APPORT DE LA POLARIMÉTRIE RADAR À LA COHÉRENCE INTERFÉROMÉTRIQUE : APPLICATION À LA FORÊT TROPICALE DE TAPAJÓS, BRÉSIL.

Mounira Ouarzeddine*, Boularbah Souissi, Aichouche Belhadj-Aissa

Faculté d'électronique et d'informatique, USTHB, BP N°32 El Alia,
Bab Ezzouar, Alger, Algérie, Tél : +213 21 24 79 12 poste 806, Fax: +213 21 24 71 87
Courrier électronique : m.ouarzeddine@yahoo.fr , b.souissi@yahoo.com , h.belhadj@lycos.com

Soumis le 23 juillet 2007 ; révisé le 8 février 2008 ; accepté le 24 avril 2008 - © *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 1, p. 35-57

Résumé

L'interférométrie Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) est une technique d'extraction de l'élévation du terrain. Elle est basée sur l'estimation de la différence de phase entre deux acquisitions d'un capteur radar selon deux points de vue différents. La qualité de cette phase est évaluée par le coefficient de cohérence. Parallèlement à l'interférométrie qui est mise en oeuvre en utilisant une polarisation fixe, la polarimétrie RSO permet la discrimination des propriétés intrinsèques de la cible en exploitant différentes polarisations. L'optimisation de la cohérence peut être obtenue en combinant la polarimétrie et l'interférométrie. Cette technique est appelée PolInSAR. L'objectif de ce travail est d'envisager deux méthodes d'optimisation de la phase interférométrique. Nous proposons une première méthode, qui consiste à générer les cohérences à partir de couples d'images dans la base de polarisation lexicographique. Suite à l'analyse des cohérences obtenues dans cette base, la cohérence maximale et sa phase interférométrique associée ont été retenues. Une deuxième méthode classique est mise en oeuvre : il s'agit d'une maximisation de la cohérence, basée sur une décomposition en valeurs propres /vecteurs propres. Cette méthode donne mathématiquement la cohérence maximum atteignable, mais est aussi beaucoup plus coûteuse à mettre en oeuvre. Nous évaluons et comparons les résultats de ces deux méthodes, à la fois sur les niveaux de cohérences obtenus, et sur les phases interférométriques. Les images RSO utilisées dans ce papier sont des données acquises en bande P sur la forêt de Tapajós au Brésil.

Mots clés : Radar RSO, Polarimétrie, Interférométrie, Cohérence interférométrique.

Contribution of radar polarimetry to interferometric coherence : Application to the tropical forest of Tapajós, Brazil.

Abstract

Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry is a technique for elevation extraction. It is based on the estimation of phase difference of radar signal between two images acquired on the same area from slightly different viewing angles. The phase difference between the two images is related to terrain height and is used for Digital Elevation Models (DEM) generation. The quality of this phase is evaluated using the coherence parameter which quantifies the correlation between the two images. In parallel to interferometry which uses a fixed polarisation and generally a unique frequency, SAR polarimetry allows discrimination of intrinsic properties of radar target exploiting different polarisations. Correlation optimisation between the two images can be obtained by polarimetry and interferometry combination. This new approach is called PolInSAR technique. The work that we present consists in considering two methods to improve the interferometric phase. We propose a first method, that consists in generating coherences from couple of images in the lexicographic basis. According to the obtained coherences in this basis, the coherence of maximum magnitude and the associated interferometric phase have been retained. A second traditional method is implemented: it is about the maximization of the coherence, based on a decomposition in eigenvalues/eigenvectors. This method gives the maximum module of coherence that it can be reached mathematically, but it is also much more difficult in implementation. We evaluate and compare the results of these two methods, on the coherences obtained, as well as on the interferometric phases. SAR images used in this paper have been acquired at P band over the forest of Tapajós in Brazil.

Key words: SAR Radar, Polarimetry, Interferometry, Interferometric coherence.

1. INTRODUCTION

L'imagerie radar, par capteurs aéroportés et spatiaux est un procédé alternatif palliant partiellement aux contraintes des capteurs optiques, à savoir permettant une acquisition de jour comme de nuit et même dans les zones nuageuses.

Par ailleurs, le traitement et l'exploitation des informations apportées par l'amplitude, la phase et la polarisation de l'onde radar émise et rétrodiffusée ont ouvert des axes de recherche prometteurs et des applications diversifiées telles que, la caractérisation des états de surface par l'étude du coefficient de rétrodiffusion, la reconstitution du relief, la classification des cibles, etc…

L'interférométrie RSO est une technique basée sur la génération d'un interférogramme à partir de deux images complexes RSO de la même zone, acquises avec deux angles de vues légèrement différents. La principale application de l'interférométrie radar est la génération de Modèles Numériques d'Elévations (MNE), cependant, d'autres applications peuvent être réalisées par la technique dite « d'interférométrie différentielle » ; citons essentiellement les mouvements du sol (Berardino *et al*., 2002 ; Ferretti *et al.,* 2001), la surveillance des volcans (Beauducel *et al*., 2000) et la surveillance des mouvements de glaciers dans l'antarctique (Moll *et al.,* 2005). Dans le cas des radars aéroportés, l'interférométrie a été utilisée par Floury *et al*. (1996) pour la discrimination entre zones forestières et les zones non forestières et pour l'estimation des paramètres biophysiques des forêts sur la zone de Landes au sud de la France. Prakoso (2003) a exploité cette technique pour cartographier les zones tropicales de la forêt de Tapajõs au Brésil en utilisant des images aéroportées acquises en bande L et en bande P.

Si l'interférométrie utilise un couple d'images afin d'en déduire la hauteur d'un centre de phase, la polarimétrie exploite la nature vectorielle du champ électromagnétique (EM) et l'interaction avec la cible imagée. La polarisation de l'onde est décrite par la position du champ électrique dans le plan d'onde en émission et en réception. En imagerie radar, les polarisations linéaires sont les plus utilisées, il s'agit des polarisations horizontale (H) et verticale (V). A cet effet, les images acquises par les capteurs radar polarimétriques sont : HH, HV, VH, VV suivant la polarisation de l'onde émise et la polarisation de l'onde diffusée. Les principaux apports de la polarimétrie sont la description et la caractérisation de cibles, et leur classification.

Les données polarimétriques ont été utilisées dans le cadre de plusieurs applications, entre autres, en agronomie, pour la discrimination des types de récoltes, le contrôle de leur développement et leur état, et l'extraction de leurs paramètres bio-physiques (Ballester-Berman *et al*., 2005), ainsi que dans l'urbain en utilisant la technique de la tomographie RSO pour la séparation et la localisation directe de diffuseurs au sein d'une même cellule de résolution (Guillaso et Reigber, 2005), en cartographie pour la classification des forêts (Ferro-famill *et al*., 2005) et pour la discrimination entre la glace fine et les surfaces d'eaux (Skriver *et al*., 2003).

La polarimétrie peut être combinée avec l'information interférométrique ; on parle alors d'interférométrie polarimétrique, ou PolInSAR (Cloude et Papathanassiou, 1998). L'objectif principal des travaux que nous présentons dans cet article est de montrer l'apport de l'information polarimétrique en interférométrie. La principale grandeur déduite des mesures interférométriques est le centre de phase interférométrique. L'estimation de cette phase est d'autant plus précise que l'on dispose d'une meilleure corrélation des deux images ; l'image de cette phase est appelée interférogramme ; ses franges représentent les élévations relatives à la topographie du sol, ou aux déformations de celui-ci.

Après un bref rappel de la notion de cohérence en interférométrie RSO, nous proposons une méthode qui consiste à combiner les trois cohérences HH-HH, HV-HV et VV-VV. Notre méthode est ensuite comparée à la méthode d'optimisation de cohérence proposée par Cloude et Papathanassiou. Cette méthode est basée sur le théorème de décomposition polarimétrique aux valeurs/vecteurs propres, que nous avons implémenté. Les résultats et leurs interprétations portent essentiellement sur l'analyse et l'évaluation des deux méthodes pour l'amélioration de la cohérence et de la phase interférométriques.

2. L'INTERFÉROMÉTRIE RSO POLARIMÉTRIQUE

Les informations enregistrées par les capteurs radar polarimétriques sont liées aux paramètres qui décrivent l'orientation et de la forme des diffuseurs présents dans la cellule de résolution et ce grâce aux différents mécanismes de diffusion, qui peuvent être par exemple une diffusion de surface au sol, ou une diffusion multiple provoquée par un arbre ou un bâtiment. Pour une longueur d'onde donnée, les ondes à polarisations linéaires peuvent être émises et reçues en polarisations horizontale (H) et verticale (V). L'utilisation de ces deux polarisations en émission et en réception, permet d'introduire le concept de la matrice de diffusion qui contient les mesures du champ rétrodiffusé pour les quatre combinaisons de polarisations HH, HV, VH et VV. Dans ce cas, quelques caractéristiques de cibles apparaissent similaires en polarisations parallèles (HH et VV) ou croisées (HV et VH) , mais d'autres tendent à montrer des degrés différents de luminance d'images dans les modes HV ou VH et ce, en raison de la dépolarisation des parties constituant la cible (Ouarzeddine, 2002). Grâce à la polarimétrie, l'interférométrie RSO devient plus sensible à la distribution des objets orientés, surtout dans la végétation et les zones urbaines (Treuhaft et Cloude, 1999). Dans le domaine forestier, cet avantage permet une estimation plus précise de la hauteur des arbres ou de l'altitude de terrain couvert par la canopée (Gomez-Dans et Quegan, 2005). Dans les applications urbaines, la technique PolInSAR a été appliquée pour la détec-

tion des orientations des éléments diffuseurs (Schneider *et al*., 2005). Notons, à cet effet, que des travaux récents en polarimétrie interférométrique RSO ont été publiés. Ils sont liés aux développements importants que les capteurs radar connaissent (Marotti *et al*., 2007), (Neumann *et al.,* 2007). Ceci est confirmé par l'accroissement du nombre de capteurs aéroportés (tels les radars RAMSES en France, Emisar au Danemark et Pharus aux Pays Bas) et spatiaux (tels PalSAR au Japon et Radarsat2 au Canada).

3. CARACTERISTIQUES DES DONNEES UTILISEES

Tableau 1. Informations sur les images monovues utilisées

Résolution en distance	1.69 m
Résolution en azimut	0.43 m
Fréquence	415Mz
Ligne de base temporelle	13 mn
Ligne de base spatiale	1.5 m
Date d'acquisition	27/09/2000
Angle d'incidence	45°

Les données utilisées dans ce travail, nous ont été fournies gracieusement par la compagnie privée Aerosensing RadarSysteme GmbH (Munich, Allemagne) en 2001 et consistent en un couple d'images monovue aéroportées acquises en quadri-polarisation en bande P (λ=72 cm) par la technique double passe. La profondeur de pénétration dans le couvert végétal est importante pour cette longueur d'onde et offre ainsi la possibilité d'obtenir une information relative à la phase et à l'amplitude du signal rétrodiffusé par des diffuseurs au niveau du sol. Le tableau 1 récapitule les caractéristiques générales du système radar utilisé pour l'acquisition en double passe de ce couple interférométrique en particulier une ligne de base spatiale de 1.5 m. Ce système peut avoir d'autres valeurs de lignes de base spatiales selon la configuration imposée.

Le choix de la zone d'étude est conditionné par la disponibilité à notre niveau des données interféro-polarimétriques. La zone d'étude appartient à la forêt de Tapajós, dans le sud du port fluvial de l'Amazonie. Elle est située entre les coordonnées 54° 53' à 55° 06' longitude Est et 03° 03' à 03° 12' latitude Sud et localisée dans la ville de Sanitarém, dans l'état de Pará, Brésil. Cette zone est sous la tutelle de IBAMA (Institut Brésilien de l'environnement et des ressources naturelles renouvelables). La hauteur moyenne des précipitations annuelles est de 1 911,2 millimètres et la température moyenne est de 25°C. La région est caractérisée par un terrain présentant une faible topographie. L'élévation du terrain est comprise entre 10 m et 520 m. La taille des arbres varie entre 10 m et 25 m, avec quelques arbres atteignant des hauteurs de 30 m ou 40 m. La situation géographique de la zone d'étude est donnée en figure 1. Une étape de rééchantillonnage permettant d'obtenir une résolution de 1,72 m sur 1,69 m a été effectuée. Ceci est dans le but de retrouver mieux les formes des cibles sur l'image radar RSO.

