont plus étroites que celles-ci. Aucune correction radiométrique n'a été appliquée pour tenir compte du relief, les parcelles étant situées en terrain plat.

La ligne 4.1 diffère des deux autres par la direction de visée, la résolution spatiale, et par le fait qu'elle ait été acquise trois jours plus tôt. Sa direction de visée est de  $30^\circ$  alors qu'elle est de  $283^\circ$  pour les lignes 7.1 et 7.2.

Le seul relief présent dans l'image provient d'une petite chaîne de collines, mais toutes les parcelles de canne à sucre étudiées sont situées en terrain très plat. L'angle d'incidence local a donc été supposé égal à l'angle d'incidence et calculé directement à partir de l'altitude de l'avion et de la portée oblique pour chaque colonne, ces dernières figurant dans les fichiers d'étalonnage fournis par le CCT.

La figure 27 présente le masque utilisé pour l'extraction des paramètres de l'image ; il s'agit du même masque pour les trois images. Nous n'avons pas considéré les parcelles qui se trouvent dans les 500 premières colonnes de l'image de la ligne 7.2, près du nadir, et celles qui tombent partiellement hors de l'image de la ligne 7.1.

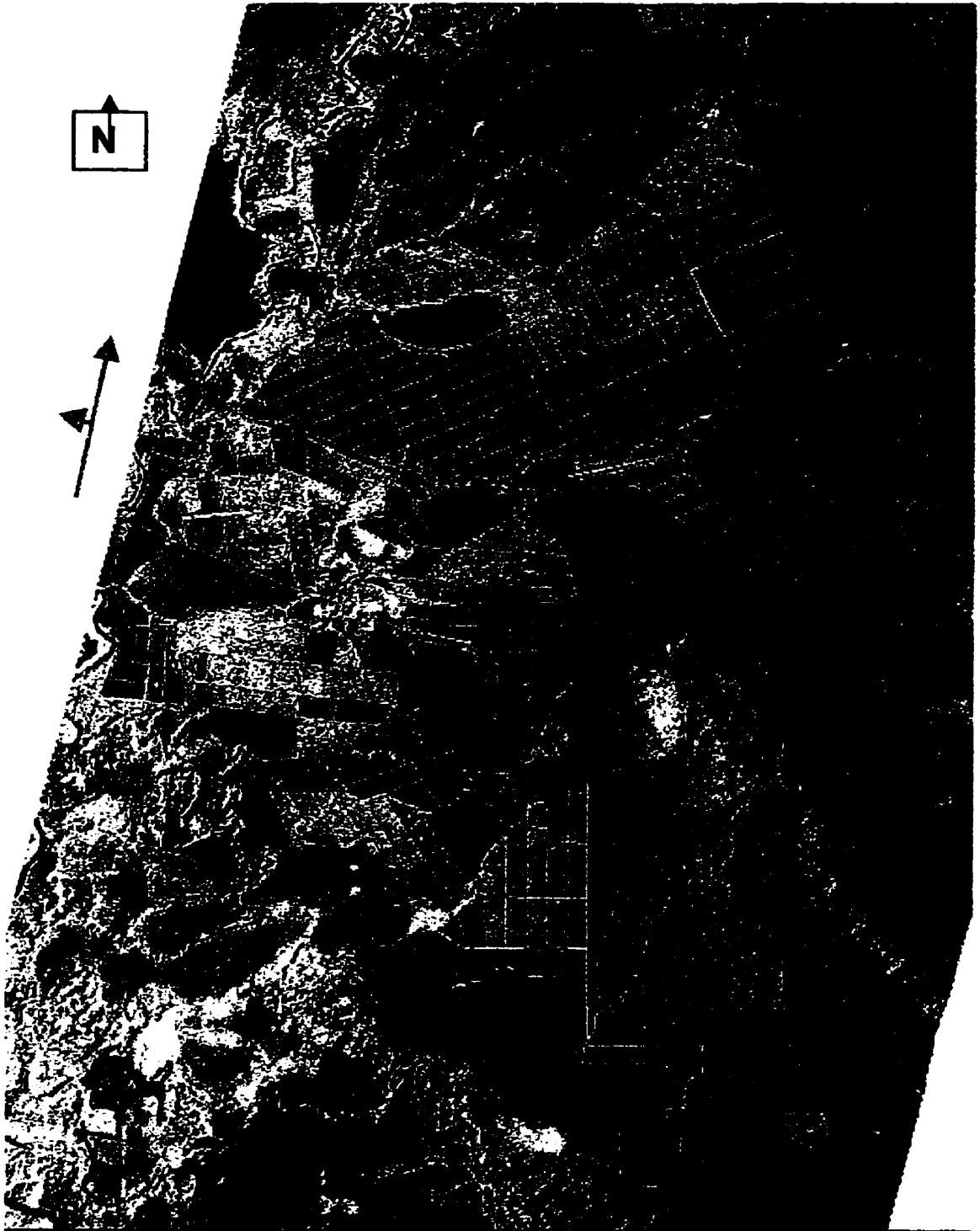


Figure 24 : Site de Taboga, illustré par la sous-image de la ligne 7.1 en composition colorée, HH en rouge, VV en bleu et en vert, délimitation des parcelles en jaune. ( $\theta_{ref}$  entre  $62^\circ$  et  $73^\circ$ )



Figure 25 : Site de Taboga, illustré par la sous-image de la ligne 7.2 en composition colorée, HH en rouge, VV en bleu et en vert, délimitation des parcelles en jaune ( $\theta_{ref}$  entre  $13^\circ$  et  $63^\circ$ )

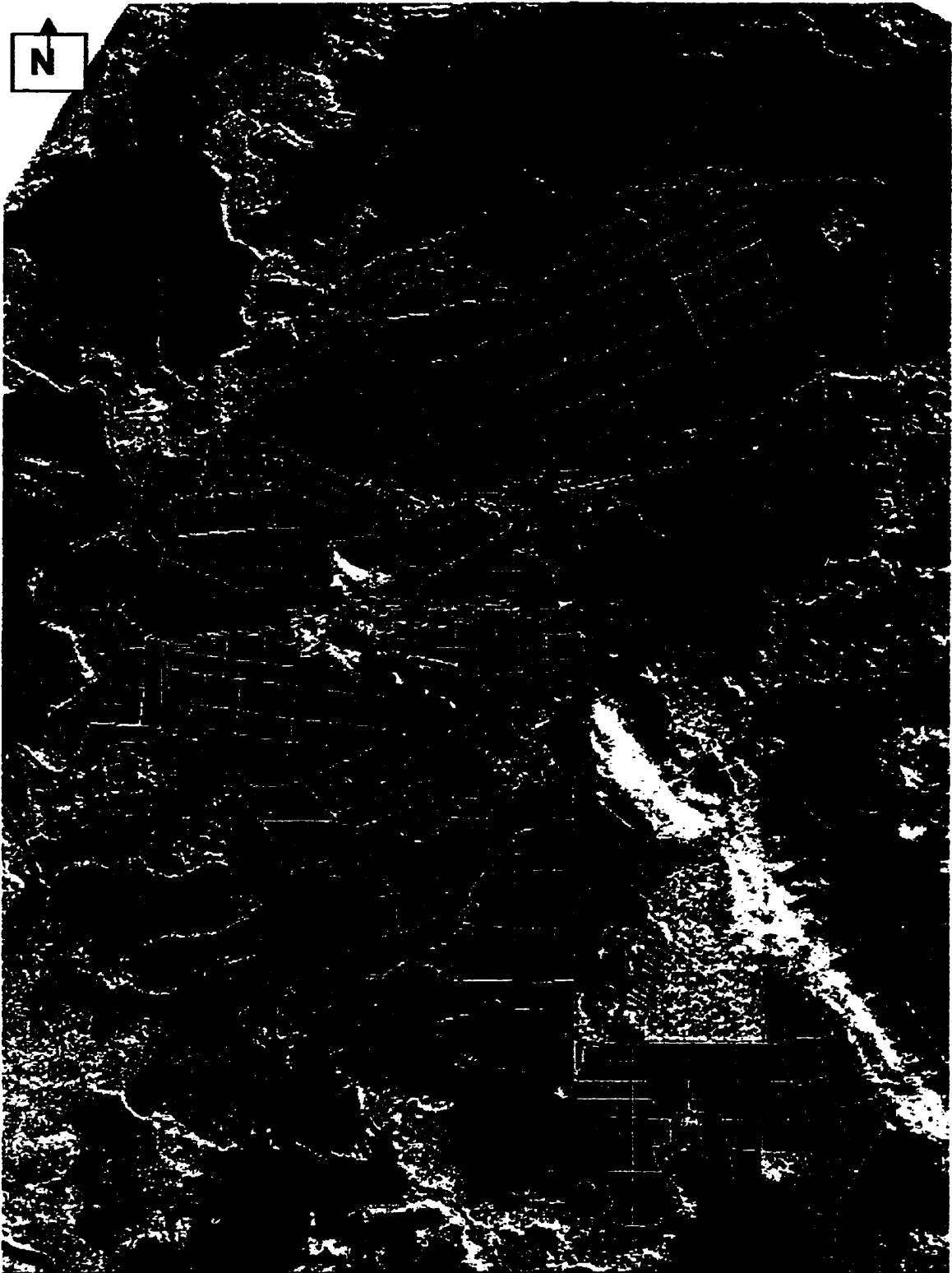


Figure 26 : Site de Taboga, illustré par la sous-image de la ligne 4.1 en composition colorée, HH en rouge, VV en bleu et en vert, délimitation des parcelles en jaune ( $\theta_{ref}$  entre  $70^\circ$  et  $79^\circ$ )



Figure 27 : Masque utilisé pour l'extraction des paramètres des images du site de Taboga, appliqué à la sous-image de la ligne 7.1

#### **4. COMPARAISON DES CAPACITÉS DISCRIMINANTES DES IMAGES ACQUISES AVEC DIFFÉRENTS ANGLES D'INCIDENCE ET POLARISATIONS**

Le travail présenté dans ce chapitre a pour but comparer les images acquises à différents angles d'incidence et polarisations sur un même site, en ce qui a trait à la discrimination entre les stades de croissance généraux des cultures, dans une optique de conservation des sols. Elle a aussi pour objectif de comparer les résultats obtenus sur différents sites dans le but d'évaluer qualitativement l'effet de la teneur en eau des sols sur ces capacités discriminantes. Nous nous intéressons surtout à la possibilité de distinguer les parcelles de sol nu et celles qui sont couvertes par la végétation. Nous observons, pour trois sites différents, la relation entre le coefficient de rétrodiffusion moyen mesuré pour chaque parcelle et le stade de croissance, pour les images de différentes lignes de vol. Les différentes images ayant été acquises presque au même moment, ce sont les différents stades de croissance présents au moment de l'acquisition des images qui sont utilisés pour étudier l'évolution du coefficient de rétrodiffusion au cours de la croissance.

Les trois sites étudiés ont été décrits au chapitre 2 ; il s'agit des suivants :

- Tierra Blanca : 23 parcelles de cultures labourées sur lesquelles on a obtenu des données de terrain au moment de l'acquisition des images. De ces parcelles, 11 sont couvertes par les images des lignes 8.1, 8.2 et 8.3, les autres seulement par celles des lignes 8.2 et 8.3. Le terrain était relativement sec, la teneur en eau moyenne des parcelles échantillonnées était de  $0,12 \text{ g. cm}^{-1}$ .

- Juan Viñas : 99 parcelles de canne à sucre appartenant à l'entreprise Hacienda Juan Viñas S.A., qui exerce un suivi des coupes et des rendements obtenus pour chacune de ses parcelles. Le terrain était humide, la teneur en eau moyenne des parcelles échantillonnées était de  $0,45 \text{ g.cm}^{-1}$ .

- Site de Taboga : 199 parcelles de canne à sucre de la Hacienda Taboga S.A., couvertes par les lignes 4.1, 7.1 et 7.2, en terrain plat et sec. La teneur en eau des sols n'a pas été mesurée au moment de l'acquisition des images, mais il n'avait pas plu sur le site depuis plus de cinq jours. Les parcelles sont irriguées occasionnellement, mais nous ne disposons

pas de données sur les parcelles qui avaient été irriguées au moment de l'acquisition des images.

Dans les sections qui suivent, l'analyse des données extraites des images est traitée séparément et différemment pour les trois sites. Pour le site de Tierra Blanca, elle est plutôt constituée d'une série d'observations, étant donné que le nombre de parcelles étudiées pour chaque culture est très faible et limite l'analyse statistique. Au moyen de représentations graphiques, nous observons la variation du coefficient de rétrodiffusion moyen calculé sur chaque parcelle,  $\sigma^{\circ}$ , en fonction de la couverture végétale et la hauteur de la végétation, ces deux derniers paramètres ayant été évalués sur le terrain au moment de l'acquisition des images. Nous observons d'autre part la relation entre le coefficient de rétrodiffusion et l'angle d'incidence local  $\theta_{loc(t)}$  pour différents types de cultures et de sols nus.

Pour les sites de Juan Viñas et de Taboga, ce sont les données fournies par les entreprises de culture de canne à sucre qui ont permis de déterminer l'âge de la repousse de la canne à sucre pour les parcelles étudiées. La relation entre le  $\sigma^{\circ}$  moyen pour chaque parcelle et cet âge est observée au moyen de représentations graphiques. Les différentes configurations d'angle d'incidence et de polarisation sont comparées entre elles au niveau de la possibilité d'utiliser le coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^{\circ}$  pour distinguer des catégories de croissance, d'une part par le  $\sigma^{\circ}$  moyen des parcelles, et d'autre part par le  $\sigma^{\circ}$  des pixels.

Pour permettre les comparaisons basées sur le  $\sigma^{\circ}$  moyen des parcelles, et pour déterminer si la différence entre deux catégories était statistiquement significative, on a choisi le test non paramétrique de Kruskal-Wallis\* (voir Hammond et Mc Cullagh, 1978), qui est une forme simple d'analyse de variance. Contrairement au test très employé du  $t$  de Student (qui suppose que les valeurs mesurées pour deux populations ont une distribution normale et des variances égales), le test de Kruskal-Wallis calcule sa statistique  $H$  à partir du rang qu'occupent les différentes mesures des échantillons de deux ou plus catégories mis en ordre numérique. Lorsque le nombre d'échantillons par population est supérieur à 5,  $H$  suit la distribution du Chi-carré ( $\chi^2$ ) pour un nombre de degrés de liberté égal à un de moins que le nombre de populations comparées entre elles. Comme nous comparons toujours les catégories de croissance deux par deux, nous avons toujours un degré de liberté, et le  $\chi^2$

estimé peut servir de paramètre pour comparer entre elles d'une part les lignes de vol acquises à différents angles d'incidence, et d'autre part les polarisations.

Pour permettre la comparaison des capacités discriminantes des images au niveau de l'utilisation du  $\sigma^0$  des pixels, nous avons réalisé des mesures de divergence\* transformée entre les signatures\* des catégories comparées deux par deux. Dans ce chapitre, les signatures ont été calculées sur l'ensemble des pixels contenus dans toutes les parcelles de chaque catégorie, séparément pour chaque polarisation de chaque ligne de vol. Les signatures peuvent donc être représentées par la moyenne et l'écart-type du  $\sigma^0$  pour une image donnée. La divergence est simplement une mesure de la distance entre les moyennes de deux catégories, pondérée par la covariance entre celles-ci. La quantité calculée ici est la divergence transformée, dont la méthode de calcul se trouve dans le glossaire à l'annexe B. Comme la discrimination entre signatures est beaucoup affectée par la variance causée par le chatoiement, celui-ci a été réduit par l'application d'un filtre de la médiane\* avec une fenêtre de taille 5 x 5. Ceci permet de tirer des conclusions plus réalistes sur la possibilité d'utiliser les images pour une séparation automatique des pixels, étape qui est généralement précédée d'un filtrage du chatoiement.

#### 4.1 SITE DE TIERRA BLANCA

Rappelons que les sous-images étudiées sur ce site sont présentées aux figures 17, 18 et 19, et que la répartition des parcelles est présentée à la figure 20. En plus de l'appréciation de différentes tonalités correspondant à différents types de couverture, nous remarquons que ces images à haute résolution mettent en évidence les barrières d'arbres entre les parcelles et la présence de la forêt riveraine le long des cours d'eau. Les parcelles appartiennent à plusieurs propriétaires et nous ne disposons pas des données de date de semence. Nous avons cependant estimé, sur 23 parcelles au moment de l'acquisition des images, une série de paramètres incluant la rugosité (qualitative), la hauteur des plants, la couverture végétale, l'orientation des rangs, la densité des plants, la teneur en eau gravimétrique (pourcentage de la masse d'eau par rapport à la masse de sol sec) et la teneur en eau volumique du sol. Le tableau 2 présente les données mesurées sur le terrain pour les parcelles de la figure 20.



Tableau 2 : Caractéristiques des parcelles étudiées pour le site de Tierra Blanca.

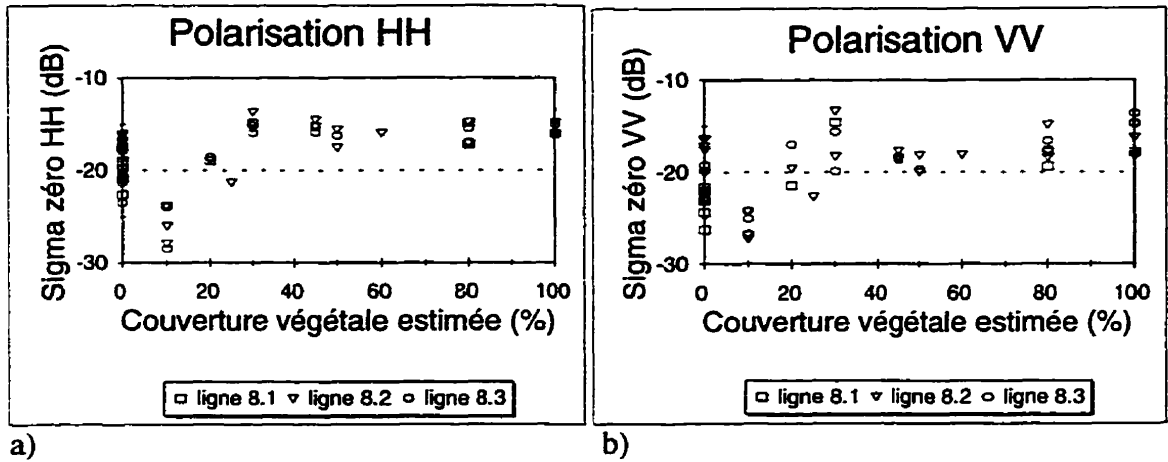
Parcelle	Nombre de pixels	Type de couverture du sol	Rugosité	Hauteur Végétation (cm)	Orientation périodicité (°)	Hauteur périodicité (cm)	Couverture végétale (%)	Couverture résidus (%)	Humidité (sol) Gravimétrique (%)	Humidité (sol) Volumétrique (g.cm <sup>-3</sup> )
1	132	Herbes et haricots	moyenne	50	--	--	100	--	14	0,10
2	159	Sol nu avec résidus	moyenne	0	--	--	0	50	13	0,09
3	123	Oignons en séchage	--	30	--	--	80	--	13	0,09
4	466	Sol nu, mottes de terre	élevée	0	--	--	0	3	12	0,07
5	186	Carottes	périodique	25	160	15	20	0	15	0,11
6	174	Sol nu (carottes en préparation)	périodique	0	160	15	0	0	16	0,1
7	148	Oignons	périodique	30	170	15	30	10	15	0,12
8	132	Carottes	périodique	35	175	15	80	0	15	0,11
9	128	Sol nu labouré	élevée	0	45	15	0	3	21	0,15
10	1480	Sol nu	moyenne	0	--	5	0	--	17	0,12
11	388	Sol nu, mottes de terre	élevée	0	--	--	0	3	31	--
12	846	Sol nu lisse, mauvaises herbes	lisse	15	--	--	5	3	12	0,09
13	777	Sol nu lisse, mauvaises herbes	lisse	15	100	--	5	3	12	0,09
14	356	Jachère dense	moyenne	70	--	--	100	--	--	--
15	311	Jachère dense	moyenne	70	--	--	100	--	--	--
16	999	Pommes de terre	périodique	20	70	20	30	3	22	0,16
17	317	Pommes de terre	périodique	25	82	17	45	3	--	--
18	473	Pommes de terre	périodique	25	68	17	45	3	--	--
19	405	Pommes de terre	périodique	20	75	25	50	3	25	0,17
20	494	Pommes de terre	périodique	20	75	25	50	3	25	0,17
21	311	Pommes de terre (jeunes)	périodique	14	160	20	25	3	19	0,14
22	308	Jachère + carottes	moyenne	90	75	0	60	20	16	0,11
23	281	Sol nu, herbes, léger labour	moyenne	10	--	15	10	3	25	0,16

#### 4.1.1 Dépendance du coefficient de rétrodiffusion moyen sur chaque parcelle envers la hauteur des plants et la couverture végétale estimée

Les graphiques de la figure 28 présentent, en a) et b), le  $\sigma^{\circ}$  moyen des parcelles (après la correction topographique décrite à la section 3.3) en fonction de la hauteur des plants, et en c) et d) en fonction de la couverture végétale vivante. Les données des parcelles 20, 21 et 22 ont été retirées pour la ligne 8.3, car elles étaient dans l'ombre. Les cadres a) et c) se rapportent à la polarisation HH et b) et d) à la polarisation VV. Les parcelles correspondant à une couverture végétale de 10% correspondent à des sols nus qui avaient été labourés il y a plusieurs semaines, qui présentent une faible couverture de courtes mauvaises herbes et qui sont plus lisses que les sols récemment labourés de couverture végétale nulle. Ces parcelles présentent un coefficient de rétrodiffusion faible. Pour les trois images, il se produit une augmentation rapide de la rétrodiffusion en fonction de la hauteur de la végétation, mais il ne se produit plus d'augmentation de  $\sigma^{\circ}$  à partir d'une couverture végétale de 30% et une hauteur de 30 cm. La variabilité observée est plutôt due à une variation dans la structure des cultures. La ligne 8.3 VV présente une valeur élevée de  $\sigma^{\circ}$  pour une couverture de 100% en raison de la réponse particulièrement forte des jachères des parcelles 14 et 15 dans cette polarisation. En raison de la hauteur (30 cm) des plants, la parcelle d'oignons produit une rétrodiffusion élevée pour les trois lignes de vol, bien que ne présentant qu'une couverture végétale de 30%, et malgré une orientation des rangs presque parallèle ( $14^{\circ}$ ) à celle de la visée. La valeur de  $\sigma^{\circ}$  obtenue pour la ligne 8.2 chez la parcelle 21 (pommes de terre jeunes) est presque aussi faible que celles du sol nu moyennement rugueux de la parcelle 23.

Les parcelles de sol nu présentent une grande variation des valeurs de  $\sigma^{\circ}$  moyen par parcelle. Ceci n'est pas surprenant puisque les pratiques de labour produisent une grande variété de rugosités de surface, même à l'intérieur de chaque parcelle. Remarquons que la variance des moyennes calculées pour chaque parcelle diminue en fonction du nombre d'échantillons (les pixels) considérés. On aurait sans doute eu moins de variation si les parcelles avaient été plus grandes. Les parcelles rugueuses présentent des valeurs élevées pour la ligne 8.2 dont les angles d'incidence locaux étaient les plus faibles (entre  $52^{\circ}$  et  $67^{\circ}$ ).

### Coefficient de rétrodiffusion en fonction de la couverture végétale



### Coefficient de rétrodiffusion en fonction de la hauteur des plants

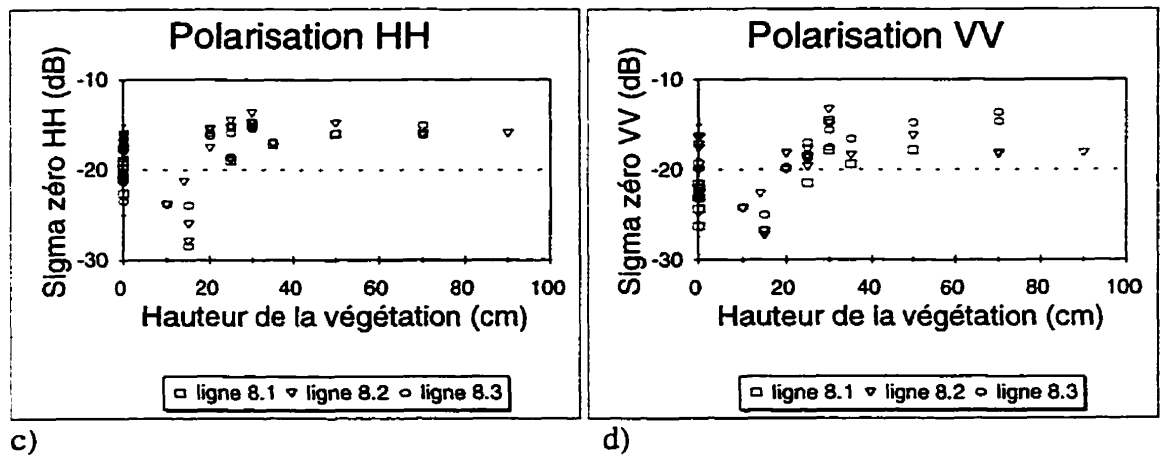


Figure 28 : Coefficient de rétrodiffusion après correction topographique en fonction de paramètres liés au stade de croissance, site de Tierra Blanca. a)  $\sigma_{HH}^0$  vs. couverture végétale vivante, b)  $\sigma_{VV}^0$  vs. couverture végétale; c)  $\sigma_{HH}^0$  vs. hauteur des plants; d)  $\sigma_{VV}^0$  vs. hauteur des plants

#### 4.1.2 Effet de l'angle d'incidence local

La figure 29 montre le  $\sigma^{\circ}$  moyen par parcelle, calculé avant la correction topographique, en fonction de l'angle d'incidence local  $\theta_{loc(t)}$  pour : a) le sol nu moyennement rugueux (parcelles 2, 10 et 23) et le sol nu très rugueux (4, 9 et 11), b) le sol nu lisse (6, 12 et 13), c) les pommes de terre (16, 17, 18, et 19), d) la jachère (14 et 15), e) les carottes (5 et 8) et f) les oignons (parcelle 7). La figure 30 montre la même mise en relation pour le  $\sigma^{\circ}$  moyen calculé après la correction radiométrique. Les points pour lesquels  $\theta_{loc(t)}$  est entre  $52^{\circ}$  et  $67^{\circ}$  correspondent à la ligne 8.2, et ceux pour lesquels il est entre  $76^{\circ}$  et  $84^{\circ}$ , aux lignes 8.3 et 8.1. De façon générale,  $\theta_{loc(t)}$  de la ligne 8.1 est légèrement supérieur à celui de la ligne 8.3, sauf pour les parcelles 2, 4, 9 et 10. On remarque que la correction radiométrique des effets du relief diminue beaucoup la dépendance de  $\sigma^{\circ}$  en fonction de  $\theta_{loc(t)}$  et rapproche les coefficients de rétrodiffusion mesurés pour les images des différentes lignes de vol. Cette correction compense pour les effets du relief mais conserve les effets de la variation de l'angle d'incidence sur la largeur d'une image et entre deux images. Pour éviter une surcorrection topographique, nous avons posé une limite de 0,995 au sinus de  $\theta_{loc(t)}$ , calculé selon la méthode décrite à la section 3.3, ce qui fait que la valeur maximum mesurable pour  $\theta_{loc(t)}$  est de  $84,26^{\circ}$ .

Alors que le sol nu et rugueux présente des valeurs relativement élevées de  $\sigma^{\circ}$  pour la ligne 8.2 qui diminuent avec une augmentation de  $\theta_{loc(t)}$ , le sol nu lisse présente déjà des valeurs très faibles de  $\sigma^{\circ}$  pour des valeurs de  $\theta_{loc(t)}$  entre  $52^{\circ}$  et  $67^{\circ}$ . Ceci concorde avec la notion de critère de rugosité, selon laquelle l'écart-type de la hauteur (souvent appelé hauteur RMS) à partir de laquelle une surface sera considérée rugueuse diminue en fonction du cosinus de l'angle d'incidence local (Cosgriff *et al.*, 1960, voir Beaulieu *et al.*, 1995, pour une synthèse des critères de rugosité). Plus l'angle d'incidence est élevé, plus les mottes de terre doivent être grosses pour que le sol agisse comme une surface rugueuse. Chez les sols moyennement rugueux, certaines parcelles ont une rétrodiffusion faible à tous les angles d'incidence, mais les parcelles de sol très rugueux présentent une nette diminution de  $\sigma^{\circ}$  avec l'angle d'incidence local. Pour les sols nus rugueux, aux angles moyens, les valeurs mesurées pour  $\sigma^{\circ}_{HH}$  sont presque égales à celles de  $\sigma^{\circ}_{VV}$ . Cependant, aux angles d'incidence élevés,  $\sigma^{\circ}_{HH}$  est plus élevé que  $\sigma^{\circ}_{VV}$ . Les courbes types présentées par Ulaby

et Dobson (1988, page 27), qui illustrent la variation de  $\sigma^{\circ}$  en fonction de l'angle d'incidence local pour une surface aléatoire, montrent qu'aux angles élevés,  $\sigma^{\circ}_{VV}$  devrait être au contraire plus élevé que  $\sigma^{\circ}_{HH}$ . Le fait que nous observions un comportement différent des courbes types présentées par Ulaby et Dobson pourrait provenir du fait que nos surfaces de sol nu ne sont pas aléatoires, ou encore du comportement angulaire du capteur. Les résultats de l'étalonnage présentés à la figure 7 ne montrent toutefois pas que  $\sigma^{\circ}_{HH}$  soit supérieur à  $\sigma^{\circ}_{VV}$  pour les colonnes les plus élevées des lignes de vol 8.2 et 8.3. Il ne se produit pas non plus d'augmentation de l'écart entre  $\sigma^{\circ}_{HH}$  et  $\sigma^{\circ}_{VV}$  en fonction de  $\theta_{loc(t)}$  pour la pomme de terre et les oignons. Cependant, le comportement observé par Ulaby et Dobson (1988) spécifiquement pour le sol nu et le roc en bande C (page 131 de leur volume) ne montre pas de différence entre la diminution de  $\sigma^{\circ}_{HH}$  et  $\sigma^{\circ}_{VV}$  jusqu'à 50°, angle à partir duquel s'arrêtent leurs observations. D'autre part, à partir de résultats de simulations, Autret *et al.* (1989) ont remarqué que le rapport de polarisation  $\sigma^{\circ}_{HH}/\sigma^{\circ}_{VV}$  augmente avec l'angle d'incidence pour les sols nus, et ce plus rapidement pour les sols secs que pour les sols humides. Il faut donc considérer les courbes types présentées par Ulaby et Dobson avec prudence pour les sols nus.

Comme le montrent les graphiques de la figure 30, les cultures présentent presque toujours un  $\sigma^{\circ}$  supérieur à -20 dB, sauf en VV pour les carottes à un angle d'incidence local de 84°. Le  $\sigma^{\circ}_{HH}$  des pommes de terre varie autour de -15 dB, et leur  $\sigma^{\circ}_{VV}$  autour de -18 dB. Ce sont les oignons qui ont montré la rétrodiffusion la plus forte en VV, celle-ci étant égale à celle de HH, autour de -15 dB. La jachère présente un  $\sigma^{\circ}_{HH}$  autour de -16 dB ;  $\sigma^{\circ}_{VV}$  est passé de -19 à -15 dB entre 60° et 84° d'angle d'incidence local. Les sols nus lisses ont présenté des coefficients de rétrodiffusion inférieurs à -20 dB pour les trois lignes de vol. Cependant, la plupart des sols nus rugueux et moyennement rugueux ont présenté un  $\sigma^{\circ}$  autour de -17 dB pour les angles moyens entre 55° et 65°, ce qui occasionne une confusion avec les cultures. Deux de ces parcelles ont montré un coefficient de  $\sigma^{\circ}_{HH}$  autour de -18 dB même à des angles élevés, la 2 (sol nu avec résidus) pour la ligne 8.3, et la 4 (sol nu très rugueux) pour la ligne 8.1. Mentionnons que la projection de la pente de la parcelle 4 est de 5° vers l'antenne pour la ligne 8.1, et qu'il est possible que la correction topographique n'ait pas totalement annulé l'effet de cette inclinaison.

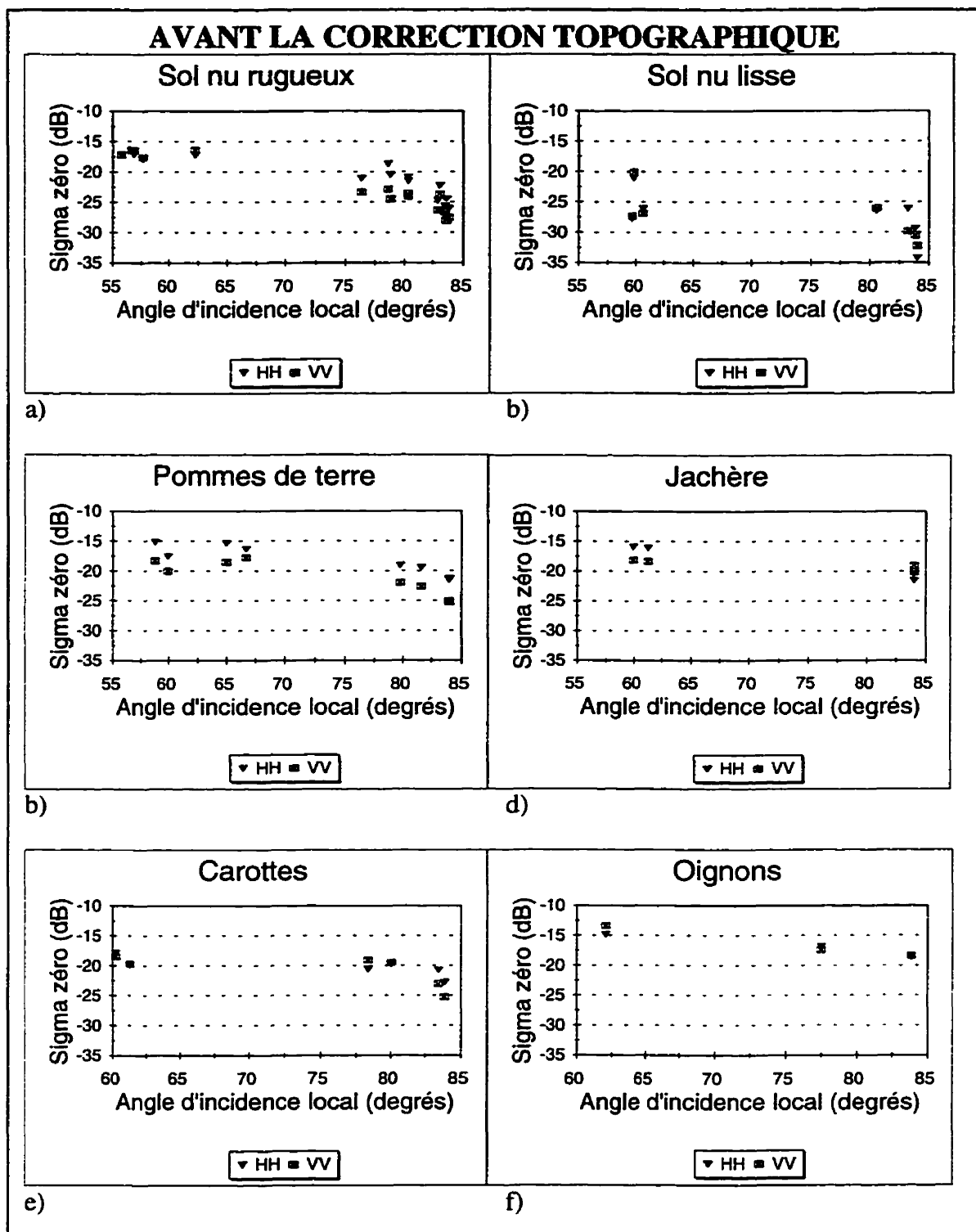


Figure 29 : Coefficient de rétrodiffusion avant la correction topographique en fonction de l'angle d'incidence local pour les sols nus et les cultures étudiées, site de Tierra Blanca. a) sols nus rugueux, b) sols nus lisses, c) pommes de terre, d) jachère, e) carottes, f) oignons.

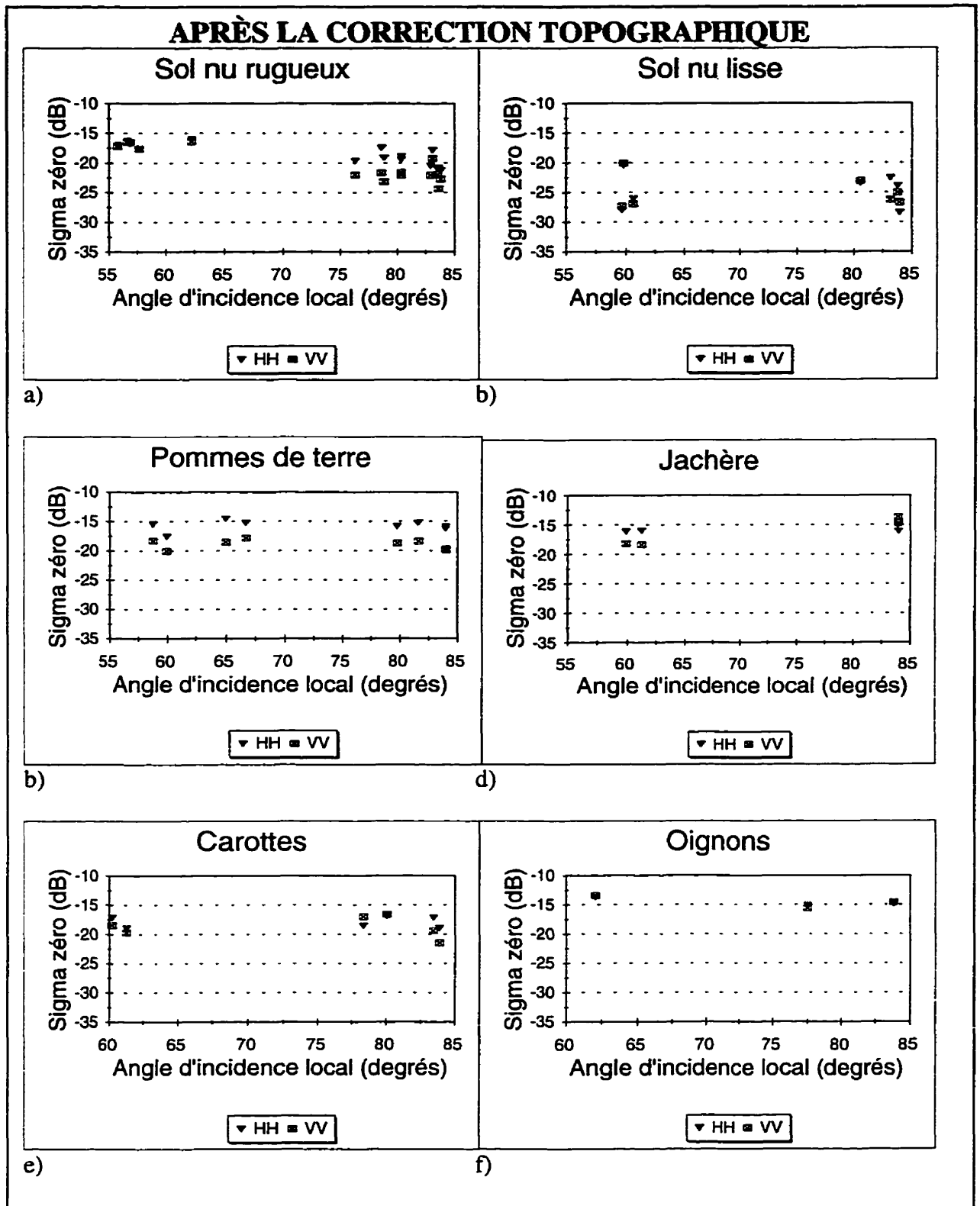


Figure 30 : Coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^0$  après correction radiométrique en fonction de l'angle d'incidence local pour les sols nus et les cultures étudiées, site de Tierra Blanca. a) sols nus rugueux, b) sols nus lisses, c) pommes de terre, d) jachère, e) carottes, f) oignons

La pomme de terre montre peu de variation de la rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence local. HH est systématiquement supérieur à VV, avec une différence de 2 à 3 dB. L'oignon montre une légère diminution du coefficient de rétrodiffusion avec  $\sigma_{HH}^{\circ}$  égal à  $\sigma_{VV}^{\circ}$ . La jachère montre peu de variation en HH mais une grande augmentation en VV.  $\sigma_{HH}^{\circ}$  est supérieur à  $\sigma_{VV}^{\circ}$  (de 2 à 3 dB) autour de 60°, alors qu'il est inférieur (d'environ 1.5 dB) pour des angles approchant 84°.

L'observation des graphiques de la figure 30 suggère que les contrastes entre sols nus et les cultures augmente avec  $\theta_{loc(t)}$  pour les sols nus rugueux. Autour de 60°, la rétrodiffusion des sols nus rugueux atteint -17 dB et peut donc être confondue avec celle de la végétation. Comme une augmentation de  $\theta_{loc(t)}$  semble entraîner une diminution plus rapide de  $\sigma^{\circ}$  chez les sols nus que chez les cultures étudiées, elle entraîne aussi une augmentation du contraste entre les deux types de surfaces. L'utilisation d'un modèle de correction topographique totalement adapté à chaque type de surface amoindrirait les contrastes entre ces surfaces.

#### 4.1.3 Distinction entre catégories

Le nombre de parcelles par catégorie est trop faible pour réaliser avec confiance des tests statistiques. Cependant, en observant les images et les graphiques des sections précédentes, on voit que la rugosité des sols nus peut compromettre la possibilité de les distinguer des parcelles de végétation pour des valeurs intermédiaires de  $\theta_{loc(t)}$  (entre 52° et 67°) à cause de leur rétrodiffusion élevée. Cette distinction devient possible aux  $\theta_{loc(t)}$  plus élevés, (entre 76° et 84°). Les sols nus lisses ont pu être distingués de la majorité des parcelles bien couvertes par la végétation pour toutes les lignes de vol par un simple seuillage appliqué au  $\sigma^{\circ}$ .moyen de chaque parcelle. Le seuil considéré était la valeur maximum  $\sigma^{\circ}$  obtenue pour ce groupe de parcelles, et était différent pour chaque ligne de vol et chaque polarisation. Les parcelles de sol nu moyennement rugueux ont pu être ainsi séparés des parcelles protégées par la végétation (couverture végétale supérieure à 30%) pour les deux polarisations de la ligne 8.1 ( $\theta_{loc(t)}$  entre 79° et 84°) et pour la polarisation HH de la ligne 8.3 ( $\theta_{loc(t)}$  entre 76° et 84°). Cependant, pour cette dernière ligne de vol,



deux parcelles de pommes de terre ont montré un  $\sigma_{VV}^{\circ}$  inférieur à la valeur maximum de  $\sigma_{VV}^{\circ}$  pour ce groupe des sols nus moyennement rugueux. Pour la ligne 8.2 ( $\theta_{loc(t)}$  entre 52° et 67°), un seuillage de la valeur moyenne de  $\sigma^{\circ}$  des parcelles occasionnait une confusion entre les parcelles de sol nu moyennement rugueux et 2 parcelles de végétation en HH, et 9 en VV. Les meilleurs résultats obtenus ici avec la polarisation HH se doivent à la plus forte rétrodiffusion des pommes de terres pour cette polarisation. Les parcelles de sol nu très rugueux ont pu être séparées de toutes les parcelles couvertes de végétation pour les  $\theta_{loc(t)}$  élevés des lignes 8.1 et 8.3, mais se confondaient avec 3 parcelles couvertes de végétation pour les angles d'incidence intermédiaires de la ligne 8.2HH et 9 parcelles pour la ligne 8.2 VV.

