# VERS UNE MÉTHODE D'ANALYSE DES DONNÉES POLARIMÉTRIQUES POUR LA CARACTÉRISATION DU MILIEU BÂTI : APPLICATION AUX IMAGES RADARSAT-2 DE LA RÉGION D'ALGER, ALGÉRIE

**Boularbah SOUISSI*, Mounira OUARZEDDINE, Aichouche BELHADJ-AISSA, Lynda BOUCHEMAKH**

**Faculté d'électronique et d'informatique, USTHB, BP N°32 El Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie*
*b.souissi@yahoo.com; m.ouarzeddine@yahoo.fr; h.belhadj@lycos.com; bouchemakh@gmail.com*

Soumis le 23 juin 2010 ; accepté le 10 avril 2011 - © *Revue Télédétection*, 2011, vol. 10, n° 2-3, p. 91-111

***Résumé***

*Les propriétés polarimétriques des ondes radar SAR rétrodiffusées par les zones urbaines sont différentes de celles des milieux naturels. En effet, la rétrodiffusion de ces derniers est souvent de type réflexion symétrique, caractérisée par une matrice de covariance quasi diagonale ($<S_{hh}S^*_{hv}> = <S_{hv}S^*_{vv}> = 0$). Quant à la réflexion des cibles urbaines, la condition de la symétrie n'est pas vérifiée et les caractéristiques de la réflexion non symétrique sont, souvent prises en considération dans l'analyse des données polarimétriques. Dans cet article, nous proposons une approche d'identification et de discrimination des cibles urbaines basée sur la corrélation entre les canaux SAR polarimétriques dans les bases linéaire et circulaire. Un seuil local de partitionnement des milieux urbains et non urbains a été appliqué aux images de corrélation. Pour l'amélioration de cette partition, nous avons proposé un facteur de séparabilité global dérivé de la décomposition de Yamaguchi que nous avons appliqué sur l'image de corrélation issue de la base circulaire. Les résultats obtenus dans cette première étape révèlent une différence importante dans les caractéristiques de rétrodiffusion entre la zone urbaine et la zone naturelle. Dans la deuxième étape, nous nous sommes focalisés sur l'analyse des structures urbaines dans lesquelles les types de diffuseurs sont discriminés selon leur hétérogénéité contextuelle et leur orientation par rapport à la ligne de visée du radar. Nous avons, à cet effet, exploité l'espace Entropie/Apha du milieu urbain pour localiser les diffuseurs surfaciques et diédriques. Les algorithmes développés ont été testés sur des images en quadri polarisation acquise par le satellite RADARSAT-2 sur la région d'Alger, Algérie.*

***Mots clefs —*** *Polarimétrie SAR, zones urbaines, décompositions polarimétriques, symétrie, mécanismes de diffusion, orientation de cibles.*

## TOWARDS A POLARIMETRIC DATA ANALYSIS METHOD FOR THE BUILT-UP ENVIRONMENT CHARACTERIZATION: APPLICATION TO RADARSAT-2 IMAGES OF ALGIERS, ALGERIA

***Abstract***

*The backscattering of a polarimetric Synthetic Aperture Radar (PolSAR) from urban area structures is different from the backscattering responses from a natural medium. However, the backscattering from natural areas is often reflection symmetric where covariance matrix is characterized by near zero values of the off-diagonal elements ($<S_{hh}S^*_{h}> = <S_{hv}S^*_{vv}> = 0$). For urban areas, however, the reflection symmetry does not hold, and the asymetric reflection has to be taken into account in the analysis of the polarimetric data. In this paper, we propose an identification and discrimination approach for urban targets based on SAR polarimetric channels correlation in linear and circular bases. A local threshold for partitioning the urban and the natural areas has been applied to images resulted from the correlation. To enhance this partition, we proposed a global seperability factor derived from the Yamaguchi decomposition and applied it to correlation image in the circular basis. In this first step, the results showed a significant difference in the backscattering characteristics between the urban and natural areas. In the second step, we focused on the analysis of urban structures where scatterers are discriminated according to their contextual heterogeneity and their orientation with respect to the radar line of sight. For this purpose, we exploited the*

*Entropy/Apha space for the urban environment, to identify the surface and dihedral scatterers. The developped algorithms have been tested on RADARSAT-2 satellite images acquired over the Algiers city, Algeria.*

*Key words — Polarimetric SAR, urban zones, polarimetric decomposition, backscattering mechanisms, symmetry, target orientation.*

## 1. INTRODUCTION

La télédétection urbaine devient de plus en plus utile pour le suivi régulier de l'évolution rapide des grandes agglomérations des pays au monde. La zone urbaine se révèle en effet comme un objet d'étude transversal ouvert à plusieurs disciplines, entre autres la géographie et l'économie urbaines, l'urbanisme, la politique urbaine, etc. La délimitation de cette zone tient à l'heure actuelle une importance évidente dans un contexte de mise à jour des informations sur de l'espace urbain.

La ville d'Alger est parmi les villes qui connaissent actuellement une vague d'urbanisation très intense. La mise en œuvre de politiques urbaines pour le suivi régulier de ce phénomène d'urbanisation nécessite l'acquisition d'informations fiables et actualisées. Les images de télédétection sont des sources importantes qui doivent être traitées et exploitées pour l'extraction de l'information demandée. Le radar à ouverture de synthèse SAR (Synthetic Aperture Radar) peut produire des images régulièrement et par tout temps. Ces capteurs SAR sont soit aériens soit satellitaires, chacun ayant ses propres caractéristiques et avantages. Les capteurs embarqués sur des porteurs aériens fournissent de meilleures résolutions tandis que les porteurs spatiaux sont d'une part plus stables et, d'autre part, permettent de couvrir des zones plus étendues. Les premiers systèmes SAR satellitaires utilisés en télédétection étaient à fréquence et polarisation unique, permettant d'acquérir des images à basse résolution spatiale (quelques dizaines de mètres). L'information fournie par ces radars imageurs est exploitée dans le domaine des sciences de la terre, soit directement, soit conjointement avec d'autres données (optiques, infrarouges, cartographiques, etc.). Comme les ondes radars avec différentes polarisations et fréquences interagissent différemment avec les structures au sol, la télédétection radar a connu un essor dans les dernières décennies grâce à la conception et à la réalisation des systèmes SAR polarimétriques aéroportés tels que AIRSAR (NASA/JPL, USA), ESAR (DLR, centre aérospatial allemand), EMISAR (DCRS, Danemark ), PHARUS (TNO-FEL, Pays bas ), AuSAR-INGARA (D.S.T.O, Australie ), PISAR (NASDA/CRL, Japon), RAMSES (ONERA, France), SAR580 (Environnement Canada, Canada), et STORM (UVSQ/CETP, France) ou spatiaux tels que RADARSAT2, ALOS PALSAR, et TERRASAR-X qui fonctionnent en mode de polarimétrie partielle ou complète et peuvent acquérir des images multipolarisation et multifréquences à haute résolution spatiale. RADARSAT2 est le radar satellitaire polarimétrique le plus récent qui a été lancé avec succès en décembre 2007 (Delisle, 2009).

La polarimétrie utilise la nature vectorielle de l'onde (Papathanassiou et Cloude, 2002). Elle a pour objectif la caractérisation des cibles en enregistrant leurs réponses dans différentes polarisations d'émission et de réception de l'onde radar.

Afin de permettre la séparation des mécanismes de rétrodiffusion au sein d'une même cellule de résolution, différents modèles de décomposition de cibles ont été proposés (Touzi *et al*. 2004; Lee et Pottier, 2009). Leur principe est la projection des données polarimétriques sur des bases canoniques associées à chaque type de mécanismes de rétrodiffusion issus de l'interaction de l'onde radar avec les cibles excitées. Ces méthodes diffèrent selon la nature, cohérente ou non de ces dernières. Pour les cibles cohérentes mentionnons (Cloude et Pottier, 1997) la décomposition de Pauli, la décomposition SDH (Krogager, 1999) et celle de Cameron (Cameron *et al*., 1996). Pour leur part, les décompositions de Cloude-Pottier (Entropie/Alpha), de Van Zyl (Van Zyl, 1989, Cloude et Pottier, 1996), de Freeman (Freeman et Durden, 1998) et de Yamaguchi (Yajima *et al*., 2008) décrivent les propriétés non- cohérentes des cibles dites distribuées (Cloude et Pottier, 1997; Touzi, 1997). Leurs applications essentielles dans les domaines tels que l'agriculture, la foresterie, l'hydrologie et l'urbanisme sont l'identification, la discrimination et la classification selon les propriétés de rétrodiffusion des cibles contenues dans les données polarimétriques.

Quoique les méthodes d'extraction de l'information polarimétrique des zones urbaines sont nombreuses, l'analyse des scènes urbaines à partir des données SAR à une résolution moyenne s'est révélée être une tâche très difficile pour principalement deux causes: la diffusion est généralement complexe avec des contributions très différentes dans une même cellule de résolution, et les phénomènes de repliement et d'ombrage dus à la géométrie des structures urbaines qui se manifestent par une imprécision ou un manque d'information ou même par un effet de speckle dans les images radar. Notre contribution dans cet article porte sur la séparabilité des différents diffuseurs du milieu urbain (du1, du2,…) par rapport aux diffuseurs d'un milieu naturel (dn1, dn2,...). Nous avons exploité la corrélation entre cannaux polarimétriques dans la base circulaire et nous avons défini un seuil de séparabilité global pour améliorer le partitionnement. L'identification des diffuseurs surfaciques et diédriques dans une structure urbaine a été réalisée à travers la combinaison de l'espace (Entropie/Alpha) et l'orientation de cibles. Les résultats obtenus ont été évalués par les tracés des signatures polarimétriques des cibles identifiées. Les algorithmes développés ont été testés sur des images en quadri polarisation acquises par le satellite RADARSAT-2 sur la région d'Alger, Algérie.

L'article est structuré comme suit. Après avoir présenté la zone de test et les caractéristiques des images radar SAR correspondantes, nous donnons une synthèse sur les descripteurs polarimétriques que nous avons exploités. Nous présentons ensuite la méthodologique que nous avons adoptée ainsi que les résultats correspondants, suivis de l'extraction et de l'analyse des descripteurs polarimétriques à savoir l'entropie, l'angle alpha et l'angle d'orientation des structures urbaines. En dernière partie, la conclusion fait ressortir l'intérêt de l'utilisation des images radar polarimétrique dans la description structurale du milieu urbain.

## 2. ZONE D'ÉTUDE ET DONNÉES UTILISÉES

La ville d'Alger présente une grande diversité de groupements urbains. Elle est située au Nord de l'Algérie (dont elle est la capitale) entre le mont Blidéen et la mer Méditerranée. Elle est caractérisée par une très forte densité urbaine et de nombreux quartiers périphériques. Géographiquement, elle se situe entre les longitudes 2° 55' et 3° 30' et les latitudes 36° 30' et 37°. Les altitudes varient entre le niveau de la mer et les hauteurs d'Alger qui se situent autour de 400 m.

La méthodologie que nous proposons est évaluée sur une zone pilote contenant différents thèmes d'occupation des terres. Elle est située à environ 10 km à l'est d'Alger (figure 1a). Région initialement agricole, elle est aujourd'hui envahie par un tissu urbain qui se densifie de jour en jour. Elle est marquée par une forte concentration urbaine et qui est aménagé principalement en cinq villes (figure 1b) : Bab-Ezzouar, Fort de l'eau, Beau lieu, Dar El Beida et Hamiz.