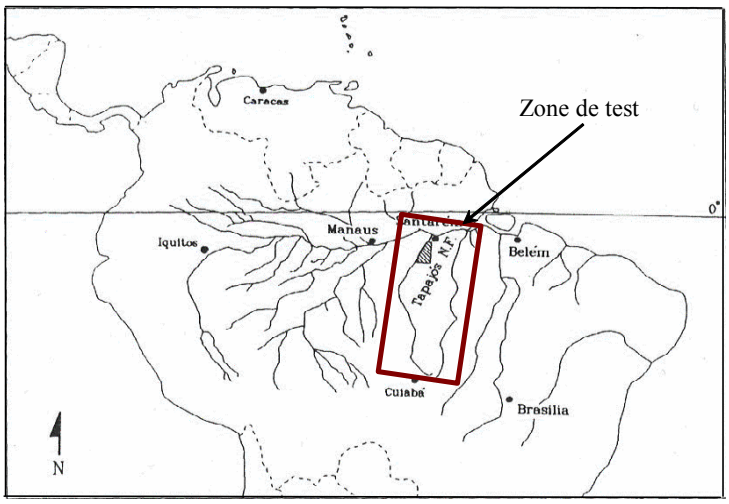


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude

Nous avons extrait de la scène originale dont la taille est de 700 pixels par 2 950 pixels deux zones de test dont la taille est de 400 x 400 pixels chacune. La zone A est choisie dans une région plane et la zone B est prise dans une région au relief plus important. Nous indiquons sur la figure 2 les zones A et B choisies. Les figures 3a, 3b et 3c représentent les images d'amplitudes obtenues dans les trois polarisations respectives HH, HV et VV pour la zone B. Nous remarquons, sur les images d'amplitude, que la rétrodiffusion des cibles peut varier d'une polarisation à l'autre. Les mesures en polarisation HV et VH sont égales en raison de l'hypothèse de réciprocité, valable en configuration monostatique et généralisable aux cibles naturelles pour un milieu linéaire qui ne présente pas d'effets magnétiques (Ballantine, 1928).

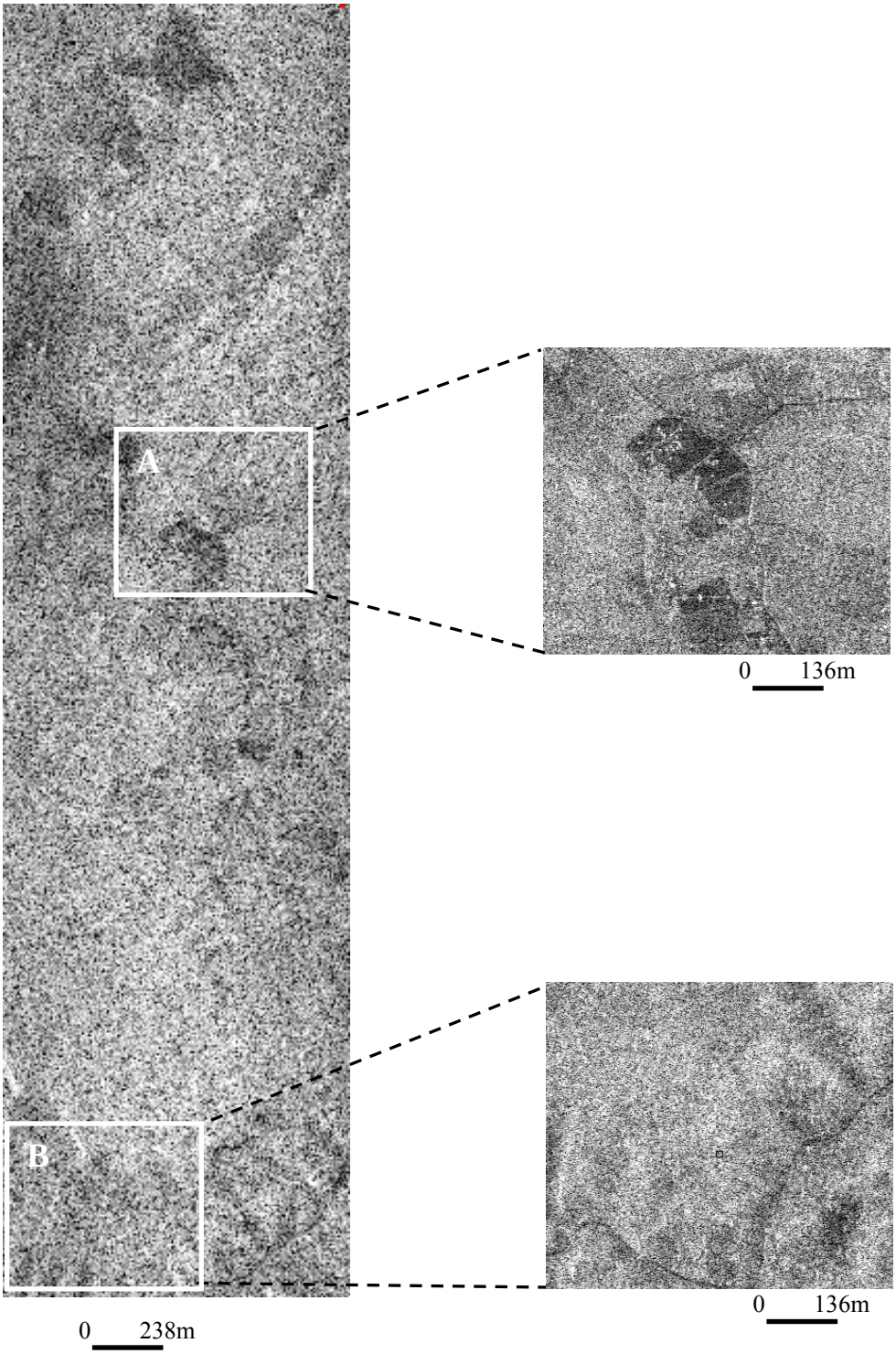


Figure 2. Zones de test choisies dans la forêt nationale de Tapajós au Brésil, polarisation HH
A: Zone plane, B: Zone à relief peu accidenté.

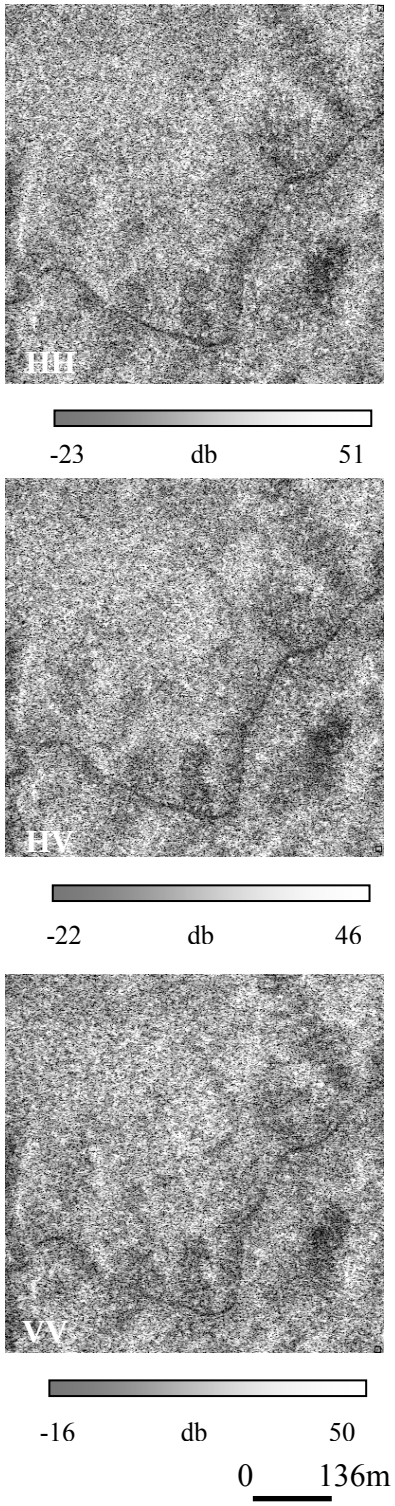


Figure 3. Images amplitude : HH , HV, VV

4. METHODOLOGIE

La méthodologie que nous avons développée est schématisée par l'organigramme donné par la figure 4. Elle repose sur deux approches de combinaison des données interféro-polarimétriques ayant pour objectif l'amélioration du coefficient de cohérence complexe. En effet, la corrélation des images interféro-polarimétrique est un indicateur de qualité de la phase interférométrique qui conditionne notamment le processus de déroulement de phase. Nous comparons deux méthodes de calcul de cohérence maximum, une première méthode originale, très simple à mettre en œuvre, et une seconde

méthode bien connue en PolInSAR, optimale au sens mathématique du terme, mais de mise en œuvre plus complexe d'un point de vue algorithmique.

La première approche est basée sur la génération des cohérences et des interférogrammes pour les polarisations de la base « lexicographique » HH-HH, HV-HV et VV-VV. Pour chaque pixel, nous calculons la cohérence maximale parmi les trois calculées (sur une fenêtre 3*3), et nous déterminons la phase interférométrique qui lui correspond. Le résultat est une nouvelle image phase que nous appelons « image phase maximale ». Dans la deuxième approche, nous utilisons la décomposition cohérente de la matrice de diffusion dans la base de Pauli (Cloude et Pottier, 1997) et l'optimisation vectorielle de la matrice de cohérence (Cloude et Papathanassiou, 1998, Papathanassiou, 1999). Le processus mis en œuvre s'appuie sur le calcul d'une nouvelle base de vecteurs propres qui servira au calcul de l'interférogramme optimisé.

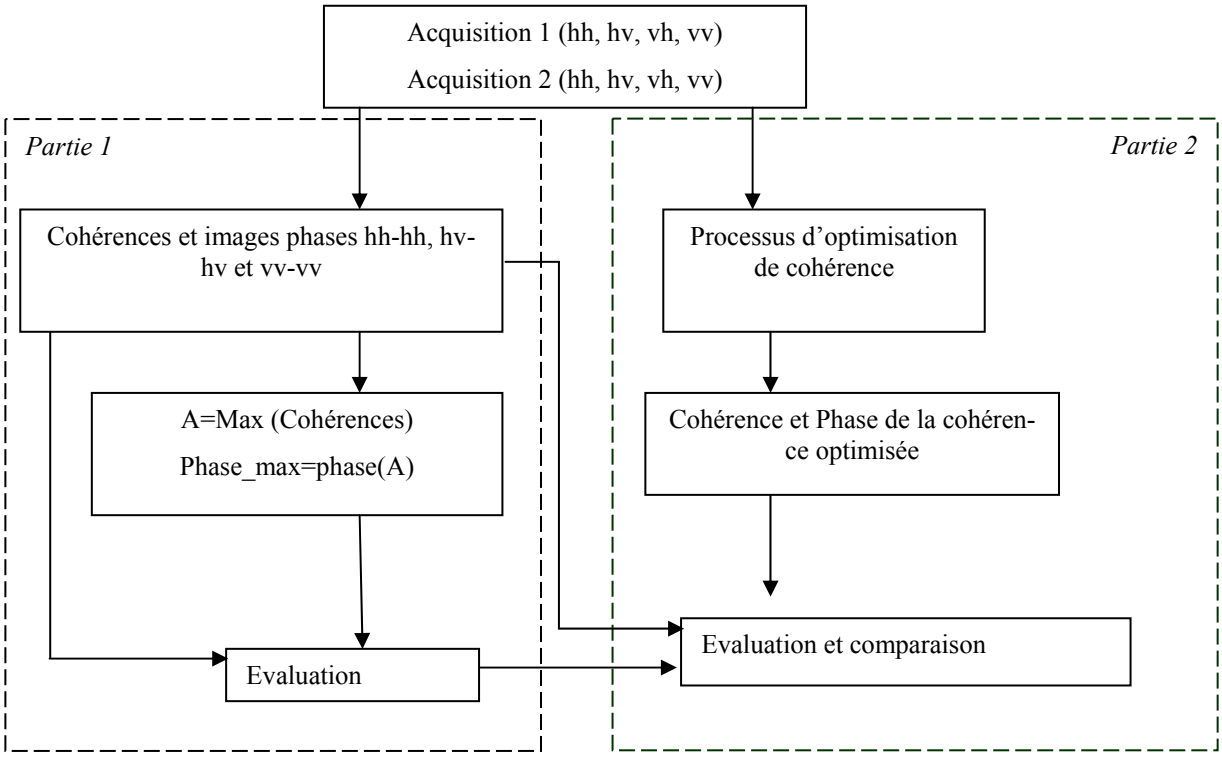


Figure 4. Synoptique de la méthodologie adoptée

4.1. Cohérence interférométrique

L'information mesurée par le capteur radar pour chaque cellule de résolution ou pixel localisé par ses cordonnées en azimut et en distance est désignée par un couple de complexes (S_1 et S_2) donnés par les expressions suivantes :

$$S_1 = A_1 e^{j\varphi_1} \qquad S_2 = A_2 e^{j\phi_2}$$

La première étape est la superposition géométrique dite aussi recalage du couple d'images de S_1 et S_2 (appelées respectivement image maître et image esclave). Cette étape conditionne la fiabilité et la précision du processus interférométrique. Pour notre cas, les images SAR polarimétriques ont été recalées par la compagnie Aerosensing à une précision du un dixième.