Les données sont insuffisantes pour permettre de développer des critères permettant de distinguer les cultures les unes des autres. Cependant les contrastes entre polarisations dépendent du type de culture. Par exemple, les pommes de terre ont montré des valeurs de  $\sigma_{HH}^{\circ}$  supérieures à  $\sigma_{VV}^{\circ}$  pour tous les angles d'incidence étudiés, alors que les oignons ont montré des valeurs similaires de  $\sigma^{\circ}$  pour les deux polarisations. La jachère a montré un  $\sigma_{VV}^{\circ}$  supérieur à  $\sigma_{HH}^{\circ}$  pour des angles d'incidence locaux de 84°.

#### 4.1.4 Résumé des résultats pour le site de Tierra Blanca

Le sol nu rugueux a montré une plus grande sensibilité à l'effet de  $\theta_{loc(t)}$  que ne l'ont montré les autres groupes, c'est à dire une tendance à une diminution de  $\sigma^{\circ}$  avec une augmentation de  $\theta_{loc(t)}$ . Les résultats présentés par Ulaby et Dobson (1988) pour la bande C, à partir d'une série de mesures au moyen d'un diffusomètre basé au sol, montrent aussi que  $\sigma^{\circ}$  diminue plus rapidement en fonction de  $\theta_{loc(t)}$  pour le sol nu et le roc (page 131 de leur volume) que pour la végétation courte (page 243). Dans notre cas, à des angles d'incidence moyens (autour de 60°), la distinction entre les sols nus rugueux et la végétation pose un problème en raison de la rétrodiffusion élevée des sols. La discrimination entre les sols nus rugueux et la végétation augmente avec  $\theta_{loc(t)}$ . Cependant, à des angles d'incidence très élevés, de faibles variations de la pente locale occasionnent des variations importantes de la rétrodiffusion et des ombres qui limitent l'utilité des images.

Lorsque comparés aux cultures, les sols nus ont en général montré une plus grande variation du  $\sigma^\circ$  moyen par parcelle, ceci pouvant être dû à la grande variabilité dans la rugosité de surface des sols nus.

Les parcelles de sol nu lisse ont pu être facilement distingués de la végétation relativement bien développée au moyen du  $\sigma^\circ$  moyen de chaque parcelle pour tous les angles d'incidence locaux couverts par nos données. Rappelons que la teneur en eau des sols pour ce site, qui est en moyenne de  $0,12 \text{ g.cm}^{-3}$ , est relativement faible.

Les parcelles de pommes de terre ont montré des valeurs de  $\sigma_{HH}^\circ$  supérieures à celles de  $\sigma_{VV}^\circ$  pour tous les angles d'incidence étudiés, alors que les parcelles d'oignons ont montré des valeurs semblables de  $\sigma^\circ$  pour les deux polarisations. La jachère a montré un  $\sigma_{VV}^\circ$  supérieur à  $\sigma_{HH}^\circ$  pour des angles d'incidence locaux de  $84^\circ$ .

Des parcelles de pomme de terre et d'oignons dont la couverture végétale était relativement faible (entre 30 et 50%), offrant au sol une protection limitée contre l'érosion hydrique, montraient des coefficients de rétrodiffusion aussi élevés que celles de jachère présentant une couverture végétale complète. Le radar en bande C semble bien pouvoir distinguer les parcelles de sol nu de celles qui présentent une certaine croissance de végétation lorsque les angles d'incidence sont élevés, mais semble présenter peu de sensibilité à la quantité de végétation sur le sol.

## 4.2 SITE DE JUAN VIÑAS

Rappelons que les figures 21 et 22 présentent les sous-images des lignes de vol 8.2 et 8.3, avant et après la correction topographique. La figure 23 présente les masques utilisés pour le calcul des moyennes du coefficient de rétrodiffusion des parcelles.

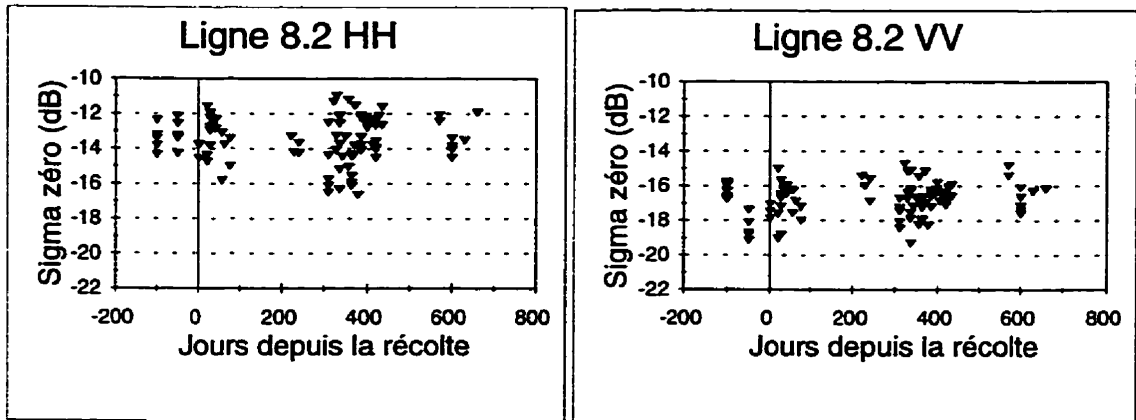
### 4.2.1 Évolution de la rétrodiffusion avec la croissance des plants

Les graphiques de la figure 31 présentent, en fonction de l'âge de la repousse, le  $\sigma^\circ$  moyen par parcelle calculé après la correction radiométrique des effets du relief. Cette relation est montrée pour les parcelles récoltées, pour les lignes de vol 8.2 ( $\theta_{local}$ ) entre

62° et 79°) et 8.3 ( $\theta_{loc(t)}$  entre 39° et 63°), en polarisations HH et VV. Un âge de -50 jours a été arbitrairement attribué aux parcelles récoltées qui étaient encore couvertes de résidus pour pouvoir les distinguer, sur les graphiques, des autres parcelles récemment récoltées. Un âge de -100 a été attribué aux parcelles de sol nu en processus de rénovation, et celles-ci ont été incluses dans ces graphiques pour permettre la comparaison de leur  $\sigma^o$  avec celui des parcelles récoltées. Ces parcelles ont subi un labour profond la semaine antérieure à l'acquisition des images, et sont donc très rugueuses. L'âge 0 correspond aux parcelles récoltées dont les résidus viennent d'être brûlés.

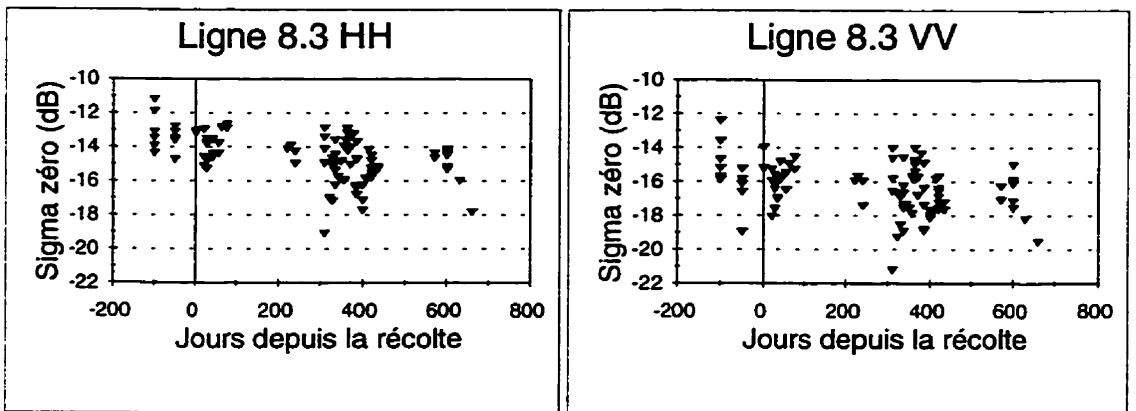
Le coefficient de rétrodiffusion ne semble montrer aucune relation consistante avec l'âge de la canne à sucre. Nous observons une diminution de  $\sigma^o$  pour la ligne 8.2 et une augmentation pour la ligne 8.3 pour les 100 premiers jours suivant la récolte, mais cette tendance ne se poursuit pas avec la croissance des plants. Il y a une grande variation de la moyenne du  $\sigma^o$  des parcelles pour tous les stades de croissance.  $\sigma^o_{HH}$  est systématiquement supérieur à  $\sigma^o_{VV}$ , en moyenne de 4 dB pour la ligne 8.2, et de 2 dB pour la ligne 8.3. Pour la canne à sucre récoltée, la plupart des valeurs de  $\sigma^o_{VV}$  sont entre -15 et -19 dB pour la ligne 8.2 et entre -14 et -20 dB pour la ligne 8.3 ; les valeurs de  $\sigma^o_{HH}$  se trouvent entre -11 et -17 dB pour la ligne 8.2 et entre -12.5 et -18 dB pour la ligne 8.3. Les parcelles couvertes de résidus non brûlés (âge = -50) présentent un écart entre  $\sigma^o_{HH}$  et  $\sigma^o_{VV}$  encore plus important que celui de la canne, surtout pour la ligne 8.2.

Cependant, les sols nus et la canne à sucre adulte présentent des coefficients de rétrodiffusion moyens semblables, ce qui implique qu'on ne pourrait dans ces conditions distinguer le sol nu et sol couvert pour des fins de prévision de l'érosion des sols. Les images présentent de fait des tonalités et des textures semblables pour le sol nu et la canne adulte. Pour la ligne 8.3, plusieurs parcelles de canne mûre apparaissent plus sombres que les parcelles de sol nu. Deux facteurs peuvent être responsables de la rétrodiffusion élevée des parcelles de sol nu : la rugosité importante des parcelles rénovées et la teneur en eau élevée des sols (autour de 0,45 g/cm<sup>3</sup> alors qu'elle n'était qu'autour de 0,12 g/cm<sup>3</sup>, en moyenne, pour le site de Tierra Blanca).

Ligne 8.2 ( $\theta_{loc(t)}$  entre  $62^\circ$  et  $79^\circ$ )

a)

b)

Ligne 8.3 ( $\theta_{loc(t)}$  entre  $39^\circ$  et  $63^\circ$ )

c)

d)

Note : les âges  $-100$  et  $-50$  ont été arbitrairement attribués aux parcelles de sol nu en processus de rénovation et aux parcelles couvertes de résidus, respectivement.

Figure 31 : Coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'âge de la canne récoltée, site de Juan Viñas. a) ligne 8.2HH b) ligne 8.2VV c) ligne 8.3HH d) ligne 8.3VV

#### 4.2.2 Effet de l'angle d'incidence local

La figure 32 présente, pour les images avant la correction topographique, la valeur du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^\circ$  moyen par parcelle en fonction de l'angle d'incidence local,  $\theta_{loc(t)}$ , pour les deux polarisations, les parcelles rénovées avant la semence, les parcelles récemment brûlées, les résidus et différents groupes d'âge de la canne à sucre récoltée. La figure 33 présente la même mise en relation pour les images après la correction topographique. Ces graphiques regroupent les données des deux lignes de vol.

Dans les cadres a), c), d) et f) de la figure 32, pour les images non corrigées, chaque ligne de vol montre une diminution de  $\sigma^\circ$  en fonction de  $\theta_{loc(t)}$ . Les données des deux lignes de vol placées côte à côte ne montrent pas de continuité. C'est que pour chaque ligne, les angles d'incidence les plus faibles correspondent aux parcelles qui sont orientées vers le capteur et les angles les plus élevés aux parcelles orientées en direction opposée. Après la correction topographique, on retrouve une diminution plus lente de  $\sigma^\circ$  en fonction de  $\theta_{loc(t)}$ , et une meilleure continuité entre les tendances des deux lignes de vol. Pour les images non corrigées, on remarque que le  $\sigma^\circ$  diminue en fonction  $\theta_{loc(t)}$  pour le sol nu, les parcelles brûlées, les résidus et la canne jeune, mais pas pour la canne d'un et de deux ans (cadres e) et f)). Pour ces deux derniers groupes, après la correction topographique,  $\sigma_{HH}^\circ$  augmente en fonction de  $\theta_{loc(t)}$ .

Après la correction topographique, les parcelles de sol nu en processus de rénovation (très rugueuses) montrent une lente mais évidente diminution de  $\sigma^\circ$  avec l'augmentation de  $\theta_{loc(t)}$ . Tel que nous l'avions remarqué pour le sol nu du site de Tierra Blanca,  $\sigma_{VV}^\circ$  diminue plus rapidement que  $\sigma_{HH}^\circ$ , et l'écart entre ces deux quantités augmente donc avec  $\theta_{loc(t)}$ . Les parcelles brûlées présentent un comportement semblable à celui du sol nu rugueux. Les parcelles couvertes de résidus non brûlés montrent une stabilité des valeurs de  $\sigma_{HH}^\circ$  et une légère diminution de  $\sigma_{VV}^\circ$  en fonction de  $\theta_{loc(t)}$ , avec un écart important entre  $\sigma_{HH}^\circ$  et  $\sigma_{VV}^\circ$ , même à de faibles angles d'incidence locaux. La canne jeune (entre 40 et 80 jours) présente une très légère augmentation de  $\sigma_{HH}^\circ$  et une diminution de  $\sigma_{VV}^\circ$  avec une augmentation de  $\theta_{loc(t)}$ . Les groupes de canne entre 310 et 435 jours et entre 570 et 660 jours montrent aussi l'augmentation de  $\sigma_{HH}^\circ$  mais pas de diminution de  $\sigma_{VV}^\circ$ . La seule

chose qui semble distinguer le sol nu de la canne est l'augmentation de  $\sigma_{HH}$  de la canne à sucre en fonction de  $\theta_{loc(t)}$ . Nous verrons au chapitre 5 si la combinaison des deux images acquises avec des angles d'incidence différents peut effectivement aider à distinguer le sol nu de la canne à sucre bien développée.

Mentionnons que les variétés de canne à sucre cultivées à Juan Viñas sont rampantes, c'est à dire qu'avec la croissance, la tige est de plus en plus couchée sur le sol. La présence d'éléments diffuseurs disposés horizontalement pourrait expliquer une plus forte rétrodiffusion en HH pour les groupes de canne de un ou de deux ans. L'augmentation de l'écart entre  $\sigma_{HH}$  et  $\sigma_{VV}$  en fonction de  $\theta_{loc(t)}$  pourrait s'expliquer par le fait que l'augmentation de  $\theta_{loc(t)}$  entraîne une augmentation de l'écart entre la direction d'oscillation du vecteur de champ électrique et le plan du terrain. Cette explication pourrait aussi s'appliquer au comportement des résidus.

Le comportement angulaire observé pour la canne à sucre ressemble beaucoup à celui de l'herbe présenté par Ulaby et Dobson (1988, p. 179), déterminé à partir d'une série de mesures au moyen d'un diffusomètre basé au sol. En bande C, le  $\sigma_{HH}$  de l'herbe atteint son minimum (-14 dB en moyenne) entre 40° et 50°, puis augmente légèrement avec l'angle d'incidence local alors que le  $\sigma_{VV}$  diminue très doucement. La canne à sucre est une graminée et ressemble à une herbe géante. Le volume de Ulaby et Dobson ne présente pas de données pour la bande X dans l'herbe, bande qui serait sans doute pour l'herbe ce que la bande C est pour la canne à sucre, en ce qui concerne le rapport entre la longueur d'onde et la largeur des feuilles. Les simulations réalisées par Saatchi *et al.* (1995) de la rétrodiffusion de l'herbe en bande C en fonction de l'angle d'incidence local montrent une augmentation de  $\sigma^o$  pour la polarisation HH de même que pour la VV.

Notons aussi que pour les pentes orientées en direction opposée au radar, la correction topographique a probablement contribué à l'effet angulaire observé. La correction suppose une diminution de l'intensité rétrodiffusée en fonction du cosinus de  $\theta_{loc(t)}$ , et il est possible que la canne à sucre présente une diminution moins marquée.

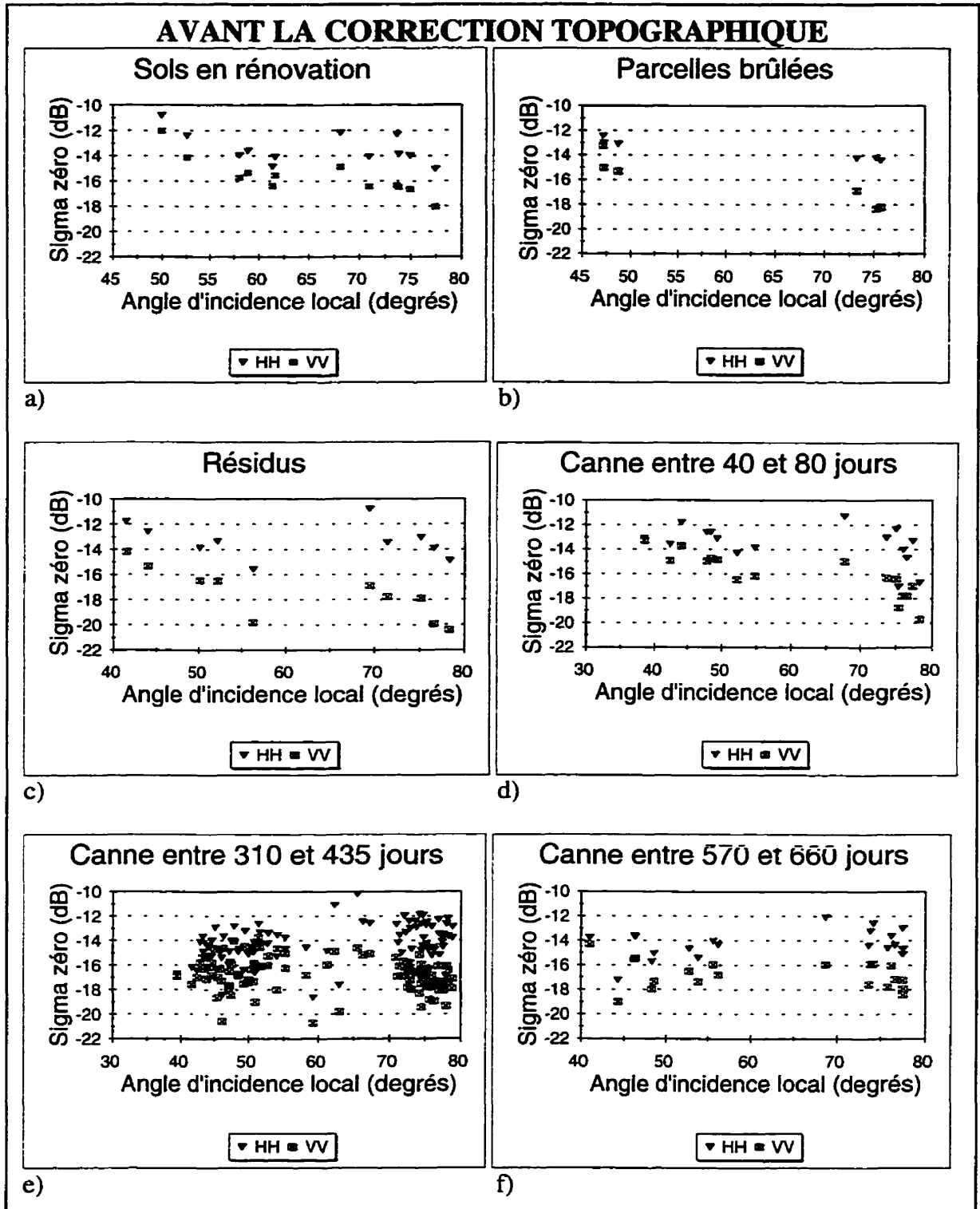


Figure 32 : Coefficient de rétrodiffusion moyen par parcelle,  $\sigma^0$ , avant la correction topographique, en fonction de l'angle d'incidence local  $\theta_{loc(i)}$ . a) sol nu en processus de rénovation, b) parcelles récemment brûlées, c) parcelles récemment récoltées couvertes de résidus, d) canne récoltée il y a entre 40 et 80 jours, e) canne récoltée entre 310 et 435 jours, f) canne récoltée il y a entre 570 et 660 jours

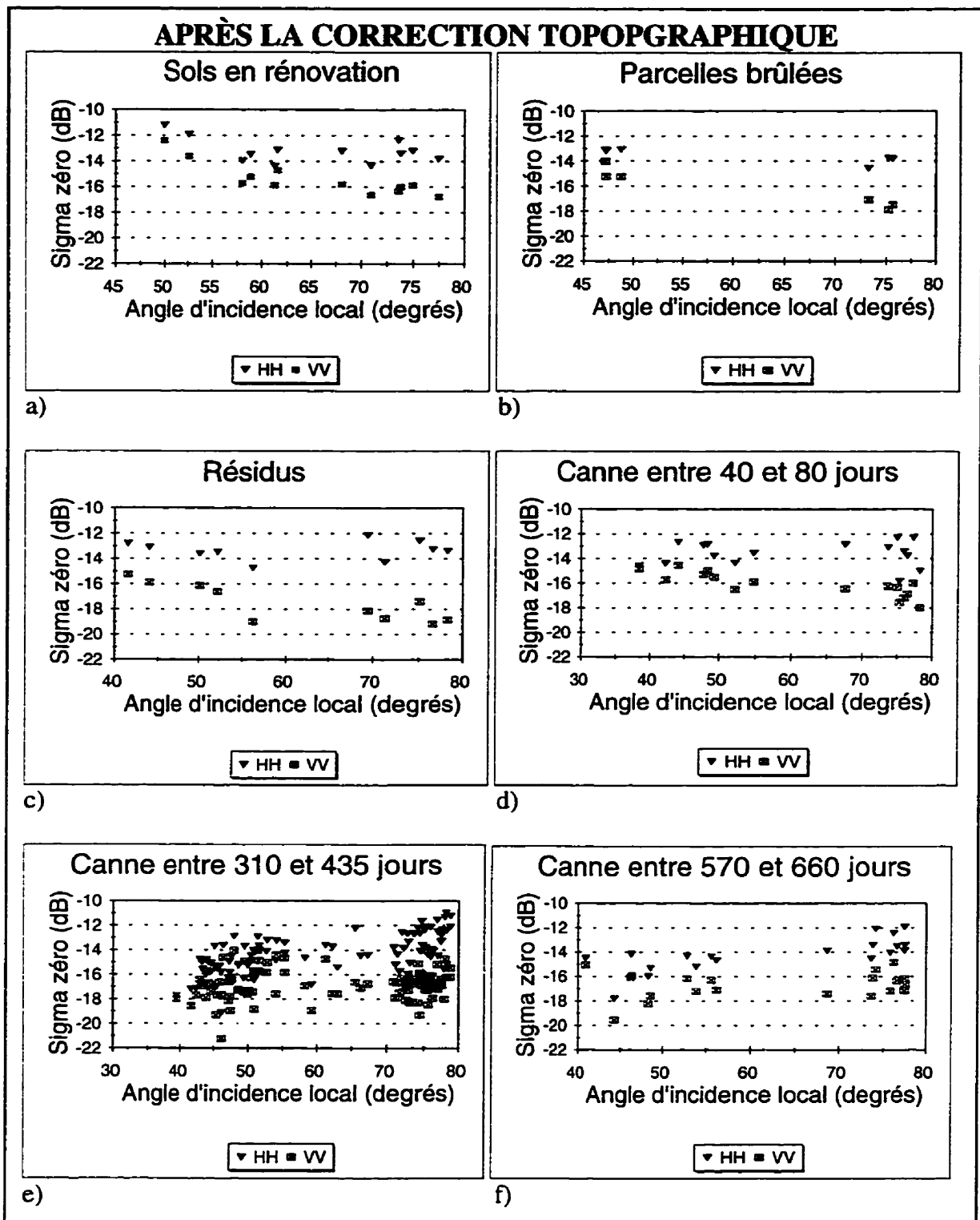


Figure 33 : Coefficient de rétrodiffusion moyen par parcelle,  $\sigma^0$ , après la correction topographique, en fonction de l'angle d'incidence local  $\theta_{loc(i)}$ . a) sol nu en processus de rénovation, b) parcelles récemment brûlées, c) parcelles récemment récoltées couvertes de résidus, d) canne récoltée il y a entre 40 et 80 jours, e) canne récoltée entre 310 et 435 jours, f) canne récoltée il y a entre 570 et 660 jours



### 4.2.3 Discrimination entre catégories

Huit catégories différentes de croissance ont été définies pour l'analyse :

- 1) les sols nus rénovés avant la semence,
- 2) les parcelles récemment rénovées,
- 3) les parcelles rénovées et semées depuis a 84 jours,
- 4) les parcelles récoltées couvertes de résidus de canne,
- 5) les parcelles récoltées et récemment brûlées,
- 6) les parcelles récoltées dont l'âge est entre 40 et 80 jours,
- 7) les parcelles récoltées dont l'âge est entre 310 et 435 jours,
- 8) les parcelles récoltées dont l'âge est entre 570 et 660 jours.

La figure 34 présente la distribution des parcelles selon ces catégories pour le site. La figure 35 présente, en a) et b) la moyenne du  $\sigma^{\circ}$  en fonction de la catégorie pour les images des deux lignes de vol, en considérant l'ensemble des pixels représentés par chaque catégorie, sur les images filtrées au moyen d'un filtre de la médiane de taille 5 x 5. La même figure présente en c), d), e) et f) les fourchettes représentées par la moyenne  $\pm$  un écart-type (les valeurs moyennes, maximales et minimales ont été calculées sur les images de  $\sigma^{\circ}_{(m2/m2)}$  puis ont ensuite été converties en dB). La figure 36 montre les mêmes mises en relation pour les images corrigées des effets du relief. On remarque que la correction topographique a fait diminuer l'écart-type de  $\sigma^{\circ}$  pour la plupart des catégories. En raison du nombre insuffisant d'observations, les catégories 2, 3 et 5 ne sont pas considérées dans l'analyse statistique.

Les catégories 5 à 8 correspondent à des âges croissants de la canne récoltée. Dans les images corrigées des effets du relief, les deux lignes présentent une variation très faible du  $\sigma^{\circ}$  moyen entre ces catégories, cette variation ne dépassant pas 1,7 dB. Dans le cas de la ligne 8.3, la rétrodiffusion montre une faible tendance à diminuer avec la croissance de la canne à sucre, et cette diminution est plus accentuée en HH qu'en VV. La plus forte rétrodiffusion en HH qu'en VV pour la catégorie 5 pourrait être due à la présence de résidus. Cependant, on voit que les fourchettes représentées par la moyenne  $\pm$  un écart-

type se chevauchent presque entièrement et il est impensable de réaliser une classification automatique des images, même pour séparer le sol nu avant semence des autres catégories.

Pour les angles intermédiaires de la ligne 8.3, le sol nu rugueux avant la semence montre, en moyenne, une rétrodiffusion supérieure à celle de la canne de deux ans. Ceci concorde avec les résultats présentés pour le soya par Alphonse et Le Toan (1988), où pour un sol nu humide la rétrodiffusion est élevée et diminue avec la croissance de la végétation. La diminution de  $\sigma^{\circ}$  avec la croissance de la canne est fort probablement due à la diminution de la teneur en eau des feuilles qui accompagne le mûrissement de la canne. Cependant, cette diminution n'est pas observée aux angles élevés de la ligne 8.2.

Contrairement à ce qui était observé pour le site de Tierra Blanca, le contraste entre le sol nu rugueux et la végétation diminue avec  $\theta_{loc(n)}$ . La différence de comportement entre les sites de Tierra Blanca et de Juan Viñas peut s'expliquer au moins en partie par la différence de teneur en eau des deux sites. Étant donné que le  $\sigma^{\circ}$  du sol nu est plus élevé que celui de la canne mais diminue plus rapidement en fonction de  $\theta_{loc(n)}$  (la canne adulte montrant même une augmentation en HH), l'écart entre le  $\sigma^{\circ}$  des deux types de couverture diminue avec une augmentation de l'angle d'incidence. Il faut noter que ce contraste est très faible même aux angles d'incidence moyens étudiés ici, et qu'il ne permet pas une séparation des parcelles de sol nu même en utilisant leur  $\sigma^{\circ}$  moyen.

Il est intéressant de remarquer que le  $\sigma^{\circ_{VV}}$  des résidus est en moyenne plus faible que celui du sol nu. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'aux angles intermédiaires et rasants, pour le rayonnement à polarisation verticale, la direction d'oscillation du vecteur électrique se rapproche de la verticale au terrain. En présence de résidus couchés sur le sol, le rayonnement trouverait très peu de structures verticales permettant une rétrodiffusion. Il est remarquable à la figure 36 a) et b) que l'écart entre  $\sigma^{\circ_{HH}}$  et  $\sigma^{\circ_{VV}}$  est plus élevé pour les résidus que pour les autres catégories, et nous explorerons donc au chapitre 5 la possibilité d'utiliser cet écart pour discriminer cette catégorie des autres.

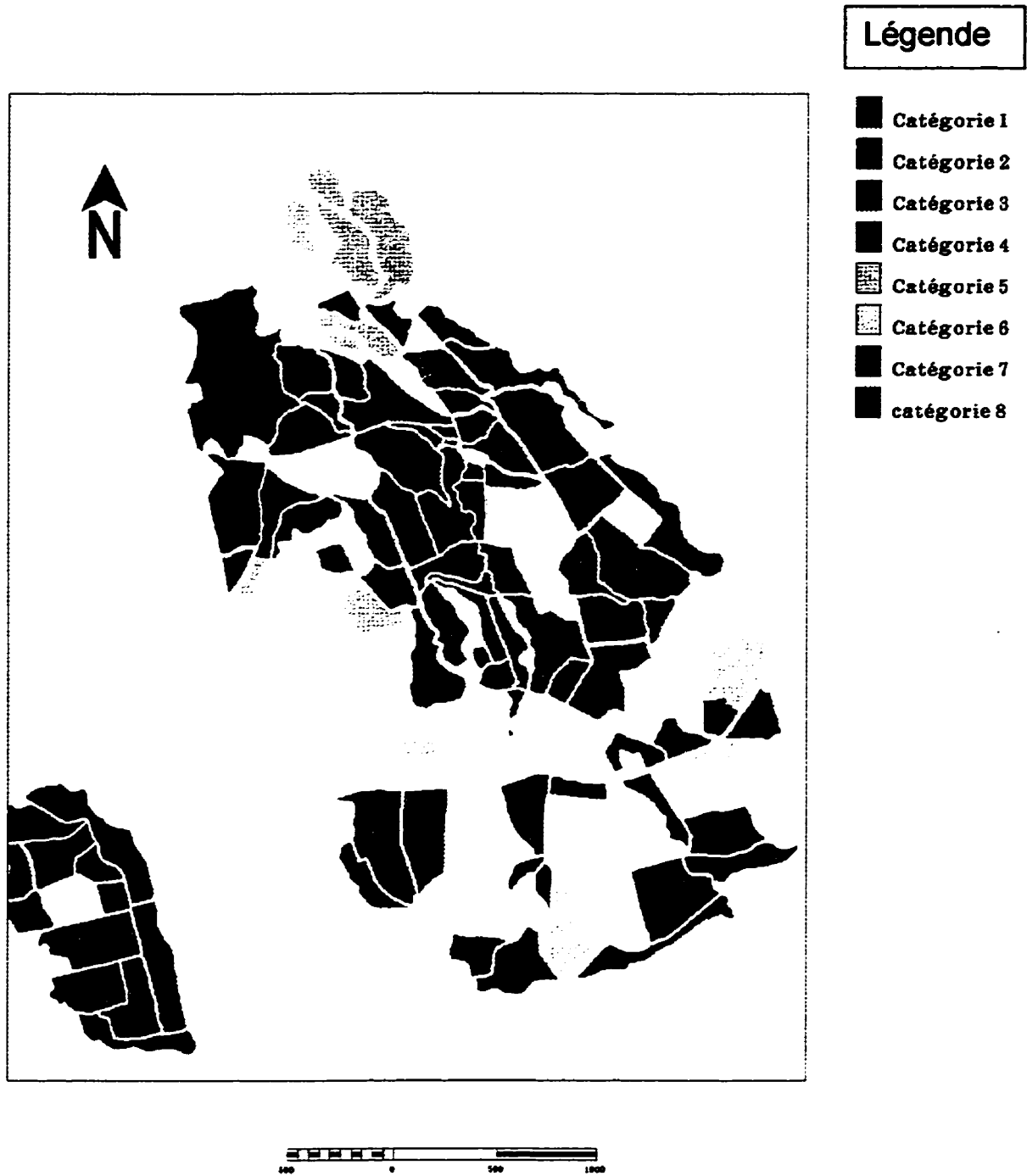


Figure 34 : Distribution des parcelles appartenant aux différentes catégories pour le site de Juan Viñas

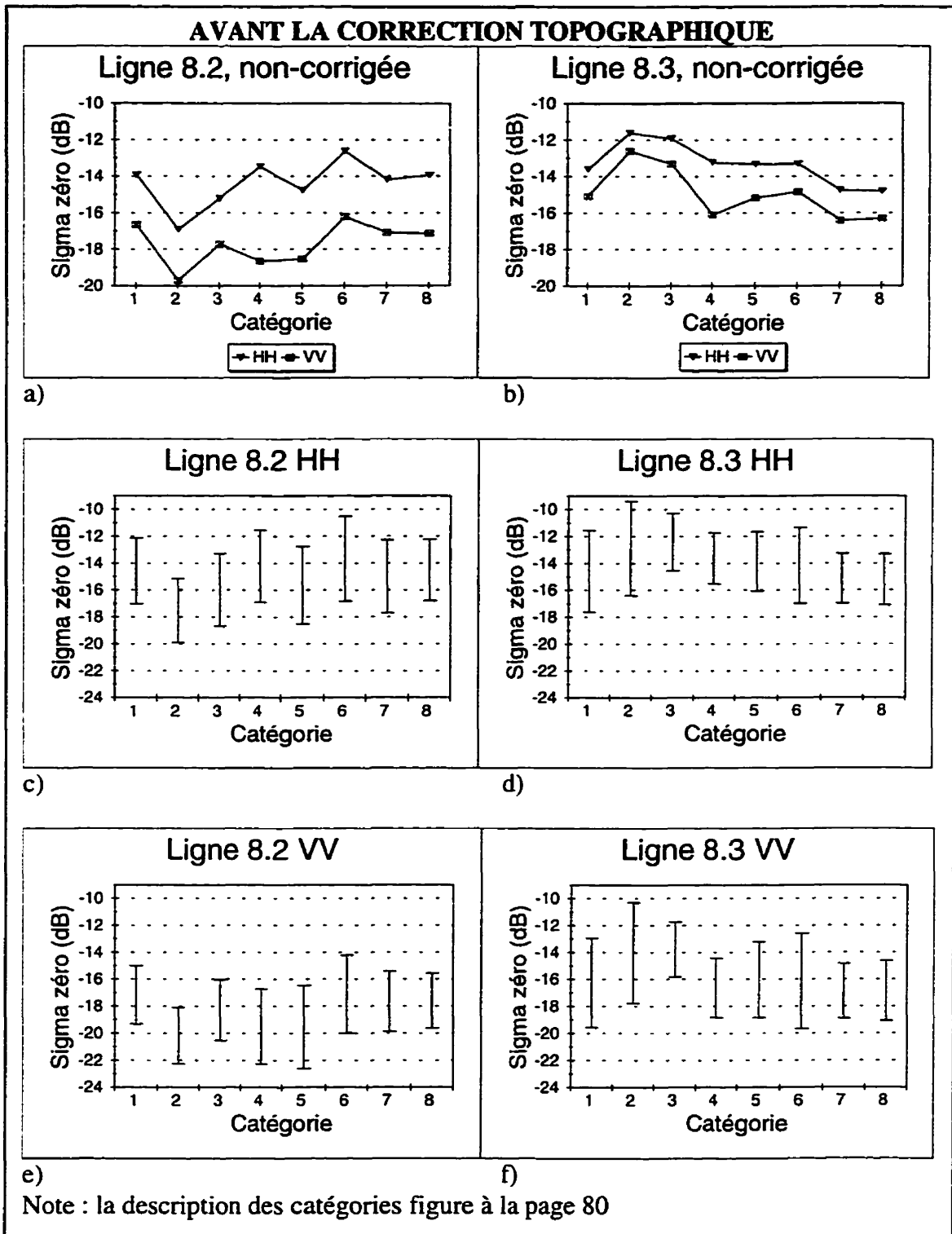


Figure 35 : Moyenne du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^0$  en fonction de la catégorie pour les images avant la correction topographique. a) ligne 8.2, HH et VV, b) ligne 8.3, HH et VV. Fourchettes de valeurs représentées par la moyenne de  $\sigma^0$  plus ou moins un écart-type : c) ligne 8.2HH, d) ligne 8.3HH e) ligne 8.2 VV, f) ligne 8.3 VV

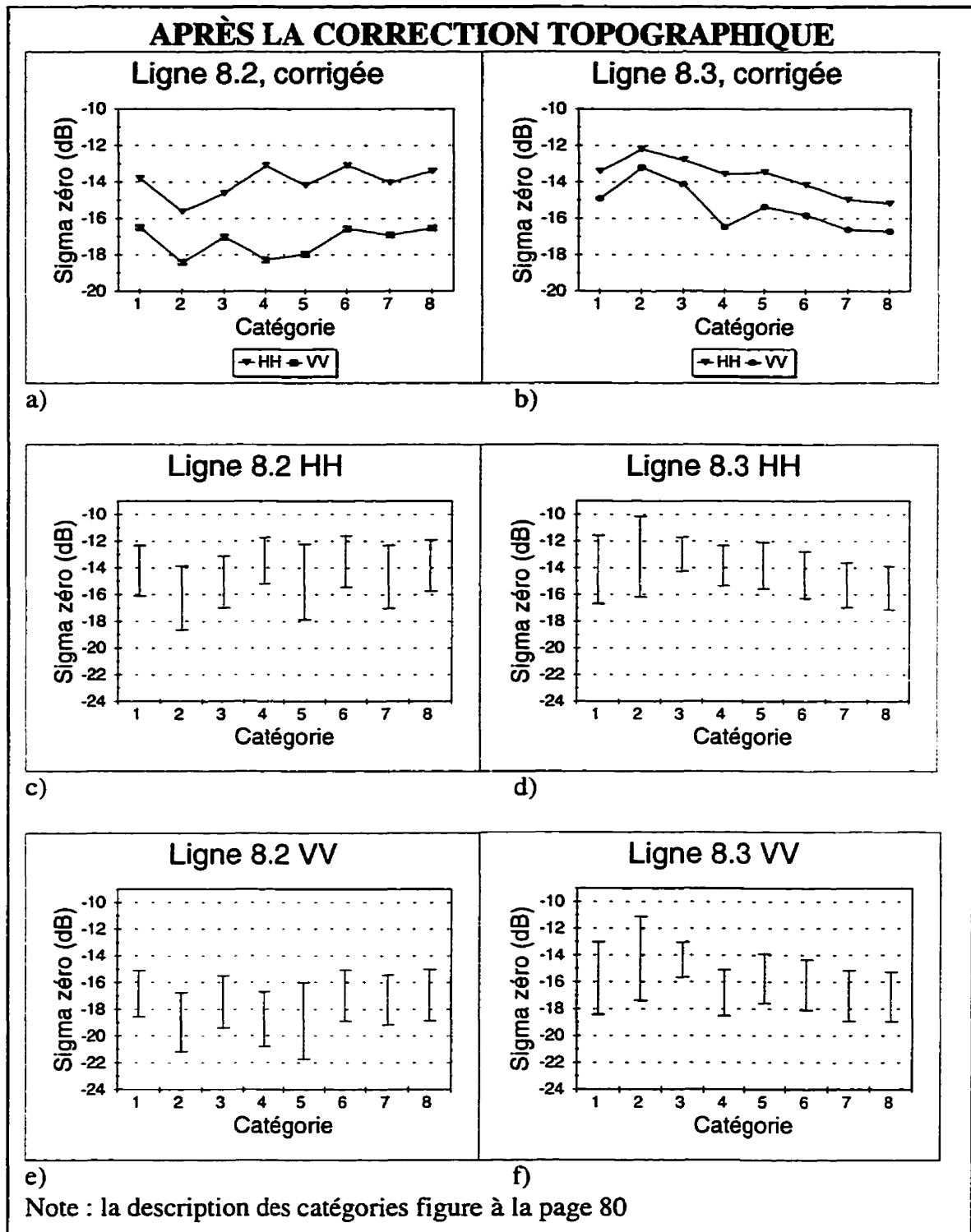


Figure 36 : Moyenne du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^0$  en fonction de la catégorie pour les images après la correction topographique. a) ligne 8.2, HH et VV, b) ligne 8.3, HH et VV. Fourchettes de valeurs représentées par la moyenne de  $\sigma^0$  plus ou moins un écart-type : c) ligne 8.2HH, d) ligne 8.3HH e) ligne 8.2 VV, f) ligne 8.3 VV

La figure 37 présente l'approximation du Chi-carré calculée à partir du test de Kruskal-Wallis, pour l'utilisation du  $\sigma^0$  moyen par parcelle pour distinguer deux à deux les catégories 1 et 4 des catégories 6, 7, et 8. Mentionnons que pour un degré de liberté, une valeur du Chi-carré de 10,83 correspond à une probabilité de 0,001 que les différences observées entre les catégories soient dues au hasard. Une valeur de 6,64 correspond à une probabilité de 0,01, généralement utilisée comme la limite à partir de laquelle on considère comme "très significative" la différence entre catégories ou populations. D'autre part, une valeur de 3,84 correspond à une probabilité de 0,05, limite souvent employée pour la qualifier de "significative". Ces résultats s'appliquent à la discrimination entre catégories et non à la discrimination des parcelles appartenant à chacune des catégories, ni aux pixels.