Pour notre étude, nous disposons de données RADARSAT2 (figure 1c) acquises le 11 avril 2009 sur la ville d'Alger dans la bande de fréquence C (5.3 GHz) et suivant les quatre canaux de polarisation *HH*, *VV*, *HV* et *VH* en mode quad fine. Les données SAR polarimétriques projetées au sol ont un espacement inter-pixel de 7,5 mètres en portée et 4,73 mètres en azimut. L'angle d'incidence du radar est compris entre 38,34° et 39,81°. Les caractéristiques du système radar relatives aux données utilisées sont répertoriées dans le tableau 1.

## 3. DESCRIPTEURS POLARIMÉTRIQUES

Les ondes incidentes et rétrodiffusées peuvent avoir des composantes horizontales et verticales. La polarisation de l'onde diffusée est fortement liée aux caractéristiques géométriques et à la structure physique intrinsèque de la cible observée (Touzi *et al.,* 2004). Les propriétés de diffusion de cette cible sont contenues dans la matrice de diffusion définie par :

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \quad (1)$$

où les indices h et v indiquent la polarisation horizontale et verticale respectivement

Les quatre éléments de la matrice de diffusion sont des nombres complexes où $S_{hh}$ et $S_{vv}$ sont les éléments co-polaraires et $S_{hv}$ et $S_{vh}$ sont les éléments en polarisation croisée. L'hypothèse de réciprocité stipule que $S_{hv} = S_{vh}$ . La matrice est alors symétrique et est définie par trois éléments complexes.

La vectorisation de la matrice de diffusion permet d'obtenir un vecteur cible qui contient toute l'information polarimétrique suivant les deux bases de décomposition les plus utilisées, à savoir la base lexicographique et la base de Pauli (Papathanassiou, 1999; Sauer, 2008).

Dans la base lexicographique, le vecteur de cible est donné par :

$$\vec{k}_L = \begin{bmatrix} S_{hh} & \sqrt{2}S_{hv} & S_{vv} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

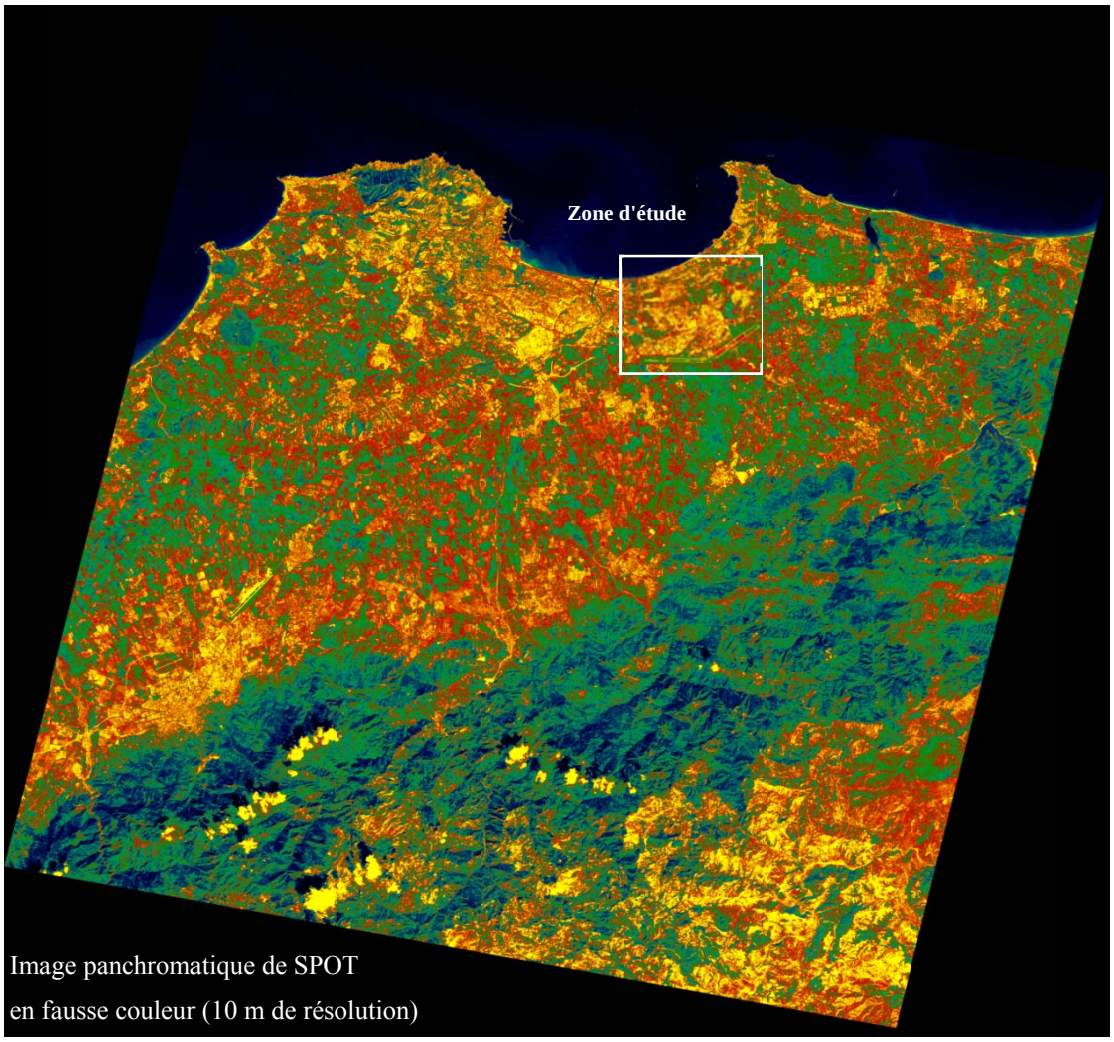
Dans la base de Pauli, il est donné par :

$$\vec{k}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv} \quad S_{hh} - S_{vv} \quad 2S_{hv}]^T \quad (3)$$

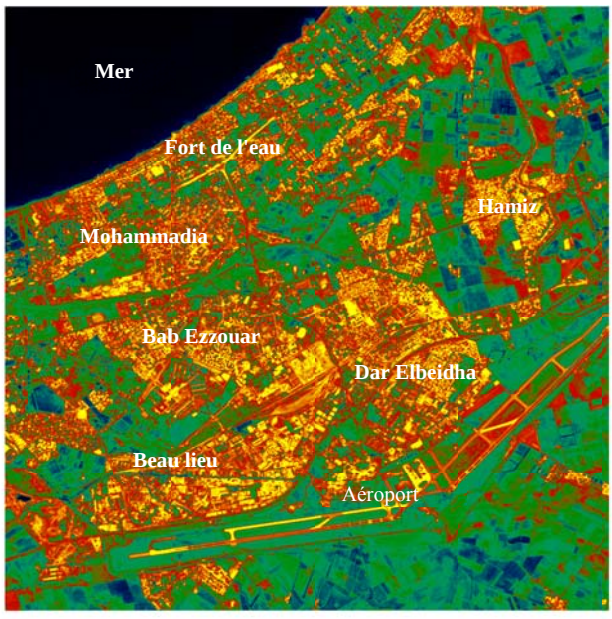
où T indique transposé.

### 3.1 Matrices polarimétriques

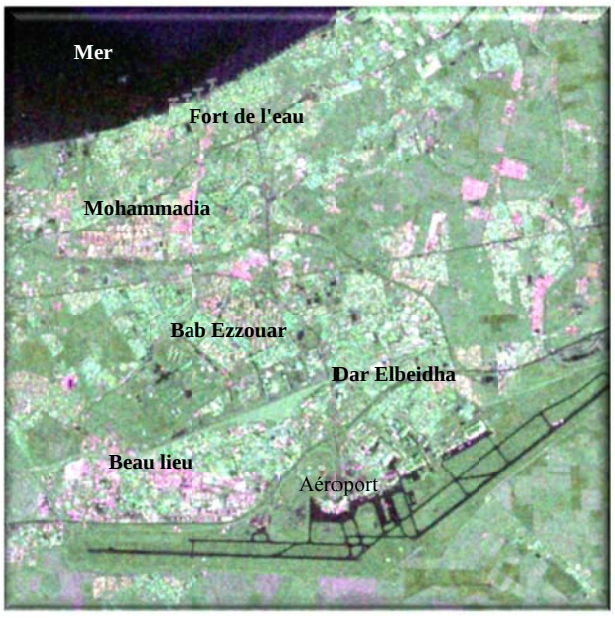
Nous utilisons les vecteurs de diffusion pour établir la matrice de covariance [C], de cohérence [T] ou de Muller [M]. Les éléments de ces matrices représentent l'information polarimétrique de base pour extraire les paramètres intrinsèques et analyser les réponses des cibles dans un milieu distribué. Les statistiques de ces matrices et leurs apports dans la




(a)




(b)




(c)

Figure 1 : a) Image SPOT de la zone d'Alger, b) Image SOPT de la zone d'étude, c) Composition colorée de la zone d'étude dans la base linéaire (R:HH, V:HV et B:VV)

TABLEAU 1 : Paramètres d'acquisition des données Radarsat-2

| | |
|---|---|
| Fréquence | Bande C (5,3 GHz) |
| Canaux de polarisation | HH, HV, VH, VV (Single Look Complex) |
| Résolutions Inter-pixels | 4,74 m *4.73 m (azimut) * (distance) |
| Largeur de la fauchée | 25 km |
| Mode | Quad-fine |
| Date d'acquisition | 11 Avril 2009 |
| Heure d'acquisition | 10 :54 pm GMT |
| Orbite | Ascendante, Réf : DT14 |
| Angle d'incidence | 38,34-39,81° |

modélisation des phénomènes de rétrodiffusion des objets au sol ont été étudiées intensivement (Lee, 1994; Lee, 1999; Lee et Pottier, 2009).

La matrice de covariance [C] est définie comme étant le produit scalaire du vecteur de diffusion $\overrightarrow{k_L}$ avec son transposé conjugué**.**

$$\langle [C] \rangle = \langle \overrightarrow{k_L}\, \overrightarrow{k_L}^{*T} \rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{hh}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle \\ \sqrt{2}\langle S_{hv} S_{hh}^* \rangle & 2\langle |S_{hv}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle & \sqrt{2}\langle S_{vv} S_{hv}^* \rangle & \langle |S_{vv}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

Où $*T$ indique le conjugué transposé.

Quant à la matrice de cohérence $[T]$, elle est calculée par le produit de $\langle \overrightarrow{k_p}\, \overrightarrow{k_p}^{*T} \rangle$. Cette matrice peut s'écrire aussi en fonction de la matrice de covariance $[C]$ à travers la transformation linéaire suivante (Lee et Pottier, 2009; Cloude et Pottier, 1997):

$$\langle [T] \rangle = [E] \langle [C] \rangle [E]^T \quad (5)$$

où $[E] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix}$

Ces matrices sont hermitiennes semi-définies positives, donc elles possèdent des valeurs propres réelles positives ou nulles.

Pour la matrice polarimétrique de Muller, les éléments sont calculés à partir de la matrice de cohérence comme suit :

$$m_{kl} = \frac{1}{2} Trace([T]\eta_{kl}) \quad (6)$$

Avec $\eta_{kl} = (-1)^{-\delta_{kl}} [A] \sigma_k \otimes \sigma_l [A]^{*T}$

Où $[A] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & i & -i & 0 \end{bmatrix}$ et $\delta_{kl} = \begin{cases} 0 & k \neq l \\ 1 & k = l \end{cases}$

$\sigma_k$ *(k* = 0, 1, 2, 3*)* sont les matrices de Pauli données par:

$$\sigma_o = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \ \sigma_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \ \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } \ \sigma_3 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}.$$

La matrice de Muller représente l'information sur la cible sous forme de puissance et de phase relatives d'un état de polarisation par rapport à l'autre. Elle est utilisée, principalement dans le calcul et le tracé des signatures polarimétriques qui peuvent servir au calcul du degré de polarisation ainsi qu'à l'estimation de l'angle d'orientation de la cible par rapport à la ligne de vue du radar.