L'interférogramme complexe correspondant à ce couple d'images est donné par le produit de l'image S_1 et du conjugué de l'image S_2. Son expression est la suivante :

$$\gamma = \frac{\sum_{n=1}^{N} s_1^{(n)} s_2^{*(n)}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N} \left|s_1^{(n)}\right|^2 . \sum_{n=1}^{N} \left|s_2^{(n)}\right|^2}} \qquad (1)$$

Le module $|\gamma|$ représente le coefficient de corrélation appelé cohérence, N étant le nombre de pixels dans la fenêtre d'analyse et est pris égal à 3.

L'argument de γ représente la phase interférométrique.

La formulation générale de cette phase est déduite de la différence des phases globales φ_{S1} et φ_{S2} relatives à la cible observée, dans les deux images. Elles sont données par les expressions suivantes :

$$\varphi_{S1}(cible) = \frac{4\pi}{\lambda} R_{S1} + \varphi_{propre_1} + \varphi_{inst} \quad , \qquad \varphi_{S2}(cible) = \frac{4\pi}{\lambda} R_{S2} + \varphi_{propre_2} + \varphi_{inst}$$

où :

φ_{inst} est la somme de la phase du bruit de la phase liée aux conditions atmosphériques et de la phase instrumentale.

R_{S1} et R_{S2} sont les distances radar-cible relatives aux deux acquisitions. Leur différence est proportionnelle à l'élévation de la cible.

φ_{propre_1} et φ_{propre_2} sont les phases propres de la cible dans les deux acquisitions respectivement.

La différence entre les deux phases φ_{S1} et φ_{S2} est donnée par l'expression suivante :

$$\Delta\varphi(cible) = \varphi_{S1} - \varphi_{S2} = \frac{4\pi}{\lambda}(R_{S1} - R_{S2}) + \Delta\varphi_{propre} + \Delta\varphi_{inst} = \arg(S_1.S_2^*) = \phi \qquad (2)$$

On considère que le terme $\Delta\varphi_{inst}$ est négligeable, le terme $\Delta\varphi_{propre}$ est lié à l'intervalle temporel entre les deux acquisitions (décorrélation temporelle) dans le cas de l'interférométrie à double passe et à la ligne de base spatiale (décorrélation spatiale).

La valeur du coefficient de corrélation entre les deux images résulte de ces contraintes. Il est à noter qu'à basse fréquence, la décorrélation temporelle est négligeable dans le cas d'une faible ligne de base temporelle (temps qui sépare les deux acquisitions), car l'interaction s'effectue avec les éléments structuraux de la forêt de plus grande taille qui sont alors moins sensibles au vent.

4.2. Optimisation de la cohérence proposée

Pour illustrer la variabilité de la cohérence et celle des interférogrammes correspondants dans les différentes polarisations, nous donnons sur la figure 5 les images de cohérences de la zone B dans les quatre configurations polarimétriques respectives HH-HH, HV-HV, VV-VV et HH-VV. La variation du niveau de gris du noir au blanc correspond à la variation de la valeur de la cohérence de 0 à 1. Nous présentons sur la figure 6, les histogrammes des cohérences pour les deux zones A et B. Pour ces deux zones, les images de cohérence présentent une distribution similaire pour les trois premières combinaisons, ce qui n'est pas le cas pour la combinaison HH-VV.

D'après les statistiques données au tableau 2, pour la zone A , les cohérences HH-HH, HV-HV et VV-VV possèdent respectivement des moyennes de 0,68, 0,69 et 0,72, alors que la cohérence HH-VV présente des valeurs de cohérence nettement plus faibles égale en moyenne à 0,40. Il en est de même pour la zone B où les moyennes des cohérences HH-HH, HV-HV et VV-VV sont respectivement de 0,58, 0,57 et 0,57 et celle de la cohérence HH-VV est de 0,40.

Cette valeur moyenne faible notée au niveau de la cohérence HH-VV est due d'une part à la forte dépolarisation des cibles volumiques présentes dans le site d'étude qui correspond à une zone forestière et d'autre part au changement de polarisation.

Les histogrammes de la figure 6 et les statistiques données par le tableau 2, montrent la dépendance entre la corrélation et la topographie. Plus la cible est plane et plus la cohérence est élevée. Ceci est confirmé par la forme des histogrammes relatifs à la zone A qui sont plus étroits et présentent un nombre d'apparition maximum pour une corrélation plus importante (fréquences d'apparition maximale de 2 587 pour une corrélation de 0,81) comparés à ceux de la zone B (fréquences d'apparition maximale de 1 512 pour une corrélation de 0,70) .

Nous avons, aussi, généré les interférogrammes en utilisant différentes combinaisons de polarisations entre les deux acquisitions pour montrer que chaque combinaison fournit une information sur la différence de phase entre les deux acquisitions. Nous présentons sur la figure 7, les interférogrammes de la zone B. Notons que sur un interférogramme, la dégradation du niveau de gris allant du blanc au noir représente un cycle de phase de 2π radians appelé frange. Les interférogrammes obtenus paraissent bruités, réduisant ainsi la précision de l'estimation de l'altitude. Néanmoins, les

franges des interférogrammes HH-HH, HV-HV et VV-VV sont mieux délimitées que celles de l'interférogramme HH-VV pour les raisons citées précédemment.

Afin d'exploiter l'information de phase apportée par chaque polarisation, nous avons calculé la cohérence maximale au niveau local en comparant les trois cohérences pour chaque pixel. Nous l'avons générée à partir de l'expression que nous avons définie comme suit :

$$Coh_{max} = Max(Coh_{hh\text{-}hh}, coh_{hv\text{-}hv}, coh_{vv\text{-}vv}) \quad (3)$$

La cohérence HH-VV n'est pas prise en considération. L'équation 3 est justifiée par les figures 5-7, où nous montrons sur les images de cohérences et les histogrammes correspondant à cette combinaison de polarisation une nette atténuation des niveaux de gris et un décalage vers la valeur nulle.

Pour chaque cohérence maximale trouvée relative à un pixel donné, nous avons calculé la phase interférométrique correspondante. L'image obtenue forme « l'interférogramme maximal » donné par:

$$Phase_interf = phase (Coh_{max}) \quad (4)$$

Pour évaluer les résultats de cette approche, nous avons tracé les profils de cohérences et calculé les résidus (présentés dans la partie résultat).

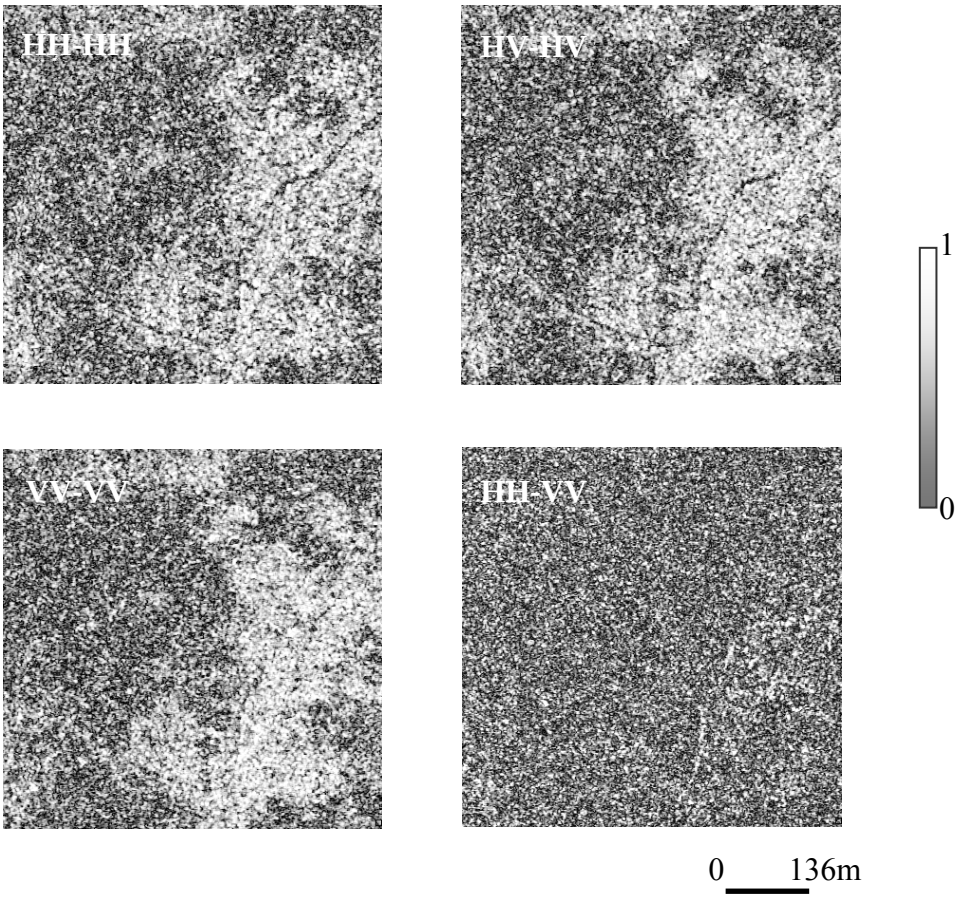


Figure 5. Zone B : Images de cohérence calculées à partir des images de polarisations singulières.