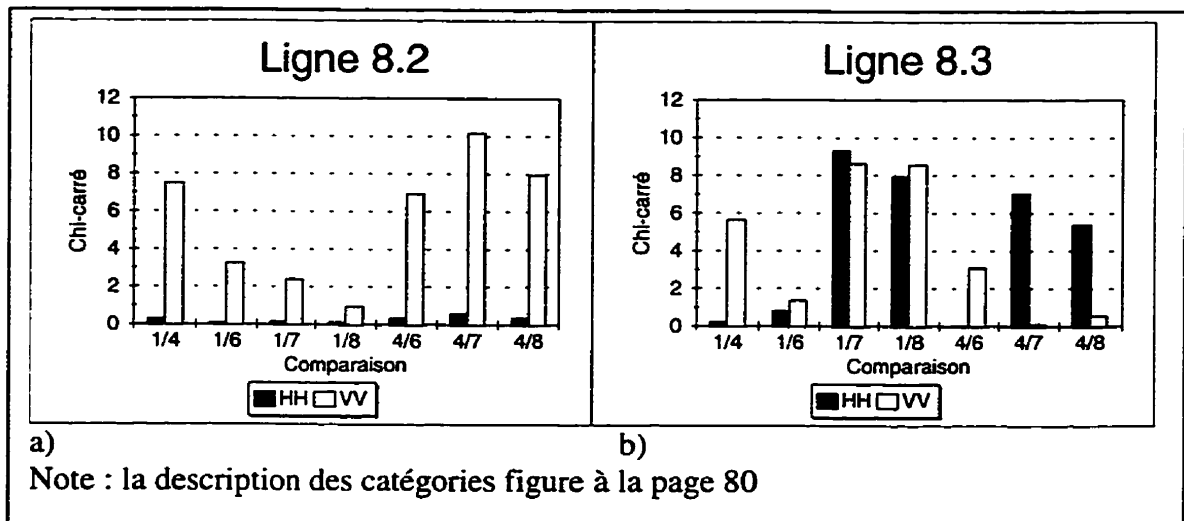


Figure 37 : Chi-carré évalué à partir du test de Kruskal-Wallis, pour la discrimination entre catégories à partir du  $\sigma^0$  moyen par parcelle (site de Juan Viñas). a) ligne 8.2, b) ligne 8.3

Une discrimination très significative entre le sol nu rugueux (catégorie 1) et la canne de un et de presque deux ans (catégories 7 et 8) s'observe seulement pour la ligne 8.3, et ce grâce à la rétrodiffusion plus élevée du sol nu. La seule autre catégorie qui a présenté une discrimination significative par rapport aux autres est celle des parcelles couvertes de résidus (catégorie 4). Pour la polarisation VV des images des deux lignes de vol, une différence significative est observée entre les catégories des résidus et du sol nu rugueux (catégorie 1), grâce à une rétrodiffusion plus faible des résidus. Cette différence est encore plus significative pour les angles élevés de la ligne 8.2 que pour les angles intermédiaires

de la ligne 8.3. Pour ce qui est de la différence entre la catégorie 4 et la canne à sucre adulte (catégories 7 et 8), on obtient des résultats différents pour les deux images. La discrimination entre ces catégories est significative en VV pour la ligne 8.2 (les résidus présentaient un  $\sigma^{\circ}_{VV}$  plus faible que celui de la canne), et significative en HH pour la ligne 8.3 (les résidus présentaient un  $\sigma^{\circ}_{HH}$  plus élevé que celui de la canne). La différence de comportement entre les deux lignes de vol provient de la rétrodiffusion élevée en HH pour les parcelles de canne adulte aux angles d'incidence élevés de la ligne 8.2.

La figure 38 présente les valeurs de la divergence\* transformée mesurée entre les signatures spectrales des catégories pour le site de Juan Viñas, sur les images filtrées au moyen d'un filtre de la médiane avec une fenêtre de taille 5 x 5. Les valeurs obtenues sont extrêmement faibles, bien en deçà de 1, ce qui indique un chevauchement presque complet des signatures, confirmant ce qui a été remarqué aux graphiques c) à f) de la figure 36. Ceci indique qu'une classification automatique des pixels de ces catégories ne serait pas possible.

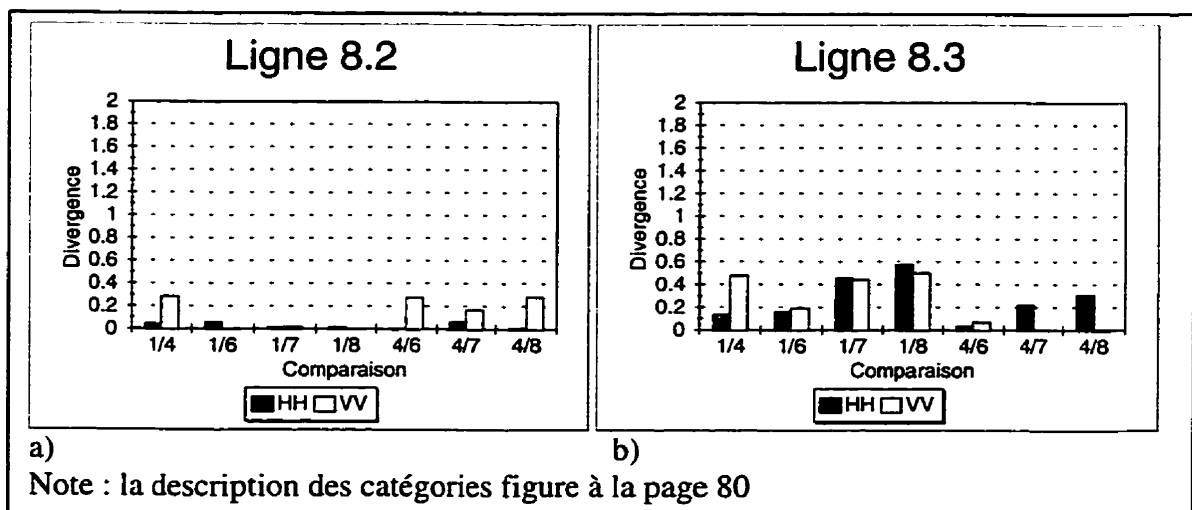


Figure 38 : Divergence transformée entre les signatures spectrales des catégories comparées deux par deux (site de Juan Viñas). a) ligne 8.2 b) ligne 8.3

#### 4.2.4 Résumé des résultats obtenus pour le site de Juan Viñas

Le coefficient de rétrodiffusion de la canne à sucre semble diminuer beaucoup moins que celui du sol nu en fonction de  $\theta_{loc(t)}$ . La canne à sucre a même montré une augmentation de  $\sigma_{HH}^{\circ}$  avec une augmentation de  $\theta_{loc(t)}$

La catégorie des résidus a montré une rétrodiffusion remarquablement plus faible en VV qu'en HH pour les deux lignes de vol étudiées, mais plus prononcée pour les angles d'incidence élevés. Seule la polarisation VV montrait une distinction très significative entre les résidus et le sol nu avant semence. Pour les valeurs élevées de  $\theta_{loc(t)}$  (entre 63° et 79°), la catégorie des résidus se distinguait de celles de canne récoltée d'un an et de deux ans par sa rétrodiffusion plus faible en VV, et pour  $\theta_{loc(t)}$  entre 39° et 63°, par sa rétrodiffusion plus forte en HH.

La rétrodiffusion élevée des sols nus rénovés avant semence entraîne un mauvais contraste entre cette catégorie et celles des différents groupes d'âge de la canne à sucre récoltée. Cette rétrodiffusion élevée serait causée par une forte rugosité et par une teneur en eau élevée des sols (en moyenne de 0,45 g.cm<sup>-3</sup>).

Pour  $\theta_{loc(t)}$  entre 39° et 63°, les parcelles de canne d'environ un an et deux ans montrent un  $\sigma^{\circ}$  plus faible, en moyenne, que celui du sol nu. Même si pour ces angles le test de Kruskal-Wallis a montré une distinction très significative entre les catégories de sol nu avant semence et la canne d'environ deux ans, il ne fut pas possible de distinguer les parcelles de ces deux catégories par leur  $\sigma^{\circ}$  moyen. L'observation des fourchettes présentées par la moyenne plus ou moins un écart type des valeurs de  $\sigma^{\circ}$  des pixels des catégories étudiées indique qu'il y a un grand chevauchement entre leurs signatures et qu'il serait impossible de réaliser une classification automatique des pixels. Les très faibles valeurs de divergence transformée obtenues entre les signatures des catégories confirment cette observation.



### 4.3 SITE DE TABOGA

Les figures 24 à 26 présentent les images des trois lignes de vol acquises au-dessus du site de Taboga. Les zones rougeâtres correspondent à des parcelles de riz mûr, caractérisées par une plus forte rétrodiffusion en HH qu'en VV, et ne sont pas prises en compte dans cette étude. Les parcelles sombres correspondent aux parcelles de canne à sucre en processus de rénovation (sol nu rugueux) ; on retrouve aussi sur l'image des parcelles sombres de riz en préparation ou inondées. La figure 27 présente le masque utilisé pour l'extraction des moyennes du coefficient de rétrodiffusion pour chaque parcelle.

#### 4.3.1 Évolution de la rétrodiffusion avec la croissance des plants

Les graphiques de la figure 39 montrent, pour chacune des lignes de vol, la progression de  $\sigma_{HH}^{\circ}$  et de  $\sigma_{VV}^{\circ}$  en fonction du nombre de jours écoulés depuis la récolte pour les parcelles récoltées. La fourchette d'angles d'incidence indiquée pour les différentes images correspond à celle des parcelles étudiées et non à toute la sous-image, tel que montré à la dernière colonne du tableau 1. La figure 40 se rapporte aux parcelles rénovées, et montre la progression du  $\sigma^{\circ}$  moyen de chaque parcelle en fonction du nombre de jours depuis la semence. Rappelons que les valeurs obtenues pour la ligne 7.2 VV sont plus élevées que pour les autres images (voir figure 9), ce qui provient probablement d'une erreur dans les paramètres d'étalement, tel que discuté à la section 3.2. Nous comparerons donc les capacités discriminantes de chacune des images des lignes de vol, sans tenter d'établir des valeurs absolues de  $\sigma^{\circ}$  ou d'établir, pour la polarisation VV, une relation entre celui-ci et l'angle d'incidence.

Pour les parcelles récoltées (figure 39),  $\sigma^{\circ}$  augmente en fonction de l'âge de la repousse, jusqu'à environ 80 jours. Pour la ligne 4.1  $\sigma^{\circ}$  diminue ensuite alors qu'il se stabilise pour les lignes 7.1 et 7.2. Comme l'image de la ligne 4.1 diffère des deux autres par la direction de visée, nous pourrions soupçonner que la direction des rangs soit la cause de son comportement différent par rapport aux images des deux autres lignes. Cependant, cette différence se note surtout pour les parcelles récoltées dont la repousse est supérieure à 80 jours, pour lesquels l'effet des rangs devrait être moins important. Pour la ligne 4.1, une explication possible à la diminution du  $\sigma^{\circ}$  avec la croissance de la végétation est l'angle d'incidence élevé qui occasionne une augmentation du trajet parcouru dans la végétation

par le rayonnement, avant de toucher le sol, et une augmentation de l'atténuation du signal. Le trajet parcouru à travers la végétation est égal à la hauteur de la végétation divisée par le cosinus de l'angle d'incidence, et augmente donc très rapidement à des angles d'incidence élevés. On doit mentionner que la ligne 4.1 a été acquise trois jours avant les lignes 7.1 et 7.2, et que l'âge de la repousse indiqué sur les graphiques est relatif à la date d'acquisition de ces deux dernières lignes.

Pour les parcelles rénovées (figure 40), la portion négative de l'abscisse représente la séquence des interventions apportées aux sols avant la semence, qui ne suit pas un chronogramme rigide. Nous remarquons une valeur très faible de  $\sigma^o$  quelques jours avant la semence, ce qui pourrait correspondre à l'aplanissement de la surface pratiqué avant le creusage des sillons. Ces faibles valeurs se manifestent pour toutes les lignes de vol. Durant la période de préparation des sols, on retrouve une grande dispersion des valeurs de la rétrodiffusion, qui se réduit après la semence. Nous remarquons une augmentation très légère de  $\sigma^o$  en fonction du nombre de jours depuis la semence. La ligne 7.2 VV montre peu de différence entre les coefficients de rétrodiffusion avant et après la semence. Pour la ligne 4.1, on observe un  $\sigma^o$  élevé pour les parcelles semées dont l'âge est entre 3 et 5 jours. Comme cette ligne a été acquise trois jours avant les deux autres images, il se peut que les valeurs élevées de  $\sigma^o$  correspondent à l'irrigation de démarrage qui est pratiqué juste après la semence de la nouvelle canne.

Remarquons les faibles valeurs du  $\sigma^o$  des sols nus avant semence, par rapport à celles de la canne à sucre récoltée de quelques semaines. Elles sont toutes inférieures à  $-18$  dB (sauf pour la ligne 7.2 VV). Rappelons que pour le site de Juan Viñas, le  $\sigma^o$  des parcelles de sol nu avant semence était plus élevé, supérieur à  $-17$  dB. Cette rétrodiffusion élevée des sols nus, qui occasionnait une confusion avec les parcelles de canne à sucre bien développée, avait été attribué à la combinaison de la rugosité élevée et de la teneur en eau des sols. Comme la préparation du sol pendant la rénovation s'effectue selon les mêmes méthodes dans les deux sites, produisant une rugosité très élevée, nous pouvons conclure qu'à Juan Viñas la teneur en eau élevée des sols ait été la principale responsable du manque de contraste entre le sol nu et la canne à sucre.

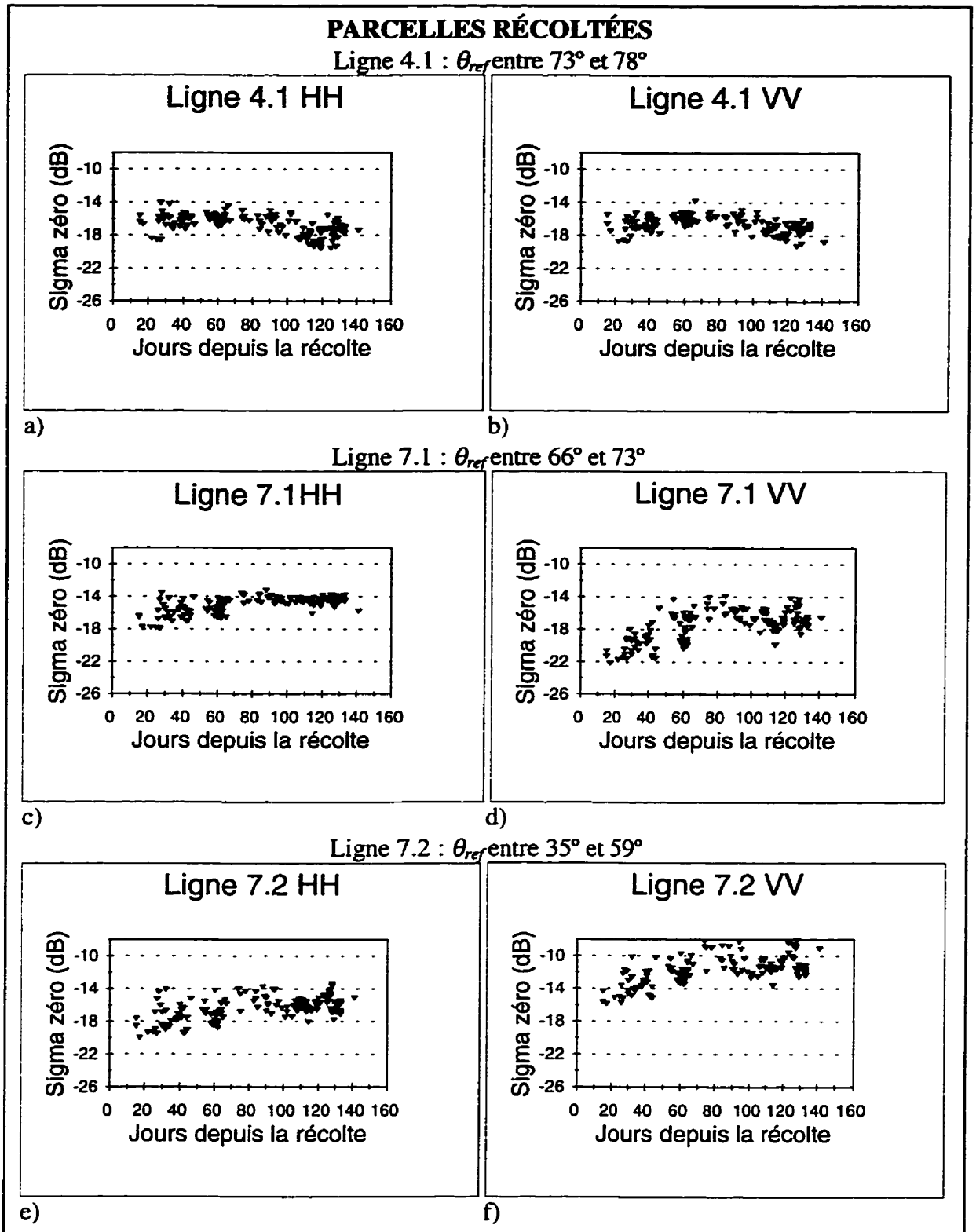


Figure 39 : Graphique du coefficient de rétrodiffusion en fonction du nombre de jours de repousse pour les parcelles récoltées (site de Taboga). a) ligne 4.1 HH, b) ligne 4.1 VV, c) ligne 7.1 HH, d) ligne 7.1 VV, e) ligne 7.2 HH, f) ligne 7.2 VV

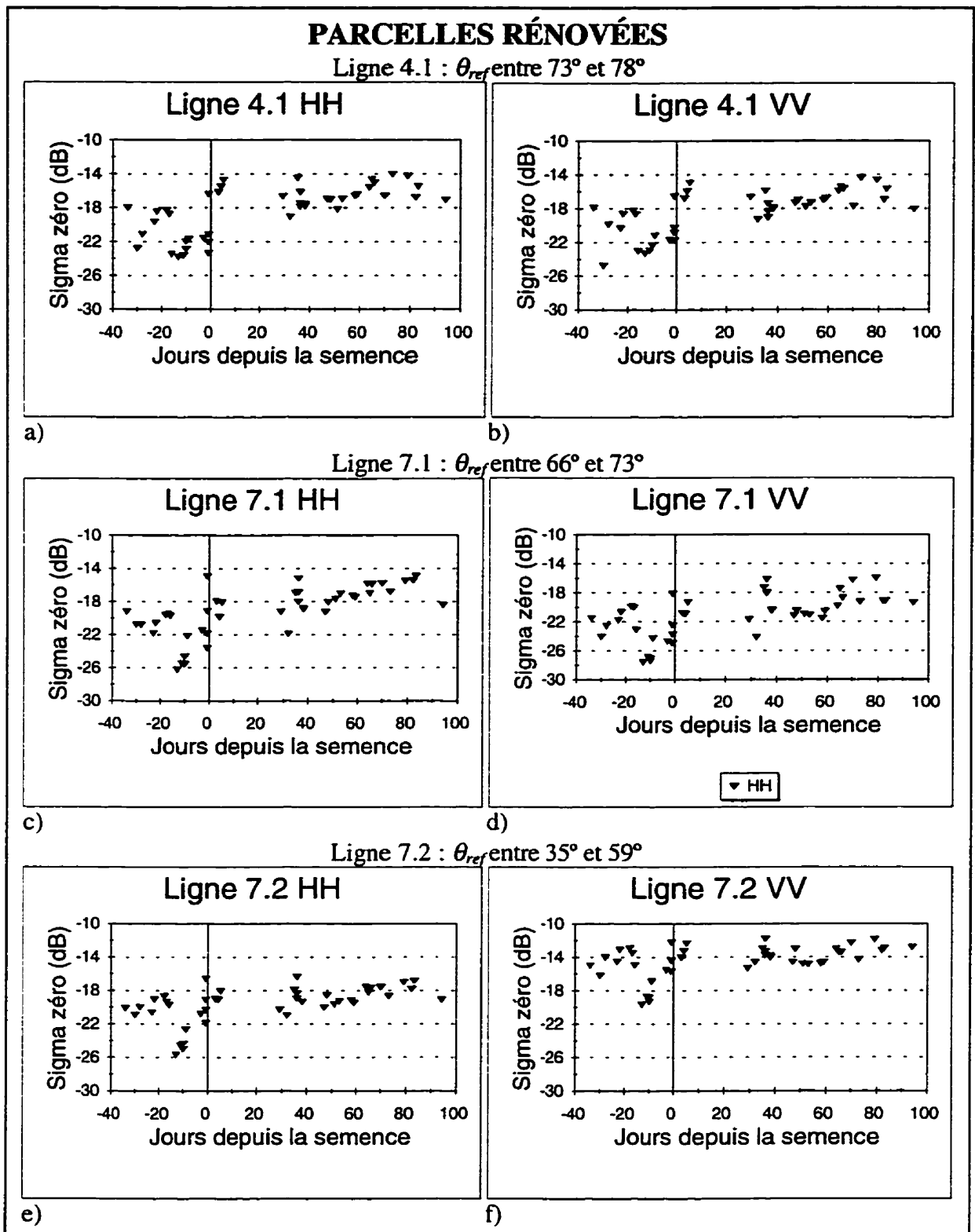


Figure 40 : Graphiques du coefficient de rétrodiffusion en fonction du nombre de jours de repousse pour les parcelles rénovées (site de Taboga). a) ligne 4.1 HH, b) ligne 4.1 VV, c) ligne 7.1 HH, d) ligne 7.1 VV, e) ligne 7.2 HH, f) ligne 7.2 VV

Pour les parcelles récoltées, on remarque que l'augmentation du  $\sigma^o$  pendant les 80 premiers jours de la repousse est plus importante pour la polarisation VV que pour la HH. Le tableau 3 présente la valeur des coefficients de corrélation entre le  $\sigma^o$  moyen de chaque parcelle et l'âge de la repousse, pour les 80 premiers jours dans le cas de la canne récoltée, et pour entre 20 et 100 jours de repousse pour la canne rénovée. Pour la canne récoltée, les coefficients de corrélation sont plus élevés pour la polarisation VV que pour la HH. Ils sont plus élevés pour la HH dans le cas de la canne rénovée, sauf pour les angles d'incidence élevés de la ligne 4.1. Les faibles valeurs de  $\sigma^o_{VV}$  observées pendant les premières semaines après la récolte rappellent les faibles valeurs de  $\sigma^o_{VV}$  des parcelles couvertes de résidus à Juan Viñas ; elles sont peut-être causées par la présence de résidus brûlés entre les repousses de canne à sucre.

Tableau 3 : Coefficients de corrélation entre le coefficient de rétrodiffusion et l'âge de la repousse pour les parcelles récoltées d'entre 20 et 80 jours, et pour les parcelles rénovées d'entre 20 et 100 jours (site de Taboga).

parcelles	Coefficient de corrélation entre $\sigma^o$ et l'âge de la repousse, lignes :					
	4.1HH	4.1VV	7.1HH	7.1VV	7.2HH	7.2VV
Récoltées (de 20 à 80 jours)	0,20	0,52	0,48	0,65	0,37	0,66
Rénovées (de 20 à 100 jours)	0,46	0,53	0,54	0,29	0,43	0,37

#### 4.3.2 Effet de l'angle d'incidence

Pour le site de Taboga, on parlera de l'angle d'incidence  $\theta_{ref}$  plutôt que de l'angle d'incidence local  $\theta_{loc(t)}$  puisqu'aucune correction topographique n'a été appliquée et nous avons calculé l'angle d'incidence pour la surface de référence considérée pour l'étalonnage. En supposant que le terrain est plat et à l'altitude considérée pour l'étalonnage,  $\theta_{ref}$  est égal à  $\theta_{loc(t)}$ . La figure 41 montre les graphiques du  $\sigma^o$  en fonction de  $\theta_{ref}$  pour les parcelles de sol nu en processus de rénovation (plus de 5 jours avant la semence), pour chacune des lignes de vol. Il est impossible de déduire une relation claire entre les deux variables. On doit mentionner que cette catégorie semble contenir deux groupes de rugosité différente, d'après les valeurs de  $\sigma^o$  (à la figure 40, voir les points correspondant aux âges négatifs). La figure 43 montre cette même mise en

relation pour les parcelles de canne de plus de 100 jours. Les lignes 7.2 en HH et en VV et la ligne 7.1 VV montrent une augmentation évidente du  $\sigma^{\circ}$  en fonction de  $\theta_{ref}$ . Pour la ligne 7.2, correspondant aux colonnes 500 et suivantes de l'image, les résultats de l'étalonnage pour la ligne de vol entière ne suggèrent pas que cet effet soit dû à l'étalonnage. En effet, les graphiques de la figure 9 e) et f) ne montrent pas d'augmentation de  $\sigma^{\circ}$  à partir de la colonne 500. Toutefois, l'augmentation remarquée pour la ligne 7.1 VV (colonnes 1900 à 4090) pourrait être due à l'étalonnage. Les valeurs observées pour la ligne 4.1 sont inférieures à celles de la 7.1 donc ici, la tendance à une augmentation de  $\sigma^{\circ}$  en fonction de  $\theta_{ref}$  ne se manifeste pas d'une ligne à l'autre. On a vu que l'étalonnage de la ligne 7.2 produit des valeurs qui ne diminuent pas avec  $\theta_{ref}$ , alors qu'elles devraient diminuer en fonction du cosinus de  $\theta_{ref}$  (Hawkins and Teany, 1993).

On a vu pour les sites de Tierra Blanca et de Juan Viñas que le  $\sigma^{\circ}$  des cultures diminuait moins en fonction de  $\theta_{loc(t)}$  que celui des sols nus. Il se peut qu'un étalonnage visant une uniformité du  $\sigma^{\circ}$  sur la largeur de l'image fasse augmenter artificiellement le  $\sigma^{\circ}$  de la canne à sucre en fonction de  $\theta_{ref}$ .

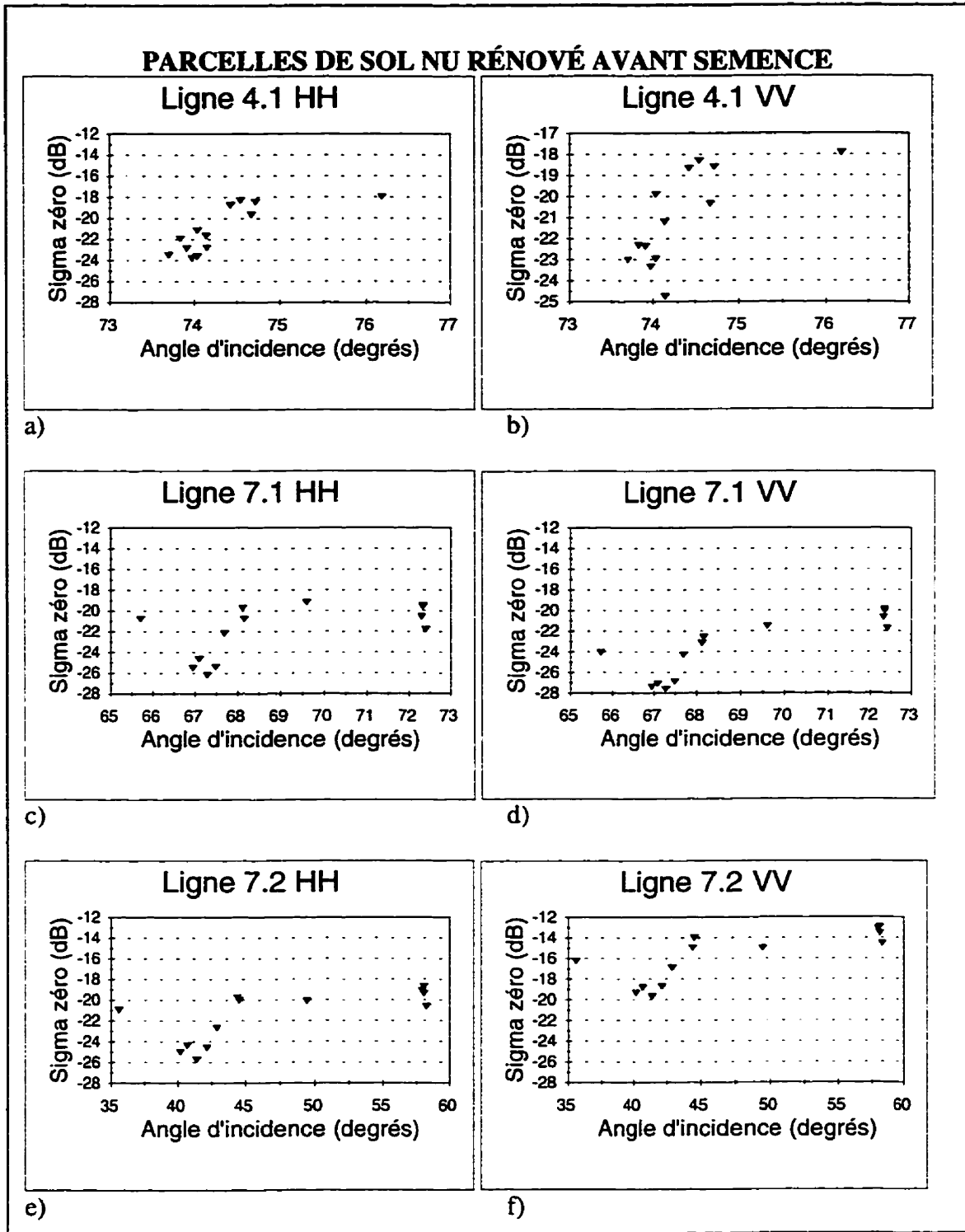


Figure 41 : Graphiques du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^{\circ}$  en fonction de l'angle d'incidence  $\theta_{ref}$  pour les parcelles de sol nu en processus de rénovation, site de Taboga. a) ligne 4.1 HH, b) ligne 4.1 VV, c) ligne 7.1HH, d) ligne 7.1 VV, e) ligne 7.2 HH, e) ligne 7.2 VV

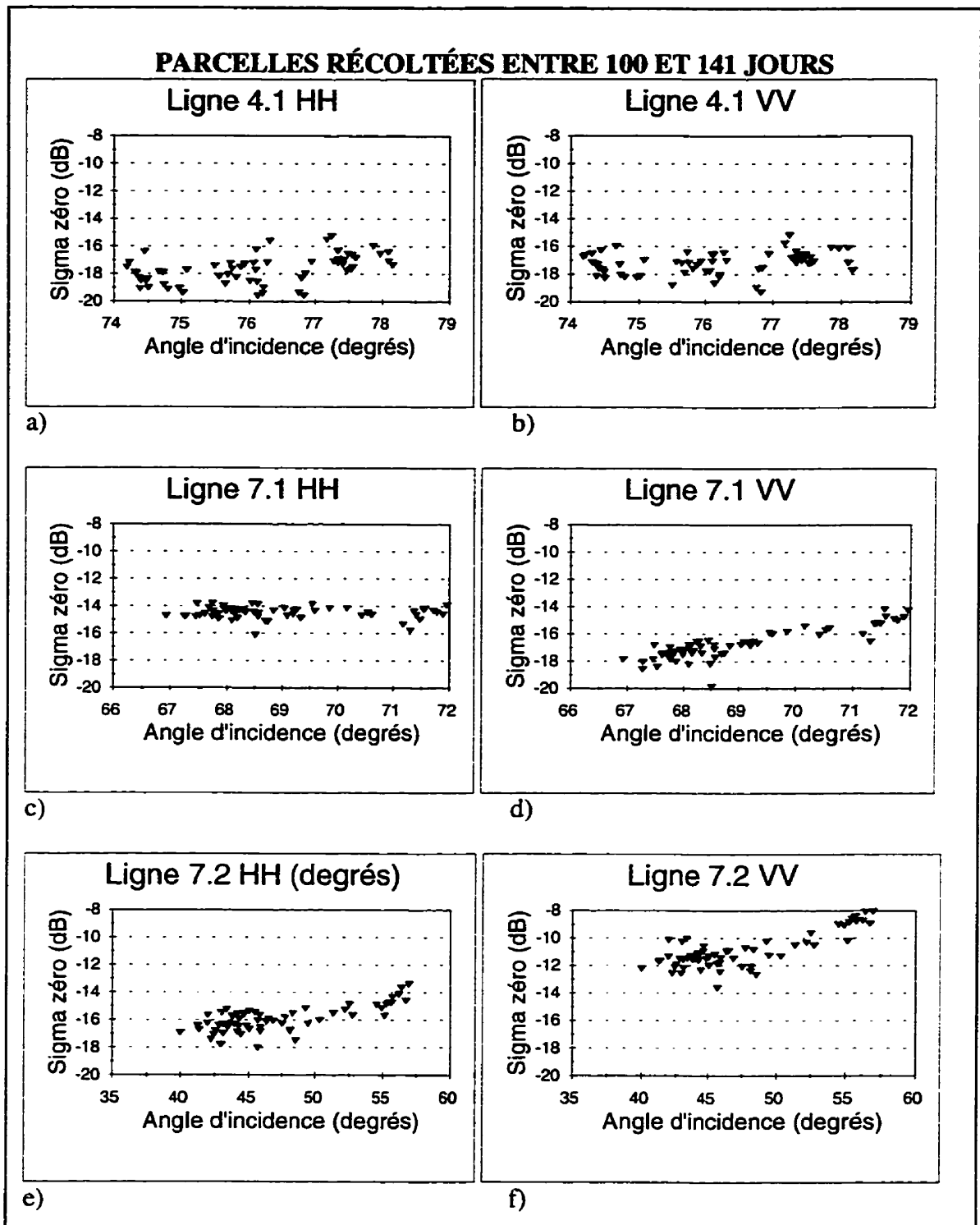


Figure 42 : Graphiques du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^0$  en fonction de l'angle d'incidence  $\theta_{ref}$  pour les parcelles de canne de plus de 100 jours, site de Taboga. a) ligne 4.1 HH, b) ligne 4.1 VV, c) ligne 7.1HH, d) ligne 7.1 VV, e) ligne 7.2 HH, e) ligne 7.2 VV



### 4.3.3 Discrimination entre catégories

Six catégories ont été établies pour le site de Taboga :

- 1) parcelles rénovées qui n'ont pas encore été semées, sols nus secs (nous avons considéré les parcelles dont l'âge est inférieur à -5 jours),
- 2) parcelles rénovées dont l'âge est entre 3 et 5 jours,
- 3) parcelles rénovées et semées depuis entre 60 et 100 jours,
- 4) parcelles récoltées dont l'âge est entre 15 et 30 jours,
- 5) parcelles récoltées dont l'âge de la repousse est entre 60 et 80 jours,
- 6) parcelles récoltées dont l'âge de la repousse est entre 100 et 141 jours.

Au moment de l'acquisition des images, il n'y avait pas de parcelles récoltées depuis moins de 15 jours. La figure 43 montre la distribution des parcelles appartenant à ces catégories. La figure 44 présente la moyenne du  $\sigma^{\circ}$  par catégorie pour les images des deux lignes de vol, en considérant l'ensemble des pixels représentés par chaque catégorie, sur les images filtrées au moyen d'un filtre de la médiane avec une fenêtre de taille 5 x 5. La figure 45 présente les fourchettes de valeurs correspondant à la moyenne des catégories plus ou moins un écart-type (les valeurs moyennes, maximales et minimales ont été calculées sur les images de  $\sigma^{\circ}_{(m2/m2)}$  puis ont ensuite été converties en dB). Pour les lignes 7.1 ( $\theta_{ref}$  entre  $66^{\circ}$  et  $73^{\circ}$ ) et 7.2 ( $\theta_{ref}$  entre  $35^{\circ}$  et  $59^{\circ}$ ), l'écart entre les moyennes des coefficients de rétrodiffusion des catégories 1 et 6 est plus élevé pour la polarisation HH que pour la polarisation VV. Pour la ligne 7.1, cet écart est de 7,2 dB en HH alors qu'il est de 6,3 dB en VV. Pour la ligne 7.2, il est de 5,4 dB en HH et de 4,7 dB en VV. Le fait que cet écart soit plus élevé pour la ligne 7.1 que pour la ligne 7.2 confirmerait la conclusion formulée à partir des résultats obtenus à Tierra Blanca, que le contraste entre les sols nus rugueux et secs et les parcelles couvertes de végétation augmente avec  $\theta_{loc(t)}$ . Cependant, les résultats obtenus pour les angles élevés de la ligne 4.1 ( $\theta_{ref}$  entre  $73^{\circ}$  et  $78^{\circ}$ ) font réaliser qu'il est imprudent d'avancer une telle conclusion pour tous les angles d'incidence et toutes les cultures. En effet, pour la ligne 4.1, l'écart entre les moyennes des catégories 1 et 6 n'est que de 2,9 dB en HH et de 3,3 dB en VV.

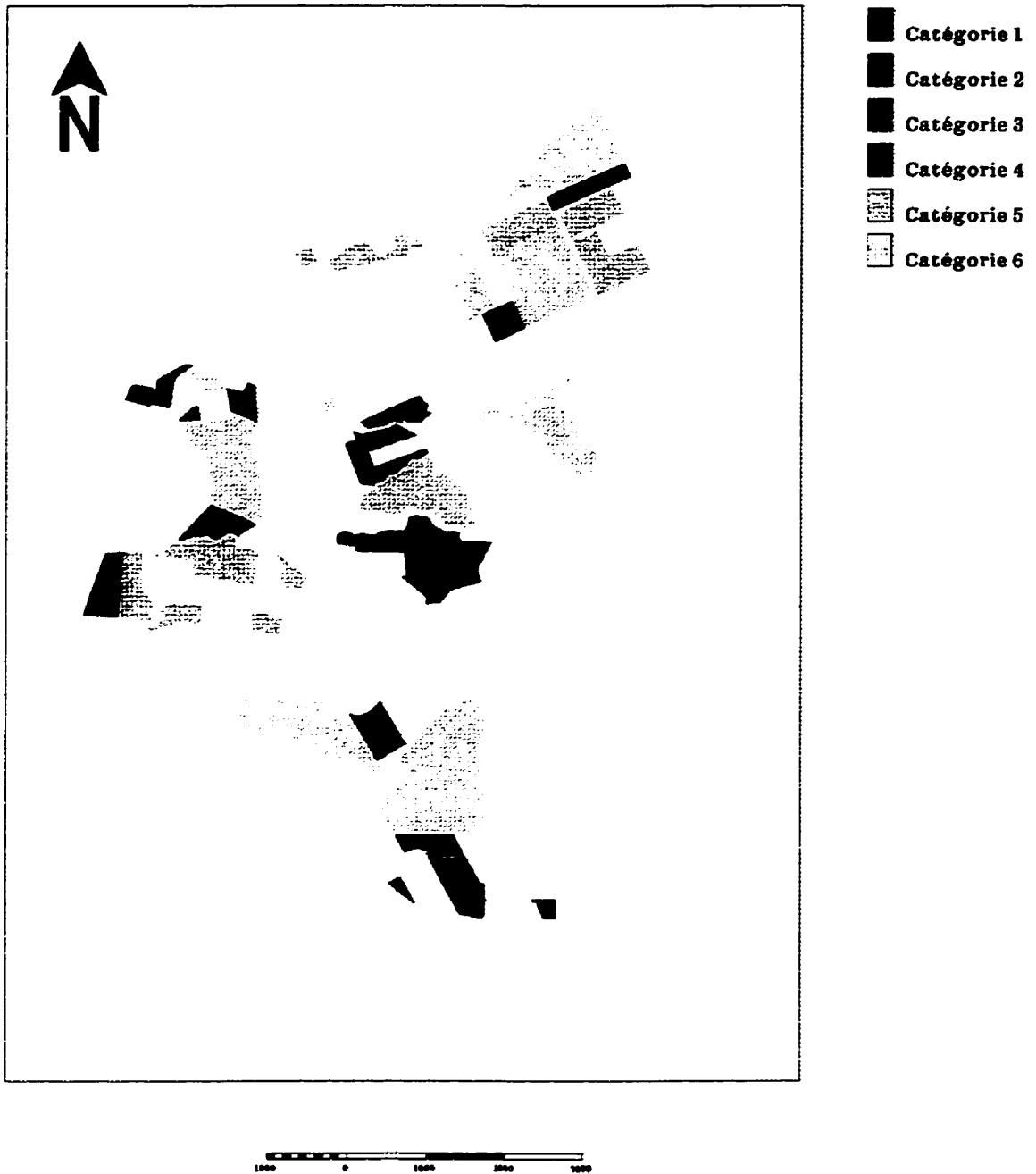
**Légende**

Figure 43 : Distribution des parcelles appartenant aux différentes catégories étudiées pour le site de Taboga

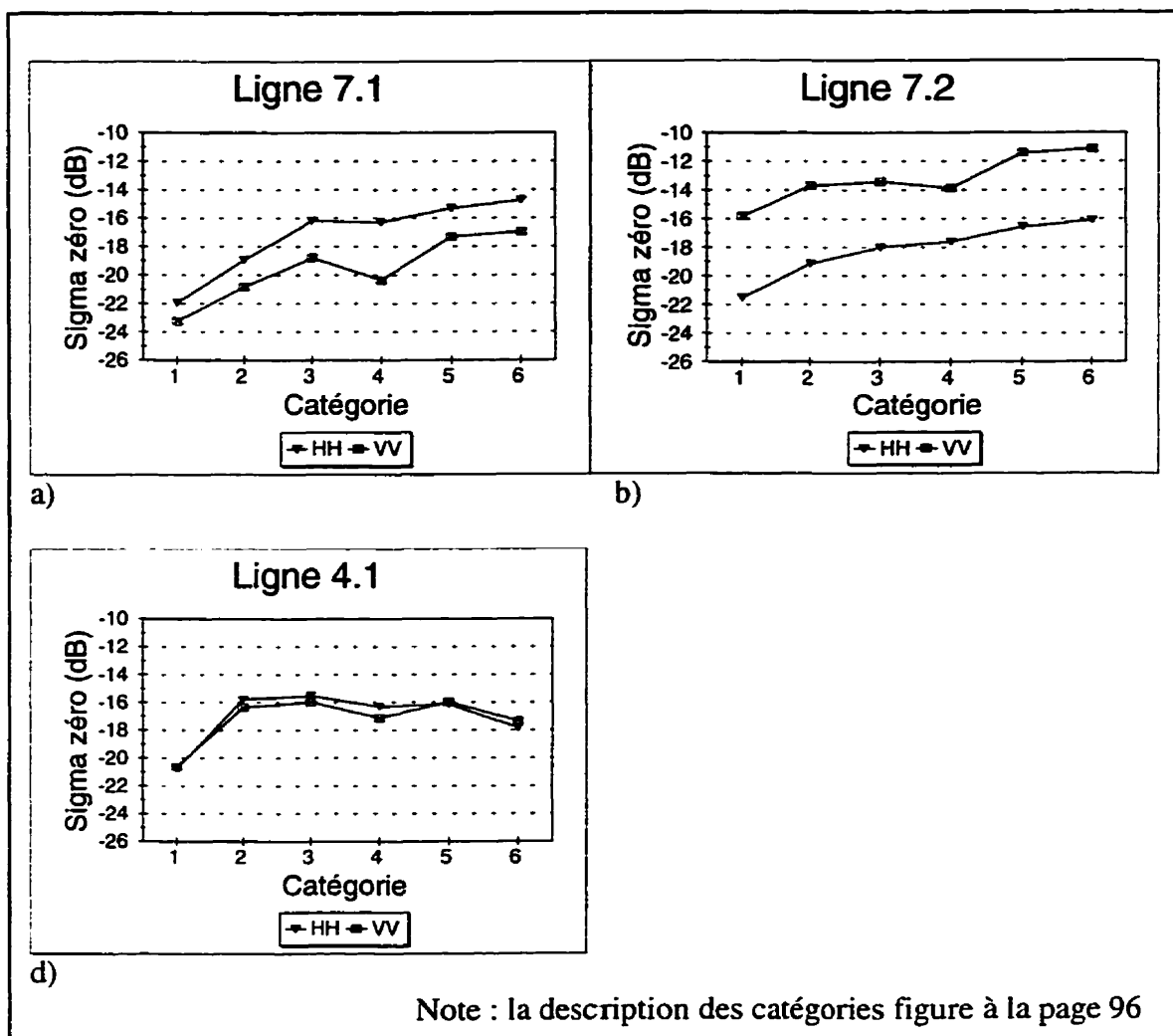


Figure 44 : Moyenne du coefficient de rétrodiffusion pour chaque catégorie, site de Taboga. a) ligne 4.1 ( $\theta_{ref}$  entre  $73^\circ$  et  $78^\circ$ ), b) ligne 7.1 ( $\theta_{ref}$  entre  $66^\circ$  et  $73^\circ$ ), c) ligne 7.2 ( $\theta_{ref}$  entre  $35^\circ$  et  $59^\circ$ )

Remarquons aussi que la différence entre les catégories 4 et 5 est plus prononcée pour la polarisation VV que pour la HH, surtout pour la ligne 7.1. La rétrodiffusion légèrement plus élevée en HH qu'en VV pour la catégorie 4 pourrait être causée par la présence de résidus brûlés au début de la croissance de la canne à sucre.