## 3.2 Décompositions polarimétriques

Le principe des modèles de décomposition est d'exprimer la réponse polarimétrique d'une cible en une somme pondérée de rétrodiffusions de cibles canoniques (éléments indépendants) et d'associer chaque composante générée, à partir des données polarimétriques, à un mécanisme physique de rétrodiffusion (Huynen, 1965; Cameron *et al*., 1996; Cloude et Pottier, 1996; Touzi and Charbonneau, 2002). Selon les propriétés cohérentes et non cohérentes des cibles, deux types de modèles de décomposition sont proposées dans la littérature (Touzi *et al*., 2004; Lee et Pottier, 2009):

### *3.2.1 Les modèles cohérents*

Ces modèles supposent que le pixel ne contient qu'un seul type de mécanisme et son analyse ne prend pas en considération le voisinage. Ce sont des modèles ponctuels qui décomposent la matrice de diffusion en la somme de matrices de diffusion élémentaires $[\boldsymbol{S}] = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{c_i \sigma_i}$, chacune définissant un mécanisme de diffusion canonique. Le paramètre $c_i$ est le coefficient de retrodiffusion d'un diffuseur i. Parmi les modèles les plus utilisées dans ce type de décomposition, nous citons:

a) Décomposition en matrices de Pauli:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} = c_0\sigma_0 + c_1\sigma_1 + c_2\sigma_2 \qquad (7)$$

où $c_0 = \frac{S_{hh}+S_{vv}}{\sqrt{2}}$ , $c_1 = \frac{S_{hh}-S_{vv}}{\sqrt{2}}$ et $c_2 = \sqrt{2}S_{hv}$

La première matrice décrit une diffusion d'un rebond impair tel que la sphère ou le réflecteur trièdre, la deuxième est associée à un diffuseur de type double bond tel que des réflecteurs dièdres et la troisième matrice correspond à un diffuseur volumique ou double bond orienté de 45 degrés par rapport à l'horizontal. Cette décomposition peut contribuer à l'identification des zones urbaines, mais son inconvénient réside dans la confusion entre un dièdre orienté de 45° qui peut être un bâti et une diffusion volumique issue d'un arbre par exemple.

b) Décomposition de Krogager ou SDH, décompose la matrice [S] en matrices associées aux diffuseurs canoniques de types : Sphère, Dièdre et Hélice, d'où son nom. Ces matrices sont :

$$[S]_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, [S]_d = \begin{bmatrix} \cos 2\psi & \sin 2\psi \\ \sin 2\psi & -\cos 2\psi \end{bmatrix} \text{ et } [S]_h = e^{\mp i2\psi} \begin{bmatrix} 1 & \pm i \\ \pm i & -1 \end{bmatrix} \qquad (8)$$

où la phase $\psi$ représente l'angle d'orientation du diffuseur.

Dans cette décomposition, nous remarquons qu'il n'y a pas de diffuseur volumique. Cependant, une hélice ou un dièdre orienté d'un angle $\psi$ différent de zéro peut représenter ce type de diffuseur. Par conséquent, un milieu urbain peut être confondu avec un milieu naturel. L'image de cette décomposition est représentée sur la figure 2a.

c) Méthode SSCM (Symmetric Scattering Characterization Method) de Touzi (Touzi et Chabonneau, 2002). Cette méthode utilise le principe de la décomposition de Cameron (Cameron *et al*., 1996). Elle est basée sur le concept de la symétrie. Un vecteur de diffusion symétrique modélise une cible qui est géométriquement plus ou moins symétrique par rapport à la ligne de vue du radar. Une distinction peut être faite entre des diffuseurs à symétrie plus dominante $\vec{S}_{max}^{sym}$ et ceux à symétrie moins dominante $\vec{S}_{min}^{sym}$, d'où l'expression de S qui devient :

$$\vec{S} = \cos(\tau)\vec{S}_{max}^{sym} + \sin(\tau)\,\vec{S}_{min}^{sym} \qquad (9)$$

où l'angle τ représente le degré de symétrie d'une cible.

Ce modèle n'est pas adapté à l'identification des zones urbaines, il se base sur le concept de la symétrie et donc il ne prend pas en considération les zones possédant des structures géométriques complexes. La figure 2b est une image résultat illustrant cette décomposition.

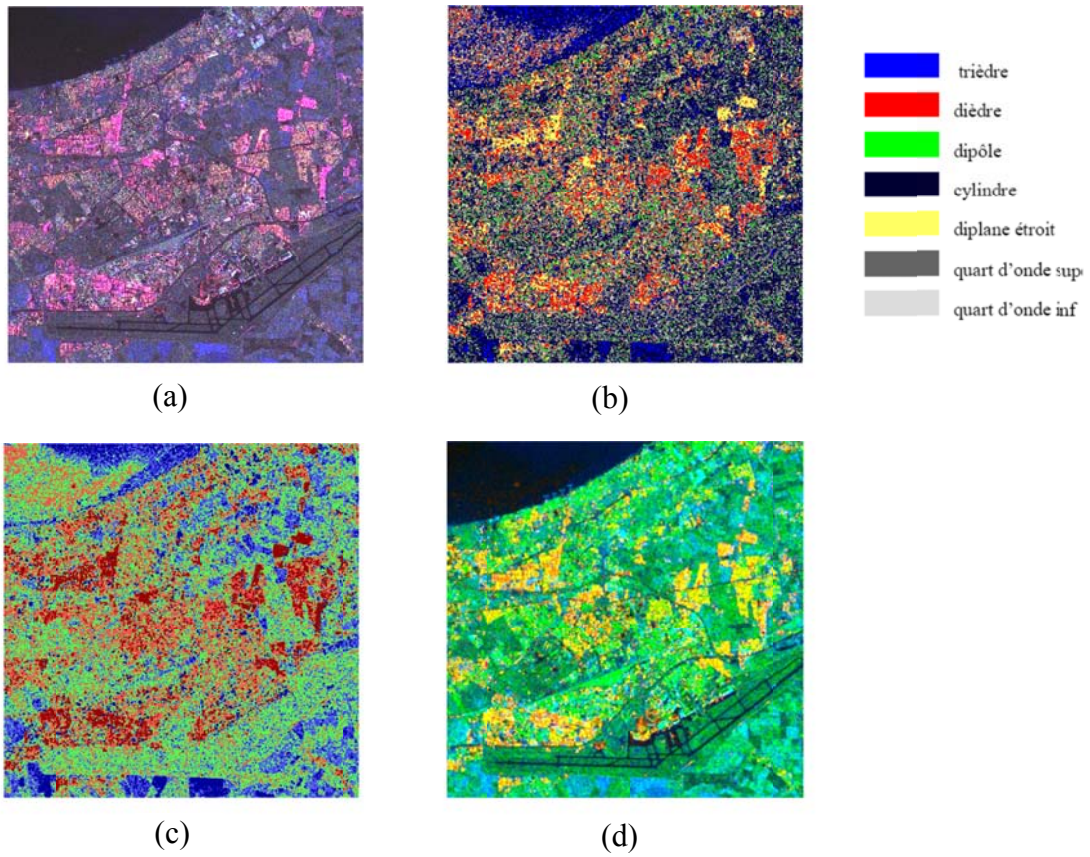



Figure 2: a) image RVB de SDH (S :Bleu, D :Rouge et H :vert), b) image SSCM,
c) Entropie/Alpha et d) image RVB de Yamaguchi PdPvPs (Pd : Rouge, Pv :vert et Ps :Bleu).

#### *3.2.2 Les modèles non cohérents*

Ils prennent en considération dans l'analyse de la réponse de la cible, le voisinage, ce sont donc des modèles contextuels. Le vecteur de diffusion est exploité afin d'établir la matrice de cohérence ou de covariance et d'extraire les paramètres intrinsèques de la cible. Parmi ces modèles, on trouve celui de Cloude/Pottier basé sur la décomposition de la matrice de cohérence en valeurs et vecteurs propres (figure 2c) ainsi que ceux de Van Zyl et Freeman-Durden basés sur la décomposition de la matrice de covariance. Ces trois modèles supposent la symétrie de la cible. En 2008, Yamaguchi *et al.* (Yajima *et al.*, 2008) ont modifié la modèle de Freeman-Durden sous la condition générale de symétrie et d'asymétrie (figure 2d). Ainsi plusieurs travaux méthodologiques et d'applications ont été développés (Ferro-Famil *et al.*, 2001; Lardeux *et al.*, 2009; Touzi *et al.*, 2009). Notre contribution dans cet article porte sur l'identification et la description des cibles urbaines et est développée principalement autour de la condition de symétrie.

### 3.3 Synthèse polarimétrique

Le principe de la synthèse polarimétrique est de simuler la réponse de la rétrodiffusion d'une cible pour n'importe quelle combinaison arbitraire de transmission et de réception de l'onde radar exprimée en fonction de la matrice de Muller [M] (Lee et Pottier, 2009). L'expression du coefficient de rétrodiffusion est donnée par:

$$\sigma(\chi,\psi) = \frac{4\pi}{k^2} S_r[M]S_t^T \tag{10}$$

où *k* est le nombre d'onde transmise, et *S* est le vecteur normalisé de Stokes défini comme :

$$S = [1 \quad \cos(2\psi)\cos(2\chi) \quad \sin(2\psi)\cos(2\chi) \quad \sin(2\chi)]^T \tag{11}$$

$\psi$ est l'angle d'orientation qui varie de 0° à 180°, et $\chi$ est l'angle d'ellipticité qui s'étend de -45° à 45° où le signe de cet angle indique le sens de rotation de l'onde.

La représentation graphique en 3D montre les variations du coefficient de rétrodiffusion $\sigma(\chi,\psi)$ en fonction de l'état de polarisation. Nous donnons sur la figure 3 un exemple de signature polarimétrique d'une cible urbaine, assimilée à un diffuseur double bond (figure 3a) et une zone de la mer ayant une diffusion surfacique (figure 3b).

Il faut noter que cet outil de synthèse polarimétrique est très utilisé pour la validation des résultats des décompositions et pour calculer, aussi les réponses des diffuseurs canoniques.

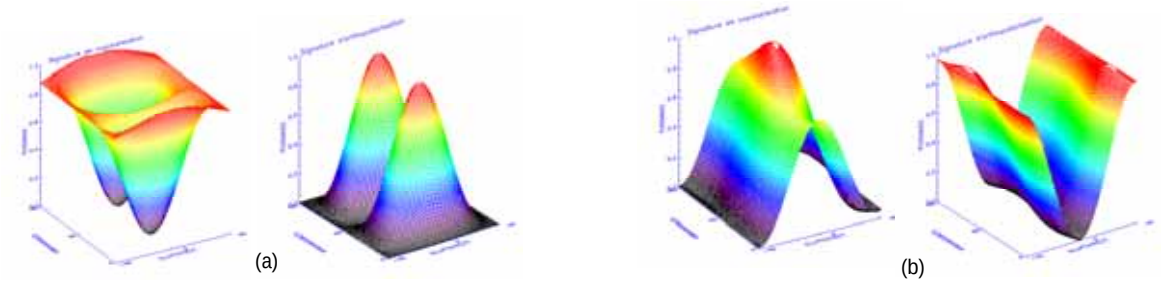



Figure 3 : Exemple de signatures polarimétriques a) d'une zone urbaine, b) de la mer.

## 4. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE PROPOSÉE

La démarche développée pour l'analyse de données polarimétriques que nous proposons est schématisée par l'organigramme de la figure 4. L'objectif de cette démarche est l'identification, la discrimination et la localisation des types de diffuseurs constituants les milieux urbains. Elle se base principalement sur le concept de symétrie et d'asymétrie des diffuseurs par rapport à l'incidence de l'onde radar polarimétrique.