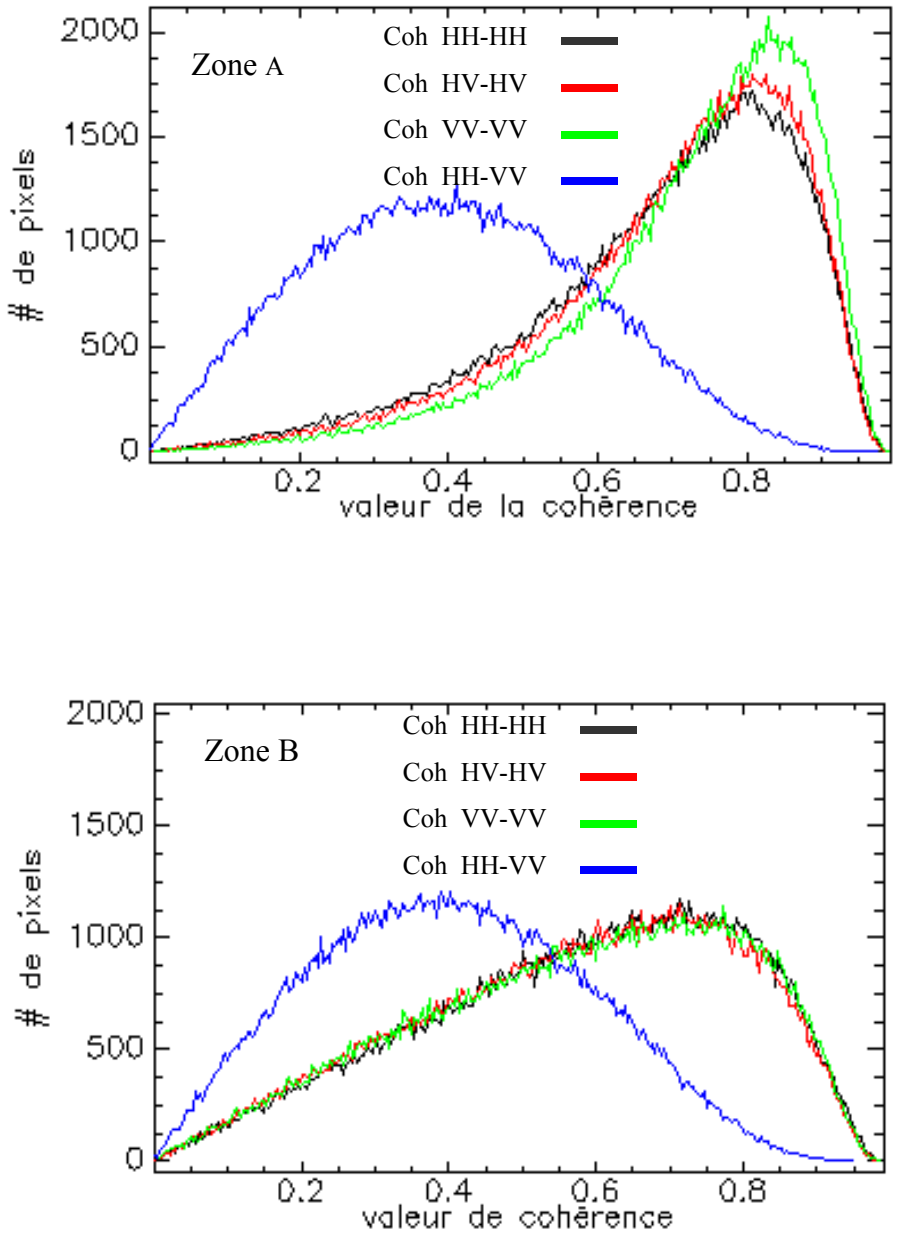


Figure 6. Histogrammes des cohérences singulières. Zone A et Zone B.

4.3. Optimisation de la cohérence de Cloude et Papathanassiou

Nous utilisons les quatre images radar monovues acquises dans les quatre polarisations. A chaque pixel correspond une matrice de diffusion donnée comme suit:

$$S = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \tag{5}$$

Afin de séparer les types de mécanismes de diffusions associés aux cibles au niveau du sol, la matrice de diffusion est décomposée sur des composantes indépendantes. La base de transformation la plus proche de la rétrodiffusion des ci-

bles au sol est celle de Pauli. Elle exprime la diffusion de la cible sous trois types : la diffusion surface, double rebond et la diffusion multiple. Elle est représentée par le vecteur de Pauli :

$$\vec{k}_p = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[S_{hh} + S_{vv}, S_{vv} - S_{hh}, 2S_{vh}\right]^T \tag{6}$$

T indique l'opérateur transposé.

Nous rappelons ici pour mémoire brièvement le principe de la méthode de Cloude et Papathanassiou (Cloude et Papathanassiou, 1998).

Le produit interférométrique des deux images est calculé au moyen des vecteurs de Pauli du couple interféro-polarimétrique $\left(\vec{k}_1, \vec{k}_2\right)$ représentant l'image maître S_1 et l'image esclave S_2:

$$\vec{k}_{1,2} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[S_{1,2_{hh}} + S_{1,2_{vv}}, S_{1,2_{vv}} - S_{1,2_{hh}}, 2S_{1,2_{vh}}\right]^T \tag{7}$$

Le calcul du produit tensoriel des éléments des vecteurs $\vec{k}_1 \; et \; \vec{k}_2$ constitue la première étape pour l'optimisation de la cohérence. Ce produit est donné par l'expression suivante :

$$\left[T_6\right] = \left\langle \begin{bmatrix} \vec{k}_1 \\ \vec{k}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{k}_1^{\,*T} & \vec{k}_2^{\,*T} \end{bmatrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} \left[T_{11}\right] & \left[\Omega_{12}\right] \\ \left[\Omega_{21}\right]^{*T} & \left[T_{22}\right] \end{bmatrix} \tag{8}$$

où

- $[T_6]$ est une matrice positive hermitienne semi-définie 6x6,
- $[T_{11}]$ et $[T_{22}]$ sont des matrices 3x3 contenant l'information polarimétrique pour chaque image.
- $[\Omega_{12}]$ contient l'information interférométrique de phase des différents canaux entre les deux acquisitions.

L'optimisation consiste à rechercher une nouvelle base de projection des composantes de la matrice $[\Omega_{12}]$ dans laquelle l'information interférométrique est maximisée.

Il s'agit donc de définir deux vecteurs complexes normalisés $\vec{w}_1 \; et \; \vec{w}_2$ qui permettront d'obtenir les nouveaux coefficients de diffusion μ_1 et μ_2 vérifiant :

$$\mu_1 = \vec{w}_1^{*T}\vec{k}_1 \quad ; \quad \mu_2 = \vec{w}_2^{*T}\vec{k}_2 \tag{9}$$

A partir desquels nous déterminons la phase interférométrique

$$\phi_i = \arg\left(\mu_1 \mu_2^{\,*}\right) \tag{10}$$

L'expression vectorielle généralisée et normalisée de la cohérence dans la base $\left(\vec{w}_1, \vec{w}_2\right)$ est donnée par :

$$\gamma\left(\vec{\mu}_1, \vec{\mu}_2\right) = \frac{\left|\left\langle \vec{w}_1^{*T}\left[\Omega_{12}\right]\vec{w}_2 \right\rangle\right|}{\sqrt{\left\langle \vec{w}_1^{*T}\left[T_{11}\right]\vec{w}_1 \right\rangle \left\langle \vec{w}_2^{*T}\left[T_{22}\right]\vec{w}_2 \right\rangle}} \tag{11}$$

La détermination des vecteurs $\vec{w}_1 \; et \; \vec{w}_2$ pour lesquels γ est maximale passe par la résolution des équations matricielles 3x3 :

$$\left[T_{11}\right]^{-1}\left[\Omega_{12}\right]^{*T}\left[T_{22}\right]^{-1}\left[\Omega_{12}\right]\vec{w}_1 = \nu\,\vec{w}_1 \tag{12}$$

$$[T_{22}]^{-1}[\Omega_{12}]^{*T}[T_{11}]^{-1}[\Omega_{12}]\vec{w}_2 = \nu\,\vec{w}_2 \tag{13}$$

La solution des équations (12) et (13) donne trois valeurs propres réelles ν_k (k=1,2,3) correspondant à trois paires de vecteurs propres représentant les mécanismes optimaux de diffusion. Les valeurs des trois cohérences optimisées sont obtenues en prenant la racine carrée de ν_k.

La valeur propre maximale, sert à déterminer les vecteurs $\vec{w}_{1opt}$ et $\vec{w}_{2opt}$ qui sont utilisés pour calculer l'interférogramme comme suit:

$$\begin{aligned} \text{interferogramme} &= \arg(\mu_{1opt}\mu^{*}_{2opt}) \\ &= \arg\left(\vec{w}^{*T}_{1opt}[\Omega_{12}]\vec{w}_{2opt}\right) \end{aligned} \tag{14}$$

Dans le cas général, l'optimisation de Cloude et Papathanassiou donnent deux vecteurs $\vec{w}_{1opt}$ et $\vec{w}_{2opt}$ différent l'un de l'autre, elle est appelée polarimétrie « non contrainte » (Gomez-Dans and Quegan, 2005). Ceci signifie avoir deux états de polarisation différents qui décrivent la même cible. Ce qui n'est pas un cas réel.

Dans le cas où on force l'égalité des deux vecteurs d'optimisation $\vec{w}_{1opt} = \vec{w}_{2opt}$ par l'approche de la polarimétrie « contrainte », le même état de polarisation est retrouvé dans les deux images. Il a été démontré alors que cette approche permet de stabiliser l'algorithme de Cloude et papathanassiou et donne un sens physique aux états de polarisations qui résultent en des mesures d'élévations plus précises. Néanmoins cette étude n'a pas fait l'objet de notre article.

La méthode de Cloude et Papathanassiou a été mise en œuvre et évaluée. Les résultats ont été comparés à ceux de la méthode que nous avons proposée.

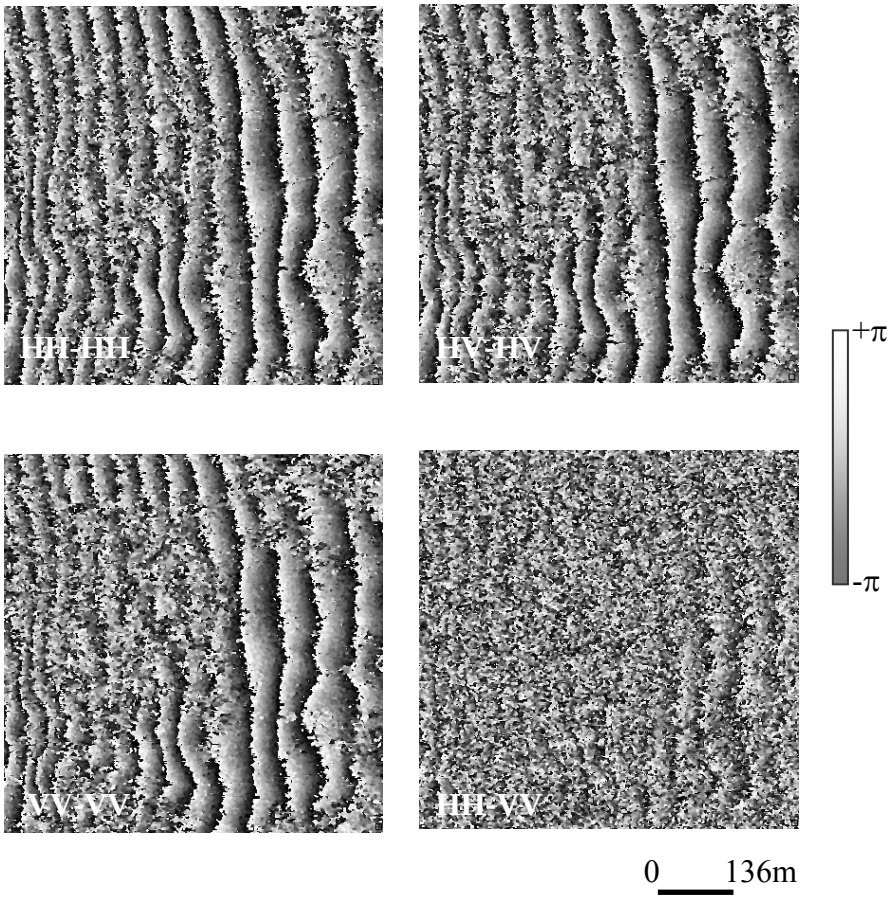


Figure 7. Interférogrammes issus des combinaisons des images SLC.

5. RESULTATS ET EVALUATION

Dans cette section, on présente et on évalue les résultats. Une discussion de l'influence de la topographie sur la cohérence sera aussi présentée.

5.1. Evaluation par les cohérences

Etant donnée la similarité des distributions des cohérences HH-HH, HV-HV et VV-VV (figure 6), nous avons comparé uniquement la cohérence HH-HH à la cohérence maximale. Nous présentons sur la figure 8, l'image de cohérence obtenue à l'aide de la méthode que nous avons proposée et l'image de cohérence HH-HH. Sur la figure 9, on trouvera les histogrammes correspondants. Pour la zone de test A, la plus forte probabilité de la cohérence maximale correspond à un coefficient de corrélation de 0,88 (2 587 pixels /160 000 pixels), et la probabilité maximale de la cohérence HH-HH (1 713/ 160 000) est atteinte pour un coefficient de corrélation de 0,80.

Quant à la zone de test B, la probabilité la plus élevée (1 512 pixels /160 000 pixels) pour la cohérence maximale, correspond à un coefficient de corrélation de 0,81 et celle de la cohérence HH-HH, (1 105/ 160 000) à un coefficient de corrélation de 0,73.