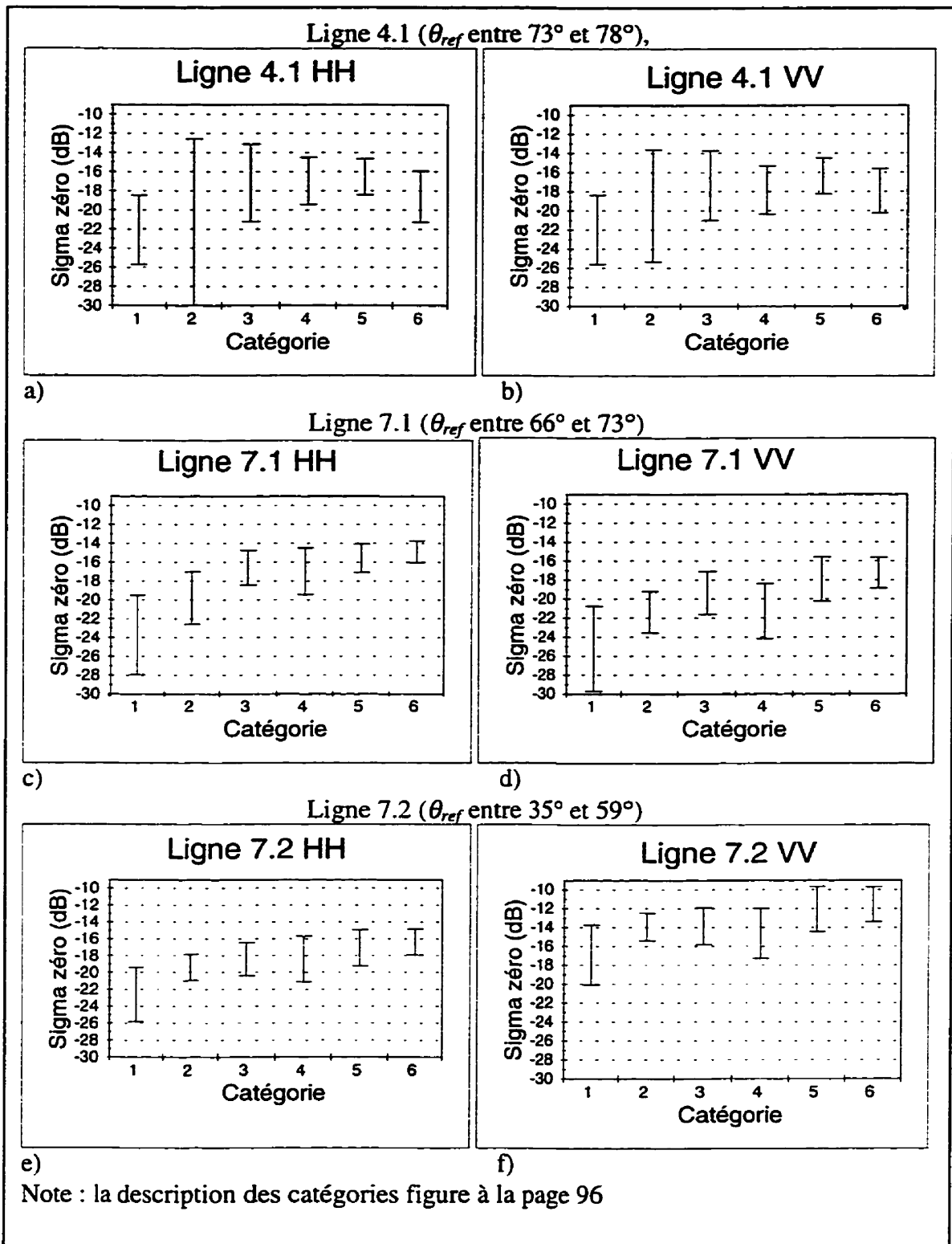


Figure 45 : Fourchettes correspondant à la moyenne du coefficient de rétrodiffusion plus ou moins un écart-type pour chaque catégorie (site de Taboga). a) ligne 4.1 HH, b) ligne 4.1 VV c) ligne 7.1 HH, d) ligne 7.1 VV, e) ligne 7.2 HH, f) ligne 7.2 VV

La figure 46 présente le Chi-carré ( $\chi^2$ ) estimé au moyen du test de Kruskal-Wallis, pour différentes comparaisons de catégories à partir des moyennes du  $\sigma^o$  pour chaque parcelle, pour les images des trois lignes de vol et des deux polarisations.

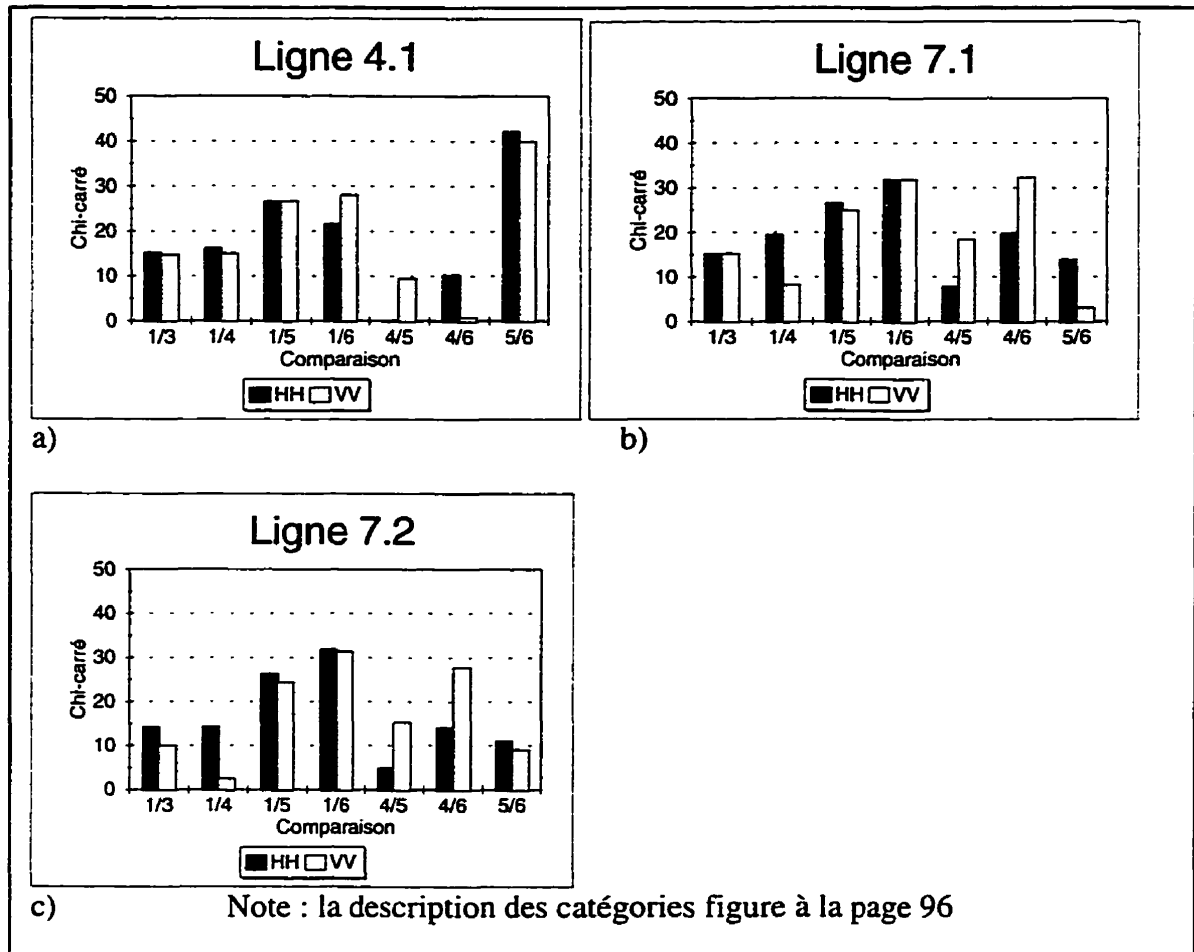


Figure 46 : Chi-carré ( $\chi^2$ ) estimé pour différentes comparaisons entre catégories. a) ligne 4.1 ( $\theta_{ref}$  entre  $73^\circ$  et  $78^\circ$ ), b) ligne 7.1 ( $\theta_{ref}$  entre  $66^\circ$  et  $73^\circ$ ), c) ligne 7.2 ( $\theta_{ref}$  entre  $35^\circ$  et  $59^\circ$ )

Comme mentionné plus tôt, un  $\chi^2$  de plus de plus de 10,83 indique que la probabilité que la différence entre les catégories soit due au hasard est inférieure à 0,1%, et donc que la distinction est très significative. Un  $\chi^2$  de plus de 6,64 indique une probabilité de moins de 1% et un  $\chi^2$  de plus de 3,84 correspond à une probabilité de moins de 5%, ce qui est généralement accepté comme limite pour qu'une différence soit considérée comme significative. Dans la majorité des cas, cette probabilité a été inférieure à 0,1%.

Toutes les lignes de vol ont indiqué une différence très significative entre les catégories de la canne de plus de 100 jours et celle du sol nu en rénovation. La ligne 4.1 VV n'a pas montré de distinction significative entre la canne de plus de 100 jours et les jeunes repousses de canne récoltée (catégories 6 et 4). Remarquons que les valeurs du  $\chi^2$  obtenues sont beaucoup plus élevées que pour le site de Juan Viñas.

Les résultats dus test de Kruskal-Wallis nous donnent un aperçu de la discrimination entre catégories, mais ne nous indiquent pas le pourcentage des parcelles de chaque catégorie qui pourrait être distinguées de celles des autres catégories à partir de leur  $\sigma^o$  moyen. En fixant un seuil égal à la valeur maximum du leur  $\sigma^o$  moyen des parcelles de sol nu avant semence pour chaque ligne de vol et chaque polarisation, on a tenté d'identifier les parcelles de la catégorie 1. Le tableau 4 présente le pourcentage des parcelles des autres catégories qui se sont confondues avec celles de la catégorie 1 pour les différentes images:

Tableau 4 : Nombre de parcelles des autres catégories qui se sont confondues avec les parcelles de sol nu avant semence (catégorie 1), en utilisant la valeur maximum du  $\sigma^o$  moyen des parcelles de sol nu comme seuil

Ligne	Pourcentage de parcelles des autres catégories se confondant avec la catégorie 1, pour les Catégories :				
	2	3	4	5	6
4.1 HH	0	0	21	0	40
4.1 VV	0	11	29		19
7.1 HH	33	0	0	0	0
7.1 VV	67	0	71	13	0
7.2 HH	67	11	43	3	0
7.2 VV	67	56	79	13	2

La ligne 7.1 HH a permis de distinguer les parcelles de sol nu de toutes les autres catégories, sauf d'une seule parcelle de la catégorie 2, de sol nu où la canne a été semée récemment. Moins de parcelles se confondent avec le sol nu en HH qu'en VV pour les lignes 7.1 et 7.2. Cependant, les deux polarisations ont permis une distinction presque complète entre les parcelles des catégories 1 et 6. Pour la ligne 4.1, on a une confusion importante entre ces deux catégories.

La figure 47 présente les mesures de divergence transformée pour la comparaison des signatures de différentes catégories, aussi calculées sur les images filtrées au moyen d'un

filtre de la médiane avec une fenêtre de taille 5 x 5. Les valeurs de divergence sont plus élevées pour la polarisation HH que pour la VV au niveau de la discrimination entre le sol nu avant semence (catégorie 1) et les autres catégories, sauf pour la ligne 4.1 pour le cas particulier des comparaisons 1/5 et 1/6. Les valeurs de divergence obtenues sont beaucoup plus élevées que pour le site de Juan Viñas, et elles sont particulièrement élevées pour la ligne 7.1 HH. Des valeurs de divergence entre 1,4 et 1,85 pour la ligne 7.1HH indiquent qu'une classification automatique des pixels des parcelles de sol nu ne serait pas parfaite mais donnerait des résultats satisfaisants.(voir le glossaire pour l'interprétation des résultats de l'analyse de divergence).

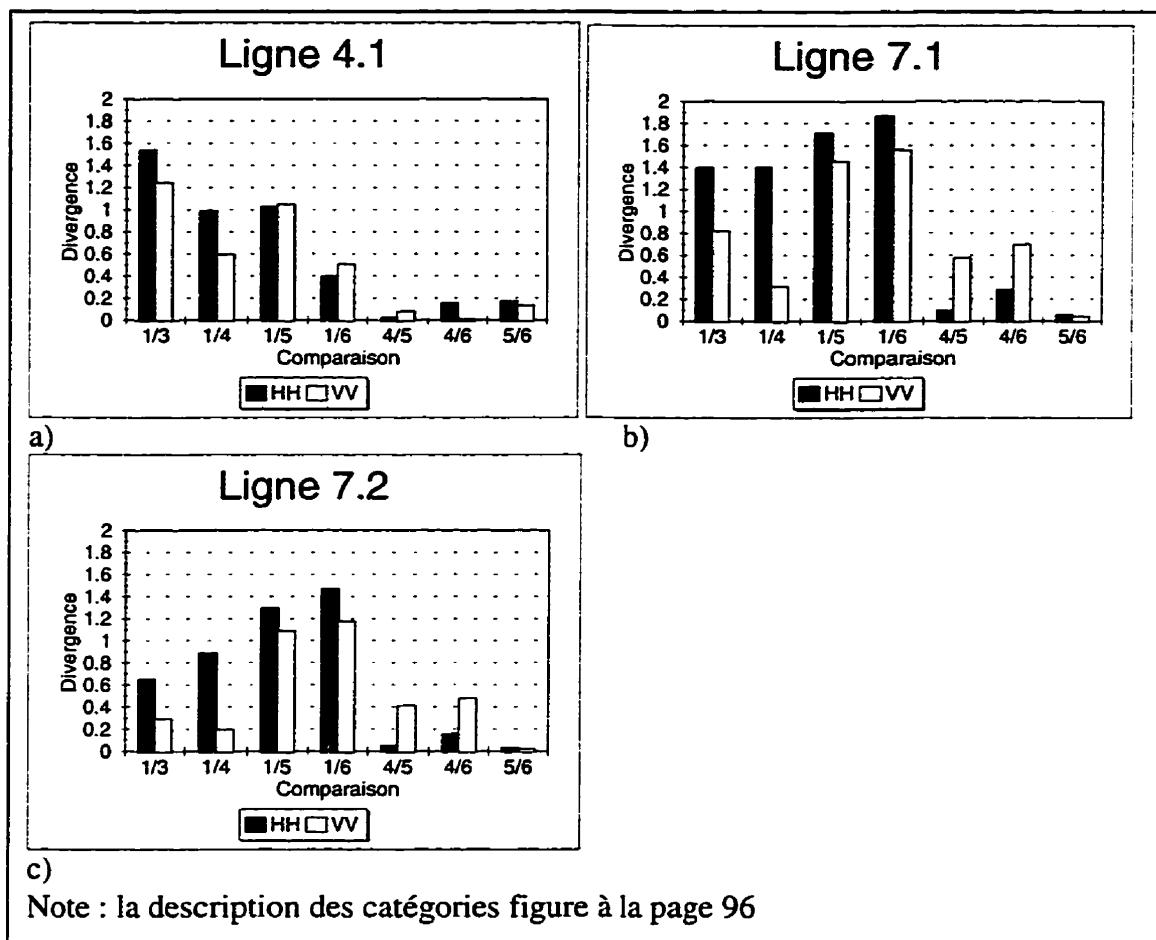


Figure 47 : Divergence transformée pour la comparaison des signatures des catégories comparées deux à deux. a) ligne 4.1 ( $\theta_{ref}$  entre  $73^\circ$  et  $78^\circ$ ), b) ligne 7.1 ( $\theta_{ref}$  entre  $66^\circ$  et  $73^\circ$ ), c) ligne 7.2 ( $\theta_{ref}$  entre  $35^\circ$  et  $59^\circ$ )

#### 4.3.4 Résumé des résultats obtenus pour le site de Taboga

La discrimination entre les catégories de sol nu avant semence et de la canne à sucre entre 100 et 141 jours semble augmenter avec  $\theta_{ref}$ , sauf aux angles rasants (supérieurs à  $73^\circ$ ). Cette hypothèse est basée sur le fait que la différence des moyennes entre ces deux catégories était plus élevée pour  $\theta_{ref}$  entre  $66^\circ$  et  $73^\circ$  que pour  $\theta_{ref}$  entre  $35^\circ$  et  $59^\circ$ . Les valeurs de la divergence transformée pour la comparaison de ces mêmes catégories étaient aussi plus élevées. Cependant, pour  $\theta_{ref}$  entre  $73^\circ$  et  $78^\circ$ , nous avons obtenu des valeurs plus faibles de l'écart entre les moyennes des catégories, de la divergence transformée et de la valeur estimée du Chi-carré par le test de Kruskal-Wallis à partir des moyennes du  $\sigma^\circ$  de chaque parcelle. Il semble que l'on observe un mécanisme de rétrodiffusion différent aux angles très élevés, possiblement par une plus grande atténuation des contributions du sol et des réflexions multiples entre le sol et la canne à sucre, causée par un parcours plus long du rayonnement à travers la végétation.

Pour  $\theta_{ref}$  entre  $35^\circ$  et  $59^\circ$  et entre  $66^\circ$  et  $73^\circ$ , nous avons obtenu avec la polarisation HH une meilleure discrimination qu'avec la VV entre le sol nu avant semence et les autres catégories considérées dans l'analyse statistique, soient la canne semée d'entre 60 et 100 jours, la canne récoltée entre 15 et 30 jours, entre 60 et 80 jours et entre 100 et 141 jours. Ceci est notable autant au niveau de l'écart entre les moyennes de  $\sigma^\circ$  des catégories qu'au niveau des valeurs calculées de la divergence transformée. De plus, le coefficient de corrélation entre le  $\sigma^\circ$  moyen de chaque parcelle et l'âge de la canne à sucre semée depuis 20 à 100 jours était plus élevé en HH qu'en VV. Toutefois, la polarisation VV a produit une meilleure discrimination que la HH entre les catégories de canne à sucre récoltée de différents âges. Pour les trois images étudiées, le coefficient de corrélation obtenu entre le  $\sigma^\circ$  moyen de chaque parcelle et l'âge de la repousse de la canne récoltée depuis 20 à 80 jours était plus élevé en VV qu'en HH.

Les résultats présentés suggèrent qu'en climat relativement sec il soit possible de séparer, au moyen de leur  $\sigma^\circ$  moyen, les parcelles bien couvertes par la canne à sucre des parcelles de sols nus, sauf pour des angles d'incidence supérieurs à  $73^\circ$ . Les valeurs de la divergence transformée indiquent que pour des angles d'incidence entre  $66^\circ$  et  $73^\circ$ , en



polarisation HH, il est possible d'obtenir une séparation imparfaite mais satisfaisante des pixels de sol nu avant semence par rapport aux différents groupes de la canne récoltée (entre 20 et 141 jours), et par rapport à la canne à sucre semée depuis 60 à 80 jours.

#### 4.4 DISCUSSION SUR L'EFFET DE LA TENEUR EN EAU SUR LES CAPACITÉS DISCRIMINANTES DES IMAGES

Si la végétation est considérée nuisible pour l'estimation la teneur en eau des sols à partir d'images ROS (Dubois *et al.*, 1995), l'effet de la teneur en eau des sols est lui aussi perturbateur pour l'évaluation de la couverture végétale. Bien que l'augmentation de la rétrodiffusion du sol en fonction de la teneur en eau soit un phénomène bien connu, on retrouve dans la littérature peu de mises en garde sur l'effet perturbateur de l'humidité du sol, qui peut aussi affecter l'estimation de la biomasse des forêts et l'identification des coupes à blanc avec la bande C, surtout en milieu tropical humide.

Les résultats de Alphonse et Le Toan (1988) montrent que la végétation peut interférer avec le potentiel de mesure de la teneur en eau, et que l'effet de la teneur en eau peut grandement gêner l'évaluation de la couverture végétale. En effet, en faisant varier l'humidité du sol dans le cadre de mesures au diffusomètre sur des cultures de soya, ces auteurs ont remarqué (figure 10 de leur article) que pour une teneur en eau du sol entre 0,1 et 0,2 g/cm<sup>3</sup>,  $\sigma^{\circ}$  variait peu en fonction de la fraction volumique de la végétation. Pour des teneurs en eau supérieures, la rétrodiffusion des sols nus était élevée et diminuait en fonction de la fraction volumique de la végétation. Pour des teneurs en eau inférieures, elle était faible pour les sols nus, et augmentait avec la présence de végétation. Pour des fractions volumiques végétales élevées, la rétrodiffusion était pratiquement indépendante de la teneur en eau du sol. Nos résultats confirment cette observation ; aux angles d'incidence moyens au site de Juan Viñas, la canne à sucre développée présente un  $\sigma^{\circ}$  plus faible que celui du sol nu rugueux et humide, et au site de Taboga, plus élevé que celle du sol nu rugueux et sec. Cependant, pour les angles d'incidence rasants au site de Juan Viñas, le sol nu et la canne à sucre de plus de 100 jours présentent des valeurs semblables de  $\sigma^{\circ}$ .

## 5. LA COMPLÉMENTARITÉ DES POLARISATIONS ET DES ANGLES D'INCIDENCE

Au chapitre précédent, nous avons comparé différents angles d'incidence, différents sites et les polarisations HH et VV quant à leur habilité de discriminer entre différents stades de croissance de la canne à sucre et des cultures maraîchères. Dans ce chapitre, nous verrons si la combinaison des polarisations et des angles d'incidence améliore les capacités discriminantes du radar.

### 5.1 CONTRASTES DE POLARISATION

Nous avons vu au chapitre précédent que certaines parcelles agricoles présentaient de remarquables contrastes de polarisation. En effet, pour le site de Tierra Blanca, ce sont les jachères qui semblent montrer une rétrodiffusion plus forte en VV qu'en HH pour des angles d'incidence locaux élevés. Pour le site de Juan Viñas, ce sont les parcelles couvertes de résidus humides couchés sur le sol qui présentent un  $\sigma_{HH}^o$  supérieur à  $\sigma_{VV}^o$ .

L'objectif de cette section est de vérifier s'il est possible de profiter de ces contrastes de polarisation pour distinguer les parcelles couvertes de résidus de canne à sucre, et étudier comment ces contrastes varient avec l'angle d'incidence local  $\theta_{loc}$ . En effet, on a vu que les contrastes variaient entre les lignes de vol couvrant un même site avec des angles d'incidence différents. Par exemple, pour le site de Tierra Blanca, une rétrodiffusion plus forte en VV qu'en HH s'observait pour les jachères seulement à des angles d'incidence très élevés.

Les indices ou rapports de polarisation peuvent aider à contourner le problème de l'étalonnage, lorsque les phénomènes observés montrent des comportements particuliers en ce qui a trait à la polarisation. Il faut dans ce cas que les variations en HH et en VV dépendantes de la portée oblique soient équivalentes ou encore corrigées. La plupart des études se rapportant aux indices de polarisation publiées dans le domaine de la télédétection radar utilisent des rapports de polarisation (Le Toan *et al.*, 1989, Dubois *et*

al. (1995)), ou encore une différence normalisée (Paloscia and Pampaloni (1992), pour l'étude des hyperfréquences passives). Nous utiliserons ici simplement le rapport entre les coefficients de rétrodiffusion en HH et en VV, qui se traduit par une différence entre ces coefficients pour des images étalonnées en dB. Dans ce chapitre, l'indice de polarisation IP est donc défini comme:

$$IP_{(dB)} = \sigma_{HH(dB)} - \sigma_{VV(dB)} \quad (5-1)$$

### 5.1.1 Discrimination entre catégories, basée sur l'indice de polarisation IP

Pour cette étape, seul le site de Juan Viñas sera étudié. L'indice IP moyen sur chaque parcelle est calculé comme la différence des moyennes de  $\sigma_{HH}$  et de  $\sigma_{VV}$  sur chaque parcelle.

Pour le site de Juan Viñas, le test de Kruskal-Wallis est appliqué à l'IP pour les mêmes comparaisons de catégories qu'au chapitre précédent (voir la définition des catégories à la page 80). La figure 48 présente les approximations du Chi-carré ainsi obtenues pour chaque ligne de vol, comparées à celles obtenues pour les polarisations HH et VV prises séparément. Le IP produit une discrimination très significative entre la catégorie des résidus (catégorie 4) et toutes les autres catégories comprises dans cet exercice, qui sont la canne dans différents stades de croissance et le sol nu rénové avant semence.

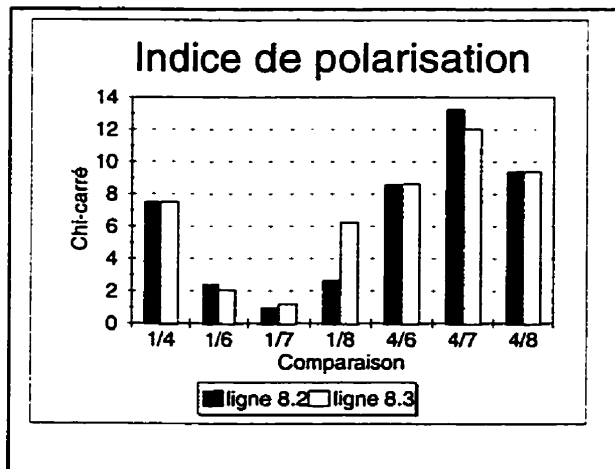


Figure 48 : Résultats du test de Kruskal-Wallis en utilisant l'indice de polarisation comme variable (site de Juan Viñas)

Pour la distinction des résidus, nous avons obtenu des valeurs du Chi-carré supérieures en utilisant le IP qu'en utilisant séparément les polarisations HH ou VV, lorsque comparées avec celles de la figure 38. Rappelons que les parcelles brûlées, récemment semées et semées depuis 84 jours n'ont pas été incluses en raison du petit nombre d'observations pour chacune d'elles, mais que celles-ci ne montraient pas de forts contrastes de polarisation. Pour la ligne 8.3 (angles d'incidence moyens), le IP permet une distinction entre le sol nu et la canne mûre de presque deux ans (catégories 1 et 8), en raison du faible  $\sigma_{HH}^o$  de la canne mûre, mais moins significative qu'en utilisant séparément les polarisations HH et VV.

La figure 49 présente les valeurs de la divergence transformée obtenues en utilisant a) les polarisations HH et VV comme deux canaux séparés, et b) en utilisant l'indice de polarisation seul. Ces valeurs ont été calculées sur les images de  $\sigma_{(m2/m2)}^o$  filtrées à l'aide d'un filtre de la médiane de taille 5 x 5. L'indice de polarisation est alors le rapport entre  $\sigma_{HH(m2/m2)}^o$  et  $\sigma_{VV(m2/m2)}^o$  pour chaque pixel.

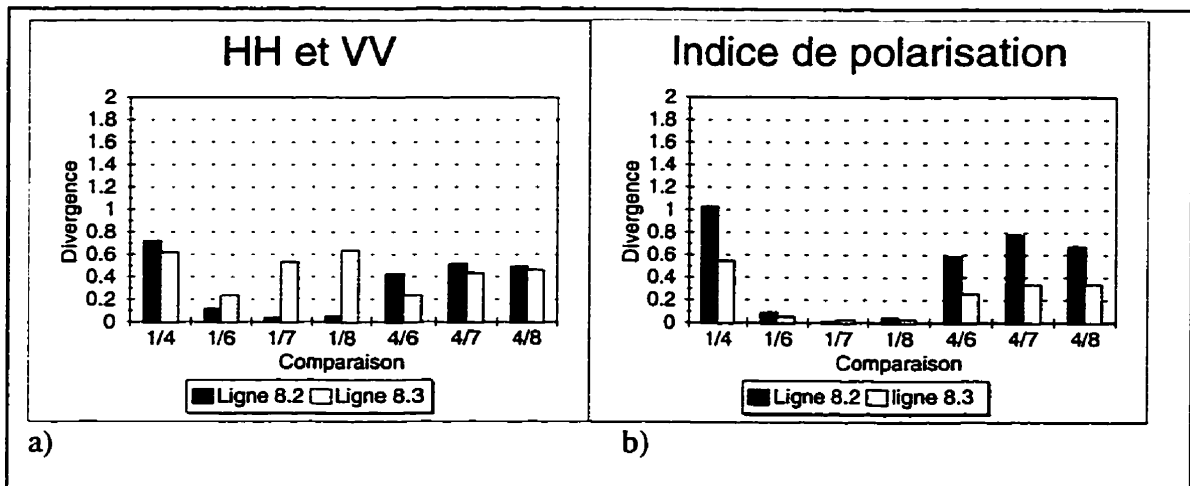


Figure 49 : Divergence transformée des signatures de catégories comparées deux par deux, a) en combinant HH et VV comme canaux séparés, b) en utilisant l'image de l'indice de polarisation

Pour la ligne 8.2, on obtient des valeurs de divergence plus élevées en utilisant l'IP qu'en utilisant les polarisations HH et VV ensemble comme deux canaux séparés. Les valeurs sont très faibles, en général inférieures à 1, ce qui implique un grand chevauchement entre les classes et qu'une classification automatique laisserait un très grand nombre de pixels mal classifiés. Nous observons des valeurs de divergence appréciables à l'aide du IP seulement pour la comparaison des résidus (catégorie 4) avec les autres catégories, et les valeurs obtenues sont plus élevées pour la ligne 8.2 ( $\theta_{loc(t)}$  entre 62° et 79°) que pour la ligne 8.3 ( $\theta_{loc(t)}$  entre 39° et 63°). L'utilisation des polarisations HH et VV dans deux canaux séparés produit des valeurs de divergence légèrement supérieures pour la ligne 8.2 que pour la 8.3.

La figure 50 montre une image de l'indice de polarisation IP calculé à partir des images en HH et VV du site de Juan Viñas (ligne 8.2), filtrées au moyen d'un filtre de la médiane de taille 5x5. Les parcelles couvertes de résidus de canne présentent des tons brillants.

### 5.1.2 Relation entre le IP et l'angle d'incidence local

La figure 51 montre la relation entre le IP des parcelles et  $\theta_{loc(t)}$  pour le site de Juan Viñas, pour les images des deux lignes de vol regroupées, a) pour les parcelles de résidus et b) pour parcelles de canne récoltée entre 310 et 435 jours (catégorie 7). Nous remarquons que dans les deux cas le IP augmente avec  $\theta_{loc(t)}$ . Cependant, aux angles d'incidence élevés de la ligne 8.2, les cinq parcelles de résidus présentent un IP supérieur à 4,45, tandis que les parcelles de canne à sucre présentent un IP moyen inférieur. En utilisant un seuil de 4,45 pour le IP moyen des parcelles, on a pu séparer les cinq parcelles de résidus de toutes les autres parcelles étudiées, sauf d'une seule parcelle de la catégorie 7 qui présentait aussi un IP supérieur à 4,45. Pour les angles moyens de la ligne 8.3, en utilisant un seuil de 2,43, on a pu séparer les cinq parcelles de résidus des autres sauf pour une parcelle semée il y a 84 jours et quatre parcelles de la catégorie 7.



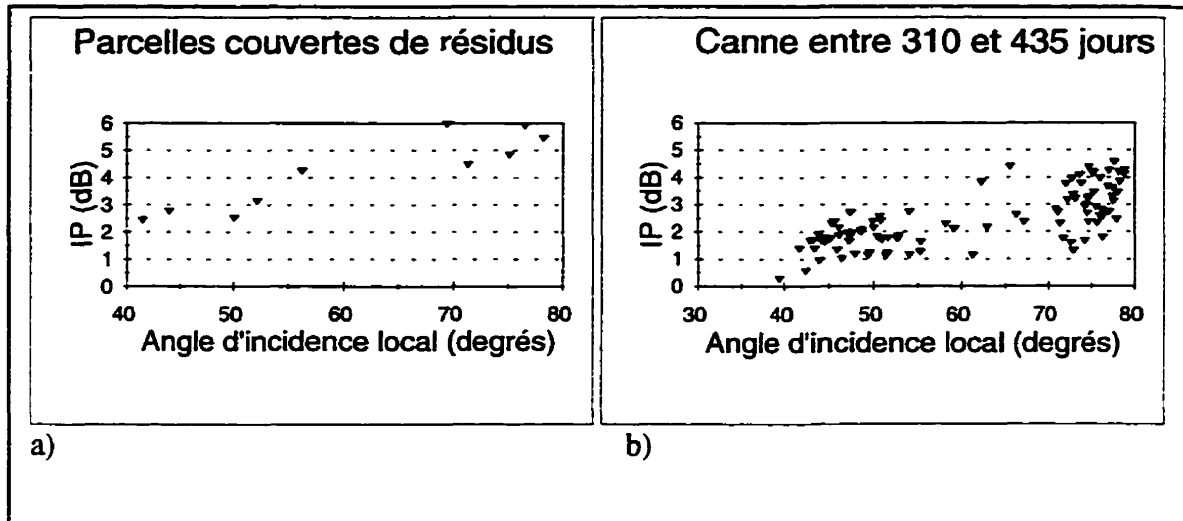


Figure 51 : Valeur de l'indice de polarisation IP en fonction de l'angle d'incidence local a) pour les résidus et b) pour les parcelles de canne entre 310 et 435 jours

Les résultats du test de Kruskal-Wallis ne montre pas, à la figure 48, de différence importante entre le pouvoir discriminant des deux lignes de vol acquises à des angles d'incidence différents. Cependant, les mesures de divergence (figure 49) montrent une meilleure discrimination pour des angles d'incidence locaux plus élevés. Rappelons aussi que pour le site de Tierra Blanca, des valeurs de  $\sigma_{VV}^o$  supérieures à  $\sigma_{HH}^o$  se produisait seulement pour des angles d'incidence élevés. Le nombre d'observations disponibles pour ce site est insuffisant pour réaliser une analyse de la relation entre le contraste de polarisation et  $\theta_{loc(t)}$ , mais le phénomène remarqué est intéressant et pourrait être expliqué par un rapprochement des orientations de la tige de la plante et du vecteur de déplacement électrique pour la polarisation VV aux angles d'incidence élevés.

### 5.1.3 Causes des contrastes de polarisation

Dans la littérature, les contrastes de polarisation sont souvent expliqués par l'orientation préférentielle de la végétation, et on adapte parfois l'explication au phénomène observé. Par exemple, lorsque la végétation est plutôt verticale (cas du riz ou des herbes), l'observation de  $\sigma_{VV}^o > \sigma_{HH}^o$  est souvent expliquée par une atténuation plus forte en VV, et d'autre part le cas  $\sigma_{VV}^o > \sigma_{HH}^o$  est expliqué par un plus grand nombre de diffuseurs verticaux. Dans certains cas, l'atténuation domine l'effet de l'orientation de la végétation, et dans d'autres cas c'est la rétrodiffusion. La manière avec laquelle le rayonnement

interagit avec le milieu dépend beaucoup de l'angle d'incidence local et de la hauteur de la végétation.

L'effet de l'orientation de la végétation sur les contrastes de polarisation dépend des proportions des contributions de la végétation, du sol et des réflexions multiples entre le sol et la végétation. L'atténuation ne pourra jouer un rôle important que si la rétrodiffusion provenant du sol ou des réflexions multiples entre le sol et la végétation sont suffisamment fortes pour se faire atténuer. Si la rétrodiffusion de la végétation domine, le rayonnement dont l'orientation de la polarisation est plus proche de celle des composantes de la végétation sera plus fortement rétrodiffusé. Si les contributions du sol ou des interactions entre le sol et la végétation dominent, le rayonnement dont l'orientation de la polarisation est plus proche de celle des composantes de la végétation sera plus fortement atténué, donc la polarisation contraire sera favorisée au niveau du coefficient de rétrodiffusion mesuré. Les facteurs pouvant faire varier ces contributions sont :

- l'épaisseur du couvert (plus elle est élevée, moins la contribution du sol sera forte),
- la teneur en eau du couvert (plus elle est élevée, plus la contribution de la végétation sera forte),
- l'angle d'incidence, qui influence le trajet du rayonnement dans la végétation avant de toucher le sol, et qui affecte aussi la projection du vecteur du champ électrique sur l'axe la végétation.

Le Toan *et al.* (1984) ont montré l'effet de l'orientation de la polarisation sur l'atténuation des hyperfréquences par le blé ; l'atténuation est beaucoup plus forte lorsque la direction d'oscillation du champ électrique se rapproche de celle de l'orientation des tiges. Ulaby et Wilson (1985) confirment ces observations en montrant que pour le blé l'atténuation est bien supérieure pour la polarisation verticale que pour la polarisation horizontale et que cette différence augmente avec l'angle d'incidence local, l'orientation du vecteur de déplacement électrique du rayonnement polarisé verticalement se rapprochant de plus en plus de celui des tiges. Ces résultats sur l'atténuation expriment le degré avec lequel le rayonnement interagit avec la végétation. Si l'atténuation est grande, il est probable que la rétrodiffusion sera grande elle aussi en autant que la taille des éléments diffusants soit comparable ou supérieure à la longueur d'onde. Le  $\sigma^o$  mesuré dépendra de la contribution



du sol, de la végétation et des réflexions multiples. L'orientation de la végétation aura un effet qui dépendra de la proportion de chacune de ces composantes. La très grande corrélation qu'ont trouvée Le Toan *et al.* (1984) entre la différence de polarisation ( $\sigma_{VV(dB)} - \sigma_{HH(dB)}$ ) et la teneur en eau volumique de la végétation pourrait s'expliquer, en partie, par une plus grande contribution du sol (et une atténuation en VV) lorsque le blé est sec, et une plus grande contribution du couvert végétal (et une rétrodiffusion supérieure en VV) lorsque le blé est humide.

Les simulations de  $\sigma^\circ$  en fonction de l'angle d'incidence réalisées par Bakhtiari et Zoughi (1991) pour les prairies à hautes herbes indiquent que pour de faibles angles d'incidence,  $\sigma_{HH}^\circ$  est supérieur à  $\sigma_{VV}^\circ$ , en raison de la forte influence du sol (les brins d'herbe sont considérés comme étant presque transparents). A partir d'un certain angle d'incidence (environ 40° pour la bande C), l'herbe devient la principale source de rétrodiffusion puisque le rayonnement parvient moins au sol et la rétrodiffusion est plus forte en VV qu'en HH. L'angle d'incidence auquel cette inversion se produit augmente avec une diminution de la longueur d'onde. Notre observation de la jachère à Tierra Blanca concorde avec cette simulation, sauf que les valeurs de  $\sigma_{VV}^\circ$  supérieures à  $\sigma_{HH}^\circ$  se sont présentées seulement aux angles d'incidence très élevés (supérieurs à 80°).

Le Toan *et al.* (1989) ont utilisé le rapport de polarisation  $\sigma_{HH(m2/m2)} / \sigma_{VV(m2/m2)}$ , équivalent à notre IP, calculé au moyen de fenêtres de 9x9 pixels, pour cartographier les rizières. En effet, ces auteurs ont trouvé qu'en bande X, les cultures de riz très jeunes montrent un  $\sigma_{VV}^\circ > \sigma_{HH}^\circ$ , et qu'au-delà de la formation des tiges,  $\sigma_{HH}^\circ > \sigma_{VV}^\circ$ . Ils ont appliqué des opérateurs de morphologie mathématique pour lisser l'image binaire obtenue en fixant un seuil à la valeur du rapport de polarisation. Ces auteurs expliquent la diminution de la rétrodiffusion en VV au cours de la croissance du riz par une augmentation de l'atténuation dans cette polarisation. Les valeurs du IP aussi que 10 dB restent inexplicables par leurs modèles de rétrodiffusion. L'eau sous-jacente joue sans aucun doute un rôle très important chez le riz qui montre des contrastes de polarisation beaucoup plus élevés que toute autre culture. L'orientation verticale des tiges de riz atténuerait préférentiellement le rayonnement polarisé verticalement, et le rayonnement polarisé horizontalement serait rétrodiffusé entre l'eau et les brins de riz de façon beaucoup plus forte.

Lors de l'étude d'images de la mission SAREX 92 en bande C au Brésil, Shimabukuro *et al.* (1994) ont remarqué que les pâturages présentaient une rétrodiffusion plus forte en VV qu'en HH, ce qu'ils ont attribué à l'orientation plutôt verticale des brins d'herbe. Cet effet ne se présentait pas pour les pâturages délaissés, qui étaient envahis par de mauvaises herbes et de petits arbustes, probablement à cause de la structure plus aléatoire du couvert végétal.

## 5.2 COMBINAISON D'IMAGES RADAR ACQUISES À ANGLES D'INCIDENCE DIFFÉRENTS

On a vu au chapitre 4 que le coefficient de rétrodiffusion varie en fonction de l'angle d'incidence local, et de façon différente pour différents types de couvert. La combinaison d'images acquises à angles d'incidence différents a donc le potentiel d'améliorer la discrimination entre ces types de couvert, par rapport à l'utilisation de chaque image individuelle. On étudiera l'avantage que présente la combinaison d'images acquises à différents angles d'incidence au moyen de l'affichage combiné de ces images, du calcul de la différence du coefficient de rétrodiffusion moyen des parcelles et de l'évaluation de la divergence entre les signatures spectrales réalisées en utilisant deux images au lieu d'une seule.