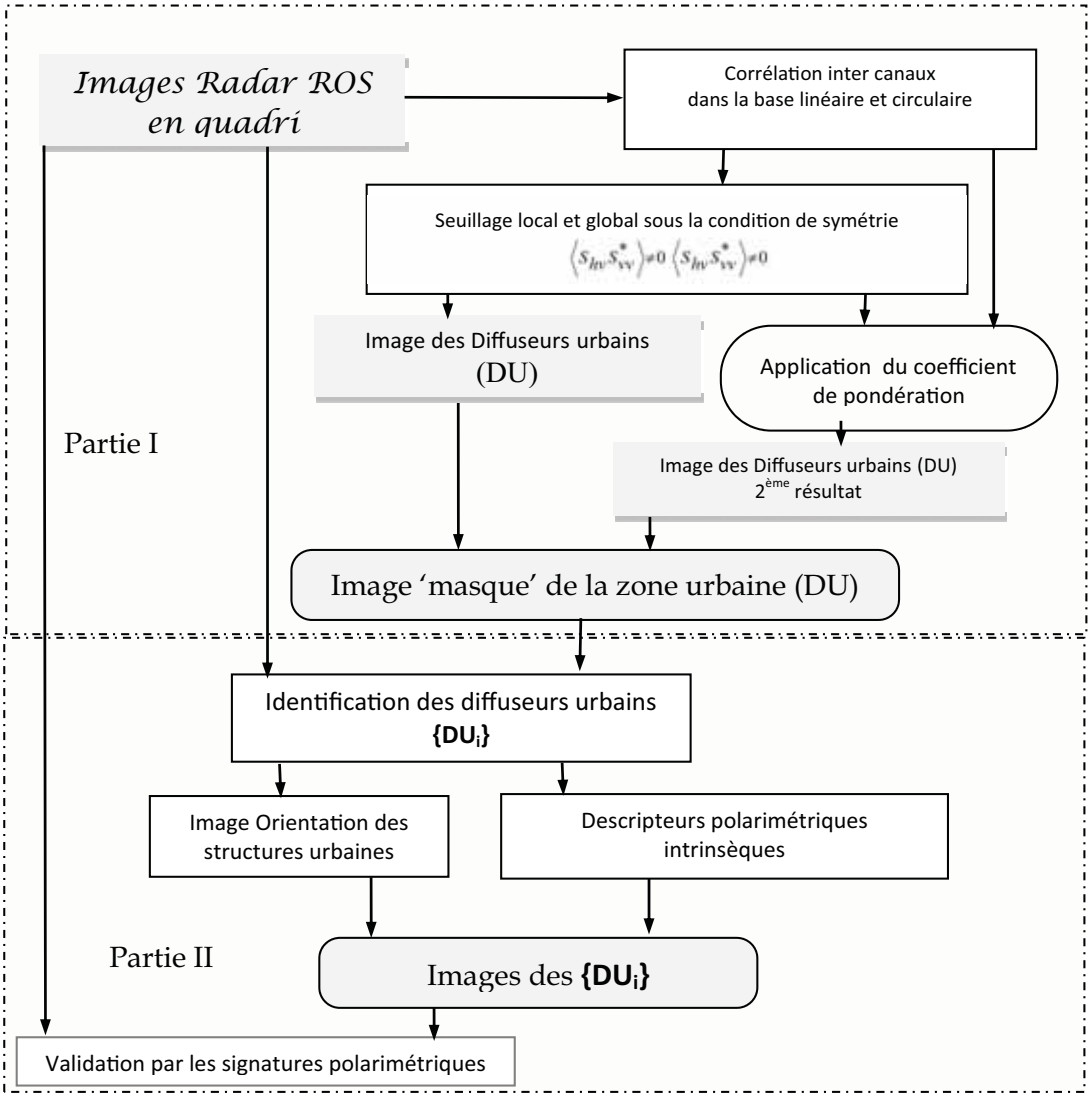



Figure 4: Organigramme général de l'approche proposée

La première étape de notre approche vise la séparation du milieu urbain (que nous avons appelé *DU*) du milieu naturel (appelé *DN*). Nous avons exploité, à cet effet, la corrélation entre les canaux polarimétriques dans les deux bases linéaire et circulaire.

Des seuils locaux et globaux sont appliqués sur les images résultantes afin de n'extraire que la zone urbaine. Pour améliorer ces résultats de séparabilité, nous avons introduit un coefficient de pondération de la corrélation symétrique dans la base circulaire.

La deuxième étape de notre approche vise l'analyse des cibles urbaines pour l'identification du type de mécanismes dominant de diffusion à savoir, la diffusion surfacique et diédrique. Nous avons combiné pour cela les descripteurs polarimétriques intrinsèques (Entropie, Alpha) et l'image orientation. La première information est relative au comportement des mécanismes de diffusion distribuée par contre la deuxième information décrit le degré d'orientation de la cible par rapport à la direction de visée du radar. Pour la validation de nos résultats nous avons tracé et comparé les signatures polarimétriques à des signatures de cibles canoniques.

## 5. CORRÉLATION ENTRE CANAUX POLARIMÉTRIQUES

### Base linéaire

En général, le sol est divisé en deux milieux. L'un est le milieu naturel distribué, tels que les champs, les forêts et la mer. L'autre est représenté par les zones urbaines qui sont composées de nombreuses constructions à structures géométriques différentes.

Le milieu naturel peut être modélisé par plusieurs cibles de diffusion symétriques. Dans les zones urbaines l'onde radar rétrodiffusée par des bâtiments, des maisons ou autres structures artificielles est caractérisée par une forte intensité et la diffusion est de formes spéculaire ou double bond. En effet, un milieu symétrique est caractérisé par un plan de symétrie qui contient la ligne de visée du radar (Souyris *et al*., 2005). Il existe principalement trois types de symétrie: par réflexion, rotationnelle et azimutale. Pour plus de détails sur les principales propriétés de la symétrie d'un milieu géophysique, nous renvoyons le lecteur aux références suivantes (Nghiem *et al*., 1992; Touzi et Chabonneau, 2002; Souyris *et al*., 2005).

Dans la base linéaire et sous la condition de symétrie, le coefficient de corrélation entre la co-polarisation et la polarisation croisée est approximativement nul (Freeman et Durden, 1998; Souyris *et al*., 2005; Ainsworth *et al*., 2008) :

$$\langle S_{hh} S_{hv}^{*} \rangle = \langle S_{hv} S_{vv}^{*} \rangle \approx 0 \tag{12}$$

En conséquence, les valeurs des éléments qui n'appartiennent pas aux diagonales de la matrice de covariance (équation 4), sont égales à zéro d'où :

$$\langle [C] \rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{hh}|^2 \rangle & 0 & \langle S_{hh} S_{vv}^{*} \rangle \\ 0 & 2\langle |S_{hv}|^2 \rangle & 0 \\ \langle S_{vv} S_{hh}^{*} \rangle & 0 & \langle |S_{vv}|^2 \rangle \end{bmatrix} \tag{13}$$

Sous cette nouvelle hypothèse, plusieurs méthodes ont été développées (Ainsworth *et al*., 2008). La décomposition de Freeman-Durden (Freeman et Durden, 1998) est l'une des méthodes qui a mis en évidence la condition de symétrie. Nous avons exploité cette condition pour discriminer les milieux urbains de ceux qui sont naturels.

La figure 5a représente l'image de corrélation entre les cannaux HH et HV de la zone d'étude. Pour effectuer la séparabilité entre les zones urbaines et naturelles, nous avons calculé un seuil à partir d'un profil d'une ligne qui contient différents objets tels que le bâti, les arbres et le sol nu. La valeur trouvée étant égale à 0,0022 comme indiqué sur la figure 5b. L'application de ce seuil à l'image de corrélation nous a permis d'extraire les zones urbaines ( $cor \geq 0{,}0022$ pour une zone urbaine et $cor < 0{,}0022$ pour une zone naturelle). Le résultat est donné sur la figure 5c.

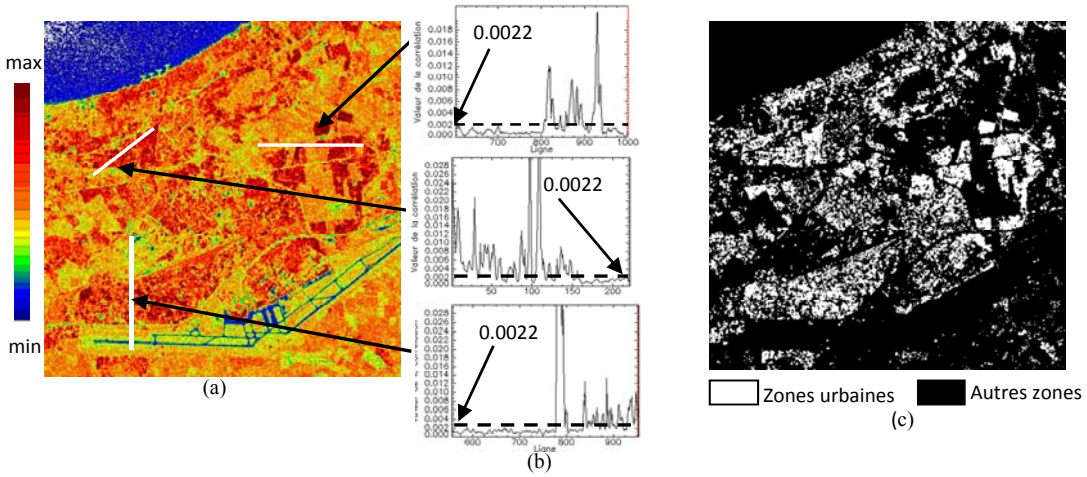



Figure 5: a) Image de corrélation entre HH et HV et b) profils de la cohérence et c) extraction du milieu urbain (en couleur blanche).

## Base circulaire

Yamaguchi et *al.* (Yajima *et al*., 2008) ont rajouté à la décomposition de Freeman-Durden qui décompose la cible en trois composantes, un quatrième paramètre définissant le mécanisme d'asymétrie représenté par l'hélice. Ce paramètre est associé aux zones urbaines ayant des structures géométriques complexes.

Dans un milieu urbain, la diffusion surfacique est pertinente pour les toits et les murs des bâtiments et elle peut être aussi formée par la structure mur-sol-mur qui a la forme d'un trièdre. Quant à la diffusion double bond, elle est causée par des structures de dièdre formé par la structure sol-mur. L'hélice est un élément qui peut être représenté par au moins deux dièdres. Sa diffusion est causée par des structures géométriques urbaines complexes. Ce mécanisme possède un maximum de rétrodiffusion dans la base circulaire lévogyre ou dextrogyre (Ulaby et Elachi, 1990).

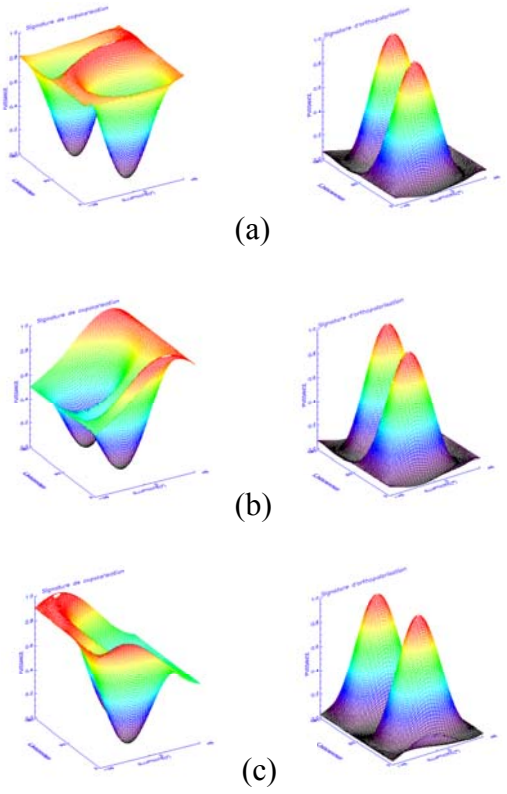



Figure 6 : signatures polarimétriques a) Diffuseur double bond d'un bati, b)
et c) Diffuseur d'une hélice gauchère et droitière d'une structure urbaine complexe

La figure 6a montre les réponses de polarisation d'un diffuseur double bond d'un bâtiment. La réponse co-polarisée indique que le maximum mesuré de la rétrodiffusion se produit pour la polarisation linéaire (angle d'ellipticité nul) et circulaire (angle d'ellipticité égal à +/- 45°). La réponse de la polarisation croisée possède deux maxima dans la base linéaire et un minimum dans la base circulaire.