L'image de la cohérence maximale donnée sur la figure 8, est plus claire que la cohérence HH-HH (voir parties encadrées). L'histogramme correspondant possède une distribution de variance plus faible et est plus décalé vers la valeur 1. Ceci est valable pour les zones A et B. Par ailleurs, la moyenne de la cohérence maximale de la zone B est plus faible si on la compare à celle de la zone A. Ceci est dû aux effets de décorrélations géométriques, causés par le mode d'acquisition du RSO dans les zones de reliefs accidentés (voir tableau 2).

Tableau 2. Statistiques des cohérences

	Zone A				
	min	max	moy	cohérence	Nb d'occurence
hh-hh	0.0019	0.99	0.68	0.80	1713
hv-hv	0.0037	0.98	0.69	0.81	1742
vv-vv	0.0070	0.99	0.72	0.83	1959
hh-vv	0.0002	0.97	0.40	0.38	1205
maximale	0.1565	0.99	0.81	0.88	2587
Opt1	0.0000	0.99	0.87	0.90	5330
Opt2	0.0000	0.95	0.72	0.76	2559
Opt3	0.0000	0.86	0.43	0.48	1228

	Zone B				
	min	max	moy	cohérence	Nb d'occurence
hh-hh	0.0012	0.99	0.58	0.73	1105
hv-hv	0.0022	0.98	0.57	0.73	1105
vv-vv	0.0032	0.98	0.57	0.73	1105
hh-vv	0.0004	0.94	0.40	0.38	1155
maximale	0.0924	0.99	0.70	0.81	1512
Opt1	0.0000	0.89	0.70	0.76	2729
Opt2	0.0000	0.84	0.49	0.50	1447
Opt3	0.0000	0.76	0.19	0.10	1380

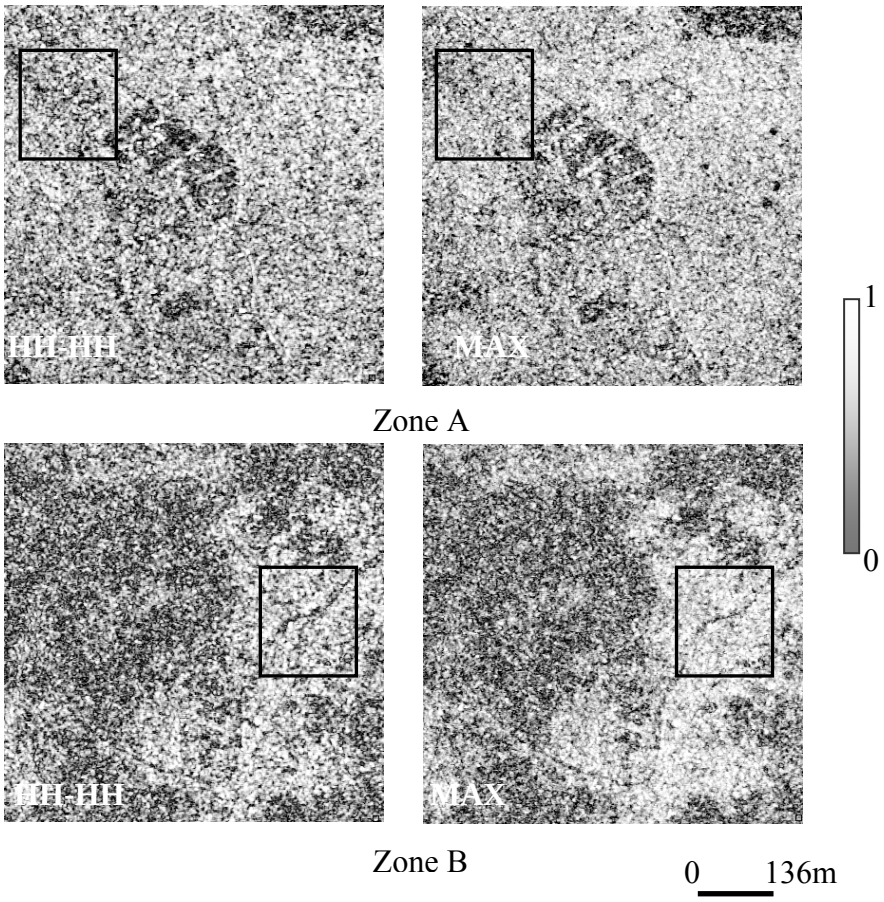


Figure 8. Cohérences HH-HH et maximale pour les zones A et B.

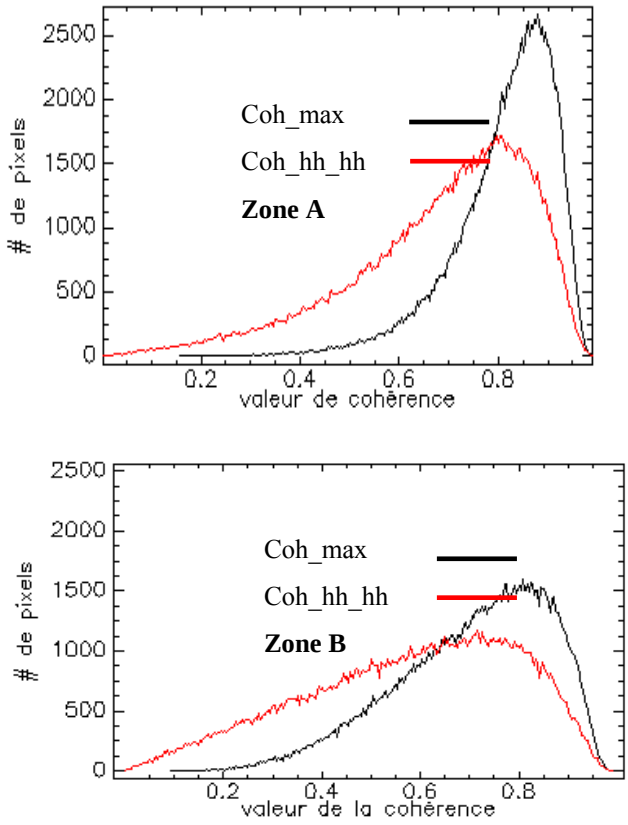


Figure 9. Histogrammes des cohérences HH-HH et maximale pour les zones A et B.

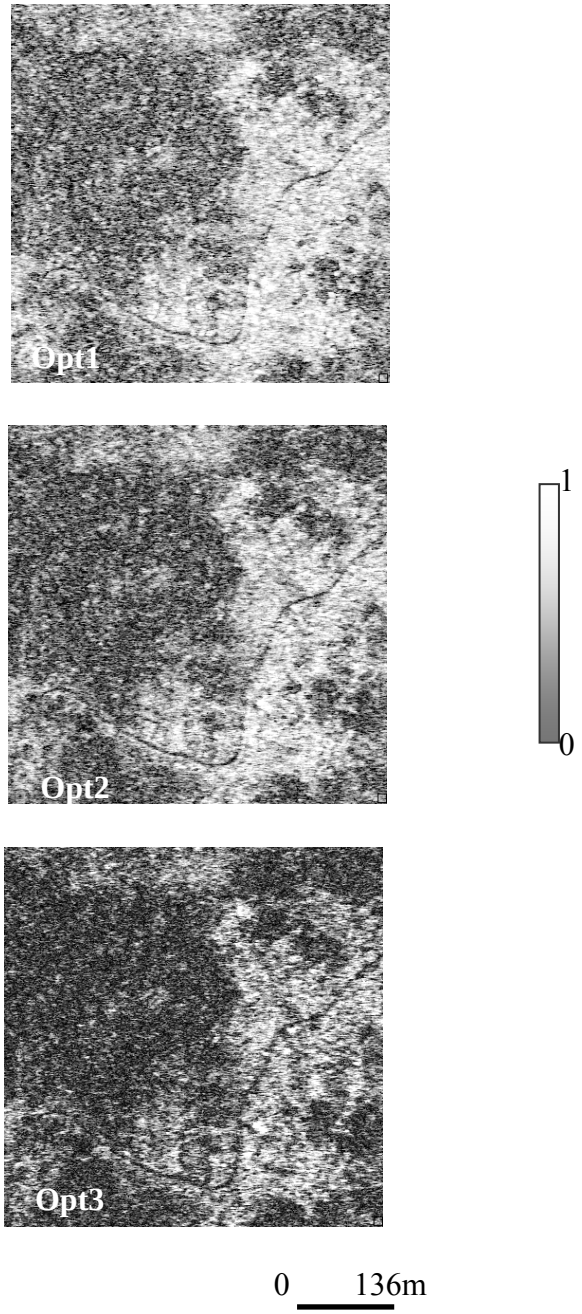


Figure 10. Cohérences issues du processus d'optimisation. 1re Cohérence (optimisée), 2e cohérence et 3e cohérence

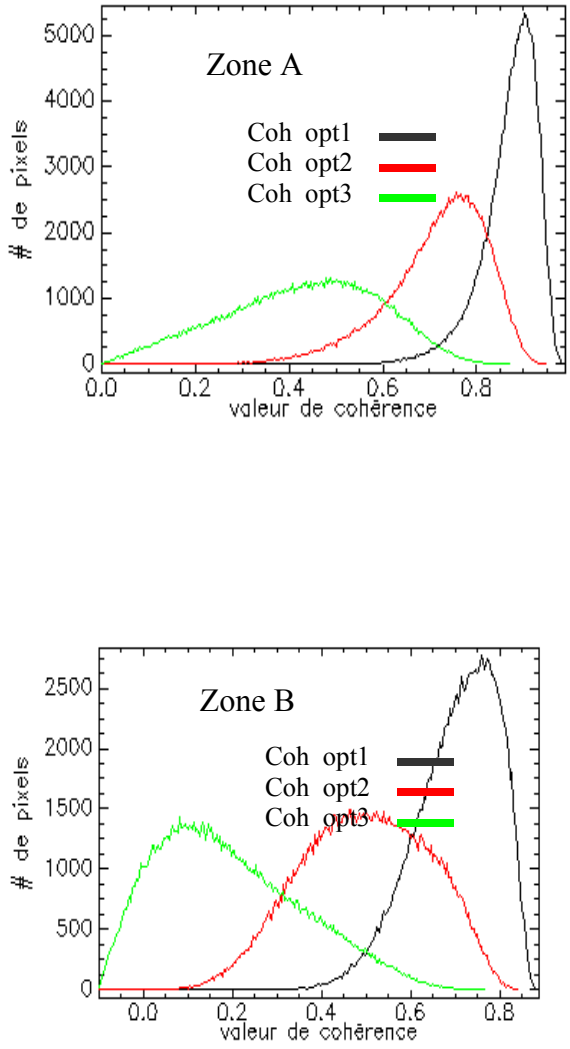


Figure 11. Histogrammes des cohérences issues du processus d'optimisation pour les zones A et B.