### 5.2.1 Affichage combiné des images

Les figures 52 à 54 présentent la combinaison des images des différentes lignes de vol disponibles pour les trois sites, en polarisation HH. En ce qui concerne les sites de Tierra Blanca et de Juan Viñas, les effets des ombres dues au relief dominant l'image, puisque la visée de la ligne 8.3 est antiparallèle à celle des lignes 8.1 et 8.2. Pour le site de Tierra Blanca, les parcelles de sol nu présentent des tons verdâtres puisqu'elles ont une rétrodiffusion appréciable aux angles intermédiaires de la ligne 8.2, et plus faibles aux angles élevés des lignes 8.1 et 8.3. Pour le site de Juan Viñas, certaines des parcelles de canne de un ou deux ans apparaissent rougeâtres en raison d'une plus forte rétrodiffusion dans la ligne 8.2 que dans la 8.3. Cependant, cette tendance n'est pas consistante pour toutes les parcelles de canne de un ou deux ans. Le site de Taboga présente, à la figure 54, un résultat intéressant : les parcelles de couleur jaune et jaune oranger sont des parcelles de

canne de plus de deux mois qui montrent une rétrodiffusion relativement forte dans les lignes 7.1 et 7.2, mais une rétrodiffusion très faible à angles d'incidence rasants. Les parcelles de ton plutôt gris sont celles de canne jeune pour lesquelles les trois lignes de vol présentent une rétrodiffusion intermédiaire. Les parcelles sombres, à faible rétrodiffusion pour les trois lignes de vol, sont les parcelles en préparation ou récemment semées ou de riz en préparation et inondé. Les parcelles de couleur jaune pâle sont de riz mûr et présentent une rétrodiffusion relativement élevée pour les trois lignes de vol.

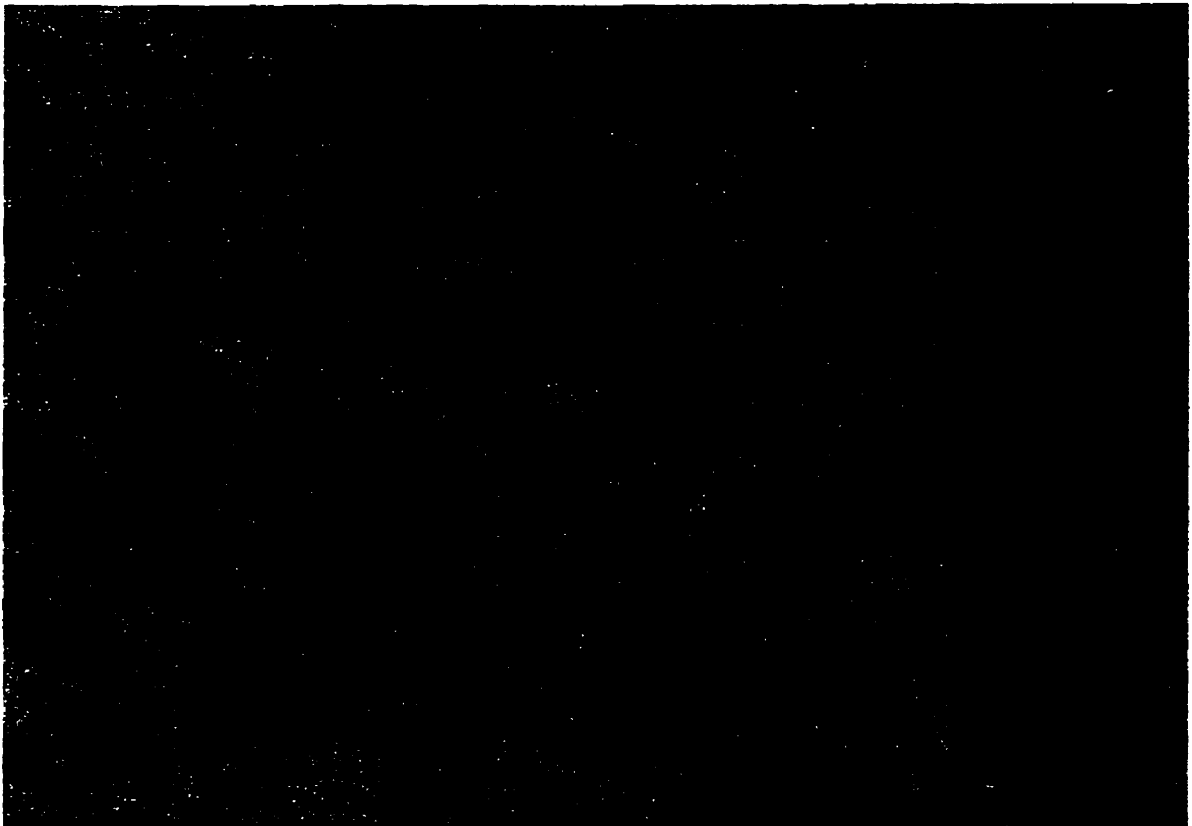


Figure 52 : Combinaison de la polarisation HH des lignes 8.1 (rouge), 8.2 (vert) et 8.3 (bleu) pour une portion du site de Tierra Blanca

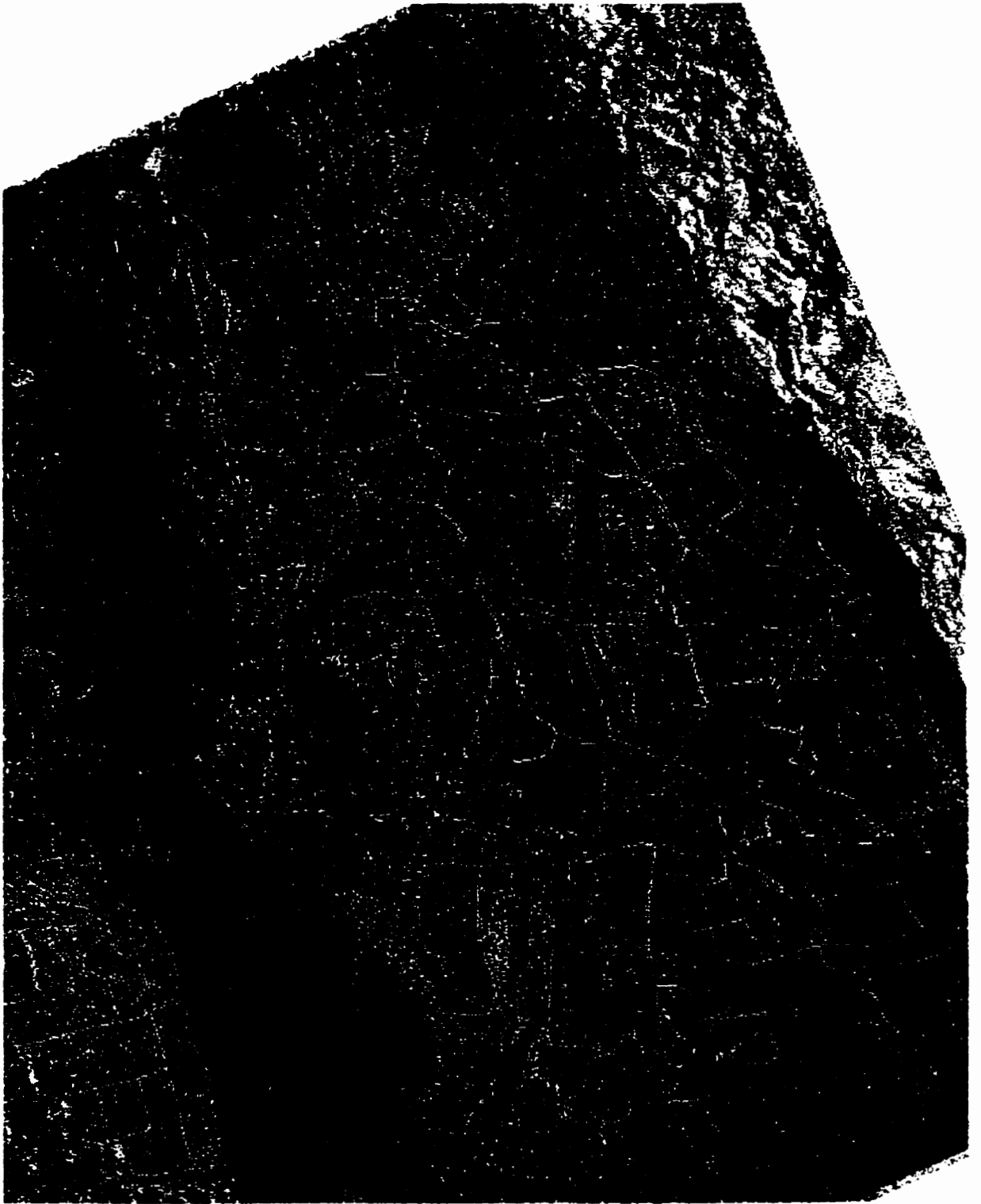


Figure 53 : Combinaison de la polarisation HH des lignes 8.2 (rouge) et 8.3 (vert et bleu) pour le site de Juan Viñas



Figure 54 : Combinaison de la polarisation HH des lignes 7.2 (rouge), 7.1 (vert) et 4.1 (bleu) pour le site de Taboga

### 5.2.2 Suivi de la croissance et discrimination entre catégories

La figure 55 montre, en fonction de l'âge de la repousse de la canne récoltée, les différences entre le  $\sigma_{(m)}$  moyen des parcelles obtenu pour deux lignes de vol (correspondant à un rapport de valeurs de  $\sigma_{(m2/m2)}$ ). Nous n'observons pas de comportement particulier pour la différence, mais les différences  $\sigma_{4.1} - \sigma_{7.1}$  et  $\sigma_{4.1} - \sigma_{7.2}$  diminuent en fonction de l'âge de la repousse. La figure 56 a) présente les résultats du test de Kruskal-Wallis (approximation du Chi-carré) pour la distinction entre catégories en utilisant  $\sigma_{4.1} - \sigma_{7.1}$  comme variable. En comparant ces résultats avec ceux de la figure 47, on obtient de meilleurs résultats avec la différence  $\sigma_{4.1} - \sigma_{7.1}$  qu'avec les lignes de vol considérées seules pour la distinction entre les catégories 4 et 6, c'est à dire entre les jeunes pousses de canne récoltées depuis entre 15 et 30 jours et la canne entre 100 et 141 jours. Pour ce qui est de la discrimination entre les catégories 5 (canne entre 60 et 80 jours) et 6, la différence  $\sigma_{4.1} - \sigma_{7.1}$  produit une valeur du Chi-carré qui est supérieure à celle obtenue en utilisant  $\sigma_{4.1}$  seul pour la polarisation HH, mais inférieure pour la polarisation VV. La différence  $\sigma_{4.1} - \sigma_{7.1}$  a aussi produit une discrimination significative entre les catégories 1 et 6, avec des valeurs du Chi-carré semblables à celles obtenues avec  $\sigma_{4.1}$ , mais inférieures à celles obtenues avec  $\sigma_{4.1}$  ou  $\sigma_{7.1}$ .

La figure 56 b) présente les valeurs de la divergence transformée calculées sur les images du  $\sigma_{(m2/m2)}$  filtrées au moyen d'un filtre de la médiane de taille 5 x 5. En comparant ces valeurs avec celles de la figure 48, nous remarquons que l'utilisation combinée des lignes 4.1 et 7.1 augmente les valeurs de la divergence et améliorerait donc les résultats d'une éventuelle classification automatique des pixels. Si l'on considère 1,7 la valeur de divergence à partir de laquelle une discrimination est acceptable, on pourrait espérer une classification imparfaite mais satisfaisante des pixels des parcelles de sol nu pour la polarisation HH. Les résultats sont moins bons pour la polarisation VV où les valeurs de la divergence sont plus faibles et où il se produit une confusion notable entre le sol nu avant semence (catégorie 1) et la canne à sucre récoltée depuis 15 à 30 jours (catégorie 4). La combinaison des deux lignes de vol améliore légèrement la discrimination entre les catégories 4 et 6 et d'autre part entre les 5 et 6, mais les valeurs de divergence restent très faibles et une classification automatique aurait peu de succès.

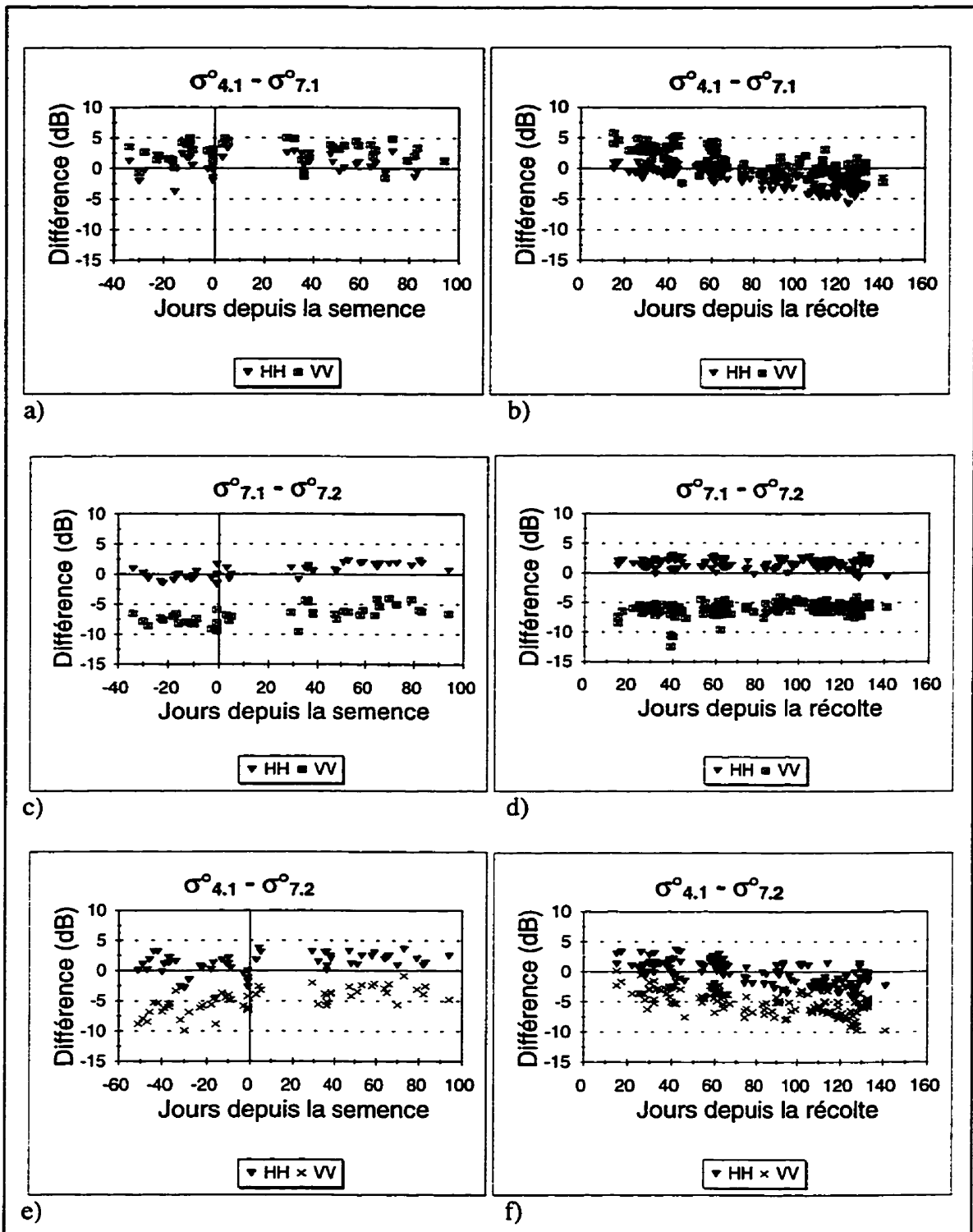


Figure 55 : Différence entre les coefficients de rétrodiffusion des lignes de vol, en fonction de l'âge de la repousse des parcelles récoltées et rénovées, site de Taboga. a) 4.1 et 7.1 parcelles rénovées, b) 4.1 et 7.1, parcelles récoltées c) 4.1 et 7.2, parcelles rénovées, d) 7.1 et 7.2, parcelles récoltées e) 4.1 et 7.2, parcelles rénovées, f) 7.1 et 7.2, parcelles récoltées

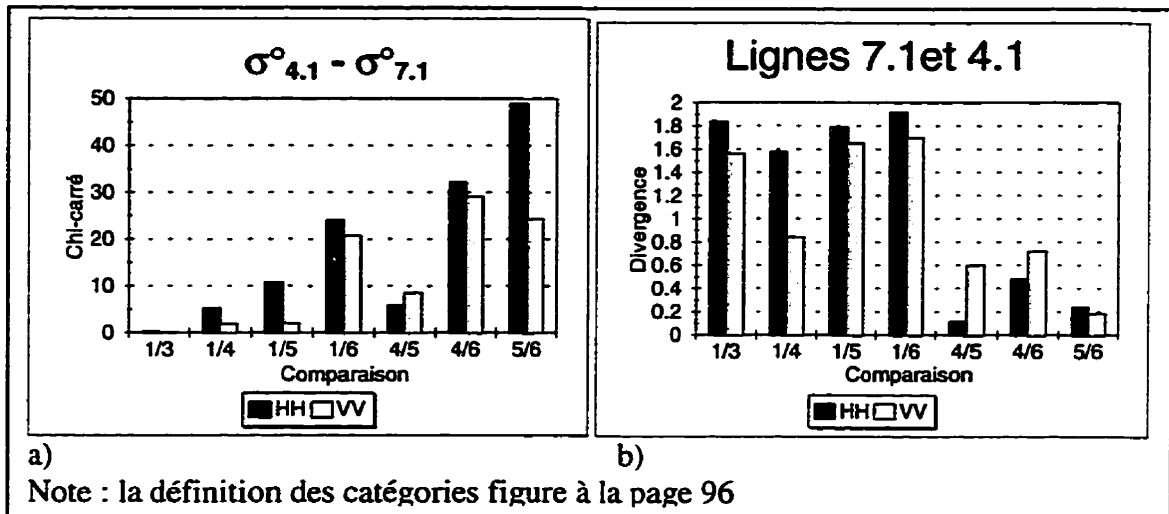


Figure 56 : a) Résultats des tests statistiques de Kruskal-Wallis (approximation du Chi-carré) pour la distinction des catégories à partir de la différence du coefficient de rétrodiffusion entre les lignes de vol 4.1 et 7.1, (site de Taboga). b) Mesures de divergence des signatures utilisant les images des lignes 4.1 et 7.1

Cette même analyse a été appliquée au site de Juan Viñas ; la figure 57 montre les valeurs de  $\sigma_{8.2}^o - \sigma_{8.3}^o$  pour chaque parcelle en fonction de l'âge de la repousse . On ne voit pas de relation consistante entre cette différence et l'âge de la canne à sucre. De plus, la dispersion de valeurs est si grande qu'on ne peut distinguer une catégorie de croissance d'une autre. Cependant, pour plupart des parcelles de presque deux ans, on obtient une différence positive (une rétrodiffusion plus forte à angle d'incidence plus élevé). Pour le sol nu avant semence et les résidus, les valeurs tendent à être négatives en VV.

La figure 58 a) montre les résultats du test de Kruskal-Wallis (approximation du Chi-carré) appliqué à  $\sigma_{8.2}^o - \sigma_{8.3}^o$ . Pour la polarisation HH, il y a une discrimination très significative entre le sol nu avant semence et la canne de presque deux ans (catégories 1 et 8). Pour la polarisation VV, les parcelles de résidus (catégorie 4) se distinguent significativement de la canne d'un an (catégorie 7) et de la canne de presque deux ans (catégorie 8) par la différence en polarisation VV.



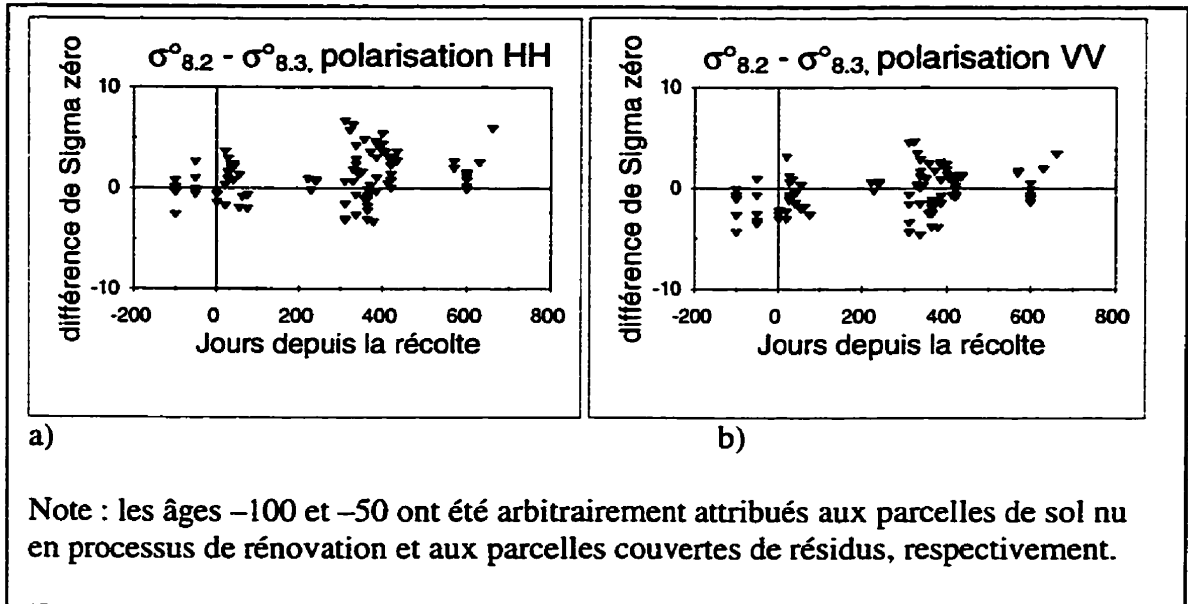


Figure 57 : Différence entre les coefficients de rétrodiffusion lignes 8.2 et 8.3 en fonction de l'âge de la repousse, site de Juan Viñas. a) polarisation HH, b) polarisation VV

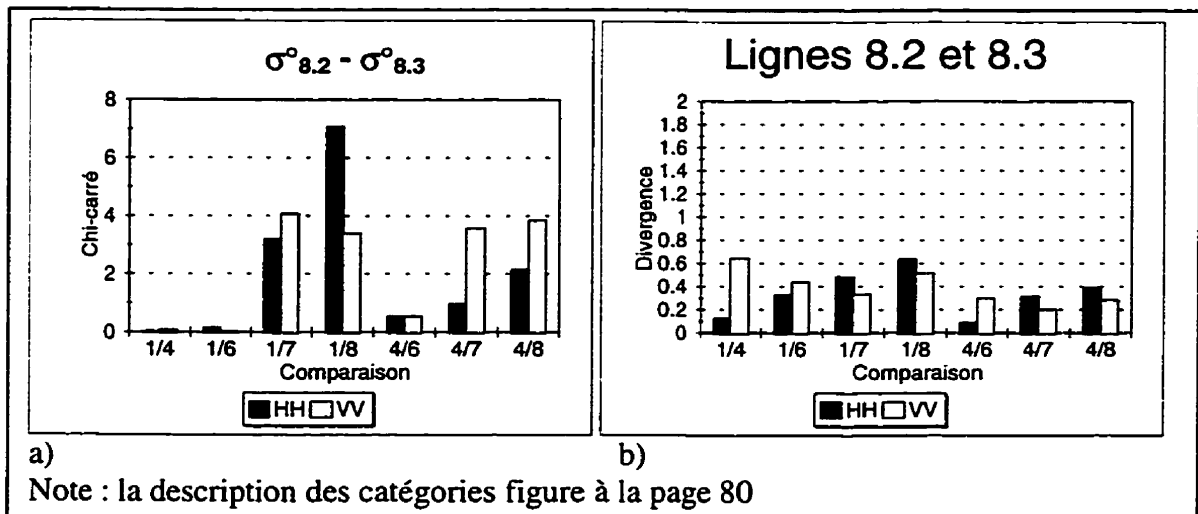


Figure 58 : a) Chi carré évalué au moyen du test de Kruskal-Wallis pour le site de Juan Viñas en utilisant la différence entre des coefficients de rétrodiffusion des lignes 8.2 et 8.3 comme variable. b) mesures de divergence des signatures utilisant les images des lignes 8.2 et 8.3.

La figure 58 b) présente les valeurs de la divergence transformée calculées pour les différentes comparaisons entre catégories, pour les images de  $\sigma^{\circ}_{(m2/m2)}$  filtrées à l'aide

d'un filtre de la médiane de taille 5 x 5. Les valeurs de divergence sont extrêmement faibles, indiquant qu'il ne serait possible de réaliser une séparation automatique des pixels pour aucune des catégories étudiées.

Autret *et al.* (1994) proposent la comparaison de la rétrodiffusion mesurée à des angles d'incidence différents, avec la même polarisation et la même fréquence, comme moyen d'éliminer l'effet de la teneur en eau et de pouvoir mesurer la rugosité de surface des sols nus. Ils établissent que la combinaison d'angles qui optimise la sensibilité à la rugosité est 20° et 40°. Le rapport entre les coefficients de rétrodiffusion  $\sigma_{(m2/m2)}^o$  à 40° et 20° augmente avec la rugosité de surface, selon les simulations réalisées par ces auteurs. Pour notre site de Taboga, le fait que la croissance de la canne à sucre entraîne une diminution de  $\sigma_{4.1}^o - \sigma_{7.1}^o$  suggère qu'elle produise l'effet d'une diminution de la rugosité, peut-être par une atténuation des réflexions multiples entre le sol et la végétation.

La comparaison des résultats obtenus pour les deux sites de canne à sucre, Juan Viñas et Taboga, met en évidence la nécessité d'une réflexion plus profonde sur les mécanismes de rétrodiffusion qui prévalaient. La différence entre les coefficients de rétrodiffusion (en dB) d'une image acquise à angles intermédiaires et ceux d'une image acquise à angles rasants diminue avec la croissance de la canne pour le site de Taboga, mais nous n'observons pas ce phénomène pour le site de Juan Viñas. Mentionnons que les deux sites diffèrent par l'humidité des sols (faible pour Taboga, élevée pour Juan Viñas), les variétés de canne à sucre (à cycle d'un an avec tiges verticales à Taboga et à cycle de deux ans avec canne rampante à Juan Viñas), l'étendue des données disponibles (couvrant quatre mois de croissance à Taboga, deux ans à Juan Viñas), et le relief (qui fait douter de la validité des données acquises à angles très élevés pour Juan Viñas).

Pour les conditions sèches du site de Taboga, l'augmentation de la rétrodiffusion pendant les deux premiers mois de croissance puis la diminution subséquente pour les angles rasants suggère un rôle important des réflexions multiples entre le sol et les feuilles de canne à sucre en début de croissance, qui seraient atténuées ensuite avec l'augmentation de la biomasse. Cette diminution se noterait plus tôt aux angles rasants puisque le trajet à travers la végétation est plus élevé qu'aux angles d'incidence inférieurs. Il serait intéressant d'étudier l'évolution de la rétrodiffusion pour tout le cycle de croissance de la

canne à sucre en conditions sèches, étude qui est maintenant possible grâce aux satellites radar tels que RADARSAT.

Pour les conditions humides du site de Juan Viñas, le fait que la canne mûre présente une rétrodiffusion plus faible que le sol nu pour les angles intermédiaires pourrait provenir de la très forte rétrodiffusion du sol nu humide, qui est atténuée avec la croissance de la canne. Le fait que ce comportement n'ait pas été observé pour les angles presque rasants en conditions humides pourrait s'expliquer par la rétrodiffusion plus faible du sol nu au départ, qui était presque équivalente à celle de la canne adulte.

### 5.3 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS OBTENUS SUR LA COMPLÉMENTARITÉ DES POLARISATIONS ET DES ANGLES D'INCIDENCE

L'utilisation de l'indice de polarisation (IP) moyen par parcelle a permis une discrimination très significative de la catégorie des résidus de canne à sucre par rapport au sol nu avant semence et à la canne mûre ou en croissance, grâce à un IP plus élevé pour les résidus. Les parcelles couvertes de résidus ont pu être distinguées de la majorité des autres parcelles étudiées en fixant un seuil sur les valeurs de l'indice IP calculées pour chaque parcelle. Cependant, l'utilisation du IP ou des deux polarisations combinées dans une classification automatique aurait peu de succès pour identifier les pixels des parcelles couvertes de résidus en raison de la variance élevée de ce paramètre à l'intérieur de chaque parcelle.

L'indice de polarisation IP augmente avec l'angle d'incidence local et, pour la canne à sucre, sa capacité de distinguer les résidus et la canne à sucre augmente en fonction de ce paramètre. Pour le site de Taboga où les conditions étaient sèches, la combinaison d'images acquises à angles d'incidence rasants intermédiaires a montré un grand potentiel pour améliorer le suivi de la croissance de la canne à sucre et pour améliorer la discrimination entre le sol nu avant semence et les autres stades de croissance. La différence entre le  $\sigma^{\circ}$  mesuré à angles d'incidence très élevés et celui mesuré pour des angles intermédiaires diminue en fonction du nombre de jours de la repousse des parcelles récoltées. Ceci n'a cependant pas été observé pour le site de Juan Viñas pour lequel les sols étaient très humides.

## 6. CONCLUSIONS

Les paragraphes qui suivent font la mise au point sur la possibilité ou non de vérifier les hypothèses énoncées au chapitre 2, au moyen des résultats présentés aux chapitres 4 et 5. Pour chacun des thèmes soulevés dans les hypothèses, la conclusion est suivie d'un résumé des résultats qui l'appuient et d'une courte discussion sur ses conséquences pour la planification de l'acquisition d'images de télédétection radar satellitaire.

### 6.1 CERTAINS ANGLES D'INCIDENCE SONT-ILS PLUS AVANTAGEUX QUE D'AUTRES POUR AUGMENTER LES CONTRASTES ENTRE LES PARCELLES DE SOL NU ET CELLES COUVERTES PAR LA VÉGÉTATION ?

Les résultats présentés au chapitre 4 montrent que le contraste entre le sol nu rugueux et les parcelles couvertes par la végétation augmente avec l'angle d'incidence lorsque le sol est sec, et diminue légèrement lorsque le sol est humide. En effet, pour les sites de Tierra Blanca et de Juan Viñas, le  $\sigma^{\circ}$  des parcelles de sol nu rugueux diminue de façon plus importante avec  $\theta_{loc(t)}$  que pour les cultures maraîchères et la canne à sucre. Nos résultats montrent que pour les sites où les sols étaient secs (Tierra Blanca et Taboga), le contraste provient d'une rétrodiffusion plus faible pour le sol nu que pour les parcelles couvertes par la végétation ; la diminution plus rapide du  $\sigma^{\circ}$  des sols nus avec l'augmentation de l'angle d'incidence a entraîné une augmentation des contrastes. Cependant, les résultats obtenus pour l'image acquise à angles rasants pour le site de Taboga contredisent cette conclusion, en raison de la chute du  $\sigma^{\circ}$  avec la croissance à partir d'environ 80 jours. Il semble avoir un changement dans les mécanismes de rétrodiffusion à angles d'incidence très élevés (supérieurs à  $73^{\circ}$ ), possiblement causés par une atténuation des contributions du sol et des réflexions multiples entre le sol et la canne à sucre, survenant à cause d'une augmentation de la distance parcourue dans le couvert végétal. Ces angles d'incidence ne sont cependant pas accessibles par les capteurs radar à bord de satellites.

Pour le site de Juan Viñas où les sols étaient humides, les contrastes notés pour les angles d'incidence intermédiaires étaient causés par une rétrodiffusion plus forte pour le sol nu en préparation que pour la canne à sucre d'un an et de deux ans. Une augmentation de l'angle d'incidence a entraîné une diminution plus importante du  $\sigma^{\circ}$  des sols nus et une diminution des contrastes.

Nous pouvons faire les recommandations suivantes quant au choix de l'angle d'incidence, pour maximiser ces contrastes :

- Si les sols sont secs et rugueux, il vaut mieux choisir des angles d'incidence plus élevés pour réduire la rétrodiffusion du sol et augmenter les contrastes. Cependant, il faut être prudent avec les angles très élevés qui ne sont accessibles qu'avec des systèmes aéroportés.
- Pour la canne à sucre, si les sols sont très humides et très rugueux par rapport à la bande spectrale utilisée, il est probable que la rétrodiffusion de la canne à sucre sera plus faible que celle du sol nu ; dans ce cas, il vaudrait mieux choisir des angles d'incidence plus faibles pour maximiser la rétrodiffusion du sol nu.
- Si nous étudions des cultures à feuilles grasses ou larges comme celles de la pomme de terre, il est peu probable que la rétrodiffusion des sols nus même humides surpassent la leur. Il serait donc préférable de miser sur des angles d'incidence plus élevés pour réduire la rétrodiffusion des sols nus.

Ces recommandations sont basées sur l'hypothèse d'une plus grande stabilité angulaire du  $\sigma^o$  des cultures que de celui du sol nu, ce qui reste à vérifier pour une gamme plus étendue d'angles d'incidence et pour un plus grand nombre de cultures. On doit mentionner que les résultats présentés par Ulaby et Dobson (1988) montrent un écart plus important entre les  $\sigma^o$  mesurés à 20° et 50° pour la végétation courte et l'herbe, par rapport au sol nu et au roc. Ces résultats montrent aussi un écart plus important à 50° qu'à 20° entre les  $\sigma^o$  du sol nu et du roc et ceux de l'herbe ou de la végétation courte. Toutefois, l'établissement de règles claires de décision requiert une étude de la rétrodiffusion pour une grande variété de cultures et de conditions climatiques. Poirier et al (1988) ont obtenu de meilleurs résultats de classification agricole pour des angles d'incidence autour de 53° que pour des angles autour de 30°, ce qui indique que l'augmentation de l'angle d'incidence serait avantageuse non seulement pour l'identification des parcelles de sol nu.

## 6.2 LA COMBINAISON D'IMAGES ACQUISES À ANGLES D'INCIDENCE DIFFÉRENTS PEUT-ELLE AMÉLIORER LA DISTINCTION DES STADES DE CROISSANCE ?

Les résultats obtenus pour le site de Taboga suggèrent que la combinaison d'une image acquise à angles d'incidence très élevés ( $>73^\circ$ ) avec une image acquise à angles intermédiaires permette de mieux distinguer les stades de croissance de la canne à sucre après la récolte, par rapport à chaque image prise séparément.

Cette capacité discriminante accrue était due au fait que pour les angles intermédiaires la rétrodiffusion augmente mais se stabilise avec l'âge de la repousse de la canne récoltée, alors que pour l'image à angles rasants, elle augmente puis diminue. La différence entre les coefficients de rétrodiffusion (en dB) des deux images diminue avec l'âge de la récolte sans montrer de saturation pour l'étendue des âges étudiés, soit jusqu'à 5 mois pour ce site. Cependant, ce comportement n'a pas été observé pour le site de Juan Viñas.

Notons que les angles presque rasants qui ont produit l'effet observé pour le site de Taboga ne sont possibles que pour des ROS aéroportés.

## 6.3 LA POLARISATION HH EST-ELLE PRÉFÉRABLE À LA POLARISATION VV POUR LA DISCRIMINATION ENTRE CERTAINES CATÉGORIES DE CROISSANCE ?

Pour la pomme de terre et la canne à sucre, nous avons observé une rétrodiffusion plus élevée pour la polarisation HH que pour la VV, ce qui fait qu'en conditions sèches l'écart entre le coefficient de rétrodiffusion du sol nu et celui de ces cultures était plus élevé en HH qu'en VV. Ceci ne s'est cependant pas produit pour le site de Taboga pour l'image acquise à angles d'incidence très élevés (entre  $73^\circ$  et  $78^\circ$ ). Pour le site de Taboga, les coefficients de corrélation entre  $\sigma^\circ$  et l'âge de la canne des parcelles rénovées étaient légèrement supérieurs pour la polarisation HH que pour la VV, sauf pour les angles d'incidence très élevés.

Les résultats obtenus pour le site de Taboga indiquent que, abstraction faite de l'image acquise à angles très élevés, la polarisation VV est préférable à la HH pour distinguer les

parcelles récemment récoltées de celles de canne plus âgée. Les coefficients de corrélation obtenus entre  $\sigma^{\circ}$  et l'âge de la repousse des parcelles récoltées confirment cette observation. Ceci est dû à la rétrodiffusion relativement forte en HH de la canne récemment récoltée, qui est peut-être causée par la présence de résidus brûlés entre les repousses de canne à sucre. Rappelons que les données disponibles pour le site de Taboga limitent notre étude à des âges inférieurs à 150 jours.

Les résultats obtenus pour le site de Juan Viñas, pour l'image acquise aux angles d'incidence locaux intermédiaires ( $\theta_{loc(t)}$  entre  $39^{\circ}$  et  $63^{\circ}$ ), montrent une légère diminution du  $\sigma^{\circ}$  au cours du cycle de croissance de deux ans des variétés de canne qui y sont cultivées. Pour ce cas particulier, la polarisation HH montre une meilleure capacité de discrimination entre les résidus et la canne à sucre d'un an ou de deux ans, grâce à une rétrodiffusion plus forte des résidus humides couchés horizontalement sur le sol. Pour l'image acquise à angles rasants ( $\theta_{loc(t)}$  entre  $62^{\circ}$  et  $79^{\circ}$ ), c'est la polarisation VV qui produit une meilleure discrimination que la HH entre les résidus et la canne de un an ou de deux ans.

#### 6.4 L'UTILISATION DES POLARISATIONS HH ET VV COMBINÉES PERMET-ELLE D'IDENTIFIER CERTAINES PRATIQUES DE CONSERVATION DES SOLS ?

Au chapitre 5, nous avons montré que la différence des coefficients de rétrodiffusion moyen par parcelle en HH et VV produisait une discrimination très significative entre les parcelles de résidus et les autres catégories de croissance. Les parcelles couvertes de résidus ont pu être séparées de grande la majorité des autres parcelles en appliquant un seuil à la valeur de la différence (en dB) entre les coefficients de rétrodiffusion moyens par parcelle en HH et en VV. Cette discrimination était meilleure pour les angles d'incidence locaux plus élevés. Il s'agit cependant de discriminations par parcelle, et non par pixel. Les valeurs de divergence transformées calculées entre les signatures spectrales des catégories sont faibles, ce qui indique qu'une classification des résidus par pixel sera insatisfaisante. La recherche de traitements numériques qui rendraient possible la classification des aires couvertes de résidus va au-delà de la portée de cette thèse.

La possibilité d'identifier les parcelles couvertes de résidus à l'aide de la combinaison des polarisations HH et VV pourrait aussi s'appliquer à d'autres cultures à feuilles allongées et larges, comme le maïs, mais cela reste à vérifier. La surveillance des résidus en régions tropicales n'a cependant pas la même signification que dans les régions tempérées, étant donné que les calendriers de récolte ne sont pas aussi rigides et qu'il n'existe pas pour l'instant de programme de subventions aux agriculteurs qui emploient ces pratiques.

Même si les satellites actuellement en orbite ne permettent pas l'acquisition d'images à deux polarisations, on peut combiner les images de deux satellites tels que RADARSAT utilisant la polarisation HH et ERS-1 ou ERS-2, utilisant la VV, pour profiter des contrastes de polarisation entre certaines cultures.

#### 6.5 LA TENEUR EN EAU DES SOLS PEUT-ELLE ÊTRE UN ÉLÉMENT PERTURBATEUR POUR LA CARTOGRAPHIE DES ZONES PROPICES À L'ÉROSION ?

Les résultats présentés au chapitre 4, surtout en ce qui concerne la comparaison des sites de Juan Viñas et de Taboga, indiquent que la teneur en eau du sol est un élément perturbateur pour la distinction du sol nu et de la végétation.

Les contrastes de rétrodiffusion entre les parcelles de sol nu en préparation pour la semence et les parcelles de canne à sucre étaient bien supérieurs pour le site de Taboga, où les conditions étaient sèches, que pour le site de Juan Viñas, où il avait plu et où la teneur en eau du sol était autour de  $0,45 \text{ g/cm}^3$ . En effet, pour le site de Juan Viñas, le  $\sigma^0$  moyen sur les parcelles de sol nu en préparation était aussi élevé que celui des parcelles de canne à sucre d'environ deux mois, et pour l'image acquise à angles d'incidence intermédiaires ( $\theta_{loc(t)}$  entre  $39^\circ$  et  $63^\circ$ ), il était même plus élevé que celui des parcelles de canne à sucre de un ou de deux ans. Les résultats du test de Kruskal-Wallis, appliqué pour comparer deux par deux les catégories de croissance, indiquent qu'il n'y a pas de différence significative entre les moyennes du coefficient de rétrodiffusion des parcelles de sol nu et celles de la canne à sucre de 2 mois, de un an ou de deux ans, et ce pour l'image acquise à angles d'incidence élevés ( $\theta_{loc(t)}$  entre  $62^\circ$  et  $79^\circ$ ). Pour l'image acquise à angles d'incidence intermédiaires, les coefficients du Chi-carré obtenus (de l'ordre de 6) indiquent une différence significative entre les moyennes des coefficients de rétrodiffusion



des parcelles de sol nu et de celles de la canne de un ou deux ans. Les distances entre signatures spectrales indiquent une superposition presque complète des signatures pour le sol nu avant semence et la canne à sucre d'un an. Seule la canne à sucre d'un et de deux ans se distingue faiblement du sol nu par une rétrodiffusion plus faible pour l'image acquise à angles intermédiaires. D'autre part, pour le site de Taboga, les coefficients du Chi-carré obtenus entre le  $\sigma^0$  du sol nu et la canne à sucre de plus de quatre mois dépassent 30, sauf pour l'image acquise à angles rasants où ils dépassent 15. Pour les différentes images étudiées pour ce site, les valeurs de la divergence transformée obtenues entre les signatures spectrales des parcelles de sol nu en préparation pour la semence et celles de la canne à sucre de trois à quatre mois sont bien supérieures à celles obtenues pour le site de Juan Viñas.

Ces résultats indiquent qu'en bande C, il serait préférable d'étudier des images en conditions sèches pour plus facilement repérer les parcelles de sol nu. Ceci est particulièrement important en régions tropicales humides où les précipitations moyennes annuelles sont beaucoup plus importantes qu'en régions tempérées. La plupart des régions tropicales subissent une saison sèche plus ou moins marquée. On prépare généralement les cultures annuelles pendant cette période sèche, et les risques d'érosion hydrique sont les plus élevés au moment des premières pluies. Il est donc recommandé d'acquérir les images radar juste avant le début des pluies si on cherche à identifier les zones propices à l'érosion hydrique. Les satellites radar permettent une flexibilité dans la planification de l'acquisition des images, ce qui rend possible l'application d'une telle recommandation. Par exemple, la compagnie Radarsat International, l'entreprise qui commercialise les images du satellite RADARSAT, pourrait offrir la possibilité de reprogrammer l'acquisition d'une image si l'utilisateur obtient des données météorologiques montrant qu'il a plu sur son site le jour de l'acquisition planifiée originalement.