Les réponses de polarisation des deux types d'hélices (lévogyre et dextrogyre) sont montrées dans les figues 6b-c. Dans chaque cas, le maximum dans la réponse co-polarisée correspond à la polarisation circulaire lévogyre ou dextrogyre. Dans le cas des réponses de polarisation croisée, les deux types d'hélices présentent des signatures identiques qui ont un maximum de rétrodiffusion dans la base linéaire et un minimum de rétrodiffusion dans la base circulaire. Nous remarquons que ces deux signatures indiquent la mixité des deux mécanismes (dièdre et hélice) dans la rétrodiffusion de la zone urbaine à structure complexe.

En conclusion, les deux types de mécanismes qui caractérisent habituellement les zones urbaines ont un maximum de rétrodiffusion dans la base circulaire.

Pour cela et dans le but d'une meilleure discrimination du tissu urbain, nous avons eu recours à la base circulaire. Cette base peut être déduite à partir de la base linéaire. Un tel changement de base est utile pour la discrimination de certaines cibles qui n'ont pas pu être détectées dans la base linéaire HV. La transformation de base est donnée par (Papathanassiou, 1999):

$$[S]_{rl} = [U_2][S]_{hv}[U_2]^T \tag{14}$$

où

$$[U_2] = \frac{1}{\sqrt{1+\rho\rho^*}}\begin{bmatrix} 1 & \rho^* \\ \rho & 1 \end{bmatrix} \tag{15}$$

et

$$\rho = \frac{\cos(2\chi)\sin(2\psi) + i\sin(2\chi)}{1+\cos(2\chi)\cos(2\psi)} \tag{16}$$

ρ étant le rapport de polarisation, r : right et l : left

La polarisation circulaire lévogyre est définie par $\psi$=0° et $\chi$=45°. Les composantes de la matrice de diffusion dans la nouvelle base sont :

$$S_{rr} = iS_{hv} + 0{,}5(S_{hh} - S_{vv}) \tag{17}$$

$$S_{rl} = 0{,}5i(S_{hh} + S_{vv}) \tag{18}$$

$$S_{ll} = iS_{hv} + 0{,}5(S_{vv} - S_{hh}) \tag{19}$$

La figure 7 présente l'image de composition colorée RVB dans la base circulaire. Nous remarquons sur cette image que les zones urbaines se distinguent bien des autres zones si nous les comparons à la composition colorée RVB de la base linéaire (voir zones encerclées). Les zones surfaciques telle que la mer et les zones de végétation tels que les champs agricoles ont une très grande rétrodiffusion dans la polarisation circulaire croisée RL (couleur verte). Par contre les zones urbaines représentées par les couleurs violette et blanche ont de fortes rétrodiffusions dans les polarisations circulaires et co-polaires. Les pistes de l'aéroport ont une diffusion surfacique de très faible valeur dans les trois polarisations circulaires à cause de leurs surfaces lisses. Elles sont représentées par la couleur noire, similaire à celle de la mer.



(a) (b)

Figure 7 : Composition colorée RVB (a) la base circulaire (R:RR, V:RL et B:LL), (b) La base linéaire (R :HH, V :HV et B :VV)

Par ailleurs, la corrélation entre les images RR et LL, est calculée comme suit:

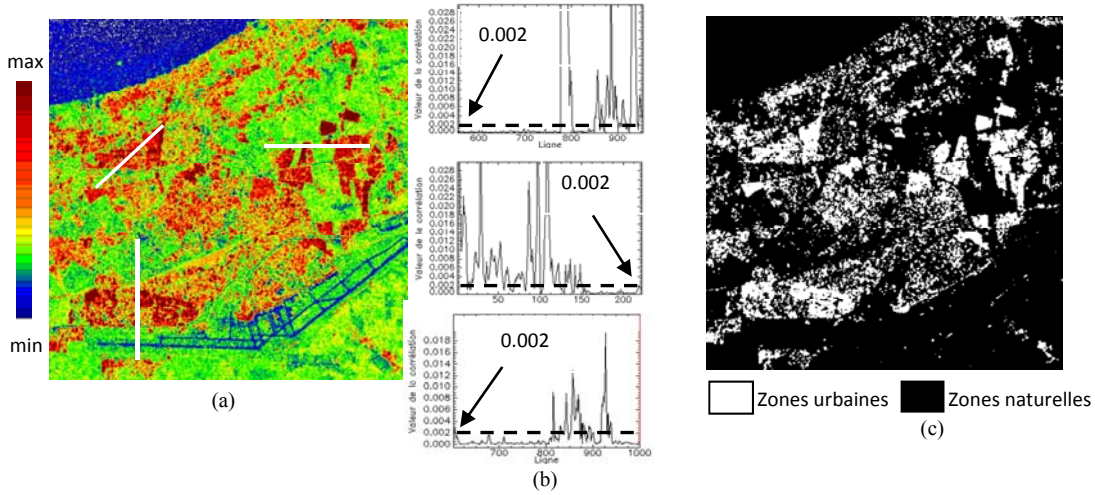
$$cor(S_{rr}, S_{ll}) = S_{rr} * conj(S_{ll})$$

$$= |S_{hv}|^2 - |(S_{hh} - S_{vv})/2|^2 + 2i\Re e(S_{hv}^*((S_{hh} - S_{vv})/2)) \quad (20)$$

Cette dernière relation indique une différence importante dans les caractéristiques de rétrodiffusion entre la zone urbaine et la zone naturelle, étant donné que l'amplitude de la corrélation dans la première zone (DU) est grande par rapport à l'amplitude de la deuxième zone (DN) où la partie imaginaire est nulle à cause de la condition de symétrie.

Pour effectuer une séparation entre ces deux types de zones, nous avons procédé de la même façon que dans la base linéaire. Nous avons donc déterminé un seuil à partir d'un profil de ligne sur l'image de corrélation dans la base circulaire (figure 8a). Il est à noter que cette ligne est la même que celle choisie dans la base linéaire.

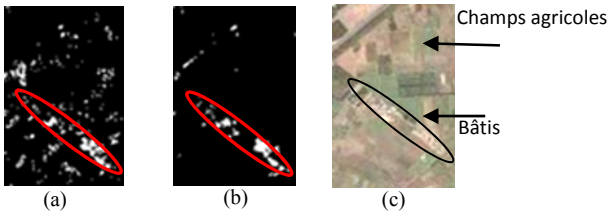
Cette valeur est de 0,0020 comme indiqué sur la figure 8b et l'extraction de la zone urbaine est donnée sur la figure 8c.




(a) (b) (c)

Figure 8: a) Image de corrélation entre RR et LL et b) profil vertical de la cohérence et c) extraction du milieu urbain (en couleur blanche).

En comparant ce résultat de l'image de corrélation à celui de la base linéaire (figure 5) et en prenant comme exemple une région agrandie de champs agricoles sur la figure 9, nous remarquons que quelques pixels de cette région ont été affectés dans la base linéaire aux structures urbaines (figure 9a). Cependant, ces pixels sont représentatifs d'un milieu naturel dans la base circulaire (figure 9b). Cette différence est due à l'absence de symétrie dans la base linéaire pour ce type de diffuseur en raison des produits de corrélation $\langle S_{hh}S_{hv}^*\rangle$ et $\langle S_{hv}S_{vv}^*\rangle$ qui sont différents de zéro. Contrairement, dans la base circulaire le produit $S_{hv}^*(S_{hh} - S_{vv})$ est nul, d'où la très faible rétrodiffusion.




(a) (b) (c)

Figure 9 **:** Comparaison de la zone 11 d'image de corrélation dans la base linéaire (a) à celle dans la base circulaire (b) et optique (c).

Ces résultats nous ont motivés à choisir la base de polarisation circulaire pour la discrimination des zones urbaines.

Il est important de noter que la condition de symétrie d'un milieu est déduite à partir de la partie imaginaire de l'équation (20). En effet, une valeur élevée de ce terme indique la présence d'un milieu non-bâti. Nous avons donc défini un "facteur de pondération" noté *f* pour rehausser les zones urbaines. Ce facteur est donné par :

$$f = |2\Re e(S_{hv}^*((S_{hh} - S_{vv})/2)) \ |/|cor(S_{rr}, S_{ll})| \quad (21)$$

Le calcul de celui-ci pour l'ensemble de la zone d'étude est donné sur la figure 10a, où la distinction entre les structures urbaines et naturelles a été bien mise en évidence par l'application d'un masque choisi à partir d'une limite sur l'histogramme correspondant (figure 10b). L'image résultante est donnée sur la figure 10c.

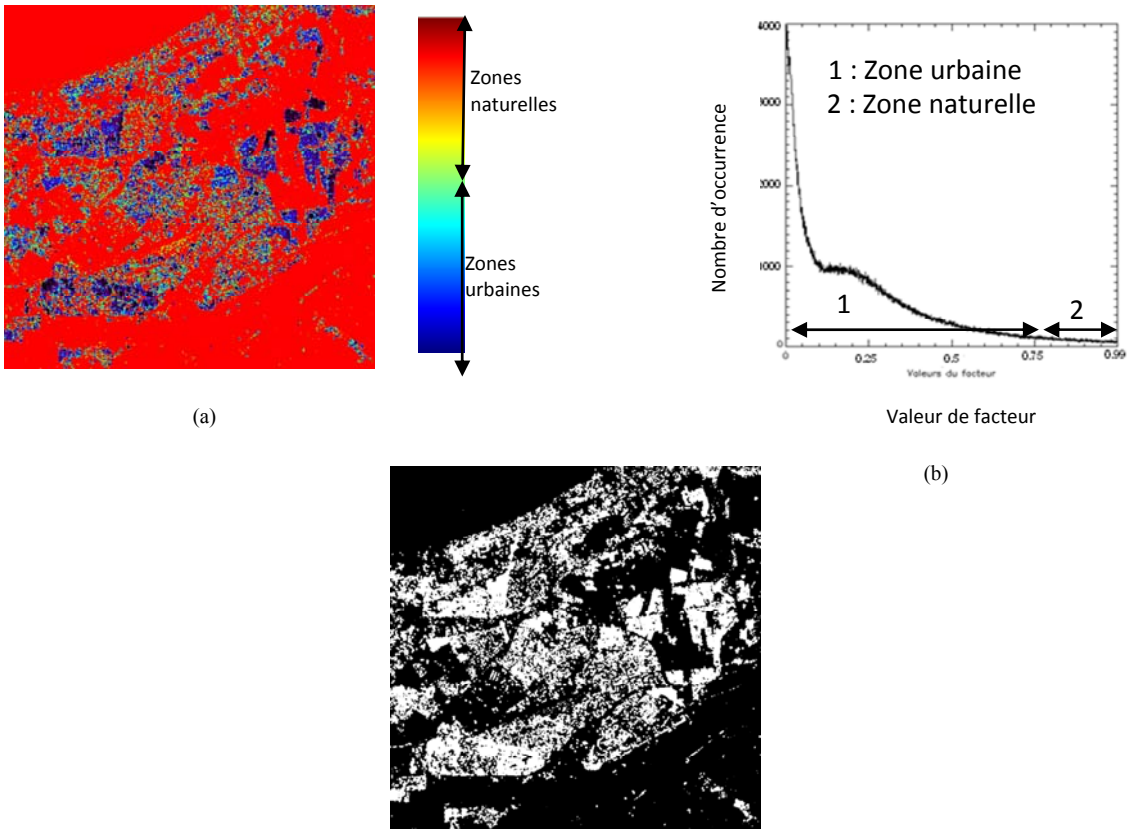



Figure 10 : Extraction de la zone urbaine à partir du facteur de pondération a)Facteur de pondération, b) Histogramme du facteur de pondération et c) Extraction de la zone urbaine.

En comparant ce résultat à celui de la base circulaire (figure 8) et en prenant comme exemple l'université USTHB de Bab Ezzouar agrandie sur la figure 11, nous observons que les trois blocs (zone encerclée) ont été bien identifiés dans l'image résultante du facteur de pondération. Ceci est dû à l'augmentation de la valeur du numérateur qui est en fonction du produit $S_{hv}^{*}(S_{hh} - S_{vv})$. La valeur de ce produit est non-nulle pour les zones urbaines.

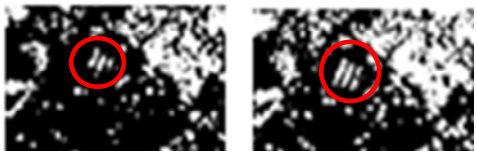



Figure 11 : a) image de corrélation circulaire et b) image extraite du facteur de pondération

Dans la suite de ce travail, nous avons utilisé ce facteur avec la décomposition de Yamaguchi pour distinguer les deux types de bâtiments, à savoir : de diffusion surfacique ou de diffusion dièdrique.

## 6. SÉPARATION DES ZONES URBAINES EN FONCTION DU TYPE DE DIFFUSION

La décomposition de Freeman-Durden est une évolution de la méthode de Van Zyl (Van Zyl, 1989). Elle permet de fournir trois composantes d'une cellule de résolution à travers la décomposition de la matrice de covariance sous la condition de la réflexion symétrique (Yajima *et al.*, 2008). Les trois composantes correspondent aux trois mécanismes de diffusion suivants: surfacique, double bond et volumique. Ce modèle de rétrodiffusion totale donne trois équations à quatre inconnues. La solution à ces équations est basée sur la condition de Van Zyl, donnée par le signe de la partie réelle de $S_{hh}S_{hv}^{*}$ à savoir :

- $Re(<S_{hh}S_{vv}^{*}>) > 0$ pour une diffusion surfacique dominante
- $Re(<S_{hh}S_{vv}^{*}>) < 0$ pour une diffusion d'un double bond dominante

Pour étendre la méthode introduite par Freeman et Durden, un autre modèle à quatre composantes est proposé par Yamaguchi. La quatrième composante rajoutée est celle de la diffusion de l'hélice. Cette composante possède la caractéristique d'un diffuseur asymétrique qui ne vérifie pas l'équation (12). Dans ce modèle, Yamaguchi et *al*. se sont basés sur le critère suivant:

$$C_r = \langle S_{hh}S_{vv}^{*}\rangle - \langle |S_{hv}|^2\rangle + P_h \tag{22}$$

où $P_h$ représente la puissance de la quatrième composante à savoir l'hélice:

$$P_h = 2|\Im m\langle S_{hv}^{*}(S_{hh} - S_{vv})\rangle| \tag{23}$$

et

- $Re(Cr) > 0$ pour une diffusion surfacique dominante
- $Re(Cr) < 0$ pour une diffusion double bond dominante

A partir de ces deux conditions et en utilisant l'image représentant l'urbain issue de l'utilisation du facteur de pondération, nous avons subdivisé la zone urbaine en deux classes cu1 (diffusion surfacique) et cu2 (diffusion dièdrique) (figure 12a).

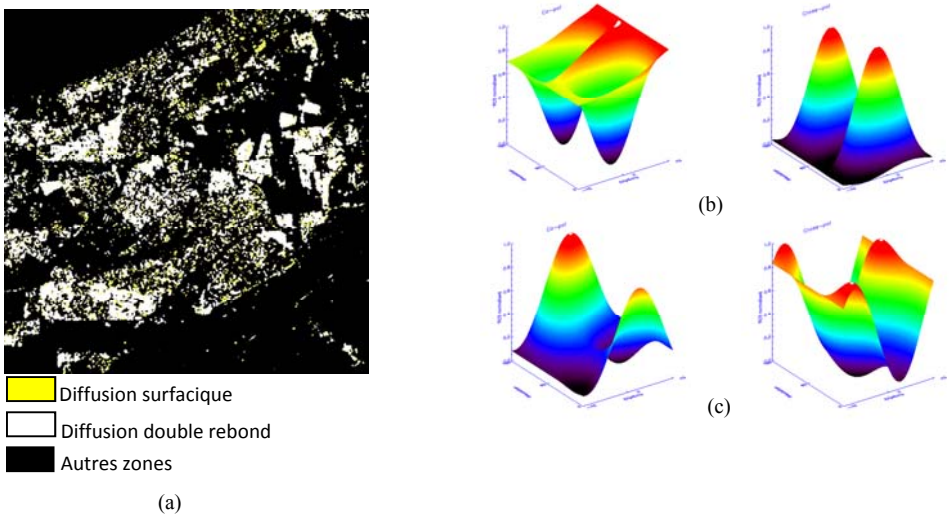



Figure 12: a) Partition de la zone urbaine (diffusion surfacique et double bond), b) et c) Signatures polarimétriques des zones d'une diffusion surfacique et de double bond.

Pour valider notre résultat, nous avons représenté sur la figure 12b, les signatures polarimétriques (Ouarzeddine *et al.,* 2006) des deux classes. Ces signatures sont comparées à celles des cibles canoniques. La figure 12b s'adapte bien à la diffusion d'un dièdre qui correspond à l'interaction sol-bâti. Les signatures polarimétriques de la deuxième région urbaine données sur la figure 12c s'approchent de celles d'un diffuseur surfacique et d'un dièdre. Cependant, l'avantage est que cette méthode peut diviser le milieu urbain en deux classes suivant leurs rétrodiffusions représentées par les mécanismes de double bond et de surface.

# 7. ANALYSE DES DESCRIPTEURS POLARIMETRIQUES

## 7.1 Descripteurs polarimétriques intrinsèques

Dans cette partie, nous exploitons les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice de cohérence pour calculer deux paramètres caractérisant les propriétés de diffusion d'un milieu quelconque et qui sont: l'entropie et l'angle alpha (Cloude et Pottier, 1997)**.**

***Entropie : Elle décrit le caractère aléatoire du phénomène de rétrodiffusion ou le degré d'impureté.***

Elle est définie par :

$$H = -\sum_{i=1}^{3} P_i log_3(P_i) \quad (24)$$

*H* varie entre 0 et 1 et $P_i$ indiquent les pseudos probabilités. Une entropie nulle, indique que la cible observée est pure et la rétrodiffusion est déterministe.

Le caractère aléatoire de la cible observée est défini par une entropie égale à 1. Cette cible est caractérisée par un bruit qui dépolarise complètement l'onde incidente.

***Alpha moyen : Cet angle informe sur le type de diffusion et est obtenu comme suit :***

$$\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^{3} P_i \alpha_i \quad (25)$$

$\alpha_i$ sont calculés à partir des trois premières composantes des vecteurs propres.

La gamme de variations possibles dans les mécanismes de diffusions peut être représentée par la variation de l'angle alpha (Cloude et Pottier, 1997), comme indiquée sur la figure 13.

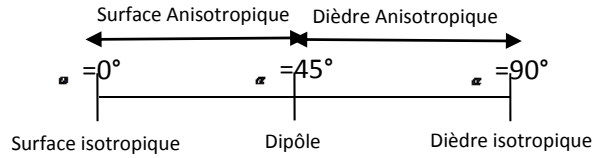



Figure 13**:** Types de diffuseurs en fonction de l'angle α.

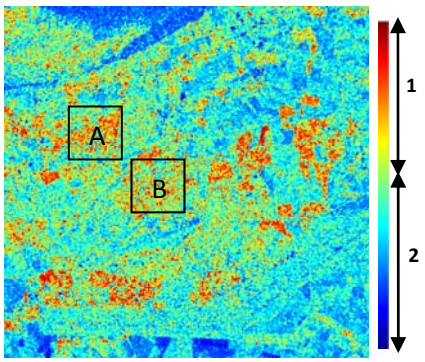
Sur l'image du paramètre alpha que nous avons généré (figure 14a), nous remarquons que la majorité des pixels des zones urbaines ont les caractéristiques d'un dièdre anisotropique. Ceci signifie une forte présence du mécanisme de diffusion double bond.

Par la suite, nous avons extrait de l'image alpha deux régions d'intérêts (ROI). Les histogrammes correspondants sont donnés sur la figure 14b-c où nous notons que les cibles qui ont une forte contribution sont des mécanismes de type dièdres anisotropiques, et celles qui ont une très faible contribution sont des mécanismes surfaciques anisotropiques.

***Décomposition Entropie/Alpha***

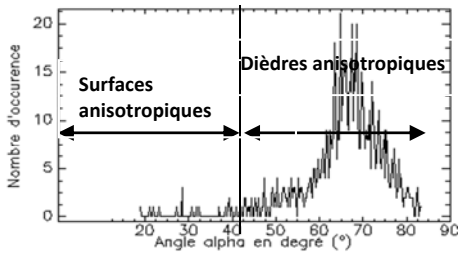
Le paramètre alpha combiné au paramètre entropie donne plus d'information sur la scène imagée. En effet, Cloude et Pottier (1997) ont développé une procédure empirique de partition de l'espace *H/α* en 8 zones représentatives des différents mécanismes de rétrodiffusion (figure 15a).

Le mécanisme de diffusion de chaque pixel de l'image polarimétrique peut être alors identifié en comparant ces paramètres *H* et *α* à des seuils fixés préalablement. Les différentes frontières des classes, dans le plan *H/α*, ont été déterminées afin de distinguer la diffusion surfacique (SR), la diffusion de volume (VD) et la diffusion double bond (DB) le long de l'axe *α*, et le degré d'impureté le long de l'axe d'entropie *H*. L'interprétation de cette segmentation peut être trouvée dans (Cloude et Pottier, 1997).

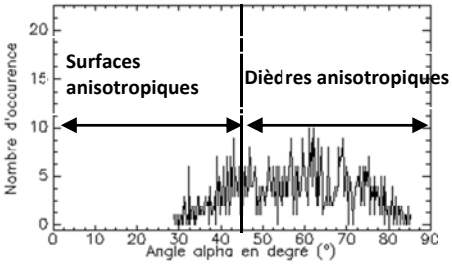



1) Dièdres anisotropiques
2) Surfaces anisotropiques

(a)



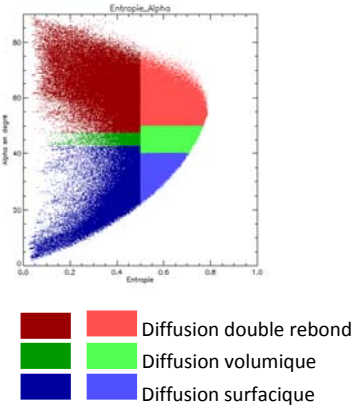

(b)



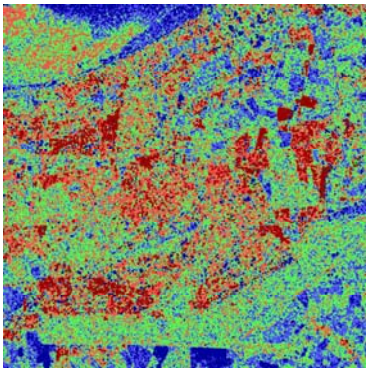

(c)

Figure 14 : a) Image de l'angle alpha ( (A) urbain dense et (B) urbain moins dense),
b) et c) Histogrammes des régions A et B respectivement.

Suivant la distribution des classes dans l'espace *H/α,* nous remarquons dans l'image résultante de la décomposition (figure 15b) que les zones urbaines sont caractérisées par la diffusion de double bond et les autres objets de la scène imagée ont les réponses des deux autres classes : surfacique et/ou volumique.




(a)



(b)

Figure 15 : a) Espace H/α, b) Image de la décomposition.

A partir de l'image résultante de la zone urbaine (figure 10c) et celle de l'image *H/α,* nous avons généré une nouvelle image qui ne contient que la zone urbaine représentée par l'espace *H/α* (figure 16a). Nous remarquons qu'il y'a une forte correspondance entre les deux figures (figure 16a et figure 16b) concernant les zones urbaines.

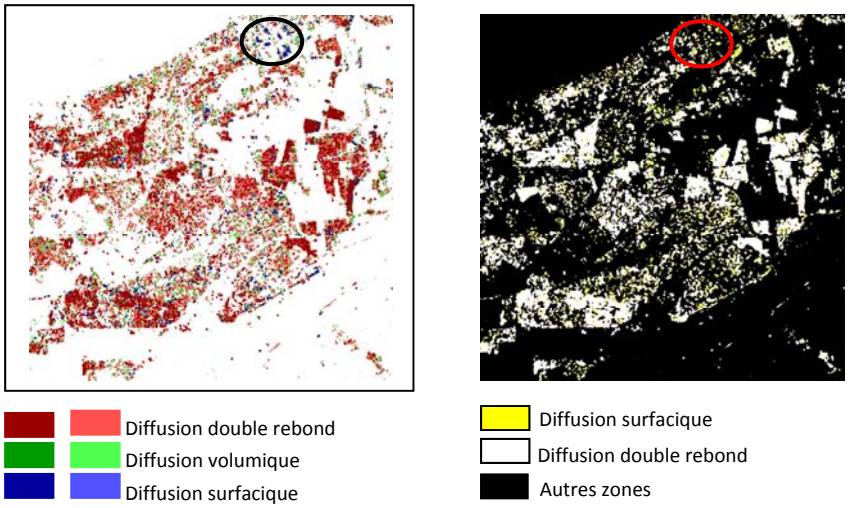



Figure 16 : comparaison entre a) H/ α**:** Image H/α de l'urbain et b) Résultat de modèle pour l'extraction du milieu urbain.

## 8. ORIENTATION DES STRUCTURES URBAINES

Pour compléter notre analyse structurale des cibles urbaines, nous avons calculé et analysé, dans cette partie, l'orientation de ces structures à partir de l'information polarimétrique. Pour mémoire, l'état de polarisation d'une onde électromagnétique est caractérisé par son angle d'orientation de polarisation (ψ) et son angle d'ellipticité (χ) comme indiqué dans la figure 17. L'angle d'orientation est l'angle entre l'axe maximal de l'ellipse et l'axe horizontal. Cet angle est reconnu à partir des études précédentes (Lee *et al.*, 2002; Leduq, 2006) pour être utile dans la mesure des alignements de la construction urbaine par rapport à la direction azimutale et dans la mesure de la topographie de surface. Certaines méthodes pour l'estimation de déplacement de l'angle de polarisation à partir des données polarimétriques ont été suggérées. Lee *et al.* (2002) ont trouvé la relation entre le changement de l'angle d'orientation et la structure géométrique de la cible au sol et ont montré que le changement de l'angle d'orientation de polarisation est essentiellement dû à la pente en azimut, la pente en distance et l'angle de vue du radar. Kimura *et al.* (2005) ont aussi appliqué ce concept en milieu urbain, et ont tiré la relation entre le changement de l'angle d'orientation et l'angle d'azimut de la paroi verticale.

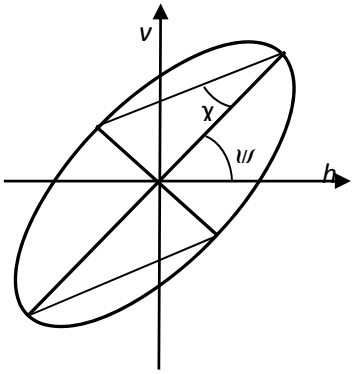



Figure 17 : Ellipse de polarisation.

La figure 18 représente un schéma d'une géométrie d'imagerie PolSAR au sol. Ce diagramme montre la relation entre l'angle d'orientation de polarisation et la pente au sol. L'espace ($\hat{x}$, $\hat{z}$) définit le sol horizontale, ($\hat{y}$, $\hat{z}$) définit le plan d'incidence et $\vec{k}$ definit la ligne de vue du radar . L'angle ∅ qui est entre la ligne de vue et l'axe vertical z indique l'angle de vue du radar. L'axe $\hat{N}$ indique le vecteur normal à la section efficace d'une surface au sol. Si cette section a une pente azimutale, le vecteur $\hat{N}$ n'est plus dans le plan d'incidence ($\hat{y}$,$\hat{z}$).

L'angle d'orientation ψ causé par la pente d'un terrain est l'angle qui fait tourner le plan d'incidence sur la ligne de vue du Radar (Lee *et al.*, 2002). La matrice de diffusion après une rotation par un angle ψ est donnée par (Freeman et Durden, 1998) :

$$[\tilde{S}] = \begin{bmatrix} \tilde{S}_{hh} & \tilde{S}_{hv} \\ \tilde{S}_{hv} & \tilde{S}_{vv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} [S] \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \quad (26)$$

Cet angle est lié à la fois à la pente de la portée et à la pente azimutale (Schuler *et al.*, 2000).

$$\tan(\psi) = \frac{tan(w)}{-tan(\gamma)\, cos(\phi) + sin(\phi)} \quad (27)$$

où $\tan(w)$ est la pente azimutale et $\tan(\gamma)$ est la pente de la portée distale.

Lee et *al*. (Lee *et al.* 2002) ont developpé un algorithme à base de la polarisation circulaire pour estimer l'angle d'orientation en utilisant la matrice de covariance sous la forme suivante :

$$\langle \tilde{S}_{RR} \tilde{S}_{LL}^{*} \rangle = \langle S_{RR} S_{LL}^{*} \rangle e^{-4\psi} \quad (28)$$

et

$$\psi = -\frac{1}{4} tan^{-1}(\langle \tilde{S}_{RR} \tilde{S}_{LL}^{*} \rangle) \quad (29)$$

avec $-\pi/4 \leq \psi \leq \pi/4$

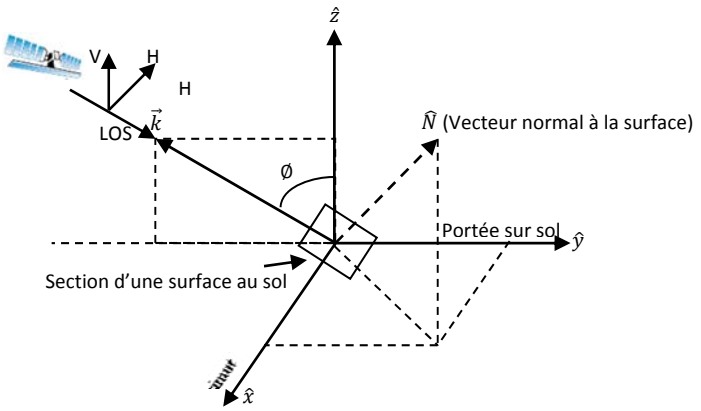



Figure 18 : Schéma de la géométrie de l'imagerie radar pour relier l'angle d'orientation aux pentes du sol.

Le même phénomène se produit dans les zones urbaines, car un mur de bâtiment ou de maison est équivalent à un petit patch incliné du sol. Dans la plupart des zones urbaines, les bâtiments et les maisons sont orientés dans la même direction, et les murs tendent à former un plan similaire à un terrain incliné. Les figures 19a-b représentent les deux cas de l'orientation d'un bâtiment par rapport à la ligne de vue du radar. Dans la figure 19a, les maisons ou les bâtiments alignés dans la direction azimutale ont une rétrodiffusion d'un double bond avec un angle de rotation ($\propto = 0$) par rapport à l'axe azimutal. Dans ce modèle de diffusion, le vecteur normal à la paroi et le plan d'incidence sont parallèles. Dans la figure 19b, la structure urbaine n'est pas alignée sur la trajectoire de vol et elle provoque un angle de rotation non-nul.

L'angle de rotation $\propto$ a une relation avec l'angle d'orientation $\psi$ donné par (Kimura, 2008):

$$\propto = \arctan(-\cos(\emptyset)\tan(\psi)) \quad (30)$$

Nous avons exploité cet angle pour une séparation plus fine des structures urbaines. La figure 20a indique l'image de l'angle d'orientation de polarisation introduit par les structures urbaines. En comparant les deux images des deux figures 20b et 20c, nous remarquons que les différentes orientations des structures urbaines dans l'image de l'angle d'orientation de polarisation montrent une bonne concordance avec ceux de l'image optique. Nous avons pris l'exemple de la ville d'El-Hamiz car elle contient plusieurs quartiers. Les bâtiments de chaque quartier sont organisés et structurés dans une seule orientation. Les résultats donnent une vue générale dans l'organisation et l'orientation des structures urbaines dans l'objectif d'une application spécifique tels que la surveillance, l'aménagement ou le développement du milieu urbain. Ces résultats constituent des informations importantes sur l'organisation des agglomérations, leur ensoleillement, leurs couloirs d'aération, leurs aménagements, etc…

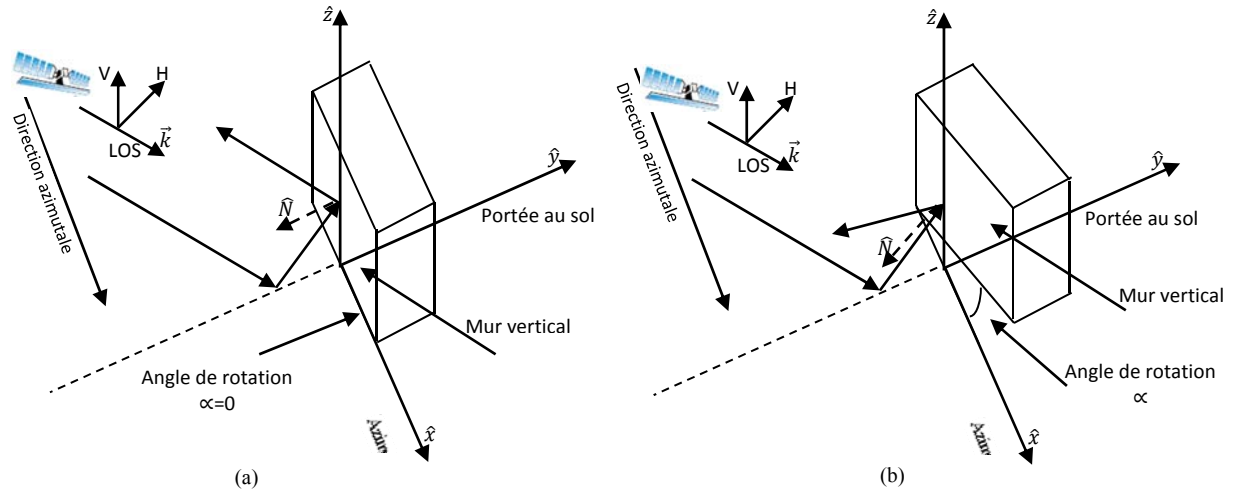



Figure 19 : Diagramme d'une géométrie radar indiquant l'angle de rotation d'un bâti,
(a) structure d'un dièdre (∝=0), (b) vue différente ($\propto$ *non nul*).

## 9. CONCLUSION

A travers ce travail, nous avons montré l'apport des images radar polarimétrique dans la description structurale du milieu urbain. La séparabilité des zones urbaines est basée sur le concept de symétrie du milieu diffuseur. Cette symétrie est traduite par la corrélation entre les images HH et HV ou bien VV et HV et qui permet d'identifier des diffuseurs symétriques dans des zones naturelles.

L'hélice est un élément non-symétrique. Son modèle est souvent rencontré dans les diffuseurs urbains. Sa forte rétrodiffusion dans la base circulaire lévogyre et dextrogyre nous a motivé à utiliser la base circulaire pour l'extraction de la zone urbaine. Dans cette base, nous avons introduit un facteur de pondération relatif à la corrélation entre RR et LL. Les résultats obtenus montrent une bonne séparabilité des zones urbaines et des zones naturelles.

Pour l'identification locale des types de diffuseurs urbains et leur structure globale 'au niveau agglomération' nous nous sommes basés sur l'estimation de l'angle de rotation par rapport à la visée du radar, sur l'angle alpha qui caractérise la géométrie de la cible ainsi que sur la réponse polarimétrique synthétisée de celle-ci. Les résultats que nous avons obtenus sont les suivants : des cibles de type dièdre qui présentent une rétrodiffusion en double bond sol-mur ont été identifiées par le tracé de leurs signatures polarimétriques et leurs comparaisons aux signatures de cibles canoniques, des mécanismes de diffusion dans les agglomérations urbaines et mixtes ont été aussi discriminés par l'analyse de l'angle alpha. L'image de l'angle de rotation nous a permis d'avoir une vue globale sur l'organisation et l'orientation des structures urbaines. Pour la réalisation de ce travail, nous avons développés, tous les algorithmes en langage IDL (I*nteractive Data Language*) et l'ensemble a donné lieu à un outil logiciel associé à une interface conviviale. Comme perspectifs à ce travail, nous proposons l'utilisation de la complémentarité polarimétrie-interférométrie afin d'estimer la hauteur des bâtiments en se basant sur le type de mécanisme de rétrodiffusion et sur son orientation par rapport à la ligne de visée du radar ainsi que l'optimisation de cohérence en milieux urbains.

### Remerciements

Les images utilisées dans ces travaux sont fournies par le MDA-Géospatial Service dans le cadre d'un projet SOAR #1670 du programme SOAR de l'Agence Spatiale Canadienne. Les chercheurs de l'équipe du projet tiennent à les remercier pour la mise à leur disposition des images en mode polarisation en quadrature à et double fin à et standard de RADARSAT-2.

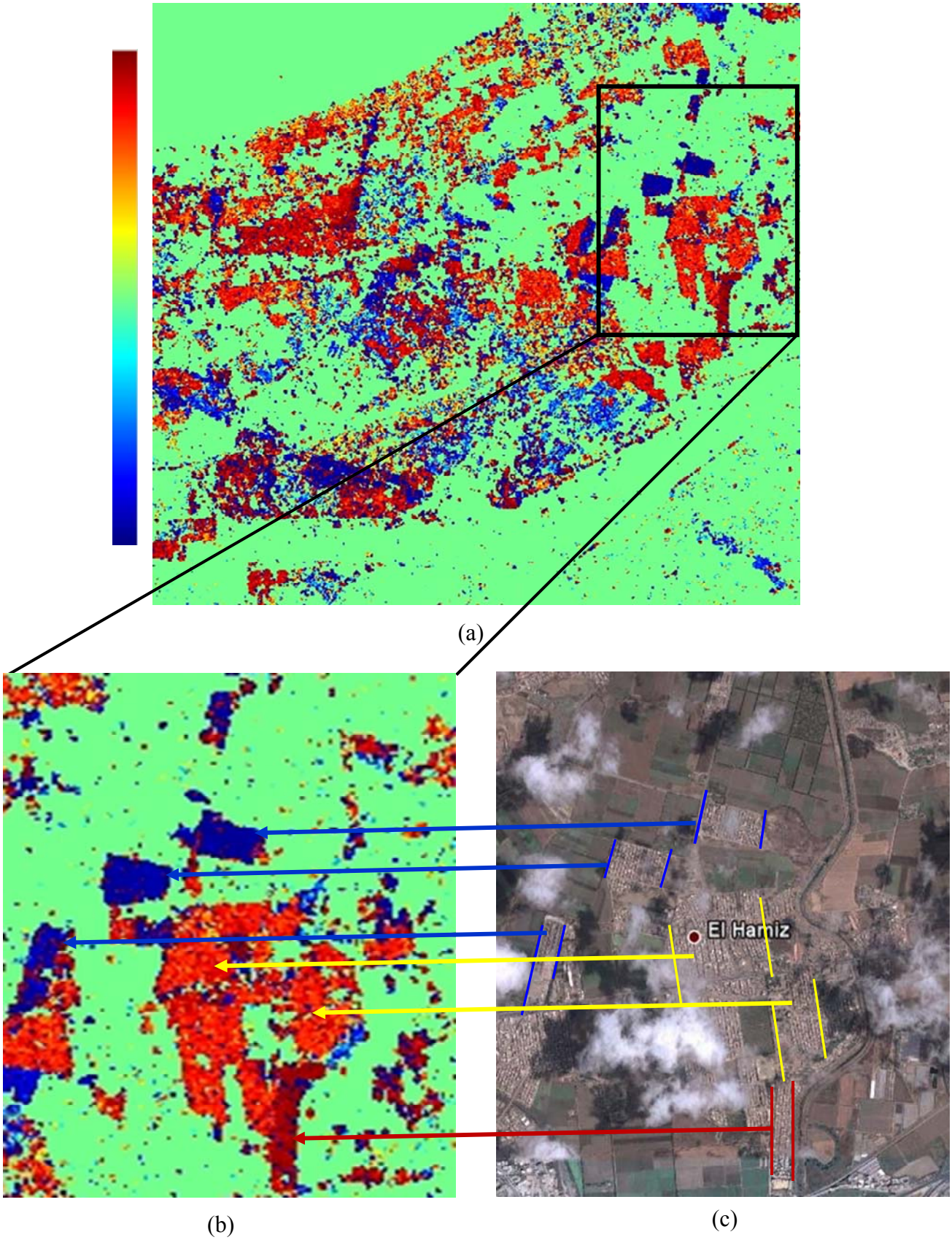



Figure 20 : (a) Image de l'angle d'orientation, (b) image d'El-Hamiz, (c) image Earth-google d'El-Hamiz

## Références


Ainsworth, T.L., Schuler, D.L. and Lee, J.-S. (2008) Polarimetric SAR characterization of man-made structures in urban areas using normalized circular-pol correlation coefficients. Remote Sensing of Environment, vol.112, no. 6, p. 2876-2885.

Cameron, W.L., Youssef, N., and Leung, L.K. (1996) Simulated polarimetric signatures of primitive geometrical shapes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, no. 3, p. 793–803.

Cloude, S. R. and Pottier, E. (1997) A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, no. 1, pp. 68-78.

Delisle, D. (2009). RADARSAT-2: Capabilities and benifits for Canadian Government. PolInSAR workshop, Esrin, Rome, Italy.

Ferro-Famil, L., Pottier, E. and Lee, J. S. (2001) Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on H/A/Alpha-Wishart classifier. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, no. 11, p. 2332-2342.

Freeman, A. and Durden, S. L. (1998) A three-component scattering model for polarimetric SAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, no. 3, p. 963–973.

Kimura, H. (2008) Radar Polarization Orientation Shifts in Built-Up Areas. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing letters, vol. 5, no. 2, p. 217-221.

Kimura, H., Papathanassiou, P. and Hajnsek, I. (2005) Polarization Orientation Effects in Urban Areas on SAR Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2005, Seoul, South Korea.

Krogager, E. (1999) New decomposition of the radar target scattering scattering matrix. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 26, no. 18, p. 1525-1527.

Leduq, P. (2006) Traitements temps-fréquences pour l'analyse des scènes complexes dans les images SAR polarimétriques. PhD thesis, Thèse PhD, Institut d'électronique et de télécommunications de Rennes, université de Rennes, France,

Lee, J. S., Grunes, M.R. and Kwork, R. (1994) Classification of Multi-look Polarimetric SAR Imagery Based on Complex Wishart Distribution. International Journal of Remote Sensing, vol. 15, no. 11, p. 2299-2311.

Lee, J. S., Grunes, M.R., Ainsworth, M. T., Du, L. J., Schuler, D. and Cloude, S. R. (1999) Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, no. 5, pp. 2249-2258.

Lee, J. S., Schuler, D. L., Ainsworth,T. L., Krogager, E., Kasilingam, D. and Boerner, W-M (2002) On the estimation of radar polarization orientation shifts induced by terrain slopes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 1, p. 30–41.

Lee, J.S. and Pottier, E. (2009) Polarimetric Radar Imaging: From basics to applications. Brian J. Thompson, New York.

Nghiem, S. V., Yueh, S. H., Kwok, R. and Li, F. K. (1992) Symmetry properties in remote sensing. Radio Science, vol. 27, no. 5, p. 693–711.

Ouarzeddine, M. Souissi, B. and Belhadj-Aissa, A . (2006) Target Detection and Characterization using H/alpha Decomposition and Polarimetric Signatures. Information and communication Technologies, ICTTA'06, proceeding IEEE, Damascus, Syria.

Ouarzeddine, M. (2008) Interférométrie et polarimétrie radar SAR pour la caractérisation des sols et la génération des MNT. Thèse de Doctorat d'état, Faculté d'électronique et d'informatique, Université USTHB, Alger, Algérie.

Papathanassiou K.P., ( 1999 ), Polarimetric SAR interferometry, Thesis submitted for the degree of Doktor der Technischen Wissenschaften, Faculty of natural sciences, Department of physics, Technical University Graz, Austria.

Papathanassiou, K. P. and Cloude, S. R. (2001) Single-baseline polarimetric SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, no. 11, p. 2352–2363.

Sauer, S. (2008) Télédétection SAR interférométrique de zones urbaines en bande L à partir de l'utilisation des techniques d'analyse spectrale polarimétriques et multi-bases. Thèse PhD, Institut d'électronique et de télécommunications de Rennes, université de Rennes, France.

Schuler, D.L., Lee, J.S., Ainsworth, T.L. and Grunes, M.R. (2000) Terrain Topography Measurement Using Multipass Polarimetric Synthetic Aperture Radar Data. Radio Science, vol. 35, no.3, p. 813-832.

Souyris, J.-C., Imbo, P., Fjørtoft, R., Mingot, S. and Lee, J.-S. (2005) Compact Polarimetry Based on Symmetry Properties of Geophysical Media: The $\pi/4$ Mode. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, no. 3, p. 634-646.

Touzi, R. (1997) Target scattering decomposition in terms of roll invariant target parameters. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45, no. 1, p. 73–84

Touzi, R. and Chabonneau, F. (2002) Characterization of target symmetric scattering using polarimetric SARs. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 11, p. 693-711.

Ulaby, F. T. and Elachi C. (1990) Radar polarimetry for geoscience applications. Artech House, Norwood, MA.

Van Zyl, J.J. (1989) Unsupervised classification of scattering behavior using polarimetric data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol 27, no. 1, p. 36-45.

Yajima, Y., Yamaguchi, Y. Sato, R. Yamada, H. and Boerner, W.-M. (2008) POLSAR Image Analysis of Wetlands Using a Modified Four-Component Scattering Power Decomposition. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 46, no. 6, p. 1667-1673.