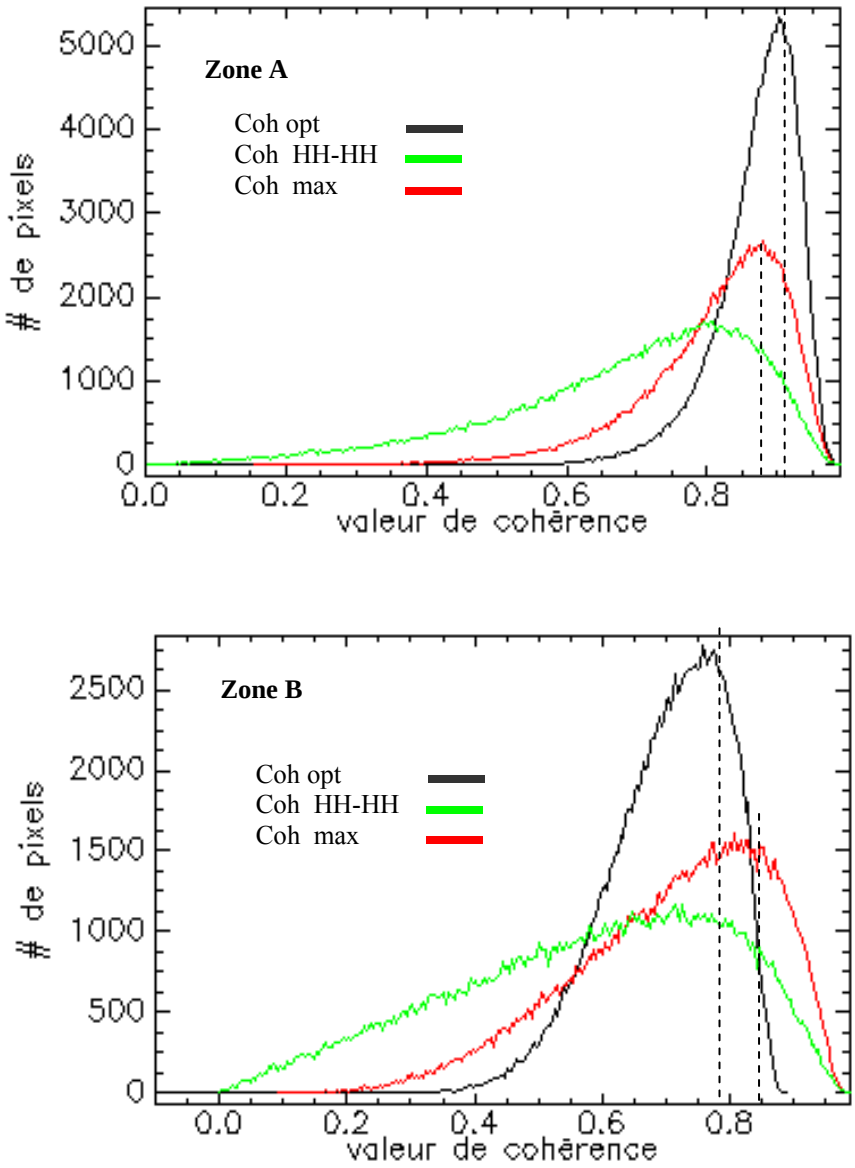


Figure 12. Histogrammes des cohérences optimisée, maximale et HH-HH.

Pour l'évaluation de la méthode de Cloude et Papathanassiou, nous avons représenté sur la figure 10, les images de cohérence de la zone B, générées par le processus d'optimisation. La première cohérence optimisée appelée opt1 (figure 10a) présente un nombre plus important des valeurs qui s'approchent de 1 comparé à celui des deux autres cohérences appelées opt2 et opt3.

Les histogrammes correspondant aux cohérences optimisées pour les zones A et B sont représentés sur la figure 11. Ces histogrammes montrent que pour la zone A, la première image de cohérence présente une probabilité maximale (5 330/160 000) correspondant à un coefficient de corrélation de 0,90. Pour la deuxième cohérence, l'histogramme a un maximum correspondant à une probabilité de 2 559/160 000 pour un coefficient de corrélation de 0,76 et pour la dernière cohérence, le maximum de l'histogramme est proche de l'origine indiquant une faible corrélation de 0,48 pour un maximum de pixels estimé à 1 228.

Pour la zone B qui représente une zone de relief peu accidentée, la première image de cohérence présente une probabilité maximale de 2 729/160 000 pour un coefficient de corrélation de 0,76. Les deux autres cohérences présentent des corrélations plus faibles. Les valeurs de la deuxième et de la troisième cohérences sont reportées au tableau 2.

A cet effet, nous avons comparé la première cohérence optimisée des zones A et B aux cohérences max et HH-HH (figure 12) et nous avons vérifiée que les performances de la méthode d'optimisation diminuent lorsque les effets de décorrélations géométriques augmentent.

A partir des cohérences données au tableau 2, nous remarquons que pour la zone A, la plupart des valeurs de la cohérence optimisée sont élevées. Les valeurs de la cohérence maximale sont aussi élevées, mais relativement à celles de la cohérence HH-HH. Pour la zone B, nous avons les mêmes constatations sauf que les valeurs sont moins élevées en raison de la forte décorrélation surtout en ce qui concerne la cohérence HH-HH. Ceci résulte de la sensibilité des images RSO aux variations topographiques.

5.2 : Evaluation par les interférogrammes

Les interférogrammes obtenus à partir de la cohérence optimisée et à partir de la cohérence maximale sont moins bruités que l'interférogramme HH-HH et ce, indépendamment de la combinaison de polarisation prise en considération pour le calcul de celui-ci. Ceci est vérifié pour la zone A et pour la zone B, (voir parties encadrées, figure 13).

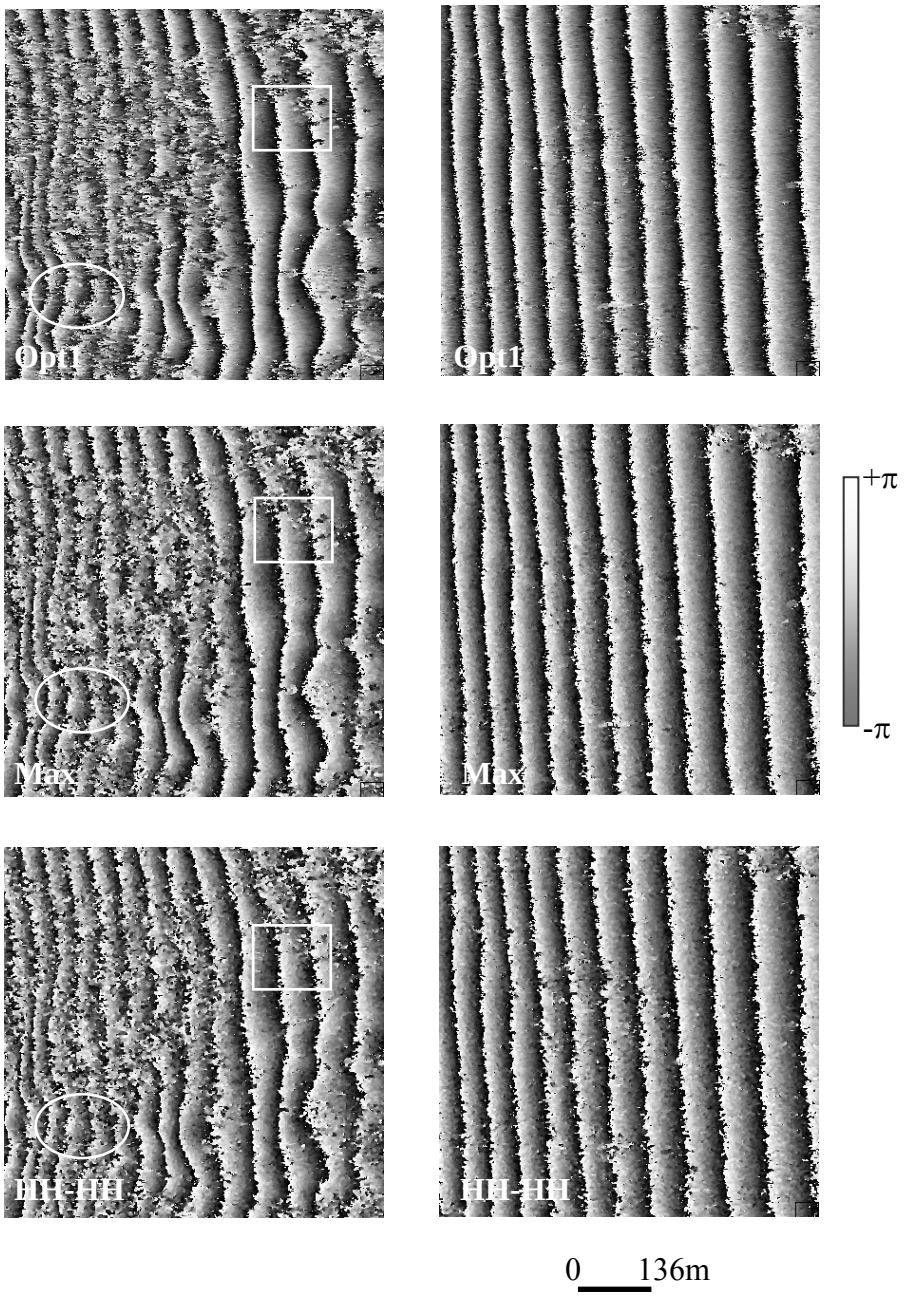


Figure 13. Interférogrammes optimisé, maximal et HH-HH.

Par ailleurs, nous constatons que les transitions des franges sont plus lisibles et bien délimitées sur l'interférogramme optimisé là où la décorrélation est peu importante. Dans le cas contraire, nous constatons que la délimitation des franges est complètement perdue sur l'interférogramme optimisé. Ce qui n'est pas le cas sur l'interférogramme maximal (figure 13, zones encerclées).

Pour cela, nous avons tracé les profils des interférogrammes optimisé, maximal et HH-HH pour deux zones de corrélations différentes (figure 14) et nous les avons comparés aux profils d'un interférogramme idéal (en couleur orange).

Nous remarquons que le profil le plus proche de celui d'une phase parfaite et qui présente moins de transitions brusques sur une frange, correspond à celui de la phase optimisée pour les deux échantillons que nous avons sélectionnés car cette phase présente moins de bruit. Néanmoins, le profil de la phase maximale, surtout pour la zone peu bruitée s'approche mieux de celui de la phase idéale que le profil de la phase HH-HH.

Il est à noter que pour les interférogrammes générés par la méthode d'optimisation (figure 15), seul le premier (figure 15a) est pris en considération. Le deuxième et le troisième interférogrammes (figure 15b - 15c) correspondant aux cohérences optimisées opt2 et opt3 sont pratiquement inexploitables par rapport aux interférogrammes calculés dans la base (H , V).

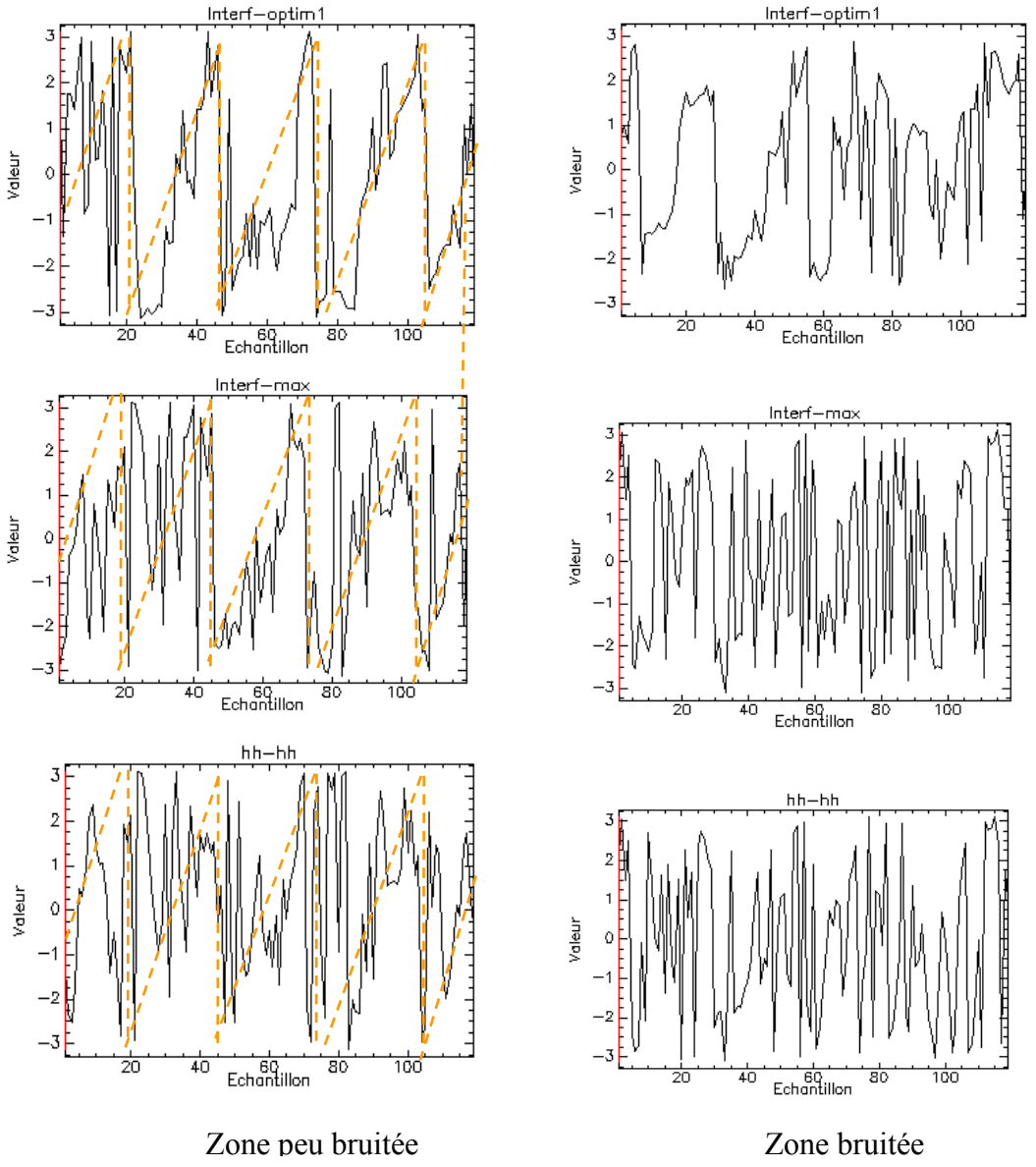


Figure 14. Profils d'interférogrammes : optimisé, maximal et HH-HH. En orange, la phase idéale.