## 6.6 COMMENTAIRES SUR L'APPLICATION DE LA MÉTHODE DE CORRECTION RADIOMÉTRIQUE DES EFFETS DU RELIEF

La correction radiométrique des effets du relief a été réalisée comme une étape de la préparation des images en vue d'atteindre les objectifs de cette recherche. Néanmoins, la méthode originale qui a été développée et présentée est une des contributions les plus importantes de cette thèse, puisqu'elle peut être adaptée à n'importe quel capteur radar et à

toute région du monde. Elle permet d'appliquer différents modèles de dépendance du  $\sigma^{\circ}$  en fonction de  $\theta_{loc(t)}$ . Le modèle qui a été appliqué ici, pour lequel on suppose que le  $\sigma^{\circ}$  varie en fonction du cosinus de  $\theta_{loc(t)}$ , a donné de bons résultats visuels pour l'ensemble des images sur lesquelles il a été appliqué et semble corriger adéquatement la rétrodiffusion des sols nus. Cependant, cette méthode pourrait occasionner une surcorrection pour la canne à sucre, puisqu'on a remarqué que  $\sigma^{\circ}$  est stable ou même augmente en fonction de l'angle d'incidence en terrain plat et en terrain incliné lorsque les effets radiométriques du relief sont corrigés. Mentionnons que le calcul des facteurs d'étalonnage des images par le Centre canadien de télédétection a aussi été réalisé en supposant que le  $\sigma^{\circ}$  varie en fonction du cosinus de l'angle d'incidence (Hawkins and Teany (1993)). Selon ce modèle de dépendance angulaire de  $\sigma^{\circ}$ , les effets du relief sont les moindres pour les angles d'incidence autour de  $45^{\circ}$ . Cet angle est permis avec les modes d'acquisition de RADARSAT, mais les ROS des satellites ERS-1 et JERS-1, dont la géométrie d'acquisition est fixe, ont des angles d'incidence moyens de  $23^{\circ}$  et  $38^{\circ}$  respectivement, produisant des distorsions radiométriques plus élevées.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

Alphonse and Le Toan, T. (1988). Retrieving Vegetation and Soil Parameters from Radar Measurements. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Aussois, France, January 18-22 (ESA SP-287) p. 105-111.

Autret, M., Bernard, R. and Vidal-Madjar, D. (1989). Theoretical Study of the Sensitivity of the Microwave Backscattering Coefficient to the Soil Surface Parameters. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 10, N.1, p. 171-179.

Bakhtiari, S. and Zoughi, R. (1991). A model for Backscattering Characteristics of Tall Prairie Grass Canopies at Microwave Frequencies. *Remote Sensing of Environment*, N. 36, p. 137-147.

Beaulieu, N., Leclerc, G. et Bonn, F. (1993a). Mesures de terrain reliées à l'acquisition d'images radar pour le suivi de l'agriculture en milieu tropical. *Mémoires du XVI<sup>e</sup> Symposium canadien sur la télédétection*, Sherbrooke, Canada, p. 315-318.

Beaulieu, N., Leclerc, G., y Velazquez M., (1993b). Potencial de las Imágenes de Radar de Alta Resolución para la Apreciación del Estado de Crecimiento y de Prácticas Culturales en Café, Caña de Azúcar y Hortalizas. *Memorias del Simposio Internacional de Radar*, San José, Costa Rica, 1-5 Noviembre.

Beaulieu, N., Leclerc, G., Velasquez, S., Pigeonnat, S., Gribius, N, Escalant, J.V. and Bonn, F. (1993 c). Investigations at CATIE on the Potential of High Resolution Radar Images for Monitoring of Agriculture in Central America. *SAREX'92 Workshop Proceedings*, Paris, France, December. p. 139-153.

Beaulieu, N., Leclerc, G. et Moisan, Y. (1995). Détermination de la rugosité de surface par des méthodes accessibles. *Journal canadien de télédétection*, Vol. 21 N.2, p.198-203.

Beaulieu, N. Leclerc, G et Bonn,F. (1995 b). "Facteurs affectant la possibilité de distinguer les stades de culture de la canne a sucre à l'aide d'images radar", *Mémoires du International Symposium on Retrieval of bio- and Geophysical Parameters from SAR data for Land Applications*, Toulouse, France, 11-14 Octobre, p. 283-291.

Bouman, B.A.M. and van Kasteren, H.W.J.(1990). Ground-Based X-band (3cm wave) Radar Backscattering of Agricultural Crops. I: Sugar Beet and Potato; Backscattering and Crop Growth. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 34, p. 95-105.

Brown, R., Brisco, B., Leconte, R., Major, D.J., Fischer, J.A., Reichert, G., Korporal, K.D., Bullock, P.R., Pokrant, H. and Kulley, J. (1993). Potential Applications of Radarsat Data to Agriculture and Hydrology. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol.9, No.4, p. 317-329.

- Cosgriff, R.L, Peake, W.H. and Taylor, R.C. (1960). Terrain Scattering Properties for Sensor System Design (Terrain Handbook II). Engineering Experiment Station Bulletin 181, Ohio State University.
- Dubois, P., van Zyl, J. and Engman, T. (1995). Measuring Soil Moisture with Imaging Radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 33, N.4, p. 915-926.
- Elizondo, C., Beaulieu, N., Raney, R.K., Ahern, F. and Campbell, F. (1993). Proyecto Radar/Costa Rica/Canada: a Collaborative Research Project. *Proceedings of the XVth Canadian Remote Sensing Symposium*, Sherbrooke, Canada, p. 61-66.
- Faustino, J. (1994). Conservación de Suelos en Parcelas de Elevada Pendiente con Plantación de Leñosas Forrajeras y Pasto. *in* Benavides J.E (ed.) *Arboles y arbustos forrajeros en América Central*, CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Guindon, B. (1990). Development of a Shape-from-shading Technique for the Extraction of Topographic Models from Individual Spaceborne SAR images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, V. 28, N. 4, P. 654-661.
- Hawkins, R.K., and Teany, L.D. (1993). SAREX 1992 Data Calibration, SAREX-92 Workshop Proceedings, ESA Headquarters, Paris, December 6-8 1993, ESA WPP-76, 41-53.
- Hammond, R. and McCullagh, P.S. (1978). *Quantitative Techniques in Geography: An Introduction*. Second Edition. Clarendon Press, Oxford, 364 p.
- Holmes, M.G. (1990). Applications of Radar in Agriculture. *in* *Application of Remote Sensing in Agriculture*, Butterworth Eds., Stoneham, p.307-330.
- Leclerc, G., Beaulieu, N., Velazquez M., S., y Bonn, F., (1993). Metodología Sencilla para Estudiar los Efectos Radiométricos Debidos al Angulo de Incidencia Local en una Imagen de Radar". *Memorias del Simposio Internacional de Radar*, San José, Costa Rica Noviembre 1-5 1993.
- Leclerc, G and Beaulieu, N. (1996). Two simple methods to correct radiometric distortions due to the slant-range projection in a radar image. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, San Francisco, USA, June 24-27, p. I 305-314.
- Leclerc, G., Reyes, C, and Hall, C (in preparation). Synthesis of Costa Rican Meteorological Information in a Geographical Context. Chapter 8 of *Geographical Modeling: Agriculture, Economy and Environment in Costa Rica*.

Le Toan, T., Laur, H., Mougin, E., and Lopes, A. (1989). Multitemporal and Dual-Polarization Observations of Agricultural Vegetation Covers by X-Band SAR Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 27, N. 6, p.709-718.

Le Toan, T., Lopez, A. and Huet, M. (1984). On the Relationship Between Radar Backscattering Coefficient and Vegetation Canopy Characteristics. *Proceedings of the IGARSS'84 Symposium, Strasbourg, France, August 27-30 1984*. ESA-SP-215. p. 155-160.

Livingstone, C.E., Gray, A.L., Hawkins, R.K. and Olsen, R.B. (1988). CCRS C/X-Airborne Synthetic Aperture Radar : an R and D Tool for the ERS-1 Time Frame, *IEEE AES Magazine*, p. 11-16.

Mc Nairn, H. and Protz, R. (1993). Mapping Corn Residue Cover on Agricultural Fields in Oxford County, Ontario, Using Thematic Mapper. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol 19, N. 2, p. 152-159.

Major, D.J., Larney, F.J., Brisco, B., Lindwall, C.W, and Brown, R.J. (1993). Tillage effects on Radar Backscatter in Southern Alberta. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, N. 2, p. 170-176.

Paloscia, S. and Pampaloni, P. (1992). Microwave Vegetation Indexes for Detecting Biomass and Water Conditions of Agricultural Crops. *Remote Sensing of Environment*, N.40, p. 15-26.

PCI, inc. (1995) EASI/PACE version 5.3, Technical Reference, Richmond Hill, Ontario, Canada.

Raney, R.K., Ahern, F.J., Dams, R.V., Werle, D. (1990). A Review of Radar Remote Sensing for Tropical Forest Management. UN/FAO/ESA microwave workshop, INPE, Brazil.

Raney, R.K (to be published in 1997). Radar Fundamentals: Technical Perspective. Chapter 2, *Manual of Remote Sensing, Third Edition*, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.

Saatchi, S.S., Van Zyl, J.J. and Asrar, G. (1995). Estimation of Canopy Water Content in Konza Prairie Grasslands Using Synthetic Aperture Radar. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, N. D12, p. 25,481-25,496.

Sabins, F. Jr. (1986). *Remote Sensing, Principles and Interpretation*, 2<sup>nd</sup> edition. W.H Freeman and Company, New York, 449 p.

Skole, D., and Tucker, C. (1993). Tropical Deforestation and Habitat Fragmentation in the Amazon: Satellite Data from 1978 to 1988. *Science*, Vol. 260, p.1905-1910.

- Shimabukuro, Y.T., Lawrence, W.T. and Ahern, F.J. (1994). Tropical vegetation analysis with Landsat Thematic Mapper and Canadian synthetic aperture radar data. Proceedings of the European Symposium on Satellite Remote Sensing, Rome, Italy, September 26-30, SPIE Vol. 2314, p. 255-260.
- Smith, A.M., Major, D.J., Lindwall, C.W., and Brown, R.J. (1995). Multi-Temporal, Multi-Sensor Remote Sensing for Monitoring Soil Conservation Farming. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 21, N. 2, p. 177-184.
- Stussi, N., Beaudoin, A., Castel, T. and Girord, P. (1995). Radiometric Correction of Multi-configuration Spaceborne SAR data over Hilly Terrain. Proceedings of the International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR data for Land Applications, Toulouse, France, 10-13 octobre, p. 457-466.
- Ulaby, F.T. and Dobson, M.C. (1988). Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain. Artech House, Norwood, Massachusetts, 357 p.
- Ulaby, F.T., Wilson, E.A. (1985). Microwave Attenuation Properties of Vegetation Canopies. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-23, No. 5.
- Van Zyl, J.J., Chapman, B.D., Dubois, P., and Shi, J. (1993). The Effect of Topography on SAR Calibration. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31, No. 5, p. 1036-1043.
- Watts, C. and Parsons, A. (1992). Make it Work! Plants. Two-Can Publishing Ltd., 48p.

## **A. ANNEXE A : REVUE DE LITTÉRATURE SUR L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION EN CONSERVATION DES SOLS, DE LA TÉLÉDÉTECTION RADAR EN AGRICULTURE, ET SUR LA CORRECTION RADIOMÉTRIQUE DES EFFETS DU RELIEF**

### **A.1. APPLICATION DE LA TÉLÉDÉTECTION OPTIQUE EN CONSERVATION DES SOLS**

#### **A.1.1. Prévision de l'érosion hydrique ou cartographie des risques d'érosion**

L'application la plus courante de la télédétection optique en conservation des sols est la détermination du type d'utilisation des sols ou du type de culture à partir de l'image ; à partir de ce type est calculé un facteur de protection végétale utilisé dans un modèle de prévision de l'érosion hydrique ou éolienne. Par exemple, l'équation de Wischmeier (1978) utilise un facteur dénommé "C" pour quantifier la protection de la végétation contre l'érosion hydrique, lequel facteur est le rapport entre l'érosion que subirait un sol nu et labouré dans une parcelle expérimentale de dimensions standardisées, sur l'érosion subie en présence de végétation. D'autres modèles d'érosion des sols utilisent aussi le facteur C. Divers organismes ont développé des tables du facteur C en fonction du type de culture et du stade de croissance. Pour les cultures tropicales, de telles tables ont été développées par le Service de conservation des sols du *U.S. Department of Agriculture* à Puerto Rico (anonyme, 1980). Des efforts ont été déployés pour l'établissement de relations entre des indices de végétation et un facteur de protection végétale. Cependant, surtout pour des couverts importants, on ne peut établir de relation directe entre la densité d'un couvert végétal et un indice de végétation (généralement dérivé à partir des bandes rouge et proche ou moyen infrarouge) ou encore la réflexion pour une bande spectrale en particulier. En effet, il se produit un plafonnement de réflectance de la végétation dans le proche et le moyen infrarouge, en fonction de l'indice foliaire LAI (à partir de valeurs du LAI de 4 environ), et lorsque plusieurs feuilles des plantes se superposent, la réflectance devient insensible à une augmentation de la densité du couvert (Bonn et Rochon, 1993). De plus, certaines cultures telles que le maïs peuvent présenter un couvert aérien important, mais peuvent être très susceptibles à l'érosion si le sol est mal protégé. Cyr et al (1995) ont

remarqué que les indices de végétation surestiment la couverture végétale en début de croissance et la sous-estiment à la fin du cycle de croissance, en raison de la sénescence. La sénescence occasionne une diminution de la teneur en chlorophylle des feuilles, ce qui augmente la réflectance dans le rouge, et une diminution de la teneur en eau des feuilles, ce qui diminue la réflectance dans le proche infrarouge.

#### A.1.2. Identification de zones propices à l'érosion hydrique ou de sols dégradés

Sans viser la cartographie du risque d'érosion sur toute une région, on peut chercher à identifier les régions les plus propices à l'érosion ou celles qui ont subi une dégradation. Il est généralement reconnu que la pente et la couverture végétale sont les facteurs prédominants dans la détermination du risque d'érosion, même si la nature du sol, la longueur de la pente et le régime climatique ont aussi beaucoup d'importance. On peut prévoir que des sols dont la couverture végétale est insuffisante et qui sont situés sur des pentes élevées présenteront un risque élevé d'érosion. Alors que la télédétection optique présente des limites importantes pour la détermination quantitative du couvert végétal à partir de valeurs de l'indice foliaire LAI supérieur à 4, elle peut être assez efficace pour quantifier le couvert lorsque la végétation est éparse, si les caractéristiques du sol sont connues. Tout au moins, elle peut permettre d'identifier les zones où la végétation est absente ou insuffisante. Cependant, la végétation morte ou sénescente est plus difficile à identifier mais elle peut protéger le sol de façon importante, surtout en milieu agricole.

Hill (1993) a développé une méthode pour identifier les zones de sol dégradé en région méditerranéenne, à l'aide d'une analyse des mixtures spectrales. Cette méthode assume que la majorité de la variation spectrale dans les images multispectrales est due au mélange d'un nombre limité de matériaux et de caractéristiques de surface (végétation, sol, ombre), qui ont différentes réponses spectrales. En première approximation, la mixture spectrale peut être modélisée comme une combinaison linéaire des réponses spectrales des composantes pures. Les auteurs sont arrivés à discerner quatre classes grossières de dégradation des sols : satisfaisant, dégradé, sévèrement dégradé et dénudé.



### A.1.3. Surveillance de pratiques de conservation des sols

Le fait de laisser les résidus agricoles sur le sol constitue une pratique de conservation des sols subventionnée dans certains pays. La mesure des résidus est difficile puisque la végétation morte ou en sénescence ne montre beaucoup moins de différence entre sa réflectance dans le rouge et le proche infrarouge, par rapport à ce que présente la végétation vivante.

Major *et al.* (1990) ont réalisé des mesures avec un radiomètre terrestre simulant quatre bandes du capteur TM, dans le but d'étudier la possibilité de distinguer des traitements du sol produisant différentes quantités de résidus, pour des rotations de deux et trois ans de blé alterné avec une jachère. La jachère était soit traitée à l'herbicide, soit labourée à lame noble (qui produit un labour minime et laisse à la surface beaucoup de résidus) ou cultivée de façon conventionnelle (enfouie en grande partie). Les valeurs d'intensité mesurées pour les différents traitements dans les quatre bandes ont été combinées en un seul indice de brillance, qui a ensuite été divisé par l'indice mesuré pour le sol nu, pour obtenir un indice relatif. Les auteurs n'ont pas pu dresser une relation significative entre cet indice de brillance et la quantité de résidus, en raison de la variabilité de l'âge des résidus. Cependant, les sols avec résidus présentaient un indice de brillance invariablement plus élevé que celui des sols nus. Les auteurs ont remarqué que l'indice de brillance était insuffisant pour distinguer les traitements étudiés. Par exemple, il était impossible de distinguer le sol nu de la jachère cultivée de façon conventionnelle, et de distinguer les différentes séquences de rotation de cultures qui avaient subi une application d'herbicide à l'automne (donc conservation totale des résidus). Cependant, ces deux derniers groupes contiennent des traitements présentant probablement, à l'intérieur de chaque groupe, un degré comparable de protection contre l'érosion éolienne. Les auteurs ont conclu de leur étude que les images du satellite Landsat TM pourraient être utilisées pour identifier les parcelles de sol nu et deux ou trois classes de couverture de résidus. Mc Naim et Protz (1993) ont établi qu'il y avait une relation significative entre le pourcentage de couverture de résidus de maïs et la différence normalisée entre les comptes numériques des bandes 4 et 5 d'une image Landsat TM. Pour leur site d'étude dans le comté d'Oxford en Ontario, ils ont obtenu de très bons résultats dans la classification des pixels en catégories de couverture de résidus lorsque les parcelles correspondant à différents types de sols étaient considérées séparément.

L'équipe de la station de recherche d'Agriculture Canada, à Lethbridge en Alberta, a réalisé plusieurs projets de recherche sur l'application de l'imagerie radar à la conservation des sols. Elle a mené des expériences à l'aide d'un diffusomètre terrestre, principalement pour déterminer les effets du type de labour sur la rétrodiffusion radar (Major *et al.*, 1993, Mc Nairn *et al.*, 1995). En Alberta, l'érosion éolienne est la plus problématique, et il est recommandé de pratiquer un labour profond qui retourne de grosses mottes de terre qui brisent la continuité de l'écoulement du vent. Il est aussi recommandé de pratiquer le moins de labour possible lorsque la jachère d'été est utilisée, et de laisser la plus grande quantité possible de résidus sur le sol. Il est nécessaire de surveiller les pratiques utilisées par les agriculteurs pour vérifier si elles sont en accord avec les recommandations.

Major *et al.* (1993) rapportent les résultats d'une série d'expériences où la distribution d'un grand nombre de variables obtenues à partir des images radar acquises à différentes polarisations (HH, VV et HV), différentes bandes spectrales (L, C et Ku), et différents angles d'incidence, est étudiée pour différents traitements du sol. Ces auteurs ont remarqué que les effets du labour et des résidus se confondent, puisque les sols qui étaient les plus lisses étaient ceux qui étaient couverts par le plus de résidus, et les sols les plus rugueux étaient ceux qui présentaient le moins de résidus. Ils ont remarqué aussi que l'effet de la teneur en eau sur le coefficient de rétrodiffusion est plus évident à angles plongeants, et que celui de la rugosité l'est à angles obliques. Un rapport du coefficient de rétrodiffusion en bande C sur celui obtenu en bande L peut être un bon outil pour évaluer la rugosité de surface. Une analyse de variance a été réalisée avec la série de variables obtenues à partir des images radar ; la fourchette d'angles d'incidence de 40° à 50° a montré la meilleure différenciation des effets des différents traitements pour les bandes C et L, et pour les configurations HH et VV. Lorsque la visée était dans le sens du labour, la rétrodiffusion était généralement plus faible pour les sols couverts de résidus que pour les sols nus. Les auteurs n'ont remarqué aucune différence entre les traitements en ce qui a trait à la distribution VV vs HH et HV vs HH des mesures.

Comme mentionné plus tôt, l'utilisation des jachères est aussi une pratique de conservation des sols recommandée et subventionnée dans certains pays. Les jachères apportent une couverture du sol différente selon la région et le climat. Brown *et al.* (1993) montrent que

les jachères d'été en Saskatchewan apparaissent très sombres sur une image ERS-1, en raison du sol presque dénudé et sec. En effet, les jachères ne sont pas irriguées et si le climat est sec, il y aura peu de végétation. Cependant, en milieu tropical humide, les jachères peuvent atteindre une hauteur plus élevée que les cultures avoisinantes, et un feuillage très abondant.

Company *et al.* (1995) ont étudié une série temporelle d'images ERS-1 pour évaluer la possibilité d'identifier l'orientation des travaux mécaniques et les pratiques culturales à l'aide de ces images. Ces données permettraient d'une part d'établir la direction privilégiée des écoulements, et d'autre part, la rugosité aléatoire. Ces auteurs ne cherchent pas à extraire des images les paramètres de rugosité, mais surtout à caractériser des surfaces à réponse hydrologique différente. Un modèle simple a été ajusté pour relier la rétrodiffusion mesurée à l'orientation des rangs, du type  $\sigma^{\circ} = -a + b \cos \alpha$ . Le paramètre  $a$  est équivalent au négatif de la demi-somme des coefficients de rétrodiffusion dans les directions parallèle et perpendiculaire à l'orientation des rangs, et  $b$  est équivalent à la demi-différence. Lorsque les paramètres  $a$  et  $b$  sont calculés pour les parcelles étudiées, quatre classes hydrologiquement intéressantes se distinguent par l'importance relative des deux valeurs, qui représentent respectivement l'effet de la rugosité aléatoire et de la rugosité périodique. Les parcelles les plus vulnérables à l'érosion sont celles où il y a une rugosité aléatoire faible mais pour lesquelles le ruissellement est concentré par une forte rugosité périodique.

Schadt *et al.* (1993) ont comparé l'exactitude, pour l'identification des jachères, entre une classification multitemporelle de quatre images ERS-1 et celle obtenue avec une image Landsat TM, et ce en vue d'un contrôle des parcelles pour lesquelles les agriculteurs reçoivent des subventions de la part de la Communauté économique européenne. En appliquant un filtre de majorité aux images classifiées, ils ont obtenu 82% des pixels de jachère bien classifiés, et seulement 5% de pixels incorrectement classifiés comme étant de jachère. Ces proportions étaient de 72% et de 12% pour l'image TM, ce qui indique qu'on peut s'attendre à de meilleurs résultats avec ERS-1 qu'avec TM, à condition d'utiliser des images multitemporelles. Les satellites radar permettent plus facilement que les satellites du domaine optique d'acquérir une série multitemporelle au cours d'un cycle de croissance. En n'utilisant qu'une image radar à la fois, les auteurs obtenaient de l'ambiguïté

entre les céréales et les jachères. Les mêmes auteurs, dans une étude antérieure (Kellndorfer *et al.* (1992)), ont noté que la rétrodiffusion radar semblait indépendante du rythme de coupe des jachères, des conditions de croissance et de la teneur en eau du sol, après avoir étudié 28 images ERS-1 acquises au-dessus d'un site de contrôle près de Fribourg. Les parcelles de jachères dans diverses conditions ont toutes montré les mêmes variations du coefficient de rétrodiffusion d'une image à l'autre. La rétrodiffusion des jachères était plus faible (on rappelle que ERS-1 utilise la polarisation VV) que celle de la forêt ou du maïs pour toutes les dates considérées. Cependant, cette uniformité dans le comportement des jachères ne se produisait pas dans les images Landsat TM, où l'on retrouvait souvent d'importantes variations spectrales dans une même parcelle.

Smith *et al.* (1995) ont développé un système de classification hiérarchique pour cartographier les différents types de couverture végétale, et les pratiques de conservation des sols. Ce système utilise des images du domaine optique SPOT et Landsat TM, et des images radar du satellite ERS-1. Appliqué à une région des prairies canadiennes, la végétation pérenne était séparée des cultures annuelles à l'aide du NDVI printanier, les cultures annuelles étaient subdivisées en jachères et en cultures au moyen du NDVI d'été, et un indice de brillance (calculé à partir des images optiques) était utilisé pour distinguer les céréales des cultures oléagineuses. La brillance radar était utilisée pour distinguer les parcelles labourées des non labourées (le non labour étant une pratique de conservation des sols), autant pour les jachères, les oléagineuses que pour les céréales. Une rétrodiffusion élevée indique le labour pour les cultures, et une faible rétrodiffusion indique la présence de résidus ou de jachère non labourée. On doit mentionner que ceci fonctionne grâce aux précipitations relativement faibles que reçoivent les prairies canadiennes à l'automne, mais que dans les tropiques humides, la teneur en eau élevée des sols et des cultures amortit les contrastes de tonalité.

## A.2. APPLICATION DE LATÉLÉDÉTECTION RADAR EN AGRICULTURE

Un grand nombre d'études a été réalisé pour déterminer le potentiel des images radar en agriculture, soit pour : a) l'identification du type de culture b) l'évaluation du stade de croissance des cultures, c) la surveillance des dommages ou du stress hydrique subi par les cultures d) l'évaluation de certaines caractéristiques du couvert végétal et e) la détermination de la teneur en eau des sols. Toutes ces applications sont de grande

importance pour la prévision de l'érosion des sols et l'identification des zones à risques élevés. Une grande partie de ces études a été réalisée au Canada et en Europe. Certains sites de contrôle ont été étudiés par de nombreuses équipes de recherche et dans le cadre de plusieurs missions d'acquisitions d'images, notamment le site de Flevoland en Hollande, le site de Feltwell en Angleterre et le site d'Oxford en Ontario, Canada. Plusieurs missions aéroportées ont été réalisées, entre autres pour préparer l'application des images de satellites, et ont aussi permis d'étudier le potentiel de la combinaison de plusieurs paramètres : bande spectrale, polarisation, angle d'incidence et date d'acquisition. Wooding (1988) décrit plusieurs applications ayant faites en Europe entre 1978 et 1987, Cihlar *et al.* (1984) ont fait une revue approfondie des applications canadiennes jusqu'en 1984, Brown *et al.* (1993) ont réalisé une révision plus récente mais plus sommaire, et Holmes (1990) rappelle les principes physiques permettant d'appliquer l'imagerie radar à l'agriculture. La majorité des études rapportées dans la littérature a été réalisée en terrain plat, sur des sites où les parcelles sont grandes et ont des formes géométriques régulières. En milieu tropical, on rencontre souvent des parcelles beaucoup plus petites

#### A.2.1. Identification ou classification des cultures

C'est généralement pour des fins d'inventaire et de prévision des récoltes qu'on cherche à identifier les cultures et à réaliser la classification agricole d'une région. La structure de la végétation est un facteur affectant la rétrodiffusion et permettant une distinction entre cultures, notamment entre les plantes à feuilles larges et les céréales. Brown *et al.* (1993) attribuent la rétrodiffusion plus élevée des cultures à feuilles larges à leur teneur en eau et à leur biomasse plus élevée, et Holmes (1990) attribue cette différence principalement à la structure des feuilles.

Il est utile de noter qu'en raison du chatoiement qui caractérise les images radar, surtout lorsque le nombre de vues est faible, on retrouve une grande variabilité de l'intensité à l'intérieur d'une classe même homogène. Les méthodes de classification "par pixel" ne sont pas aussi efficaces que pour les images optiques. On peut retrouver, à l'intérieur d'une même parcelle homogène, plusieurs classes entremêlées de façon granulaire. La classification "par parcelle" peut grandement améliorer les résultats lorsqu'on connaît la distribution de chaque parcelle homogène. La classification des images radar est presque toujours précédée d'un filtrage pour atténuer l'effet du chatoiement, et un grand nombre de

filtres adaptatifs ont été développés spécifiquement pour les images radar (Lopes *et al.*, 1990). Malgré le filtrage, les images radar restent affectées par le bruit, et il peut être avantageux d'utiliser des algorithmes de post-classification. Le filtre de majorité utilisé par Schadt *et al.* (1993) (voir aussi Kellndorfer *et al.*, 1992) attribue à chaque pixel la valeur de la classe qui représente la majorité dans une fenêtre de taille donnée, après l'application d'une classification de vraisemblance maximale.

Dans les pays tempérés où le climat, et particulièrement le gel du sol contrôlent le calendrier de semence et de récolte, différentes cultures peuvent être caractérisées par l'évolution de la rétrodiffusion au cours de la saison de croissance. Comme les différentes cultures ont souvent des rythmes de croissance différents, on peut améliorer la classification des cultures à l'aide d'images multitemporelles. Par exemple, Foody *et al.* (1988) ont étudié l'exactitude de classification par parcelle obtenue avec des images en bande X de la mission AGRISAR, au-dessus du site de Feltwell, en Angleterre. En utilisant quatre images acquises au cours de l'été, les auteurs ont obtenu un indice Kappa (un indice représentant la correspondance de la classification avec l'utilisation du sol observé par des mesures au sol) de 90 % ; l'indice est passé à 88.4% avec l'utilisation de deux images. Bouman *et al.* (1992), au moyen de mesures réalisées avec un diffusomètre, démontrent que les signatures "bitemporelles" de différentes cultures sont bien distinctes pour les configurations de ERS-1 et de JERS-1. En milieu tropical, beaucoup de cultures sont pérennes et ne peuvent être caractérisées par un comportement temporel ; même si l'existence de périodes sèches et humides répartit la croissance de certaines cultures annuelles, celles-ci ne sont pas soumises à un calendrier de semence aussi rigide que dans les régions tempérées. L'utilisation d'images multitemporelle a donc un potentiel plus limité.

L'utilisation simultanée de deux ou plusieurs bandes spectrales peut aider beaucoup la classification ; Brisco et Protz (1980) ont obtenu une exactitude supérieure à 90 % dans la classification de parcelles de maïs, avec une seule date, mais en utilisant les bandes X et L.

Comme présenté dans Pigeonnat *et al.* (1993), Beaulieu *et al.* (1994) et Benach *et al.* (1993), les bananeraies montrent une brillance très élevée sur les images radar, probablement à cause des grandes feuilles très lisses et généralement disposées de façon

symétrique, qui agissent comme des réflecteurs spéculaires en coin et renvoient efficacement le rayonnement vers l'antenne. Pigeonnat (1993) a obtenu des résultats très satisfaisants pour la classification des bananeraies en utilisant des images aéroportées en bande C, après avoir réduit la résolution d'un facteur de 8 (chaque nouveau pixel de 32 m regroupe 64 pixels de 4 m). Même si l'application de la télédétection radar à l'étude des bananeraies semble évidente par le contraste que celles-ci montrent sur les images, nous ne connaissons pas d'autres études reliées à la cartographie de cette culture.

Certaines cultures réagissent différemment à des rayonnements de polarisations différentes, et l'utilisation d'images multi-polarisées peut devenir un atout important dans certains cas. Le Toan *et al.*(1989), qui ont étudié les réponses d'images bipolarisées en bande X au-dessus de couverts agricoles, mentionnent l'utilité des systèmes multipolarisées lorsqu'une seule bande spectrale est disponible. Ils ont remarqué que lorsqu'un diagramme de signature spectrale (VV vs HH) était tracé, les cultures de blé, de soya, de tournesol et les marécages étaient regroupés en "agglomérations" dont la plage dynamique n'excédait pas 4 dB. Ils ont expliqué la rétrodiffusion légèrement plus forte en HH du blé par l'orientation préférentielle verticale de cette céréale, causant une plus grande atténuation en VV. Ces auteurs ont utilisé le rapport de polarisation  $\sigma_{HH}^o/\sigma_{VV}^o$ , calculé au moyen de fenêtres de 9x9 pixels, pour cartographier les rizières. En effet, ils ont trouvé qu'en bande X, les cultures de riz très jeunes montrent un coefficient de rétrodiffusion plus fort en VV qu'en HH et, après la formation de la tige, plus fort en HH qu'en VV. Ils ont appliqué des opérateurs de morphologie mathématique pour lisser l'image binaire obtenue en fixant un seuil à la valeur du rapport de polarisation.

Freeman *et al.* (1991) ont développé un algorithme de classification hiérarchique utilisant des paramètres extraits d'images multibande (C, L et P) et complètement polarimétriques, pour discerner les cultures sur le site de Flevoland en Hollande. Ces auteurs ont bien réussi à discerner l'eau, la forêt, les haricots, les pommes de terre, les pois, la betterave, le lin, le sol nu et la betterave rouge, avec une exactitude de plus de 90 %. Cependant, près du quart des pixels de blé d'hiver a été classé par erreur comme orge d'été, et un grand pourcentage de l'herbe et de l'orge d'été ont été classés comme luzerne. Les auteurs soulignent que la détermination des critères de classification est un processus laborieux qui

doit être répété pour chaque scène nouvelle, et qu'il serait très utile à l'avenir de développer des approches automatisées pour mettre en place ces critères.

Les travaux de Amodeo *et al.* (1995) et de Ferrazzoli *et al.* (1995) sont orientés vers l'évaluation de la biomasse des cultures. Étant donné que les différents types de cultures produisent différentes relations entre  $\sigma^{\circ}$  et la biomasse, les auteurs mettent l'accent sur le fait que l'évaluation de la biomasse dépend d'une classification des types de cultures. Bien qu'ils utilisent des données de polarimétrie complète (images du capteur AIRSAR du Jet Propulsion Laboratory), leur étude est basée sur les amplitudes pour différentes configurations de polarisation. Ils ont développé un algorithme hiérarchique pour la classification, débutant avec la bande P pour distinguer entre les aires urbaines et les forêts. Les vignobles (au moins ceux dont les rangs sont orientés en direction de la ligne de vol) sont identifiés grâce à leur différence caractéristique entre les rétrodiffusions en HH et en VV. La différence entre les  $\sigma^{\circ}$  des bandes P et L en polarisation HV permet de distinguer trois classes, le sol nu, les oliveraies et les cultures de tournesol. Les parcelles de blé mûr sont confondues avec celles de sol nu, ce que les auteurs expliquent par la teneur en eau très faible du blé au stade de maturité. La bande C permet enfin de distinguer l'eau (faible  $\sigma^{\circ}$ ), la végétation mixte ( $\sigma^{\circ}$  intermédiaire) et le colza ( $\sigma^{\circ}$  élevé). L'exactitude de classification (par pixel) obtenue avec leur méthode pour le site de Montespertoli en Italie est de près de 70% pour les vignobles et de plus de 90% pour la forêt, les zones urbaines, le colza et l'eau. Ces auteurs ainsi que Ferrazzoli *et al.* (1995) mentionnent que  $\sigma^{\circ}_{HV}$  et  $\sigma^{\circ}_{RR}$  présentent le meilleur contraste entre sol nu et végétation.

#### A.2.2. Identification du stade de croissance des cultures

En régions tempérées, comme les calendriers de semence et de récolte sont généralement bien définis pour une année donnée, on peut évaluer le stade de croissance d'une culture à partir de la date. Plusieurs équipes ont étudié l'évolution de la rétrodiffusion au cours de la croissance du riz. Kurosu *et al.* (1993), ont étudié la relation entre le coefficient de rétrodiffusion radar et certains paramètres décrivant la croissance des plants de riz, à l'aide d'images de ERS-1 (bande C, polarisation VV). Ils ont remarqué une augmentation rapide du coefficient de rétrodiffusion dans les premiers mois de croissance, puis une légère baisse avec la maturation. Ribbes *et al.* (1996) ont aussi étudié la possibilité de réaliser le



suiti du riz avec des images de ERS-1, et ont trouvé une grande variation temporelle pendant la croissance, de -18 dB au moment de la semence à environ -7 dB à partir de 80 jours de croissance. Ils ont réalisé une segmentation des parcelles de riz sur leurs sites d'étude en calculant le rapport des coefficients de rétrodiffusion d'images acquises à trois semaines d'intervalle, et en fixant un seuil à 3dB. Rosenqvist (1997), ayant réalisé un suivi de la croissance du riz avec des images JERS-1, a trouvé pour des parcelles plantées manuellement des variations du coefficient de rétrodiffusion semblables à celles rapportées par Ribbes et al. (1996). Cependant, pour les parcelles mécanisées, il a trouvé que l'orientation des rangs avait un effet important sur la rétrodiffusion et pouvait compromettre le suivi de la croissance. Aussi, chez certaines parcelles mécanisées, il a observé des coefficients de rétrodiffusion très élevés qu'il a attribués à un effet de résonance. L'étude de Le Toan *et al.* (1989) mentionnée plus tôt est un exemple du potentiel d'utilisation d'images à double polarisation pour l'identification du stade de croissance des rizières, du moins en classes grossières.

Bouman *et al.* (1992) et de Loor (1984) ont remarqué que le coefficient de rétrodiffusion des pommes de terre et des betteraves augmente avec la croissance, alors que celui des céréales (blé et orge) diminue. Ceci peut s'expliquer par le fait que la biomasse verte des pommes de terre et des betteraves augmente avec la croissance et la maturation tandis que pour les céréales, la maturation des graines se fait au dépens des ressources contenues dans la tige et les feuilles, qui jaunissent et sèchent.

Pigeonnat *et al.* (1993) ont démontré, pour les bananiers, le potentiel des images aéroportées en bande C pour distinguer les parcelles en préparation, en pré-production (plants immatures) et en production. La brillance de l'image était de plus en plus élevée d'un stade à l'autre.

Le coefficient de rétrodiffusion semble donc dépendre du stade de croissance et du type de culture, mais on retrouve peu d'études où le stade de croissance est déterminé à partir d'images radar. La phénologie des plantes annuelles en pays tropicaux est beaucoup plus complexe qu'en pays tempérés, ce qui mérite une attention particulière, autant pour la recherche que pour les projets d'application.

### A.2.3. Évaluation des dommages ou du stress hydrique subi par les cultures

Les paragraphes qui suivent présentent quelques exemples de cette application, mais ne prétendent pas couvrir le thème de façon exhaustive.

Martin *et al.* (1989) ont démontré le potentiel de l'imagerie radar en bande C pour l'évaluation de la teneur en eau des prairies à hautes herbes du Konza, au Texas et, dans une moindre mesure, du potentiel en eau des feuilles, ce qui indique la possibilité éventuelle de diagnostiquer des conditions hydriques extrêmes de la végétation de prairie. Saatchi *et al.* (1995) ont développé un modèle pour calculer la teneur en eau de l'herbe des prairies du Konza à partir du rapport  $\sigma_{HH}^o/\sigma_{VV}^o$  en bande C.

Pigeonnat (1993) a étudié la possibilité de détecter les foyers d'infestation de cercosporiose noire (une maladie fongique) dans les plantations de bananiers et a remarqué une baisse de la brillance dans l'image (en bande C) avec une augmentation du degré d'infestation.

### A.2.4. Détermination des caractéristiques du couvert agricole

D'autres études se concentrent sur la détermination de caractéristiques (ou paramètres) du couvert végétal. Plusieurs d'entre elles tentent d'ajuster un modèle de rétrodiffusion pour relier ces paramètres au coefficient de rétrodiffusion radar, généralement mesuré à l'aide d'un diffusomètre. Ces études nous intéressent beaucoup puisque des paramètres indicateurs de la couverture végétale tels que le pourcentage de couverture, la hauteur des plants, la biomasse végétale et l'indice foliaire (LAI) ont un impact important sur la protection offerte au sol par la végétation. Plusieurs des expériences rapportées dans la littérature ont été menées dans des conditions bien contrôlées, qui permettent de bien isoler les facteurs étudiés, et les mesures effectuées avec un diffusomètre ont une précision supérieure à celle des radars imageurs. Les résultats de ces mesures et des simulations réalisées avec les modèles de rétrodiffusion peuvent nous éclairer beaucoup sur les causes des "phénomènes" observés dans les images.

Sans chercher à réaliser une revue des travaux réalisés en modélisation, on peut tout de même mentionner que l'une des approches de modélisation les plus employées a été proposée par Attema et Ulaby (1978), qui représentent le couvert végétal comme un nuage de gouttelettes d'eau isotropes, d'où l'origine du "cloud model". Ce concept s'appuie sur l'hypothèse que dans un couvert végétal, le rayonnement interagit principalement avec l'eau contenue dans le couvert végétal, les autres composantes des plantes ayant une faible constante diélectrique. Bouman (1991) a eu cependant peu de succès dans l'inversion du modèle du nuage pour prédire certains paramètres des betteraves, des pommes de terre, de l'orge et du blé, même en utilisant deux polarisations, pour la bande X.

Des mesures réalisées par Le Toan *et al.* (1984) ont montré une relation presque linéaire entre le coefficient de rétrodiffusion et l'indice foliaire LAI (surface totale des feuilles divisée par la surface au sol), pour une fréquence de 9 Ghz (bande X), une polarisation VV et un angle d'incidence de 40°. D'ailleurs, ces auteurs ont aussi établi une relation linéaire entre la teneur en eau volumique du couvert végétal ( $m_v$ ) et son LAI, et ont observé une corrélation importante entre  $\sigma^o$  et  $m_v$ . Ils énoncent que lorsque la réflexion directe du rayonnement sur les feuilles est le mécanisme prédominant,  $\sigma^o$  devrait être relié à l'indice foliaire et à la teneur en eau des feuilles. Cependant, lorsque c'est la diffusion volumique qui prédomine,  $\sigma^o$  devrait être relié à la teneur en eau volumique du couvert ( $m_v$ ).

#### A.2.5. Évaluation de la teneur en eau des sols

La possibilité de déterminer la teneur en eau des sols présente un grand intérêt non seulement en agriculture mais aussi en hydrologie et en prévision de l'érosion des sols. En effet, l'humidité des sols est une donnée nécessaire à l'établissement d'un bilan hydrique. Certains modèles hydrologiques distribués supposent que les zones du bassin versant qui contribuent au ruissellement sont celles qui sont saturées d'humidité (Burt, 1989), et la possibilité de cartographier celles-ci à l'aide d'images radar fait sans doute partie des rêves de ceux qui emploient l'approche de modélisation appelée "variable source area". Plusieurs modèles supposent que plus le sol est sec, plus il y a d'infiltration et moins il y a de ruissellement, donc en théorie moins il y a d'érosion hydrique. Cependant il ne faudrait pas s'en tenir à l'hypothèse qu'un sol sec est moins propice à l'érosion hydrique que ne l'est un sol humide, en connaissant l'effet catastrophique d'une réhydratation rapide sur la

stabilité des agrégats de sols, surtout argileux (Beaulieu, (1990)). Le ruissellement peut aussi être catastrophique sur des sols très secs qui produisent peu de capacité d'infiltration s'ils sont fins, lourds et peu structurés (Anseau (1997), communication personnelle).

Alphonse et Le Toan (1988) ont réalisé des mesures du coefficient de rétrodiffusion sur des champs de Soya, au moyen du diffusomètre RAMSES II. Ces mesures ont permis de valider un modèle de rétrodiffusion qui pourrait éventuellement être inversé et utilisé pour estimer la teneur en eau du sol à partir du coefficient de rétrodiffusion. Ils ont conclu que l'inversion était possible pour des champs de faible biomasse, et que le paramètre d'entrée du modèle qui influençait le plus la sensibilité de  $\sigma^{\circ}$  à la teneur en eau est la densité volumique de la végétation. Ce paramètre est défini comme étant le rapport entre le volume de matière végétale et le volume total du couvert végétal. Ce rapport est calculé en fonction de la teneur en eau volumique du couvert, de la teneur en eau gravimétrique du couvert, et du rapport entre la masse volumique de l'eau et la masse volumique de la matière végétale sèche. Les auteurs ont trouvé une corrélation élevée entre ce paramètre et la teneur en eau de la végétation. Le modèle considère trois contributions à la rétrodiffusion radar, celle de la végétation (diffusion volumique), celle du sol, et celle de l'interaction entre le sol et la végétation. À partir des simulations, ils ont déterminé qu'à partir d'une densité volumique de végétation d'environ 0,37 %, la composante de diffusion volumique peut être considérée comme la seule contribution à la rétrodiffusion radar. Dubois *et al.* (1995) et Dupont *et al.* (1990) ont aussi reconnu l'effet perturbateur de la végétation sur la possibilité de mesurer la teneur en eau par radar. Comme nous l'avons mentionné plus tôt, Dubois *et al.* (1995) proposent un indice de végétation radar basé sur le rapport entre les coefficients de rétrodiffusion en HV sur VV, qui pourrait permettre d'exclure les zones couvertes d'une quantité appréciable de végétation d'une éventuelle cartographie de la teneur en eau des sols. Beaudoin *et al.* (1988) montrent que l'orientation des rangs peut affecter l'évaluation de la teneur en eau des sols agricoles.