5.3. Evaluation par le taux de résidus

Du fait de la visée latérale du radar, les images RSO sont extrêmement sensibles aux effets de relief. Il se crée ainsi des distorsions géométriques tels que l'effet de compression, de recouvrement et l'effet d'ombre. Ces distorsions induisent lors du calcul de la phase interférométrique ce qu'on appelle les résidus. Par ailleurs, il existe d'autres facteurs qui sont à l'origine des résidus tels que les décorrélations spatiale et temporelle et le bruit thermique. La présence des résidus rendent les franges ambiguës et déconnectées. Pour illustrer l'existence des résidus sur un interférogramme de valeurs normalisées nous donnons sur la figure 16, un exemple de calcul des résidus sur une fenêtre d'image phase. Les valeurs des résidus ne peuvent être que +1 ou -1.

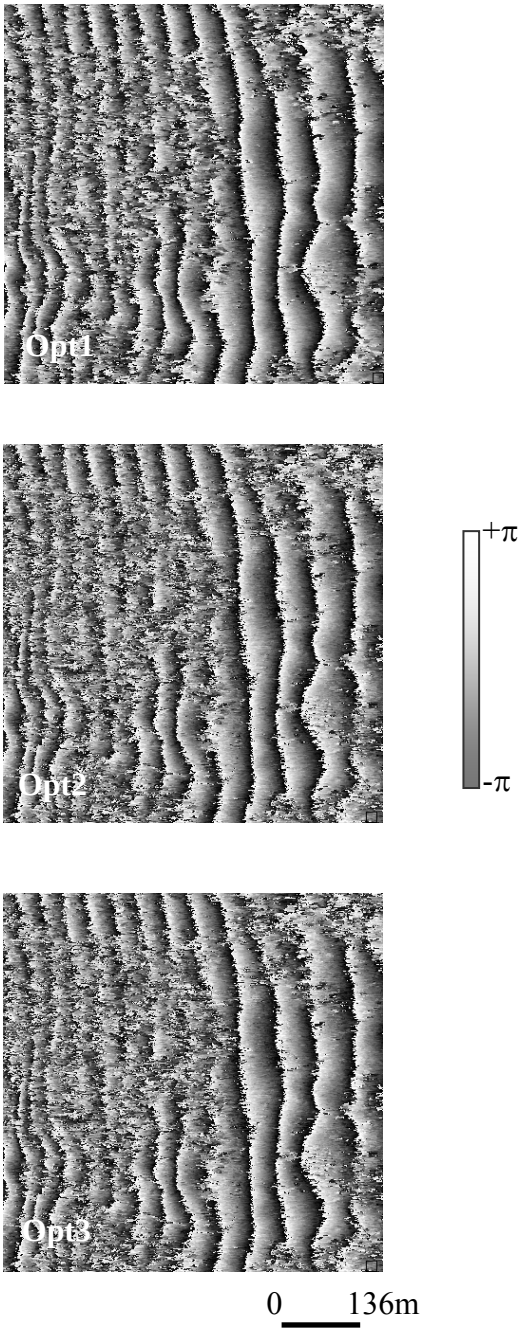


Figure 15. 1er interférogramme optimisé , 2e interférogramme , 3e interférogramme.

0.2		0.3		0.2		0.1
	0		0		0	
0.1	←	0.4		0.3	←	0.9
↓	-1	↑	0	↓	+1	↑
0.9	→	0.6		0.5	→	0.8
	0		0		0	
0.8		0.7		0.6		0.7

Figure 16. Exemple de calcul des résidus dans un interférogramme

Residu1= ((0.4-0.6)+(0.1-0.4)+(0.9-0.1)+(0.6-0.9))
= -0.2-0.3+(0.8)-0.3
= -0.2-0.3-0.2-0.3=
= -1

Residu 2= ((0.9-0.8)+(0.3-0.9)+(0.5-0.3)+(0.8-0.5))
= 0.1+(-0.6)+0.2 +0.3
= 0.1+0.4+0.2+0.3
= +1

Un des moyens de minimiser le nombre de résidus est le filtrage des interférogrammes avant l'étape de déroulement de phase (Lee *et al.,* 1998). Cependant, l'intégration de l'information polarimétrique peut aussi, réduire le nombre de résidus et permet ainsi d'améliorer les résultats de déroulement de phase.

Pour montrer cet apport, nous avons calculé les résidus des interférogrammes optimisé, maximal et HH-HH. Nous avons considéré une zone de taille 120x80 pixels, que nous avons agrandie afin de mieux visualiser la densité des résidus dans les différents interférogrammes. Les images des résidus sont données à la figure 17. Nous remarquons que le nombre de résidus est le plus faible dans l'interférogramme optimisé (1 729). L'interférogramme maximal (3 780) et l'interférogramme HH-HH (4 251) présentent plus de résidus. Les statistiques de ces résidus sont données au tableau 3.

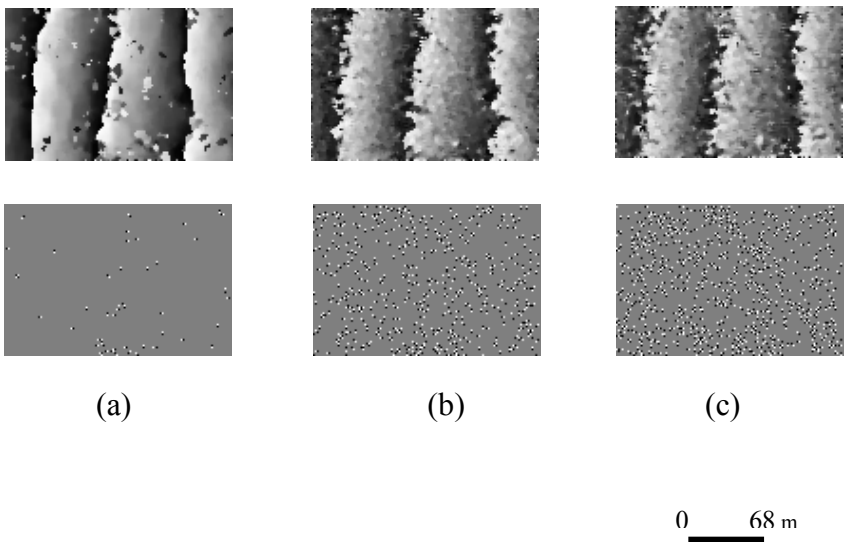


Figure 17. Calcul du nombre de résidus dans les interférogrammes : optimisé (a), maximal (b) et HH-HH (c).

Tableau 3. Statistiques des résidus pour une zone de 120x80 pixels

	Interférogramme Optimisé	Interférogramme Max	Interférogramme HH-HH
Nombre de résidus	1729	3780	4251
Pourcentage	18	39	44

Les interférogrammes données sur les figures 7, 13 et 15 comportent l'effet de la terre plate qui est conservée dans les deux approches et ne nuit pas à la comparison. Dans la partie suivante, l'effet de la terre plate est enlevé pour permettre une étape de déroulement plus rapide.

5.4. Evaluation par les phases déroulées

Le déroulement de phase est effectué par la méthode de Constantini (Constantini, 1998). Nous donnons pour illustration sur la figure 18, l'interférogramme, l'image des residus et la phase déroulée correspondant à la méthode de cloude et Papathanassiou.

Comme nous ne disposons pas de points de références (points GPS) de la région de test, nous avons pris la phase déroulée par la méthode d'optimisation comme référence à laquelle nous avons comparée les phases déroulées générées à partir des interférogrammes de la méthode proposée et à partir de la combinaison de polarisation HH-HH.

Les résultats sont évalués au moyen des profils de phase déroulées données pour deux points sur la figure 19.

Sur ces profils, la phase déroulée générée par la méthode proposée s'approche mieux de la phase optimisée. La phase HH-HH présente cependant des pics (voir zones encerclées) de valeurs différentes aux deux autres phases.

Nous visualisons sur la figure 20 les phases déroulées en 3D de la méthode de cloude/Papathanassiou et de celle de la méthode proposée. L'aspect visuel des deux phases déroulées apparaît similaire mais des différences sont relevées sur certaines zones (zones encadrées). Ce constat est confirmé par les fluctuations au niveau des profils.

Les différents tests menés montrent que la méthode d'optimisation est d'autant plus efficace que la décorrélation est peu importante. Toutefois, l'approche proposée reste une bonne alternative lorsque l'on veut éviter une théorie mathématique complexe et coûteuse à mettre en œuvre. Il est à noter que pour une image de taille 700 x 2 950 pixels le temps de calcul estimé sur la même machine est de 2h 47mn pour la méthode de Cloude /Papathanassiou et de 1mn 9s pour la méthode proposée.

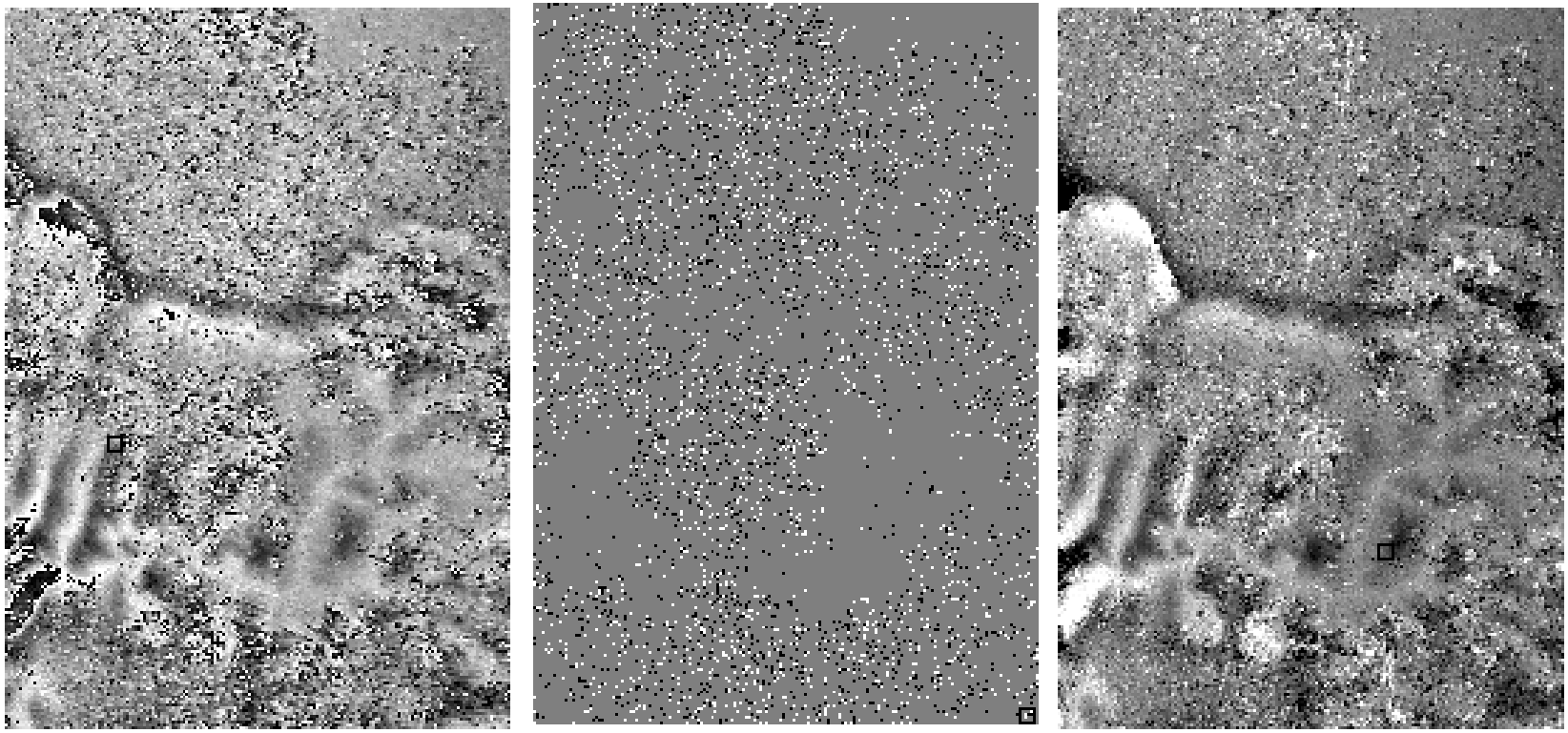


Figure 18. Interferogramme (a), image des résidus (b) et phase déroulée (c). La taille de l'image est de 700 x 2 950 pixels.

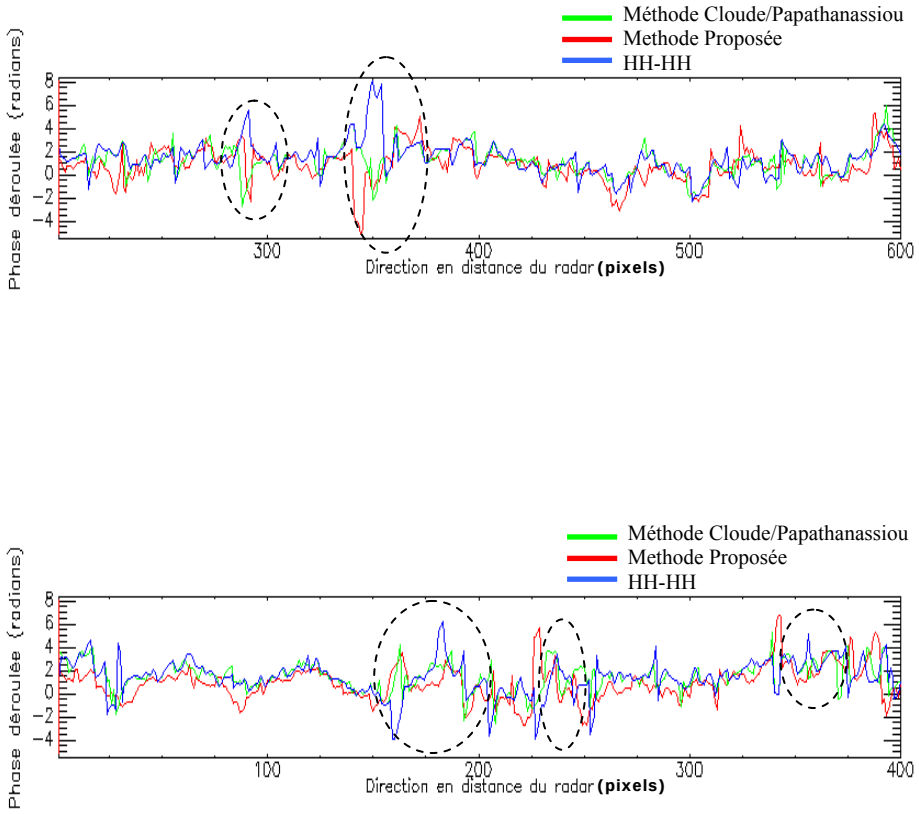
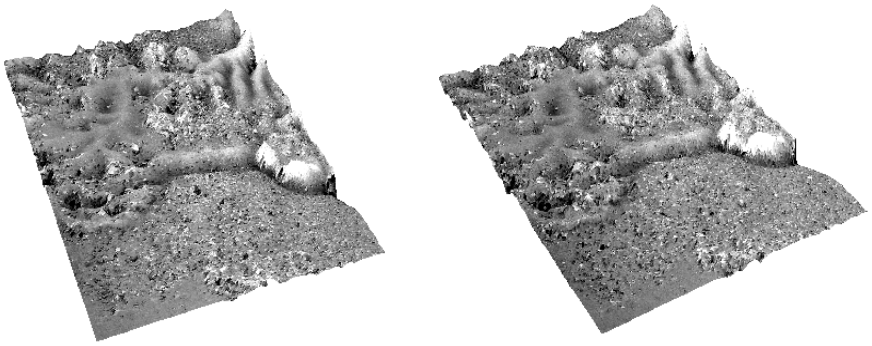


Figure 19. Deux profiles de phases déroulées. En rouge : la methode Cloude / Papathanassiou, en vert la méthode proposée et en bleu la phase HH-HH.



a) b)

Figure 20. Phases déroulées visualisée en 3D, Méthode Cloude / Papathanassiou (a), Méthode proposée (b)

6. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté et mis en oeuvre deux approches permettant d'améliorer la cohérence interférométrique en utilisant les avantages de la polarisation pour un système RSO complètement polarimétrique.

L'approche proposée résulte en une cohérence maximale à l'aide de laquelle nous avons calculé la phase interférométrique. Cette procédure nous a permis de minimiser le bruit dans l'interférogramme.

La deuxième approche se base sur le calcul des valeurs propres/vecteurs propres de la matrice de cohérence des données interférométriques polarimétriques. C'est une approche d'optimisation au sens mathématique du terme proposée par Cloude et Papathanassiou qui donne trois cohérences dont la première est utilisée pour le calcul de la phase interférométrique.

Nous avons comparé la première cohérence optimisée à la cohérence maximale pour illustrer l'apport significatif en terme de qualité d'interférogramme. Cette approche s'est révélée efficace particulièrement pour la minimisation du bruit dans les interférogrammes RSO en utilisant le profil de la phase interférométrique. La méthode que nous avons proposée est recommandable comparée à la cohérence conventionnelle, et avantageuse si l'on veut améliorer la qualité de la phase par une méthode simple de mise en oeuvre.

La mise en oeuvre des différentes étapes de l'optimisation de cohérence a mis en valeur l'apport de la polarimétrie en interférométrie RSO dans les zones forestières.

L'étape de déroulement de phase vient appuyer les résultats précédents données par la cohérence et par la qualité de l'interférogramme. La phase déroulée de la méthode proposée s'approche plus de la phase optimisée déroulée si nous la comparons par rapport à la phase déroulée issue de la combinaison HH-HH.

Ainsi, la combinaison des données interférométriques polarimétriques est prometteuse pour la génération des MNE dans les zones de végétation et les zones forestières, bien que ces performances soient altérées par les différents types de décorrélation. Si celles-ci sont importantes, l'algorithme d'optimisation ou la méthode proposée sont inefficaces car la corrélation entre les deux images RSO reste basse indépendamment du choix de la polarisation.

Dans un travail ultérieur, il sera intéressant d'appliquer les méthodes mises en oeuvre sur d'autres zones de test afin de mieux quantifier leur apport.

Plusieurs questions restent donc posées concernant les conditions d'acquisition des données interféro-polarimetriques, le type du radar d'acquisition (monostatique ou bistatique), les méthodes de traitement adaptées à ces données et la précision exigée pour une application donnée.

Remerciements

Nous remercions la compagnie privée Aerosensing pour la mise à disposition gracieuse des données polarimétriques en 2001, en particulier le docteur Michael Brandfass et le docteur João Moreira. Nous remercions aussi le docteur Elise Colin de l'ONERA pour ses suggestions et corrections de l'article.

Références

Alberga, V. Krogager, E. Chandra, M and Wanielik, G. (2004), Potential of coherent decompositions in SAR polarimetry and interferometry. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '04. Proceedings, vol 3, p. 1792- 1795.

Ballester-Berman, J. D.; Lopez-Sanchez, J. M. and Fortuny-Guasch J., (2005). Retrieval of biophysical parameters of agricultural crops using polarimetric SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, No. 4, p. 683-694.

Ballantine S., (1928) The Lorentz reciprocity Theorem for Electric Waves. Proceedings of the IRE, vol. 16, Issue 4, p. 513 -518.

Berardino, P.; Costantini, M.; Franceschetti, G.; Iodice, A.; Pietranera, L. and Rizzo, V., (2002). Differential SAR interferometry for the study of slope instability at Maratea, Italy. Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '02. IEEE International, vol. 5 , p. 2693 – 2695.

Beauducel, F., Briole P. and Froger J.L., (2000), Volcano wide fringes in ERS SAR interferograms of Etna: Deformation or tropospheric effect. Journal of Geophysical Resrarch., 105 (B7) 16391-16402.

Cloude S. R. and Pottier E., (1997). An Entropy Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, No. 1, p. 68-78.

Constantini, M. (1998). A Novel Phase Unwrapping Method Based on Network Programming. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 36, n°3, p. 813 - 821

Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. vol. 39, p. 8-20.

Ferro-Famil L., Pottier E., Lundsom P., Moshammer R., and Papathanassiou K., (2005). Forest Mapping and Classification Using L-Band PolInSAR Data. PolInSAR workshop, ESRIN, Frascati, Italie.

Floury N., Le Toan T., Souyris J.C., Singh K., Stussi N., Hsu C. C. and Kong J. A., (1996). Interferometry for forest studies, Proc. 'Fringe 96' Workshop on ERS SAR Interferometry, Zürich, p. 57-70.

Gomez-Dans J. L. and Quegan S., (2005). Constraining Coherence Optimisation in Polarimetric Interferometry of Layered Targets PolInSAR workshop, Italie.

Guillaso S. and Reigber A., (2005). Polarimetric SAR Tomography. PolInSAR workshop, ESRIN, Rome, Italie.

Lee J-S., Papathanassiou K. P., Ainsworth T. L., Grunes M. R., , and Reigber A. (1998). A New Technique for Noise Filtering of SAR Interferometric Phase Images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.36, no. 5, p. 1456-1465.

Lee J. S., Grunes M. R., Ainsworth T. L., Du L.J. 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,. p. 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.

Marotti L., Papathanassiou K., Zandona Schneider R. and Hajnsek I. (2007). First Polarimetric and Interferometric Results from ALOS−PalSAR. The 3rd International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry. ESRIN, Rome, Italie.

Moll A. Braun M. and Luberas A. Determination of glacier velocities on King George Island (Antarctica) by DInSAR, fringe 2005, ESRIN, Rome, Italie.

Neumann M., Ferro–Famil L. and Reigber A. (2007). Polarimetric coherence optimisation for multibaseline SAR data. The 3rd International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry. ESRIN, Rome, Italie.

Ouarzeddine M., (2002). Generation of Digital Terrain Models using polarimetric SAR interferometry. Thèse de Master of science en géoinformatique. ITC, Enschede, Pays Bas.

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..

Prakoso K.,U., (2003). Tropical Forest Mapping using Multiband Interferometric and Polarimetric SAR Data. PolInSAR workshop, ESRIN, Rome, Italie.

Schneider, R.Z.; Papathanassiou, K.; Hajnsek, I. and Moreira, A., (2005). Polarimetric interferometry over urban areas: information extraction using coherent scatterers, Geoscience and Remote Sensing Symposium, . IGARSS Proceedings. IEEE International, vol. 2, p.1089 – 1092.

Skriver H.,. Dierking W., Gudmandsen P. , Le Toan T., Moreira A., Papathanassiou K. and Quegan S., (2003). Applications of Synthetic Aperture Radar Polarimetry. PolInSAR workshop, ESRIN, Rome, Italie.

Treuhaft R. N. and Cloude S. R. (1999). The structure of oriented vegetation from polarimetric interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, no. 5, september. p 2620-2624.