Les résultats de Alphonse et Le Toan (1988) montrent que si la végétation peut interférer avec le potentiel de mesure de la teneur en eau des sols, l'effet de cette teneur en eau peut grandement gêner l'évaluation de la couverture végétale. En effet, en faisant varier l'humidité du sol, ils ont remarqué (figure 10 de leur article) qu'avec une humidité entre 0,1 g.cm<sup>-3</sup> et 0,2 g.cm<sup>-3</sup>,  $\sigma^{\circ}$  variait peu en fonction de la densité volumique de la végétation.

Pour des teneurs en eau supérieures, la rétrodiffusion des sols nus était élevée et diminuait en fonction de la densité volumique de la végétation. Pour des teneurs en eau inférieures, elle était faible pour les sols nus, et augmentait avec la présence de végétation. Brisco (1990) montre que les variations hydriques dans le couvert se produisant dans le jour affectent aussi la rétrodiffusion de façon importante. Pour la détermination du stade de croissance des cultures, il est alors important de considérer le facteur eau, dans la plante et dans le sol.

#### A.2.6. Utilisation de différentes polarisations

Pour l'identification des cultures, plusieurs auteurs ont étudié le potentiel de la polarimétrie, où l'on travaille avec des images dans leur forme complexe. Dans les paragraphes qui suivent, nous ne rapportons pas les résultats de ces études puisque les paramètres utilisés en polarimétrie peuvent difficilement être reliés aux résultats que nous pourrions espérer dans cette étude, avec des polarisations HH et VV. On rapporte surtout les études où l'on compare la rétrodiffusion en HH et en VV. Pour un aperçu de l'application de la polarimétrie à l'agriculture et de paramètres pouvant être tirés des images polarimétriques pour caractériser les surfaces agricoles, on renvoie les lecteurs à Groot *et al.* (1992), et à Touzi *et al.* (1992).

Plusieurs auteurs expliquent les réponses différentes aux polarisations HH et VV pour différents types de cultures par l'orientation préférentielle de certaines parties des plantes par rapport au rayonnement. Le Toan *et al.* (1984) ont réalisé des mesures d'atténuation en laboratoire sur des ensembles de plants de blé. Ils ont montré que le facteur de perte augmentait grandement plus l'orientation des tiges se rapprochait de l'orientation du vecteur de déplacement électrique. Ulaby et Wilson (1985) ont réalisé des mesures d'atténuation des hyperfréquences sur le terrain, dans des cultures de blé et de soja. Une expérience de défoliation a permis de démontrer que les feuilles du soja participaient beaucoup plus à la rétrodiffusion en HH qu'en VV. Pour le blé, ils ont confirmé les observations de Le Toan *et al.* (1984) en montrant que l'atténuation était supérieure en polarisation verticale à ce qu'elle était en polarisation horizontale, et que l'écart entre les deux augmentait avec l'angle d'incidence local. En effet, une augmentation de l'angle d'incidence local occasionne peu de changement dans l'orientation relative des tiges et du vecteur électrique pour la polarisation horizontale, mais lorsque les angles deviennent

rasants, l'orientation du vecteur de déplacement électrique se rapproche beaucoup de celui des tiges.

Holmes (1990) a mentionné que la polarisation VV produit un meilleur couplage que la HH avec la végétation (son article rapporte des résultats obtenus pour le maïs), résultant en une atténuation plus forte et une profondeur de pénétration plus faible que pour la polarisation HH. Il simplifie un peu la signification physique des réponses dans les deux polarisations en mentionnant que la polarisation HH contient l'information se rapportant au sol, et la polarisation VV l'information se rapportant à la végétation, et ajoute que la végétation a tendance à dépolariser le signal, bien plus que le sol nu. Son chapitre présente des graphiques fournis par F.T. Ulaby (mais non publiés ailleurs), présentant la variation de la profondeur de pénétration estimée en fonction de la fréquence pour un couvert de maïs, pour les polarisations HH et VV, et celle de la profondeur de pénétration en fonction de l'angle d'incidence. Les courbes de la profondeur de pénétration en fonction de fréquence du rayonnement présentent une forme exponentielle légèrement décroissante ; la profondeur de pénétration est plus élevée pour HH que pour VV, mais cette différence diminue avec une augmentation de la fréquence. En bande X, la différence de profondeur de pénétration entre HH et VV est très faible. Les effets de la polarisation sont donc plus importants à des longueurs d'onde élevées. Les graphiques présentés montrent aussi que l'écart entre la profondeur de pénétration pour HH et VV augmente avec l'angle d'incidence local. L'article ne détaille pas comment la profondeur de pénétration a été mesurée.

Bakhtiari et Zoughi (1991) ont développé un modèle pour simuler la rétrodiffusion radar des prairies à herbe haute sous deux traitements, brûlé et non brûlé, basé sur les caractéristiques physiques, biophysiques et géométriques de ces couverts. Les résultats obtenus au moyen des simulations concordent assez bien avec des mesures sur le terrain réalisées par le Kansas State University (Martin *et al.*, 1989), au moyen d'un diffusomètre. Ils ont remarqué, à de faibles angles d'incidence, que la rétrodiffusion en HH est plus élevée qu'en VV, en raison de la forte influence du sol (les brins d'herbe sont considérés comme étant presque transparents). À partir d'un certain angle d'incidence, l'herbe devient la principale source de rétrodiffusion (le rayonnement parvient moins au sol) et la rétrodiffusion est plus forte en VV qu'en HH. L'angle d'incidence auquel cette inversion se

produit augmente avec une diminution de la longueur d'onde. En bande C, cet angle est à peu près égal à  $40^\circ$ , angle que l'on dépasse souvent avec les images aéroportées, mais qui est rarement dépassé avec les angles d'incidence des satellites radar. En comparant les résultats des simulations avec des mesures réalisées à une fréquence de 10 GHz, ces auteurs ont remarqué que le modèle sous-estime la réponse en HH pour des angles d'incidence élevés. Ils attribuent cela au fait que le modèle ne tient pas compte de la courbure des feuilles qui produit une orientation légèrement horizontale sur la partie supérieure du couvert, permettant un meilleur couplage avec le rayonnement HH que ce que le modèle prévoit. Leur modèle ne tient pas compte des réflexions multiples que les auteurs considèrent comme négligeables.

Le Toan *et al.* (1989) expliquent la diminution de la rétrodiffusion en VV au cours de la croissance du riz par une augmentation de l'atténuation dans cette polarisation, mais les valeurs aussi élevées du rapport des coefficients de rétrodiffusion en HH et en VV que 10 dB restent inexpliquées par leurs modèles de rétrodiffusion. Lors de l'étude d'images de la mission SAREX'92 en bande C au Brésil, Shimabukuro *et al.* (1994) ont remarqué que les pâturages présentaient une rétrodiffusion plus forte en VV qu'en HH, ce qu'ils ont attribué à l'orientation plutôt verticale des brins d'herbe. Ils ont aussi remarqué que les pâturages délaissés, qui étaient envahis par de mauvaises herbes et de petits arbustes, ne présentaient pas cette supériorité de  $\sigma_{VV}^o$  par rapport à  $\sigma_{HH}^o$ , probablement à cause de la structure plus aléatoire du couvert végétal.

À partir de résultats de simulations, Autret *et al.* (1989) ont remarqué que le rapport de polarisation  $\sigma_{HH}^o/\sigma_{VV}^o$  augmente avec l'angle d'incidence pour les sols nus, et ce plus rapidement pour les sols secs que pour les sols humides. À des angles supérieurs à  $35^\circ$ , il devrait être possible de distinguer les sols humides des sols secs. Ceci est dû au fait que les réponses dans les deux polarisations dépendent des coefficients de Fresnel, qui eux dépendent de la teneur en eau.

Des études réalisées avec les hyperfréquences passives, surtout par des chercheurs italiens, ont traité du problème de la polarisation. Un comportement différent pour différentes polarisations caractérise l'atténuation par le couvert, et ces résultats peuvent aider à comprendre les résultats obtenus avec les hyperfréquences actives. Ferrazzoli *et al.*

(1992), Paloscia et Pampaloni (1992) travaillent avec un indice de polarisation nommé "PI", qui est la différence entre les températures de brillance mesurées avec la polarisation verticale et horizontale, divisée par la demi-somme de ces mêmes températures de brillance. Ferrazzoli *et al.* (1992) ont trouvé que cet indice diminuait avec l'indice foliaire LAI, jusqu'à prendre des valeurs négatives pour certaines cultures arrivées à leur maturité, telles que la luzerne. L'indice était toujours positif pour le sol nu, indiquant une émission supérieure en polarisation verticale ; la diminution de l'indice avec la croissance des plantes indique une augmentation de l'atténuation en polarisation verticale, par rapport à la polarisation horizontale. Un modèle basé sur la théorie du transfert radiatif, développé pour exprimer la relation entre l'indice PI et le LAI, permettrait d'estimer le LAI et la teneur en eau des plantes pendant la première phase de la croissance des cultures (Paloscia and Pampaloni, 1992).

### A.3. CORRECTIONS DES EFFETS RADIOMÉTRIQUES DE LA TOPOGRAPHIE

Le relief occasionne, dans les images de télédétection, des distorsions géométriques mais aussi radiométriques, causant une variation de l'intensité mesurée à travers la variation de l'orientation de la surface par rapport au rayonnement et au capteur. Les images radar sont particulièrement susceptibles aux effets radiométriques du relief, et c'est pourquoi la majorité des applications du radar en agriculture se sont réalisées en terrain plat. Pour les études de bassin versant, on ne peut pas éviter le relief (le bassin étant lui-même une expression du relief), et il faut tenter de corriger les effets de la topographie. En milieu tropical, une part substantielle de l'agriculture se réalise en régions montagneuses.

Pour les images du domaine optique, les corrections radiométriques employées sont généralement empiriques. En effet, il est impossible de développer une relation uniquement théorique pour décrire le comportement angulaire du rayonnement réfléchi, puisqu'une part importante du rayonnement est diffuse plutôt que directe. Cette part diffuse dépend des conditions atmosphériques. Itten et Mayer *et al.* (1993) présentent quatre modèles de correction radiométrique pour compenser les effets de la topographie. Parmi les corrections les plus couramment employées, on retrouve la méthode de Minnaert, permettant de calculer la luminance qui serait observée pour un terrain plat, LH, à partir de la luminance LT observée pour le terrain incliné.



$$LH = LT \left[ \frac{\cos(\theta_z)}{\cos(\theta_i)} \right]^k \quad (\text{A-1})$$

où  $\theta_z$  est l'angle zénithal solaire et  $\theta_z$  est l'angle de réflexion, soit l'angle entre l'axe de visée et la normale à la surface. Le facteur  $k$  est la constante de Minnaert, et est calculée empiriquement à partir des données de l'image.

Pour les images radar, les méthodes de correction que l'on retrouve dans la littérature peuvent être classées selon trois types : les approches complètement empiriques, les méthodes basées sur la compensation de la variation de l'aire contribuant à la brillance d'un pixel, et les méthodes visant à corriger à la fois cette variation d'aire locale et la dépendance angulaire du coefficient de rétrodiffusion.

### A.3.1. Approches complètement empiriques

Le facteur de correction développé par Guidon *et al.* (1981), détaillé dans Teillet *et al.* (1985), utilisé par la suite par Hinse *et al.* (1990), est semblable à la correction de Minnaert. Le facteur de correction à appliquer au compte numérique mesuré pour un terrain incliné se calcule selon l'équation A-2, en utilisant la notation de cette thèse :

$$F_{corr} = \frac{CN_H}{CH_S} = \left[ \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_{loc})} \right]^q \quad (\text{A-2})$$

Où  $CN_S$  est le compte numérique mesuré pour un terrain incliné,  $CN_H$  est le compte numérique théorique d'un terrain plat,  $\theta_i$  est l'angle d'incidence,  $\theta_{loc}$  est l'angle d'incidence local, et l'exposant  $q$  est déterminé empiriquement à partir des données de l'image. Cette approche n'implique pas de correction de la variation de l'aire au sol contribuant à la brillance de chaque pixel. En appliquant cette méthode, Teillet *et al.* (1985) rapportent qu'il y a trop de dispersion dans les données pour extraire des valeurs raisonnables de  $q$ . Ces auteurs ont utilisé deux variantes de leur facteur de correction, impliquant l'application de facteurs de décalage aux cosinus des angles d'incidence locaux, décalages calculés empiriquement à partir des données originales en utilisant une valeur

fixe pour le facteur  $q$ . Ces auteurs rapportent qu'il se produit une surcorrection de l'image en utilisant une valeur de  $q=2$ .

Il est utile de mentionner que  $\theta_{loc}$  se calcule selon :

$$\cos(\theta_{loc}) = \cos(\theta_i) \cos(\alpha) + \sin(\theta_i) \sin(\alpha) \cos(j - a) \quad (A-3)$$

où  $\alpha$  est la pente du terrain,  $a$  est son orientation (ou azimuth) et  $j$  est l'orientation du capteur par rapport à la portion de terrain considérée.

Selon une approche aussi totalement empirique, Bayer *et al.* (1991) ont ajusté 13 modèles différents avec leurs données d'image, pour relier le compte numérique de l'image à des variables telles que l'angle d'incidence local et ses composantes dans les axes transversal et azimuthal, la pente et l'orientation du terrain. Ils ne tenaient pas compte non plus de la variation de l'aire au sol contribuant à la brillance du pixel. Bien qu'ils n'exposent pas les résultats de la comparaison des 13 modèles élaborés, ils mentionnent qu'un modèle de régression polynomiale simple entre le compte numérique et l'angle d'incidence local donne de bons résultats et pourrait être un outil intéressant.

### A.3.2. Compensation de la variation de l'aire contribuant à la brillance d'un pixel (ou aire diffusante)

Comme on peut le voir dans Laur (1992) et dans Hawkins et Teany (1993), l'étalonnage des images radar entraîne l'application d'un facteur  $\sin\theta_i$  (où  $\theta_i$  est l'angle d'incidence pour une surface plane) pour transformer les valeurs de brillance (intensité par unité de surface dans l'image en projection oblique) en coefficient de rétrodiffusion (section efficace radar par unité de surface au sol). En effet, pour une surface plane et horizontale, l'aire d'une cellule de résolution au sol est  $1/\sin\theta_i$  fois plus grande que l'aire de la cellule de résolution dans la projection oblique. L'aire contribuant à la brillance d'un pixel est déterminée par la résolution plutôt que par l'espacement entre pixels. L'aire de la cellule de résolution en projection oblique, c'est à dire sur le plan de formation de l'image, est constante, et l'aire correspondante au sol augmente donc avec une diminution de l'angle d'incidence. L'inclinaison de la surface terrestre fait varier cette aire par rapport à ce qu'elle serait si la

surface était plane. Elle peut produire des erreurs radiométriques de plusieurs décibels, selon la géométrie de visée, qui augmentent avec une diminution de l'angle d'incidence.

Raney (1998) propose un facteur de correction simple des effets du relief, obtenu en divisant la longueur du segment au sol impliqué par une cellule de résolution pour une surface inclinée par celle correspondant à une surface horizontale, selon le plan transversal. En utilisant la notation de cette thèse, le facteur de correction  $F_{corr}$  à appliquer à la brillance mesurée se calcule selon :

$$F_{corr} = \frac{\beta^{\circ}_H}{\beta^{\circ}_{mesuré}} = \frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_i - \alpha_t)} = \frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_{loc(t)})} \quad (A-4)$$

où  $\beta^{\circ}_{mesuré}$  est la brillance mesurée pour le terrain incliné,  $\beta^{\circ}_H$  est la brillance théorique d'un terrain plat,  $\theta_{loc(t)}$  est la projection de l'angle d'incidence local dans le plan transversal, et  $\alpha_t$  est la projection de la pente du terrain dans ce plan.

Dans le même ordre d'idée, van Zyl *et al.* (1993) ont défini un facteur de correction pour  $\sigma^{\circ}$ , basé sur le rapport entre l'aire au sol représentée par un pixel sur le terrain (incliné) et l'aire correspondante que l'on aurait pour une surface plane et à l'altitude pour laquelle les images ont été étalonnées (approximation de la terre plate pour le cas aéroporté, terre sphérique pour les images de satellite). Pour le calcul de l'aire, l'inclinaison de la surface est décomposée selon les deux projections, puisque dans l'axe transversal l'aire varie en fonction du sinus de l'angle d'incidence local, alors qu'en azimuth elle est une fonction du cosinus de l'angle d'incidence (qui est en fait la pente locale). Le facteur de correction topographique est, selon la notation utilisée dans cette thèse :

$$F_{corr} = \frac{A_{ref}}{A_{loc}} = \frac{\sin(\theta_i - \alpha_t) \times \cos(\alpha_a)}{\sin(\theta_{ref})} \quad (A-5)$$

Les inclinaisons selon l'azimut produisent des distorsions radiométriques beaucoup moins importantes que les inclinaisons selon l'axe transversal, pour les faibles valeurs de l'angle d'incidence local. On doit estimer l'angle d'incidence à partir de la portée oblique ; les

auteurs mentionnent qu'une incertitude au niveau de l'altitude de l'avion se répercute sur le calcul de l'angle d'incidence local et donc sur le facteur de correction radiométrique.

Holezc *et al.* (1994) ont aussi développé une correction basée sur la variation de l'aire diffusante. Ils utilisent aussi des données de position (acquises par GPS) et des mesures du roulis et du tangage dans le processus de géocodage et de correction radiométrique. Ces auteurs appliquent la correction avant le géocodage, donc dans la géométrie de l'image, pour éviter le rééchantillonnage qui affecte beaucoup les données complexes.

Ulander (1995) insiste sur le fait que ces approches de correction ne sont qu'approximatives lorsque la surface est inclinée à la fois dans l'axe transversal et en azimut, et que l'angle dont on calcule le sinus ne doit pas être l'angle d'incidence local, mais plutôt l'angle entre la normale de la surface et sa projection sur le plan de l'image. Il mentionne que la correction de Van Zyl *et al.* (1993), qui multiplie les projections de l'aire au sol dans l'axe transversal oblique et en azimut, ne produit aucune erreur si l'inclinaison est seulement selon l'un ou l'autre de ces axes, et que l'erreur est faible ( $<0.2$  dB) si la pente est inférieure à  $40^\circ$ .

Guindon et Adair (1992) calculent un facteur de compression topographique en rééchantillonnant le modèle numérique d'altitude dans la géométrie de l'image et en calculant le nombre de pixels du MNA correspondant à chaque pixel de l'image de sortie. Ce facteur de compression correspond donc à un gain causé par l'inclinaison du terrain et permet de simuler l'apparence des images radar à partir de modèles numériques d'altitude.

### A.3.3. Approches compensant à la fois la variation de l'aire diffusante et le comportement angulaire de la rétrodiffusion

Pour réaliser une correction complète, on doit aussi tenir compte de la dépendance angulaire de la rétrodiffusion, c'est à dire que même en corrigeant pour la variation de l'aire diffusante, le coefficient de rétrodiffusion varie en fonction de l'angle d'incidence local.

Ulaby *et al.* (1982) présentent trois modèles ou approximations possibles formulées par Clapp (1946), décrivant la dépendance angulaire de  $\sigma^\circ$ :

Comportement théorique d'une surface lambertienne\* (rétrodiffusion selon une distribution en cosinus):

$$\sigma^{\circ}(\theta) = \sigma^{\circ}(0) \times \cos^2(\theta) \quad (\text{A-6})$$

Dépendance en cosinus (surface parfaitement rugueuse, rétrodiffusion isotrope):

$$\sigma^{\circ}(\theta) = \sigma^{\circ}(0) \times \cos(\theta) \quad (\text{A-7})$$

Ce modèle est équivalent à une indépendance, par rapport à  $\theta$ , du coefficient de rétrodiffusion  $\gamma$  défini comme étant la section efficace de rétrodiffusion par unité de surface perpendiculaire au faisceau d'illumination (Cosgriff *et al.* 1960).

$$\gamma(\theta) = \frac{\sigma^{\circ}(\theta)}{\cos(\theta)} = \gamma(0) \quad (\text{A-8})$$

Et, si on suppose que les effets de l'angle d'incidence local sont négligeables.

$$\sigma^{\circ}(\theta) = \sigma^{\circ}(0) \quad (\text{A-9})$$

Selon Cosgriff *et al.* (1960), Clapp (1946) a trouvé que c'est la dépendance en cosinus (équations A-7 ou A-8) qui s'ajustait le mieux à ses résultats expérimentaux. Cosgriff *et al.* (1960) et Ulaby et Dobson (1988) ont fait la même observation. La supposition d'un  $\gamma$  indépendant de l'angle d'incidence local pour les angles correspondant au "plateau" de rétrodiffusion est maintenant couramment employée pour l'étalonnage relatif et même absolu des images radar, par exemple par Hawkins et Teany (1993) pour l'étalonnage des données SAREX'92 employées dans cette thèse.

Leclerc *et al.* (1993) ont développé un facteur de correction qui est le rapport du coefficient de rétrodiffusion théoriquement obtenu pour une surface "idéale" (de comportement angulaire connu), plane et à une altitude de référence, sur le coefficient de rétrodiffusion théoriquement obtenu pour la même surface ayant la topographie du terrain étudié. Ce facteur de normalisation combine l'effet de la variabilité de l'aire du pixel au

sol, de la même manière que van Zyl *et al.* (1993), et l'effet du comportement angulaire de  $\sigma^{\circ}$ . Le comportement angulaire de  $\sigma^{\circ}$  est approximé comme étant celui d'une surface lambertienne. Contrairement à plusieurs auteurs qui réalisent la correction géométrique dans la géométrie de l'image (Wivell, 1992, Beaudoin *et al.* (1994)), cette méthode fonctionne dans la projection cartographique, et on géocode l'image avant de réaliser la correction. Comme le calcul de l'angle d'incidence local requiert la connaissance de la portée oblique, une image synthétique de la portée oblique est créée et géocodée selon la même procédure (avec MNA) que l'image étudiée.

Beaudoin *et al.* (1994) ont développé une méthode d'étalonnage corrigeant les effets radiométriques de la topographie causés à la fois par les variations de l'aire diffusante et par la dépendance de  $\sigma^{\circ}$  envers l'angle d'incidence local. Pour la compensation de la variation de l'aire diffusante, contrairement aux méthodes de Van Zyl *et al.* (1993) et Leclerc *et al.* (1993), leur méthode considère la surface au sol impliquée par chaque pixel comme une surface composée. Pour réaliser la correction, c'est le modèle numérique d'altitudes qui est référencé à la géométrie de l'image. La dépendance de  $\sigma^{\circ}$  en fonction du cosinus de l'angle d'incidence local, ce dernier étant considéré comme l'angle entre la normale à la surface et le vecteur d'incidence, dans un espace en trois dimensions, et peut être calculé selon l'équation (A-3). Ces auteurs ont trouvé que la variabilité de l'aire diffusante occasionnait une erreur d'étalonnage variant jusqu'à 7 dB pour les pentes faisant face au radar, et jusqu'à -3 dB pour les pentes opposées (donc une variabilité de 10 dB). Les couverts forestiers ont montré une diminution de 1 dB pour des angles d'incidence locaux entre 10° et 40°, et les auteurs estiment à 1.5 dB l'erreur causée par le comportement angulaire de l'angle d'incidence local. L'effet de la variation d'aire est beaucoup plus important que celui de la dépendance angulaire de  $\sigma^{\circ}$ , surtout pour les angles d'incidence plus faibles produits par les satellites ERS. Stussi *et al.* (1995) ont appliqué la méthode développée par Beaudoin *et al.* (1994), en calculant empiriquement l'exposant à appliquer au cosinus de l'angle d'incidence local pour décrire la dépendance angulaire de  $\sigma^{\circ}$ . Pour l'image ERS-1 étudiée, ils ont obtenu un exposant de 1 pour la forêt, ce qui confirme la validité du modèle supposant  $\gamma$  indépendant de l'angle d'incidence local.

Leclerc et Beaulieu (1996) ont développé une méthode de normalisation simplifiée, qui tient compte seulement de la variabilité de l'aire diffusante. Au lieu de considérer l'aire au sol comme le font Van Zyl *et al.* (1993), Leclerc *et al.* (1993) et Beaudoin *et al.* (1994), l'aire dont on calcule la variation est l'aire au sol projetée sur le front d'onde, donc la correction est équivalente à calculer  $\gamma$  à partir de la brillance de l'image. Le facteur par lequel on doit multiplier la brillance du pixel est le rapport entre la longueur d'une cellule de résolution dans l'image en projection oblique, dans l'axe transversal, sur la longueur de la bande de sol interceptée par cette cellule de résolution, projetée sur le front d'onde :

$$\frac{\gamma}{\beta^{\circ}} = \tan(\theta_{loc(t)}) \quad (\text{A-10})$$

et si on cherche à calculer la brillance ou le coefficient de rétrodiffusion théorique d'un terrain plat à une altitude  $h_{ref}$ , en supposant que  $\gamma$  ne varie pas en fonction de l'angle d'incidence local, alors :

$$F_{corr} = \frac{\beta_{ref}^{\circ}}{\beta_{mesuré}^{\circ}} = \frac{\tan(\theta_{loc(t)})}{\tan(\theta_{ref})} \quad (\text{A-11})$$

Cette correction est équivalente à une compensation combinée de la variation de l'aire au sol contribuant à la brillance d'un pixel et d'une dépendance de l'intensité rétrodiffusée en fonction du cosinus de l'angle d'incidence local, telle que réalisée par Beaudoin *et al.* (1994). C'est cette méthode qui est utilisée dans cette thèse et elle est développée en détail au chapitre 3.

Les auteurs montrent que l'angle d'incidence local peut être calculé à partir de l'image synthétique de la portée oblique qui a été géocodée en utilisant le modèle numérique d'altitudes, en autant que celle-ci soit emmagasinée dans un canal réel et que le rééchantillonnage ait été réalisé avec un algorithme d'interpolation bilinéaire. La projection de l'angle d'incidence local dans le plan transversal,  $\theta_{loc(t)}$ , se calcule selon :

$$\theta_{loc(t)} = \sin^{-1} \left( \frac{\Delta S_t}{\Delta G_t} \times \cos(\alpha_t) \right) \quad (\text{A-12})$$

La valeur de  $\frac{\Delta S_t}{\Delta G_t}$  pour chaque pixel est évaluée en calculant la pente de l'image synthétique de la portée oblique géocodée, projetée dans le plan transversal.

Cette équation est démontrée dans cette thèse, à la section 3.3. Cette approche permet de calculer  $\theta_{loc(t)}$  sans devoir connaître précisément l'altitude de la plate-forme et la direction de vol, en autant que le géocodage ait été bien fait. Cette méthode est utilisée dans cette thèse et elle est développée en détail au chapitre 3.

Wivell (1992) insiste sur l'importance de la qualité du modèle de terrain utilisé pour les corrections radiométriques sur la qualité de la correction, qu'une résolution insuffisante et la présence d'artifices peuvent induire des erreurs dans l'image corrigée.

#### A.4. RÉFÉRENCES

Amodeo, G., de Matthaeis, P., Ferrazzoli, P., Paloscia, S., Pampaloni, P., Schiavon, G., Sigismondi, S. and Solimini, D. (1996). The Potential of Multifrequency Polarimetric SAR in Assessing Agricultural and Arboreous Biomass. Proceedings of the International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR data for Land Applications, Toulouse, France, 10-13 octobre, p. 1-10.

Anonymous (1980). Universal Soil Loss Equation, Caribbean Area: Technical Notes supplemented with the USDA Agriculture Handbook N. 537 (AH 537/12/78). United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Box 4868 San Juan, Puerto Rico 00936.

Alphonse and Le Toan, T. (1988). Retrieving Vegetation and Soil Parameters from Radar Measurements. Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Aussois, France, 18-22 January 1988 (ESA SP-287) pp. 105-111.

Autret, M., Bernard, R. and Vidal-Madjar, D. (1989). Theoretical Study of the Sensitivity of the Microwave Backscattering Coefficient to the Soil Surface Parameters. International Journal of Remote Sensing, Vol 10, N1, pp. 171-179.

Bakhtiari, S. and Zoughi, R. (1991). A model for Backscattering Characteristics of Tall Prairie Grass Canopies at Microwave Frequencies. Remote Sensing of Environment, N. 36, pp. 137-147.



Bayer, T., Winter, R., and Schreier, G., (1991). Terrain influences in SAR backscatter and attempts to their correction. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(3), 451-462.

Beaudoin, A., Hardy, S., Deshayes, M., Le Toan, T., and Girou, D., (1993). Use of airborne SAR data for the mapping of shifting cultivation in French Guyana, SAREX-92 Workshop Proceedings, ESA Headquarters, Paris, 6-8 December, ESA WPP-76, p.185-191.

Beaudoin, A. Deshayes, M., Piet, L., Stussi, N., and Le Toan, T. (1994) Retrieval and Analysis of Temperate Forest Backscatter Signatures From Multitemporal ERS-1 Data Acquired over Hilly Terrain. Proceedings of the First ERS-1 Pilot Project Workshop, Toledo, Spain, 22-24 June (ESA SP-365).

Beaudoin, A., Le Toan, T. and Gwyn, Q.G.H. (1988). Observations on the Effect of Geometric Properties of Agricultural Soils on Radar Backscatter, from C-SAR images. IGARSS'88 Symposium, Edinburgh, Scotland. p. 1595-1598.

Beaulieu, N. (1990). L'effet de deux facteurs d'altération climatique sur l'érodabilité d'un sol argileux: les cycles de séchage/mouillage et l'oxydation. Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Canada, 231 p.

Beaulieu, N., Leclerc, G., Velasquez, S., Pigeonnat, S., Gribius, N, Escalant, J.V. and Bonn, F. (1993) "Investigations at CATIE on the Potential of High Resolution Radar Images for Monitoring of Agriculture in Central America". SAREX'92 Workshop Proceedings, ESA headquarters, Paris, France, December 6-8, p.139-153.

Benach C., S., y Araya G., A. (1993). Los datos C-SAR en la identificación de algunos cultivos tropicales en Costa Rica. Memorias del Simposio Internacional de Radar, San José, Costa Rica, 1-5 Noviembre.

Bonn, F. et Rochon, G. (1992). Précis de Télédétection: Volume 1: Principes et Méthodes. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 485 p.

Bouman, B.A.M., (1991). Crop Parameter Estimation from Ground-Based X-band (3cm wave) Radar Backscattering Data. *Remote Sensing of Environment*, N. 37, p. 196-205.

Bouman, B.A.M., and van Kasteren, D. (1992). Crop Classification Possibilities with Radar in ERS-1 and JERS-1 configuration. *Remote Sensing of Environment*, N. 40, p. 1-13.

Burt, T.P. (1989). Storm Runoff Generation in Small Catchments in Relation to the Flood Response of Large Basins. Chapter 2 in Beven, K. and Carling, P. (ed.) *Floods: Hydrological, Sedimentological and Geomorphological Implications*. John Wiley and Sons.

Brisco, B., Brown, R.J., Koehler, J.A., Sofko, G.J. and Mc Kibben, M.J. (1990) The diurnal Pattern of Microwave Backscattering by Wheat. *Remote Sensing of the Environment*, N.33, p. 37-47.

Brown, R., Brisco, B., Leconte, R., Major, D.J., Fischer, J.A., Reichert, G., Korporal, K.D., Bullock, P.R., Pokrant, H. and Kulley, J. (1993). Potential Applications of Radarsat Data to Agriculture and Hydrology. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol.9, N.4, p. 317-329.

Cihlar, J., Brown, R.J., and Guindon, B. (1984). Microwave Remote Sensing of Agricultural Crops in Canada. *Proceedings of the EARSeL Workshop on Microwave Remote Sensing Applied to Vegetation*. Amsterdam, 10-12 December.

Company, A., Beaudoin, A., King, C., et Rakotoarivony, L. (1995). Apport de l'imagerie SAR dans l'estimation de paramètres de rugosité, pour la modélisation des risques de ruissellement. Exemple d'un vignoble méditerranéen, Rousillon, France. *Mémoires du Symposium sur l'extraction de paramètres bio-géophysiques à partir des images ROS pour les applications terrestres*, Toulouse, France, 10-13 octobre.

Cosgriff, R.L, Peake, W.H. and Taylor, R.C. (1960). Terrain Scattering Properties for Sensor System Design (Terrain Handbook II). *Engineering Experiment Station Bulletin* 181, Ohio State University.

Cyr, L., Bonn, F., Pesant, A. (1995). Vegetation Indices Derived from Remote Sensing for an Estimation of Soil Protection Against Soil Erosion. *Ecological Modelling*, N. 79, p. 277-285.

De Loor, G.P. (1985). Variation of the Radar Backscatter Through the Growing Season. *Proceedings of the EARSeL Workshop on Microwave Remote Sensing Applied to Vegetation*, Amsterdam, December 10-14 1984 (ESA SP-227), p.63-67.

Dubois, P., van Zyl, J. and Engman, T. (1995). Measuring Soil Moisture with Imaging Radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 33, N.4, p. 915-926.

Dupont, P., Gwyn, Q.H.J et Brisco, B. (1990). Évolution Temporelle de la rétrodiffusion radar bande C, due à l'humidité du sol et aux changements dans la morphologie du couvert. *Compte rendu du Treizième Symposium canadien sur la télédétection*, Fredericton, N.B., Canada, p.129-143.

Ferrazzoli, P, Guerriero, L., Paloscia, S., Pampaloni et P, Solimini, D. (1992). Modeling Polarization Properties of Emission from Soil Covered with Vegetation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, No. 1, p. 157-165.

Foody, G.M., Curran, P.J., Groom, G.B. and Munro, D.C. (1988). Crop classification with Multitemporal X-Band SAR Data. *Proceedings of the IGARSS'88*, Edinburg, Scotland, September 13-16, 1988, p. 217-220.

- Freeman, A., Villasenor, J., Klein, J.D., Hoogeboom, P. and Groot, J. (1994). On the Use of Multi-Frequency and Polarimetric Radar Backscatter Features for Classification of Agricultural Crops. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 15, No. 9, p. 1799-1812.
- Groot, J.S., van den Brock, A.C., and Freeman, A. (1992). An Investigation of the potential of Polarimetric SAR Data for Discriminating Between Agricultural Crops. *Proceedings of the MAESTRO-1/AGRISCATT final workshop: Radar Techniques for Forestry and Agricultural Applications*, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, 6-7 March.
- Guindon, B., Teillet, P.M., Goodenough, D.G., Meunier, J.F. and Dickinson, K. (1981). Image Analysis Software for Airborne MSS and SAR Data, *Proceedings of the VII<sup>th</sup> Canadian Remote Sensing Symposium*, Winnipeg, Manitoba, p. 395-409.
- Guindon, B. and Adair, M. (1992). Analytic Formulation of Spaceborne SAR Image Geocoding and "Value-Added" Product Generation Procedures using Digital Elevation Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol.18, N. 1, p. 2-12.
- Hawkins, R. K., and Teany, L. D., (1994). SAREX 1992 Data Calibration, SAREX-92 Workshop Proceedings, ESA Headquarters, Paris, 6-8 December 1993, ESA WPP-76, p. 41-53.
- Hill, J. (1993). Monitoring Land Degradation and Soil Erosion in Mediterranean Environments. *ITC Journal 1993-4*, p. 323-331.
- Hinse, M., Gwyn, Q. H. and Bonn, F., 1988. Radiometric Correction of C-band Imagery for Topographic Effects in Regions of Moderate Relief, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 26, p. 122-132.
- Hoeckman, D. H., Van Der Sanden, J.J., and Bijker, W., (1994). Results of the SAREX-92 Campaign in Guyana and Colombia, SAREX-92 Workshop Proceedings, ESA Headquarters, Paris, 6-8 December 1993, ESA WPP-76, p. 157-166.
- Holecz, F. Meier, E., Piesbergen, J., Wegmuller, U. and Nuesch, D. (1994). Radiometric Calibration of Airborne SAR Imagery. *IGARSS'94*, p. 1096-1098
- Holmes, M.G. (1990). Applications of Radar in Agriculture. *in Application of Remote Sensing in Agriculture*, Butterworth Eds., Stoneham, p. 307-330.
- Itten, K. I., and Meyer, P., 1993. Geometric and Radiometric Correction of TM data of mountainous Forested Areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 31, N.4, 764-770.

Kellendorfer, J., Schadt, R., and Mauser, W. (1992). Segmented Landuse Classification of Multitemporal ERS-1 SAR data, Proceedings of the first ERS-1 Symposium, Cannes, France. ESA SP-359, 532-536.

Kurosu, T., Fujita, M. and Chiba, K. (1995). Monitoring of Rice Crop Monitoring from Space using the ERS-1 C-band SAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 33, N.4, p. 1092-1096.

Laur, H. (1992). Derivation of Backscattering Coefficient  $\sigma^0$  in ERS-1.SAR.PRI Products. ERS-1 SAR Calibration, ESA/ESRIN Report, 16 p.

Leclerc, G., Beaulieu, N., Velazquez M., S., y Bonn, F., (1993). Metodología Sencilla para Estudiar los Efectos Radiométricos Debidos al Angulo de Incidencia Local en una Imagen de Radar". Memorias del Simposio Internacional de Radar, San José, Costa Rica, Noviembre 1-5.

Leclerc, G and Beaulieu, N. (1996). "Two Simple Methods to Correct Radiometric Distortions due to the Slant-Range Projection in a Radar Image. Proceedings of the 2nd International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, San Francisco, USA, June 24-27, p. 305-314.

Le Toan, T., Laur, H., Mougin, E., and Lopes, A. (1989). Multitemporal and Dual-Polarization Observations of Agricultural Vegetation Covers by X-Band SAR Images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 27, N.6, p. 709-718.

Le Toan, T., Lopez, A. and Huet, M. (1984). On the Relationship Between Radar Backscattering Coefficient and Vegetation Canopy Characteristics. Proceedings of the IGARSS'84 Symposium, Strasbourg, August 27-30. ESA-SP-215, p. 155-160.

Lopes, A., Touzi, R and Nezry, E. (1990). Adaptive Speckle Filters and Scene Heterogeneity, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, p. 992-1000.

Lukowski, T.I. and Daleman, P.S. (1991). User's Guide for A/B SAR Radiometric Calibration: SAR\_RAD\_CAL. Technical memo N. DMD-TM-91-742, Canada Centre for Remote Sensing, 54 p.

Maraux, F. y Garcia, G., (1990). Estudio Probabilístico de la Nebulosidad. Aplicación Para la Toma de Imágenes Satélelite en Centroamérica. Resultados Resumidos. Proyecto Regional de Agrometeorología, CATIE-CIRAD-ORSTOM.

Major, D.J., Larney, F.J., Brisco, B., Lindwall, C.W, and Brown, R.J. (1993). Tillage effects on Radar Backscatter in Southern Alberta. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol.19, N.2, p. 170-176.

Mc Nairn, H. and Protz, R. (1993). Mapping Corn Residue Cover on Agricultural Fields in Oxford County, Ontario, Using Thematic Mapper. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol 19, N. 2, p. 152-159.

McNairn, H, Boisvert, J.B., Major, D., Gwyn, Q.H.J., Brown, R.J. and Smith, A. (1995). Lethbrige Scatterometer Tillage Experiment: Experiment Description and Parameter Characterization. *Proceedings of the XVII<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing*, 13-15 June, Saskatoon, Canada.

Major, D.J., Larney, F.J., et Lindwall, C.W. (1990). Spectral Reflectance Characteristics of Wheat Residues. *Tenth International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vol. 1, p. 603-607.

Martin jr., R.D., Asrar,G., et Kanemasu, E.T. (1989). C-Band Scatterometer Measurements of a Tallgrass Prairie. *Remote Sensing of Environment*, N. 29, p. 281-292

Paloscia, S. et Pampaloni, P. (1992). Microwave Vegetation Indexes for Detecting Biomass and Water Conditions of Agricultural Crops. *Remote Sensing of Environment*, N. 40, p. 15-26.

Raney, R.K., Ahern, F.J., Dams, R.V., Werle, D. (1990). A Review of Radar Remote Sensing for Tropical Forest Management. *UN/FAO/ESA microwave workshop*, INPE, Brazil.

Raney, R.K (in press, 1998). Radar Fundamentals: Technical Perspective. Chapter 2, *Manual of Remote Sensing*, Third Edition, F. Henderson and A. Lewis, editors. John Wiley and Sons.

Ribbes, F., Le Toan, T., Floury, N, Wang, L., Ding, K.H., Hsu, C.C., Kong, J.A. (1995) On the retrieval of Rice Crop Parameters from SAR data. *Symposium on the retrieval of Bio- and geophysical parameters from SAR data for land applications*, October 10-13, Toulous, France. p. 233-243.

Rosenqvist, Å (1997). Temporal and Spatial Characteristics of Irrigated Rice in JERS-1 L-band Data. Submitted to the *International Journal of Remote Sensing*.

Saatchi, S.S., Van Zyl, J.J. and Asrar, G. (1995). Estimation of Canopy Water Content in Konza Prairie Grasslands Using Synthetic Aperture Radar. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, N. D12, p. 25,481-25,496.

Schadt, R., Kellndorfer, J., Mauser, W., (1993). Comparison of ERS-1 and Landsat Thematic Mapper Data for Monitoring Grassland and Detecting Changes in Agricultural Use. *Proceedings of the Second ERS-1 Symposium: Space at the Service of our Environment*, Hamburg, Germany, 11-14 October 1993. ESA SP-361, p. 75-78.

- Shimabukuro, Y.T., Lawrence, W.T. and Ahern, F.J. (1994). Tropical Vegetation Analysis with Landsat Thematic Mapper and Canadian Synthetic Aperture Radar data. Proceedings of the European Symposium on Satellite Remote Sensing, Rome, Italy, September 26-30, SPIE Vol. 2314, p. 255-260.
- Smith, A.M., Major, D.J., Lindwall, C.W., and Brown, R.J. (1995). Multi-Temporal, Multi-Sensor Remote Sensing for Monitoring Soil Conservation Farming. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 21, N. 2, p. 177-184.
- Stussi, N., Beaudoin, A., Castel, T. and Girord, P. (1995). Radiometric Correction of Multi-configuration Spaceborne SAR data over Hilly Terrain. Proceedings of the International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR data for Land Applications, Toulouse, France, 10-13 octobre, p. 457-466.
- Teillet, P. M., Guindon, B., Meunier, J. -F., and Goodenough, D. G., (1985). Slope-Aspect Effects in Synthetic Aperture Radar Imagery, Canadian Journal of Remote Sensing, Vol.11 N.1, p. 39-50.
- Thompson, M.D., Dams, R.V. (1990). Forest and Land Cover Mapping from SAR: A Summary of Recent Tropical Studies. 23<sup>rd</sup> international Symposium on Remote Sensing of the Environment, Bangkok, Thailand, April 19-25.
- Touzi, R., Goze, S., Le Toan, T., Lopes, et Mougin, E. (1992). Polarimetric Discriminators for Sar Images. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30, N. 5, p. 973-980.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A.K. (1982). Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol. 2, Chapter 8. Radar remote Sensing and Surface Scattering Theory. Addison-Wesley publishing Co., Reading, Massachusetts.
- Ulaby, F.T., Wilson, E.A. (1985). Microwave Attenuation Properties of Vegetation Canopies. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-23, No. 5. P.746-753.
- Ulaby, F.T. and Dobson, M.C. (1988). Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain. Artech House, Michigan, 357 p.
- Ulander, L.M.H. (1995) A new Look at the Slope Correction for SAR Radiometric Calibration. IGARSS'95, Florence, Italy, p. 602-604.
- Van Zyl, J.J., Chapman, B.D., Dubois, P., and Shi, J. (1993). The Effect of Topography on SAR Calibration. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31, No. 5, p. 1036-1043.
- Wicherek, S. (1994). L'érosion des Grandes Plaines Agricoles. La Recherche, Septembre 1994, Vol. 25, p. 881-888.

Wischmeier, W.H, et Smith, D.D (1978). Predicting rainfall erosion losses- a guide to conservation planning. Agricultural Handbook N. 537, U.S. Dept. of Agriculture, Washington D.C.

Wivell, C. E., Steinwand D. R., Kelly, G. G., and Meyer, D. J. (1992). Evaluation of terrain models for the geocoding and terrain correction of SAR Images, IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30 N.6, p. 1137-1144.

Wooding, M. (1988). Imaging Radar Applications in Europe, Illustrated Experimental Results (1978-1987). Commission of the European Communities Joint Research Centre and European Space Agency, ESA TM-01.

Wooding, M. G., Zmuda, A. D., and Attema, E., (1993). An Overview of SAREX-92 Data Acquisition and Analysis of the Tropical Forest Environment, SAREX-92 Proceedings, ESA Headquarters, Paris, 6-8 December, ESA WPP-76, p. 41-53.

## **B. ANNEXE B: GLOSSAIRE**

**Actif (capteur) :** Capteur qui fournit sa propre illumination, contrairement aux capteurs passifs qui mesurent le rayonnement solaire réfléchi par les surfaces terrestres ou le rayonnement émis par celles-ci.

**Aire de diffusion :** Aire de la surface au sol qui contribue à la brillance d'un pixel. L'aire de rétrodiffusion correspond à la projection de la cellule de résolution\* sur le terrain.

**Amplitude (d'une onde électromagnétique) :** Variation du voltage de l'onde électromagnétique, entre un maximum et un minimum de l'oscillation. La puissance (en Watts, W) d'une onde électromagnétique est proportionnelle au carré de son amplitude en Volts (V).

**Angle de dépression :** Angle entre la direction de visée et l'horizontale par rapport au capteur. L'angle de dépression est le complément de l'angle d'incidence.

**Angle d'incidence :** Angle entre la direction de visée et la verticale au terrain. Pour les capteurs aéroportés, l'angle d'incidence est considéré égal à l'angle de visée, qui est l'angle entre la direction de visée et la verticale directement sous le capteur (ou nadir). Ces deux angles sont différents pour les radars satellitaires puisque l'effet de la courbure de la terre devient considérable.

**Angle d'incidence local :** Angle entre la direction de visée et la normale au plan tangent à la surface du terrain au voisinage d'un pixel.

**Axe longitudinal :** (voir azimut)

**Axe transversal oblique (*slant range axis*) :** Axe reliant le capteur et le point imagé sur le terrain. Dans les images brutes, les points de la surface terrestre sont



représentés sur cet axe. En anglais, le terme *slant range* est employé autant pour désigner l'axe transversal oblique que la portée oblique, cette dernière expression se rapportant à une distance. Synonymes: axe transversal incliné, axe de la visée, axe de la portée oblique.

**Axe transversal au sol** (*ground range axis*) : axe compris dans le plan de projection cartographique utilisé, reliant le point imagé et le point directement sous le capteur.

**Azimut** : Axe inclus dans le plan de l'image (en projection oblique ou en projection au sol) et parallèle à la trajectoire du capteur (direction de vol ou orbite). Synonyme : axe longitudinal.

**Bande spectrale** : Fourchette de longueurs d'ondes ou de fréquence pouvant être émises ou captées, correspondant à une portion du spectre électromagnétique. La sensibilité d'un capteur varie en fonction de la longueur d'onde, généralement selon une fonction en forme de cloche. La bande spectrale est souvent caractérisée par sa longueur d'onde ou sa fréquence centrale, correspondant à la sensibilité maximale du capteur pour cette bande. La largeur de la bande spectrale est généralement définie comme étant la largeur de la fourchette de valeurs de longueur d'onde ou de fréquence pour lesquelles la sensibilité est supérieure ou égale à la moitié de la sensibilité maximale. Elle est parfois définie comme la largeur d'une distribution rectangulaire pour laquelle la somme de la puissance reçue est la même que pour la distribution réelle. La fréquence du rayonnement magnétique est constante selon le milieu traversé alors que la longueur d'onde varie en fonction de son indice de réfraction, c'est pourquoi en télécommunications on utilise préférentiellement la fréquence pour désigner les bandes spectrales.

**Bandes spectrales utilisées en radar :** Les bandes spectrales utilisées en radar portent des codes d'origine militaire (Sabins, 1986).

Nom	Longueur d'onde ( $\lambda$ , cm)	fréquence (GHz)
Ka	0,8 - 1,1	40 - 26,5
K	1,1 - 1,7	26,5 - 18
Ku	1,7 - 2,4	18 - 12,5
X	2,4 - 3,8	12,5 - 8,0
C	3,8 - 7,5	8,0 - 4,0
S	7,5 - 15	4,0 - 2,0
L	15 - 30	2,0 - 1,0
P	30 - 100	1,0 - 0,3

**Binaire (nombre) :** Nombre formé d'une série de chiffres (ou bits) pouvant prendre les valeurs 0 ou 1. Le chiffre le plus à droite représente les unités, le chiffre à sa gauche les multiples de 2, le chiffre suivant les multiples de 4, et le  $n^{\text{ième}}$  chiffre vers la gauche représente les multiples de  $2^{(n-1)}$ . Le nombre binaire 10 est équivalent à 2 dans le système décimal, 100 équivaut à 4, et 11111111 équivaut à 255.

**Bit :** Unité de mémoire pouvant prendre la valeur 0 ou 1 pour former un nombre binaire. Le nombre de valeurs numériques pouvant être attribuées à chaque pixel d'une image est égal à 2 élevé à la puissance du nombre de bits disponibles, puisque les valeurs numériques sont exprimées en nombres binaires. Un ensemble de 8 bits forme un byte.

**Brillance  $\beta^\circ$  (radar brightness) :** Coefficient de réflectance radar par unité de surface dans l'image en projection oblique (Raney, 1997)

**Bruit** : Signal mesuré par le capteur mais qui ne correspond pas à la quantité que l'on cherche à mesurer. Le bruit le plus important en radar est le bruit thermique, correspondant au rayonnement émis par les composantes du capteur. Un autre type de bruit caractéristique des capteurs à rayonnement cohérent est le chatolement.

**Cellule de résolution** : Surface correspondant au produit des limites de résolution\* dans les axes azimutal et transversal. La taille de la cellule de résolution est constante sur le plan incliné de formation de l'image mais elle varie en fonction de l'angle d'incidence local lorsque projetée sur le terrain. C'est la cellule de résolution et non l'espacement des pixels qui détermine l'aire de diffusion.

**Chatolement** : Aspect granulaire "poivre et sel" visible dans les images radar et causé par des interférences parfois constructives, parfois destructives entre le rayonnement rétrodiffusé par différents diffuseurs situés à l'intérieur d'une même cellule de résolution, causant des fluctuations importantes de brillance d'un pixel à l'autre.

**Chi-carré ( $\chi^2$ )** : Test statistique réalisé pour comparer les fréquences mesurées pour différentes catégories.

$$\chi^2 = \sum_k \frac{(O - E)^2}{E} \quad (\text{B-1})$$

où  $O$  est la fréquence observée pour chaque catégorie

$E$  est la fréquence attendue pour chaque catégorie

$k$  est le nombre de catégories

On parle aussi de la "distribution du  $\chi^2$ ", qui est une série de distributions statistiques, pour différents degrés de liberté, des valeurs de  $\chi^2$  en fonction de la probabilité  $P$  que la différence observée entre les catégories soit un produit du

hasard. Ce test s'applique à des fréquences (par exemple à la fréquence des accidents de la route dans différentes municipalités) et le nombre de degrés de liberté est égal à un de moins que le nombre de catégories considérées, c'est à dire.  $df = k - 1$ . Si on compare deux catégories à la fois, on aura un degré de liberté.  $\chi^2 = 3.84$  pour  $P=0.05$ ,  $\chi^2 = 6.64$  pour  $P = 0.01$ , et  $\chi^2 = 10.83$  pour  $P = 0.001$ , correspondant respectivement à des probabilités de 5%, 1% et 0.1% que les différences observées entre les catégories soient dues au hasard. Si l'on ne dispose pas de fréquences mais de valeurs mesurées, la valeur de  $\chi^2$  peut être évaluée approximativement à l'aide du test statistique de Kruskal-Wallis.

**Coefficient de rétrodiffusion ( $\sigma^\circ$ )** : Quantité utilisée pour exprimer la capacité qu'a la surface de diffuser le rayonnement en direction de l'antenne. Il s'agit de la section efficace de rétrodiffusion ( $\sigma$ ) par unité de surface. Elachi (1988) définit le coefficient de rétrodiffusion comme étant le rapport de la puissance reçue par l'antenne sur ce qui aurait été mesuré si la surface était totalement réfléchissante et que la diffusion était isotrope.  $\sigma^\circ$  est une quantité adimensionnelle, mais est généralement exprimée en décibels (dB), i.e.  $10 \times$  le logarithme en base 10 du rapport des puissances. Un coefficient de rétrodiffusion supérieur à 1 (ou 0 dB) indique une certaine concentration de la diffusion en direction de l'antenne.

**Complexe (nombre)** : Nombre pouvant être exprimé selon la forme " $a+bi$ ", où  $i$  est la racine carrée de  $-1$  ; " $a$ " est la partie réelle et " $bi$ " est la partie imaginaire. La magnitude du nombre est la racine carrée de la somme des carrés de  $a$  et de  $b$ .

**Complexe (notation, onde électromagnétique)** : C'est pour des raisons pratiques qu'on utilise les nombres complexes pour décrire les ondes électromagnétiques. En effet, ils permettent d'utiliser des nombres exponentiels pour exprimer des fonctions trigonométriques, ce qui simplifie beaucoup la notation. Par exemple,  $e^{i\theta} = \cos(\theta) + i \sin(\theta)$ . Si on représente l'oscillation du champ électrique selon : (voir terme "onde électromagnétique" dans ce même lexique),

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t - kx + \phi) \quad (\text{B-2})$$

alors

$$E_0 \cdot e^{i(\omega t - kx + \phi)} = E(t) + i \sin(\omega t - kx + \phi) \quad (\text{B-3})$$

Les parties réelle et imaginaire de ce nombre complexe peuvent être représentées comme étant les projections sur l'axe des x et sur l'axe des y, respectivement, d'un vecteur partant de l'origine, dont la grandeur est  $E_0$  et dont l'angle par rapport à l'axe des x est  $(\omega t - kx + \phi)$ . La partie réelle est  $E(t)$  et la partie imaginaire est  $\sin(\omega t - kx + \phi)$ . L'oscillation de  $E(t)$  correspond à la rotation de ce vecteur autour de l'origine. La partie imaginaire du nombre complexe se rapporte à la phase du signal.

**Compte Numérique (CN) :** Valeur numérique pour un pixel de l'image, pour une bande spectrale ou une polarisation donnée. Au moyen de l'étalonnage du capteur, le compte numérique peut être relié à l'intensité et à la luminance reçues par ce capteur. Dans le domaine optique, le CN peut être relié à la réflectance de la surface si on connaît les conditions d'illumination, les conditions atmosphériques et la pente. En radar, on peut relier le CN d'un capteur étalonné au coefficient de rétrodiffusion ( $\sigma^0$ ) de la surface à condition de connaître les paramètres de l'image et l'altitude du capteur par rapport à au terrain, ainsi que la pente et l'orientation du terrain.

**Correction topographique :** Terme utilisé dans cette thèse pour parler de la correction des effets radiométriques du relief. La méthode de correction est décrite à la section 3.3.

**Corrélation (coefficient de) :** Coefficient calculé pour décrire le degré de correspondance entre deux ensembles de valeurs correspondantes. Dans cette thèse, le coefficient de corrélation  $r$  a été calculé selon :

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum ((a - \bar{a}) \cdot (b - \bar{b}))}{\sigma_a \cdot \sigma_b} = \frac{\frac{\sum(ab)}{n} - \bar{a}\bar{b}}{\sigma_a \cdot \sigma_b} \quad (\text{B-4})$$

où  $n$  est le nombre de valeurs considérées, les  $a$  sont les valeurs individuelles de la série  $a$ , les  $b$  sont les valeurs individuelles de la série  $b$ ,  $\bar{a}$  est la moyenne des valeurs de la série  $a$ ,  $\bar{b}$  est la moyenne des valeurs de la série  $b$ ,  $\sigma_a$  est l'écart-type des valeurs de la série  $a$ , et  $\sigma_b$  est l'écart-type des valeurs de la série  $b$ .

Le numérateur de cette équation correspond à la covariance entre les séries  $a$  et  $b$ .

**Délai radar** : Temps s'écoulant entre l'émission d'une impulsion de rayonnement et sa réception. Ce délai correspond à une trajectoire égale à deux fois la distance entre le capteur et la cible, car le rayonnement doit parcourir l'aller-retour.

**Diagramme de rayonnement de l'antenne** (*antenna pattern*) : Distribution de la brillance d'une image qui est due à une illumination et une réception irrégulières de la part de l'antenne. Le gain de l'antenne, autant pour l'émission que pour la réception, a une distribution lobée, avec un grand lobe principal et de petits lobes secondaires. La forme du lobe principal implique que le gain est plus fort vers le centre de la visée que vers les bords. Les images non corrigées ont donc généralement une brillance plus élevée au centre de l'axe de la portée, et plus sombre vers les bords (en portées proximale et distale).

**Diélectrique**: Milieu qui n'est ni parfaitement conducteur et qui n'est pas non plus complètement transparent au rayonnement électromagnétique (Raney, 1995).

**Diélectrique (constante)** : Nombre complexe qui décrit les propriétés électriques d'un milieu. La constante diélectrique relative est définie comme le rapport entre la constante diélectrique absolue du milieu et la constante diélectrique du vide. Elle est généralement exprimée sous la forme  $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ , où on appelle  $\epsilon'$  "la partie réelle" et  $\epsilon''$  "la partie imaginaire" de la constante diélectrique. La partie réelle commande la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans le

milieu alors que la partie imaginaire commande la perte d'énergie, c'est à dire l'absorption de l'onde par le milieu (Bonn et Rochon, 1993).

**Diffusomètre:** Radiomètre radar, instrument utilisé pour mesurer la puissance de la radiation électromagnétique provenant d'une surface pour une bande spectrale donnée. C'est un instrument actif utilisé pour mesurer le rayonnement rétrodiffusé, et donc calculer la constante de rétrodiffusion d'une surface. Il s'agit d'un radar qui ne produit pas d'image. Par définition, les diffusomètres sont étalonnés, et sont utilisés pour réaliser des mesures précises de  $\sigma^0$ , contrairement aux radars imageurs qui ne sont pas toujours étalonnés.

**Divergence :** La divergence est une mesure utilisée pour quantifier la séparabilité entre les signatures spectrales correspondant à deux classes ou catégories différentes. Il s'agit d'une mesure de la distance entre les moyennes calculées pour chaque classe, pondérée par les variances. Cette distance est calculée dans un espace de dimension égale au nombre de bandes spectrales considérées dans les signatures. Pour calculer la divergence, il faut calculer le vecteur de la moyenne et la matrice de covariance pour chacune des classes. La divergence entre les classes c et d,  $Diver_{cd}$  est calculée selon :

$$Diver_{cd} = \frac{1}{2} tr[(V_c - V_d)(V_d^{-1} - V_c^{-1})] + \frac{1}{2} tr[(V_c^{-1} + V_d^{-1})(M_c - M_d)(M_c - M_d)^T]$$

(B-5)

où  $tr [ ]$  est la trace d'une matrice (la somme de ses éléments diagonaux),  $V_c$  et  $V_d$  sont les matrices de covariance des classes c et d, respectivement, et  $M_c$  et  $M_d$  sont les vecteurs des moyennes pour ces deux classes (Jensen (1996), p.220).

Pour porter la mesure de divergence sur une échelle entre 0 et 2, on peut calculer la divergence transformée,  $TDiver_{cd}$ , selon :

$$TDiver_{cd} = 2 \left[ 1 - \exp\left(\frac{-Diver_{cd}}{8}\right) \right]$$

(B-6)

Une valeur de  $TDiver_{cd}$  de 2 indique une discrimination excellente entre les catégories c et d. Les valeurs entre 1,9 et 2 indiquent une bonne discrimination, mais les valeurs inférieures à 1,7 indiquent une discrimination intermédiaire, donc un certain chevauchement entre les signatures spectrales des deux catégories. Des valeurs inférieures à 1 indiquent un grand chevauchement entre ces signatures spectrales.

**Domaine optique** : Portion du spectre électromagnétique correspondant au rayonnement émis par le soleil, qui, en étant réfléchi sur les surfaces terrestres, peut être capté pour permettre la formation d'images. Le domaine optique comprend le domaine du visible (par l'œil humain), le proche et le moyen infrarouge.

**Domaine des hyperfréquences** : Portion du spectre électromagnétique correspondant à des longueurs d'onde de 1 cm à 1 m, donc de très basses fréquences. Les surfaces terrestres émettent aussi du rayonnement hyperfréquence de très faible intensité, pouvant être capté au moyen de radiomètres fonctionnant dans cette partie du spectre électromagnétique (systèmes passifs).

**Écho radar** : portion du signal émis, pour une impulsion donnée, qui est rétrodiffusée et mesurée par le capteur.

**Éclairement (*illuminance*)** : Flux incident à une surface, par unité de surface  
(Unités =  $W.m^{-2}$ )

**Filtre de la médiane** : Opération réalisée sur l'image où chaque pixel est remplacé par la médiane du groupe de pixels composé de lui-même et de ses plus proches voisins. La taille du filtre détermine le nombre de pixels considérés dans le calcul de la médiane pour chaque pixel de l'image filtrée. Ce filtre est très utilisé en radar pour réduire le chatoiement de l'image. La valeur du pixel filtré est moins influencée par la présence d'un pixel de valeur extrême dans son voisinage qu'il



ne l'est avec l'opération de la moyenne. Le filtre de la médiane préserve donc mieux les bords dans l'image que ne le fait le filtre de la moyenne.

**Flux:** Quantité d'énergie qui traverse ou qui frappe une surface par unité de temps. (Unités =  $W = Js^{-1}$ ).

**Fréquence (d'une onde) :** Nombre de cycles de l'onde par unité de temps. La fréquence des ondes électromagnétiques est exprimée en Hertz, (Hz), c'est à dire en nombres de cycles par seconde.

**Gain :** Concentration de la sensibilité (pour une antenne réceptrice) ou de la puissance transmise (pour une antenne émettrice) dans une direction particulière.

**Géocodage:** Référence de l'image ou de données spatiales à un système spécifique de projection cartographique, pour permettre la superposition de ces données avec des cartes existantes.

**Impulsion radar :** Émission de rayonnement de courte durée et répétée.

**Intensité:** Flux émis par unité d'angle solide (exprimée en  $W \cdot sr^{-1}$ ).

**Kruskall-Wallis (test de) :** Test statistique non paramétrique utilisé pour comparer différentes catégories, et pour déterminer si la différence observée entre ces catégories est due au hasard. C'est un test qui se prête très bien à des ensembles de données où on a peu de catégories et peu d'observations pour chaque catégorie. Pour réaliser ce test, on regroupe les observations de toutes les catégories comparées, on les met en ordre numérique croissant ou décroissant, on établit le rang pour chaque observation et on calcule la somme des rangs obtenus pour chaque catégorie. À partir de ces rangs, on calcule la statistique H :

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \times \sum_k \frac{R^2}{n} - 3(N+1) \quad (B-7)$$

- où  $N$  est le nombre total d'observations  
 $R$  est la somme des rangs dans chaque catégorie  
 $k$  est le nombre de catégories  
 $n$  est le nombre d'observations dans chaque catégorie

Dans les manuels de statistique, il existe des tables des valeurs de  $H$  en fonction de la probabilité  $P$  que la différence observée soit due au hasard. Cependant lorsque  $n > 5$  et  $k > 3$ ,  $H$  est distribué comme le Chi-carré  $\chi^2$ , avec le nombre de degrés de liberté  $df = k - 1$ . (voir Chi-carré dans ce même lexique).

**LAI (Leaf Area Index)** : Pour un couvert végétal, rapport entre la surface totale des feuilles et la surface au sol. Indice foliaire, indicateur de la densité de la composante foliaire de la végétation.

**Lambertienne (surface)** : Surface obéissant à la loi de Lambert, pour laquelle la luminance mesurée est indépendante de l'angle de visée mais pour laquelle l'intensité réfléchiée par un élément infinitésimal varie en fonction du cosinus de l'angle de visée.

**Longueur d'onde** : Distance entre deux répétitions dans une onde. De façon générale, on visualise la longueur d'onde comme la distance entre deux creux ou deux maximums d'une onde.

**Luminance**: Intensité lumineuse par unité de surface projetée dans la direction de visée. La quantité mesurée par un capteur est proportionnelle à la luminance. (Unités :  $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$ ).

**Médiane** : La valeur médiane d'un groupe de valeurs est la valeur pour laquelle la moitié des valeurs du groupe se trouve en dessous de cette valeur, et l'autre moitié au-dessus (voir filtre de la médiane).

**Nadir** : Axe qui origine de l'avion ou du satellite et qui se dirige directement en dessous de celui-ci, verticalement.

**Onde électromagnétique (définition) :** Propagation d'énergie qui se caractérise par l'oscillation d'un champ électrique et l'oscillation d'un champ magnétique. Les vecteurs des champs électrique et magnétique sont orthogonaux entre eux et aussi orthogonaux à la direction de propagation. Une onde électromagnétique se caractérise par son amplitude et sa fréquence.

**Onde électromagnétique (expression de) :** La grandeur du vecteur champ électrique mesuré à un endroit précis oscille en fonction du temps. On peut décrire cette oscillation à l'aide d'une fonction de cosinus, et c'est à cause de cette analogie qu'on exprime souvent la fréquence, la période et la phase d'une onde avec des unités angulaires. Le cosinus d'un angle  $\alpha$  est la projection sur un axe d'un vecteur dont la grandeur est égale à 1 et dont l'angle par rapport à cet axe est  $\alpha$ . L'oscillation du cosinus en fonction de l'angle décrit un cycle complet lorsque le vecteur aura parcouru un angle de  $2\pi$  radians. On normalise donc toutes les composantes de l'onde électromagnétique de façon à obtenir une période (normalement en unités de temps) égale à  $2\pi$ . La fréquence angulaire ( $\omega$ ) est égale à la fréquence  $f$  (le nombre de périodes que l'onde décrit par unité de temps, par seconde si l'unité de mesure est le Hertz (Hz)), multipliée par  $2\pi$ . Elle s'exprime en radians par unité de temps, et lorsque multiplié par le temps, produit un angle. Le déphasage de l'onde, qui est en réalité un décalage temporel, est aussi multiplié par  $2\pi$  et exprimée en radians ( $\phi$ ). La représentation la plus courante de l'onde électromagnétique est l'expression de la grandeur du vecteur du champ électrique  $E$ , en fonction du temps  $t$  :

$$E_{(t)} = E_0 \times \cos(\omega t - kx + \phi) \quad (\text{B-8})$$

où  $E_0$  est l'amplitude de l'onde

le terme  $(\omega t - kx + \phi)$  est la phase angulaire.

$x$  est la distance dans la direction de propagation de l'onde et

$k$  est le nombre d'onde ( $2\pi/\lambda$ ), où  $\lambda$  est la longueur d'onde.

**Orthorectification:** Correction des distorsions géométriques dues à la topographie, pour permettre une projection plane ou une projection cartographique.

**Phase (du signal) :** Si on représente le signal (ou n'importe quelle onde électromagnétique) par une fonction en cosinus (voir définition de "complexe, notation pour les ondes électromagnétiques"), la phase est le décalage entre la position d'un maximum et celui d'une onde de référence. On exprime généralement la phase en unités d'angles (voir la définition de l'onde électromagnétique). La phase peut être mesurée par les systèmes radar et est utilisée dans la synthèse des images par les systèmes ROS. Elle est aussi utilisée en polarimétrie. Elle peut apporter de l'information utile sur les surfaces étudiées.

**Pixel:** Mot formé à partir de l'expression *picture element*. Il s'agit de la plus petite unité d'une image, soit dans un écran ou dans une image numérique. Si on fait l'analogie entre une image numérique et une matrice, les pixels sont les éléments de l'image.

**Pixels (espacement entre) :** En télédétection radar, on se réfère plutôt à l'espacement entre pixels qu'à la taille de ceux-ci. L'espacement entre pixels se réfère à l'espacement, dans l'axe de la portée oblique, entre les échantillons du signal. Il est donc inversement proportionnel à la fréquence d'échantillonnage. Selon le critère d'échantillonnage de Nyquist, la fréquence spatiale d'échantillonnage devrait être le double de la résolution spatiale, pour éviter le repliement entre échantillons, et pour permettre de reconstruire le signal à partir des échantillons. Le critère d'échantillonnage de Nyquist peut être conceptualisé de manière simple : si on veut pouvoir distinguer deux objets ponctuels qui sont séparés par une distance égale à la limite de résolution, il faut au moins un échantillon d'image pour chacun de ces objets, et un échantillon entre les deux pour permettre d'apprécier l'espace entre eux. En pratique, l'espacement entre échantillons du signal est toujours plus petit que la résolution spatiale, bien qu'il ne soit pas toujours aussi petit que la moitié de celle-ci. En télédétection optique,

l'espacement entre pixels est généralement égal à l'empreinte au sol du champ angulaire du capteur (appelée en anglais Instantaneous Field of View ou IFOV).

**Polarisation** : Par le terme "polarisation", on réfère à la direction de l'oscillation du vecteur du champ électrique. La polarisation peut être linéaire, ce qui signifie que le vecteur du champ électrique oscille toujours dans la même direction. Elle peut être circulaire, ce qui signifie que la direction d'oscillation varie selon un cercle autour de l'axe de propagation de l'onde. Parmi les polarisations linéaires, on retrouve la polarisation verticale pour laquelle la direction d'oscillation se trouve incluse dans le plan transversal ou plan d'incidence (le plan contenant l'axe de la visée, ou axe transversal oblique, et le nadir), et la polarisation horizontale pour laquelle la direction d'oscillation est orthogonale au plan transversal. Comme les capteurs radar sont actifs, on peut contrôler à la fois la polarisation d'émission et de réception. On exprime la polarisation radar par deux lettres, la première se référant à la polarisation d'émission, la deuxième à la polarisation de réception. On parle de polarisation égale lorsque la polarisation d'émission est égale à celle de réception (HH et VV) et de polarisation croisée lorsque les deux polarisations sont différentes (HV et VH)

**Polarimétrie** : Branche de la télédétection radar où on mesure la phase et l'amplitude du signal reçu, et ce simultanément pour plusieurs combinaisons de polarisation. Les données sont analysées sous leur forme complexe.

**Portée au sol** (*ground range*) : Distance horizontale entre un point au sol correspondant à un élément (ou pixel) de l'image et le nadir.

**Portée distale** (*far range*) : Distance la plus longue entre le capteur et la cible dans une image. On se rapporte aussi par ce terme à l'ensemble des colonnes de l'image correspondant aux angles d'incidence les plus élevés .

**Portée oblique** (*slant range*) : Distance entre le capteur et la cible dans l'axe de la visée, déterminée à partir du délai radar. On dit que les images radar brutes sont "en portée oblique" puisque le numéro de la colonne à laquelle est placé un point

sur l'image est proportionnel à cette distance. L'axe transversal de l'image est l'axe de visée et non l'axe de la portée au sol, dans les images brutes. Ceci entraîne une distorsion de l'échelle qui varie en fonction de l'angle d'incidence, l'échelle étant très comprimée en portée proximale et se rapprochant de plus en plus, avec une augmentation de l'angle d'incidence, à l'échelle qu'on aurait avec une photographie aérienne. On doit réaliser une projection de l'axe de la portée oblique vers l'axe de la portée au sol pour permettre le géocodage de l'image.

**Portée proximale** (*near range*) : Portion de l'image correspondant aux angles d'incidence les plus faibles.

**Puissance** : Énergie par unité de temps, exprimée en Watts ( $1W=1J.s^{-1}$ ). La puissance reçue est calculée en fonction du voltage mesuré, pour la plupart des capteurs radar.

**Raccourcissement des pentes** : Distorsion géométrique rencontrée dans les images radar due au fait que les surfaces sur le terrain sont placées sur l'image en fonction de leur portée oblique. Si la pente du terrain est orientée vers le capteur, la distance entre deux points sur cette pente sera réduite sur l'image, puisque la portée oblique du point le plus haut sera réduite en raison de son élévation par rapport à l'autre. Le raccourcissement des pentes subsiste même après une projection de la portée oblique vers la portée au sol, et pour corriger ces distorsions, on doit réaliser une orthorectification\* à l'aide d'un modèle numérique d'altitudes.

**Radar**: Abréviation de *Radio Detection And Ranging* : Détection et mesure de distance par radio. Les systèmes radar incluent, en plus des systèmes imageurs (à ouverture réelle ou de synthèse), les diffusomètres, les altimètres, les radars policiers pour mesurer la vitesse, les radars de détection d'objets, les radars nautiques, etc. Ce que les différents systèmes ont en commun est qu'ils sont actifs et qu'ils utilisent un rayonnement dans le domaine des hyperfréquences. Ce qui les distingue est le type de mesures réalisées (puissance du signal, délai,

phase, décalage Doppler ou une combinaison de ces derniers), et la façon de traiter le signal.

**Radars à ouverture réelle (ROR) :** Système radar imageur où la résolution azimutale dépend de la taille de l'antenne et de son altitude (plus l'antenne est grande et l'altitude est faible, plus on aura une résolution fine). Dans un système ROR, on mesure la puissance du signal reçu et le délai radar.

**Radars à ouverture de synthèse (ROS) :** Système radar imageur sensible à la structure de la phase du signal, et où la résolution azimutale est artificiellement affinée par un traitement optique ou numérique du signal, pour être indépendante de l'altitude du capteur. On utilise une antenne relativement petite qui produit un faisceau large ; on intègre les signaux reçus sur une longueur donnée de la trajectoire de vol (selon le type de traitement, en utilisant le décalage Doppler ou la phase du signal et l'historique du délai radar) pour simuler une antenne de taille égale à cette longueur. Un point sur le terrain sera inclus dans le large faisceau pour plusieurs impulsions, et pendant que l'avion ou le satellite passe au-dessus de lui, produira un délai croissant puis décroissant. A partir de l'ensemble des échos reçus, les impulsions rétrodiffusées par une même localisation dans le plan de l'image sont identifiées par le processeur et sont utilisées pour déterminer l'intensité à attribuer à cette localisation.

**Repli :** Cas extrême de raccourcissement des pentes, se produisant lorsque l'angle d'incidence local est nul ou négatif, i.e. quand la valeur de la pente vers le capteur est égale ou supérieure à l'angle d'incidence. Les problèmes de repli sont donc plus fréquents pour les systèmes à visée plongeante que pour les visées plus obliques. Le repli se traduit par des arcs très brillants près des sommets des montagnes. Il est impossible de le corriger puisque la brillance d'un pixel correspond à l'addition du signal rétrodiffusé par deux ou plusieurs localisations différentes.

**Résolution :** Distance minimale entre deux objets que le capteur peut séparer. Comme dans l'axe transversal oblique la position des objets est déterminée par le

décali radar, la résolution dans cet axe sera proportionnelle à la durée de l'impulsion pour un radar à impulsion simple. Pour une même configuration d'impulsions, la résolution dans l'axe transversal pour l'image en projection terrestre sera d'autant plus fine que l'angle d'incidence est élevé. Pour un radar à ouverture réelle, dans l'axe de l'azimut, la résolution est déterminée par la résolution angulaire d'une ouverture de diamètre  $D$ . Cette résolution angulaire est proportionnelle à la longueur d'onde et inversement proportionnelle au diamètre de l'antenne. L'empreinte au sol de cette résolution est égale à la résolution angulaire (en radians) multipliée par la distance entre le capteur et le terrain. Cependant, pour les ROS, la résolution azimutale est indépendante de l'altitude du capteur. Pour un radar pour lequel la mise au point est complète, la résolution azimutale  $\Delta S_a$  se calcule selon

$$\Delta S_a = \frac{1}{BW_a} \times VF_a \quad (\text{B-9})$$

où  $BW_a$  est la largeur de bande spectrale dans l'axe de l'azimut, mesurée dans le domaine Doppler, et  $VF_a$  est la vitesse du faisceau dans ce même axe (qui est égale à la vitesse de l'avion pour les systèmes aéroportés).  $\Delta S_a$  est à peu près égal à la moitié de la longueur de l'antenne. Cette relation provient du fait que  $BW_a$  est inversement proportionnel à la largeur du faisceau d'illumination, et que cette largeur est inversement proportionnelle à la longueur de l'antenne en azimut.

La plupart des ROS utilisent des impulsions dont la fréquence est modulée de telle sorte que l'on évalue le décali radar en mesurant la différence de fréquence entre les impulsions émises et reçues. Aussi, la fréquence des impulsions est codée de telle sorte que l'on puisse recréer une impulsion courte et de puissance de pointe élevée à partir d'une impulsion et de puissance moindre. La résolution transversale,  $\Delta S_r$ , se calcule selon :

$$\Delta S_r = \frac{1}{BW_r} \times \frac{c}{2} \quad (\text{B-10})$$



où  $BW_t$  est la largeur de bande spectrale dans l'axe transversal et  $c$  est la vitesse de la lumière.

L'espace défini par les limites de résolution  $\Delta S_r$  et  $\Delta S_a$  est appelé "cellule de résolution", et sa projection sur le terrain définit l'aire de dispersion, l'aire contribuant à la brillance de chaque pixel. La brillance de chaque pixel dépend de la taille de la cellule de résolution et non de l'espacement des pixels (ou espacement de l'échantillonnage). Étant donné que pour les images radar on réalise un suréchantillonnage de l'image (l'espacement du pixel est plus petit que la taille de la cellule de résolution, il se produit un certain chevauchement entre les cellules de résolution des pixels voisins, et un réflecteur ponctuel intense occupera plus d'un pixel dans l'image. La tache produite dans l'image par un réflecteur ponctuel sur le terrain correspond à la taille de la cellule de résolution dans cette même image. On appelle aussi cette tache la "réponse à une impulsion".

**Rétrodiffusion** : Portion du rayonnement total diffusé par une surface qui est renvoyée vers la source d'émission.

**RMS** : Le terme "hauteur RMS" est utilisé pour quantifier la rugosité d'une surface. Il s'agit de l'erreur quadratique moyenne de la hauteur ou écart-type de la hauteur d'une surface. Elle est calculée selon :

$$h_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum (h - \bar{h})^2}{N - 1}} \quad (\text{B-11})$$

où  $\bar{h}$  est la hauteur moyenne de la surface,  $h$  est la hauteur du sol pour chaque mesure, et  $N$  est le nombre de mesures de  $h$ . En général, les mesures de  $h$  sont réalisées sur un profil de la surface.

**Section efficace de rétrodiffusion ( $\sigma$ )** : Aire d'une surface totalement réfléchissante et qui réfléchit le rayonnement de façon totalement isotrope, qui

aurait provoqué la brillance mesurée au capteur. Étant donné que les surfaces naturelles ne sont pas totalement réfléchissantes (elles occasionnent des pertes), la section efficace de rétrodiffusion est généralement inférieure à l'aire au sol qui a produit la brillance mesurée, à moins qu'il n'y ait des réflecteurs en coin.

**Signatures spectrales** : Caractérisation des valeurs correspondant à un échantillon d'image représentant une catégorie particulière de couverture ou d'utilisation des sols. Ces valeurs peuvent être définies selon plusieurs dimensions ou canaux, chacun d'eux correspondant, par exemple, aux différentes bandes d'une image multispectrale, aux polarisations d'une image multipolarisée, à des images provenant de différents capteurs ou à des indices calculés à partir d'autres images. Les signatures s'expriment généralement par des statistiques telles que la moyenne et l'écart-type des valeurs pour chaque canal, et aussi parfois par des matrices de corrélation et de covariance entre les canaux.

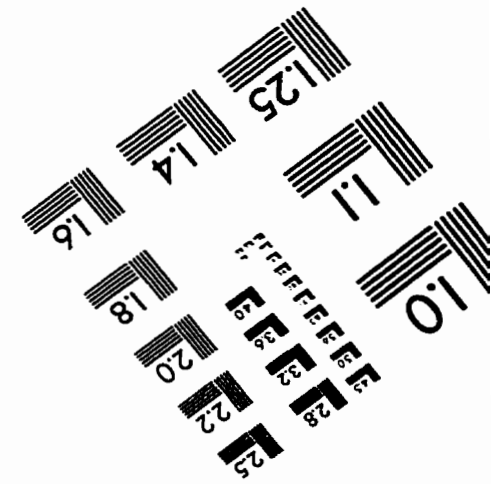
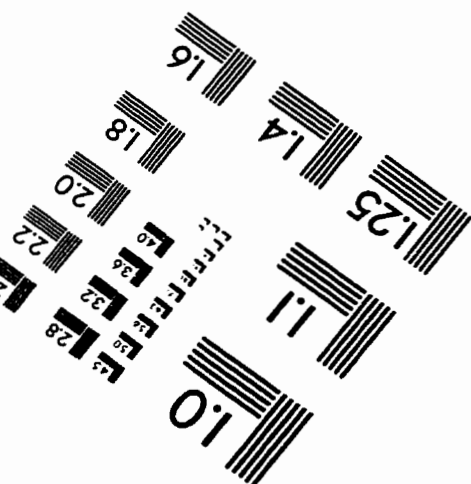
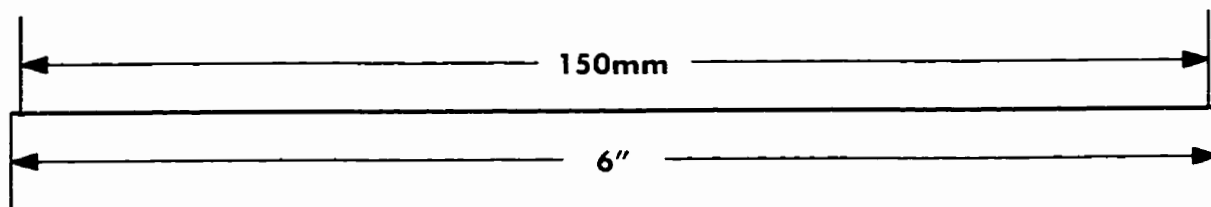
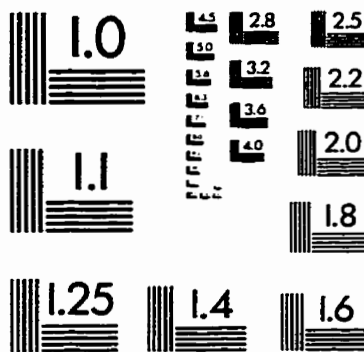
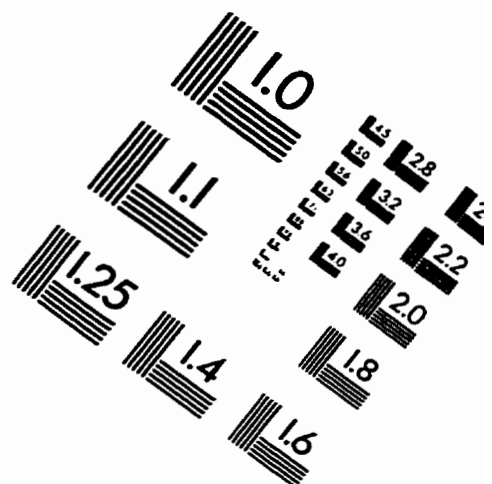
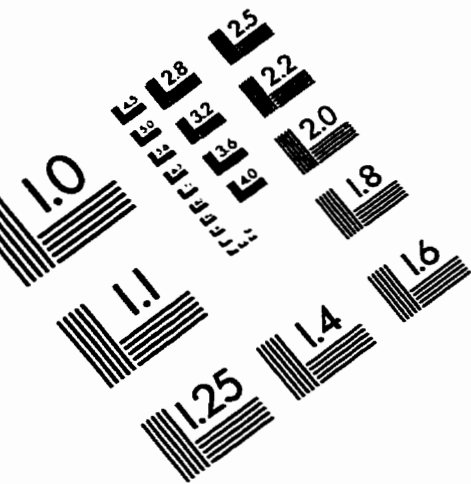
**Transpondeur** : Appareils utilisés pour l'étalonnage des images radar. Ils sont placés sur le terrain et lorsqu'ils détectent une impulsion radar, ils émettent un signal d'intensité connue vers le capteur.

**Visée (direction de)** : Orientation de la visée, dans le plan cartographique, en degrés, par rapport au nord géographique. La visée est généralement perpendiculaire à la direction de vol. Certains capteurs aéroportés peuvent orienter l'antenne soit à droite ou à gauche par rapport à la direction de vol.

**Vues (nombre de)** : Le chatoiement dans une image radar peut être réduit en intégrant plusieurs échantillons dans le calcul du compte numérique de chaque pixel. Ces échantillons peuvent être intégrés en additionnant ou en calculant la moyenne d'un certain nombre de mesures séquentielles. L'intégration des vues est généralement réalisée par le processeur dans le domaine des fréquences, avant la détection du signal. Il est aussi possible de le réaliser après la détection. Le nombre de ces échantillons intégrés est le nombre de vues. Le nombre effectif de vues est le nombre d'échantillons réellement indépendants impliqués dans chaque pixel ; il est généralement un peu plus faible que le nombre de vues puisqu'il y a

une certaine corrélation entre les échantillons. Pour des images en unités de rapport de puissances (ou de  $\sigma^o_{(m2/m2)}$ ), on peut évaluer ce nombre effectif de vues en calculant, pour une surface homogène, la racine carrée du rapport entre la moyenne et l'écart-type.

# IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc  
1653 East Main Street  
Rochester, NY 14609 USA  
Phone: 716/482-0300  
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved