



Détection automatique des repliements en interférométrie radar par analyse de cohérences de pente multi-décalages

David Petit, Jean-Denis Durou, Frédéric Adragna

► To cite this version:

David Petit, Jean-Denis Durou, Frédéric Adragna. Détection automatique des repliements en interférométrie radar par analyse de cohérences de pente multi-décalages. Congrès francophone de vision par ordinateur (ORASIS 2001), Jun 2001, Cahors, France. pp.173–182. <hal-04589562>

HAL Id: hal-04589562

<https://hal.science/hal-04589562v1>

Submitted on 28 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Détection automatique des repliements en interférométrie radar par analyse de « cohérences de pente » multi-décalages

David PETIT⁽¹⁾, Jean-Denis DUROU⁽²⁾, Frédéric ADRAGNA⁽³⁾.

⁽¹⁾ David.Petit@irit.fr, <http://www.irit.fr/~David.Petit>,
Université Paul Sabatier, IRIT, équipe TCI, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex 4.

⁽²⁾ Jean-Denis.Durou@irit.fr,
Université Paul Sabatier, IRIT, équipe TCI, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex 4.

⁽³⁾ Frederic.Adragna@cnes.fr,
CNES, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex.

Mots-clés :

Interférométrie radar, repliement, layover, filtrage, décalage spectral, cohérence, reconstruction 3D.

Résumé :

La capacité de l'interférométrie radar à générer des modèles numériques de terrain est maintenant parfaitement connue. Si les techniques associées sont particulièrement performantes sur des reliefs à faibles pentes, elles sont en revanche sujettes à caution sur les reliefs comportant des fortes pentes. En effet, les phénomènes d'ombres, de masquages, de rebonds multiples, et surtout de repliements (« layover ») en limitent les performances aux hautes résolutions.

Récemment, nous avons pu démontrer qu'il était possible d'isoler, dans une zone de repliement comportant deux pentes distinctes connues, le signal radar associé à chaque pente. La technique associée est basée sur un filtrage fréquentiel des signaux, compte tenu du décalage spectral entre les deux acquisitions. Le procédé permet de produire les interférogrammes et les images de cohérence associés aux pentes étudiées. Ces images sont appelées respectivement « interférogrammes de pente » et « cohérences de pente ». L'analyse des cohérences de pente permet de traiter judicieusement les interférogrammes de pente, et conduit à une production largement améliorée de modèles numériques de terrain dans une zone de repliement.

Les travaux que nous proposons ici exploitent ce procédé pour détecter automatiquement la pente du terrain et la présence d'un repliement, par analyse de « cohérences de pente multi-décalages ». Cela consiste à calculer la « cohérence de pente » pour l'ensemble des décalages spectraux possibles, et à en détecter les maxima. La présence de plusieurs maxima peut indiquer l'existence d'une zone de repliement. Les techniques de reconstruction du relief peuvent ainsi bénéficier directement d'une information de pente, de surcroît dans une zone de repliement.

I) Introduction

L'interférométrie radar présente de nombreux atouts pour la réalisation des modèles numériques de terrain, autant d'un point de vue opérationnel que d'un point de vue qualitatif. Nous savons cependant que les performances de la technique sont fortement dégradées par la complexité des phénomènes rencontrés. Ceux-ci peuvent être inhérents à l'imagerie, comme le masquage ou la discontinuité, ou plus spécifiques à l'imagerie radar, comme le repliement ou les rebonds multiples.

En raison du nombre de processus mis en jeu dans la production d'une image radar réelle, nous avons choisi d'abord ces problèmes par le biais de la simulation. Le simulateur 2SIR^{1,2} permet de générer des images radar et des interférogrammes, pour des conditions parfaitement maîtrisées, avec une prise en compte sélective des phénomènes. Dans cet article, nous allons porter notre intérêt sur le traitement des images radar, en vue de la détection des zones de repliement.

Dans un premier temps, nous rappellerons le principe du décalage spectral, puis nous présenterons succinctement, en second lieu, son principe d'utilisation dans la génération d'interférogrammes de pente. Dans la troisième partie, nous traiterons de la cohérence de pente et de son usage dans la détection des zones de repliement et dans l'estimation automatique des pentes. Enfin, nous conclurons sur l'usage de cette méthode pour la reconstruction 3D.

II) Théorie du décalage spectral

a) Equation

C. Prati et al³ ont déjà montré qu'un décalage angulaire entre deux acquisitions radar de la même scène produisait un décalage spectral de la réponse du sol, inhérent à la pente et aux conditions géométriques d'observation. Bien que ce phénomène produise une perte de cohérence interférométrique nuisible à la technique, il peut être exploité pour produire une séparation partielle des pentes dans les zones de repliement, ou pour améliorer la résolution en distance. F. Gatelli et al⁴ ont appliqué de tels traitements avec succès sur des images ERS.

Ce décalage spectral peut être exprimé, en fonction des paramètres géométriques décrits dans la figure 1, par l'équation (1).

α	Angle d'inclinaison
b	Ligne de base
θ	Angle d'incidence
θ'	Angle local d'incidence
d	Distance
β	Pente
f_0	Fréquence de porteuse

Table 1 : définitions.

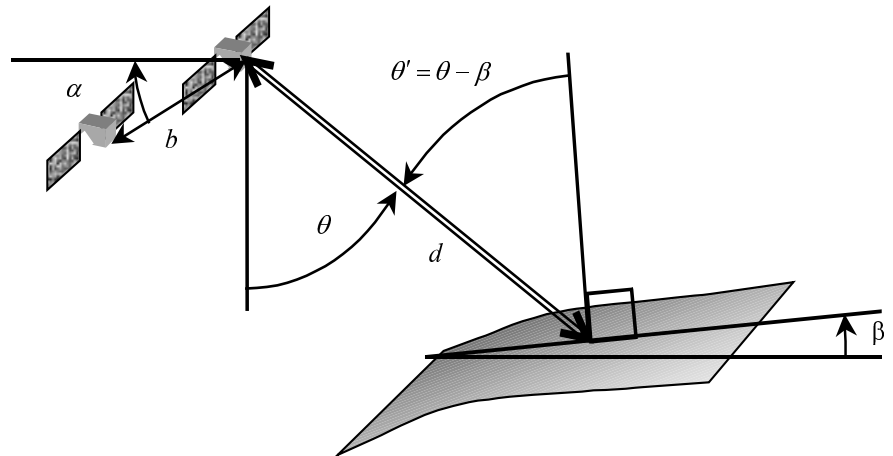


Fig. 1: géométrie de l'interférométrie radar.

$$\Delta f = f_0 \frac{b \cos(\theta - \alpha)}{kd \tan(\theta - \beta)} \quad (1)$$

Le paramètre k a été introduit pour permettre d'étendre la généralité de la formule (1) aux cas bistatique ($k = 2$) et monostatique ($k = 1$).

b) Démonstration

Nous proposons une démonstration de l'équation (1) dans le cas monostatique, à partir de la décomposition classique de la phase radar totale :

$$\phi_{\text{totale}} = \phi_{\text{trajet}} + \phi_{\text{instrument}} + \phi_{\text{atmosphérique}} + \phi_{\text{construction}} + \phi_{\text{rétrodiffusion}} + \phi_{\text{bruit}} \quad (2)$$

La reconstruction de modèles numériques d'élévation par interférométrie radar suppose généralement que seule la phase de trajet change entre les deux acquisitions radar. Cette hypothèse est convenable pour la plupart des termes (en particulier en mode bistatique), sauf pour la phase de construction. En effet, nous allons démontrer que celle-ci dépend de l'angle local d'incidence θ' , et par conséquent des conditions d'acquisition.

Grâce au modèle de Goodman⁵, nous pouvons supposer que la réponse radar contenue dans un pixel est la somme des contributions produites par une distribution aléatoire de cibles ponctuelles. Nous pouvons alors décrire la phase de construction comme étant la résultante des phases de trajet internes au pixel. Considérons le cas simple des figures 2a et 2b, où seules deux cibles ponctuelles modélisent la réponse contenue dans un pixel. La phase de construction dépend alors directement de la différence de phase $\Delta\phi$ existant entre ces deux cibles. Or celle-ci est liée à la longueur l (cf. figure 2a), distance séparant les deux cibles en projection sur l'axe de propagation de l'onde radar. L'équation (3) exprime cette dépendance :

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{f_0}{c} 2l \quad (3)$$

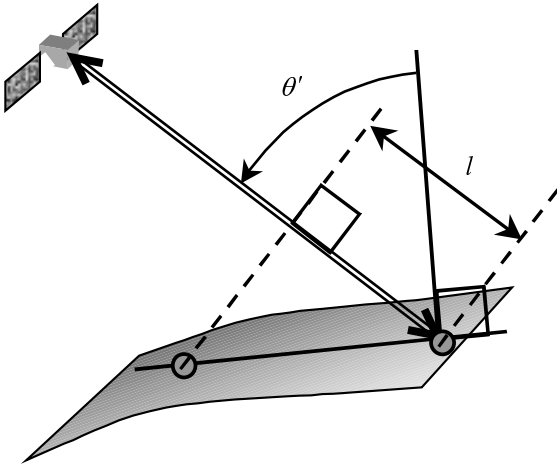


Fig. 2a : déphasage entre deux cibles.

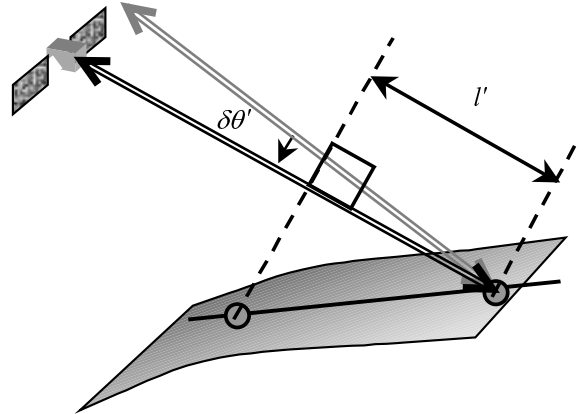


Fig. 2b : déphasage avec un angle différent.

Une nouvelle acquisition de la scène est effectuée (cf. figure 2b) avec une nouvelle incidence locale $\theta' + \delta\theta'$. La longueur de trajet l' engendre donc un nouveau déphasage $\Delta\phi'$, décrit par l'équation (4) :

$$\Delta\phi' = 2\pi \frac{f_0}{c} 2l' \quad (4)$$

La conjecture interférométrique postule que les deux phases de construction sont identiques, ce qui signifie que l'égalité (5) doit être vérifiée. Nous effectuons l'hypothèse que les problèmes de recalage entre les deux images (« coregistration ») ont été résolus par ailleurs.

$$\Delta\phi = \Delta\phi' \quad (5)$$

L'égalité (5) ne peut être valide que si nous supposons que la fréquence de l'onde radar était légèrement différente de f_0 dans le cas de la figure 2b. Nous appelons f'_0 cette nouvelle fréquence, et nous allons l'exprimer en fonction de l'ancienne fréquence f_0 et des conditions géométriques d'acquisition. La relation trigonométrique (6), complétée par la condition (7), amène à l'expression (9) du décalage spectral.

$$l' \sin(\theta' + \delta\theta') = l \sin(\theta') \quad (6)$$

$$\theta' \neq 0 \quad \text{et} \quad \delta\theta' \ll 1 \quad (7)$$

$$\Delta\phi' = \frac{4\pi f'_0 l}{c[1 + \delta\theta' / \tan(\theta')]} = \Delta\phi = \frac{4\pi f_0 l}{c} \quad (8)$$

$$\Rightarrow f'_0 = f_0 [1 + \delta\theta' / \tan(\theta')] \Rightarrow \Delta f = f_0 \frac{\delta\theta'}{\tan(\theta')} \quad (9)$$

En exploitant le fait que l'angle local d'incidence θ' représente la différence entre l'angle d'incidence θ et la pente locale β , et la relation trigonométrique² reliant $\delta\theta'$ à la ligne de base b , nous retrouvons bien l'expression (1) dans le cas monostatique ($k = 1$).

c) Limite interférométrique

L'expression (9) signifie que, pour obtenir les mêmes phases de construction dans les cas des figures 2a et 2b, il faudrait éclairer la scène avec deux ondes de fréquences différentes. Jusqu'à présent, nous avons considéré que ces ondes étaient monochromatiques. Or, l'onde radar possède une bande passante B . C'est donc toute la réponse spectrale du sol qui va être décalée entre les deux acquisitions. L'erreur introduite sur la phase de construction, ou plutôt sa variation non maîtrisée, induit un bruit de phase qui réduit la qualité de l'interférogramme. Cette perte de qualité est mesurable par un estimateur de cohérence¹.

Nous appelons x_1 et x_2 les signaux complexes des deux images. Nous utilisons l'estimateur de cohérence complexe $\tilde{\gamma}$ défini par la formule (10)⁷. Le module de $\tilde{\gamma}$ nous donne une image de cohérence. Cet estimateur utilise un modèle de franges Φ . Les variations de phase s'écartant de ce modèle de franges sont considérées comme un bruit, qui réduit la valeur de la cohérence. En pratique, nous utilisons le modèle de franges défini par (11), qui est estimé à partir du produit scalaire entre le gradient moyen de la différence de phase interférométrique, et le vecteur $(u \ v)^T$, qui a comme coordonnées les indices relatifs du pixel dans la fenêtre de calcul de la cohérence (équation (11)). La formule (10) suppose que le principe d'ergodicité est vérifié et la formule (11) implique que le principe de la stationnarité spatiale est valide⁷.

$$\tilde{\gamma} = \frac{\langle x_1 x_2^* \exp(-i\Phi(u, v)) \rangle}{\sqrt{\langle x_1 x_1^* \rangle \langle x_2 x_2^* \rangle}} \quad (10)$$

$$\Phi(u, v) = \left\langle \nabla \arg \left(\frac{x_1 x_2^*}{\sqrt{x_1 x_1^* \times x_2 x_2^*}} \right) \right\rangle \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (11)$$

La cohérence est une mesure de la stationnarité de la phase. Elle est donc d'autant plus faible que le bruit de phase est important. La limite est atteinte lorsque les réponses spectrales sont totalement

disjointes. Ceci définit une limite supérieure pour la ligne de base, relativement à la technique interférométrique^{4,6,7}.

Il est donc souhaitable de supprimer l'erreur introduite par le décalage spectral, en changeant la fréquence d'éclairage d'une acquisition à l'autre. Or, le décalage spectral à appliquer dépend de l'incidence locale θ' , et donc varie sur l'ensemble de la scène. La réalisation pratique de ce procédé présente donc des difficultés insurmontables. Supposons toutefois l'opération réalisable. Si nous corrigeons localement la fréquence centrale de l'onde, de façon à avoir une phase de construction identique, alors la différence de phase de trajet s'annule ! Or cette dernière est justement utilisée pour la mesure interférométrique du relief et ne peut donc plus être exploitée. Notons également que l'application du décalage spectral adéquat nécessite la connaissance de ce même relief...

Une meilleure façon de procéder semble donc d'estimer le décalage fréquentiel pour lequel les phases de construction sont identiques, plutôt que de mesurer une différence de phase. La mesure de ce décalage fréquentiel peut nous donner la pente locale et nous permettre de restituer correctement le relief. En effet, cette mesure n'est pas entachée par le bruit de phase introduit par les segments de spectre disjointes, puisque ces derniers sont ignorés. La limite interférométrique reste cependant la même, puisque la précision de la mesure est liée à la largeur de spectre commune. La précision est néanmoins améliorée. Pour réduire cette limite interférométrique, il reste donc intéressant d'acquérir les deux images pour des fréquences différentes, mais cette fois avec un décalage spectral en rapport avec le relief moyen.

III) Interférogrammes et cohérences de pente

a) Sélection de pente

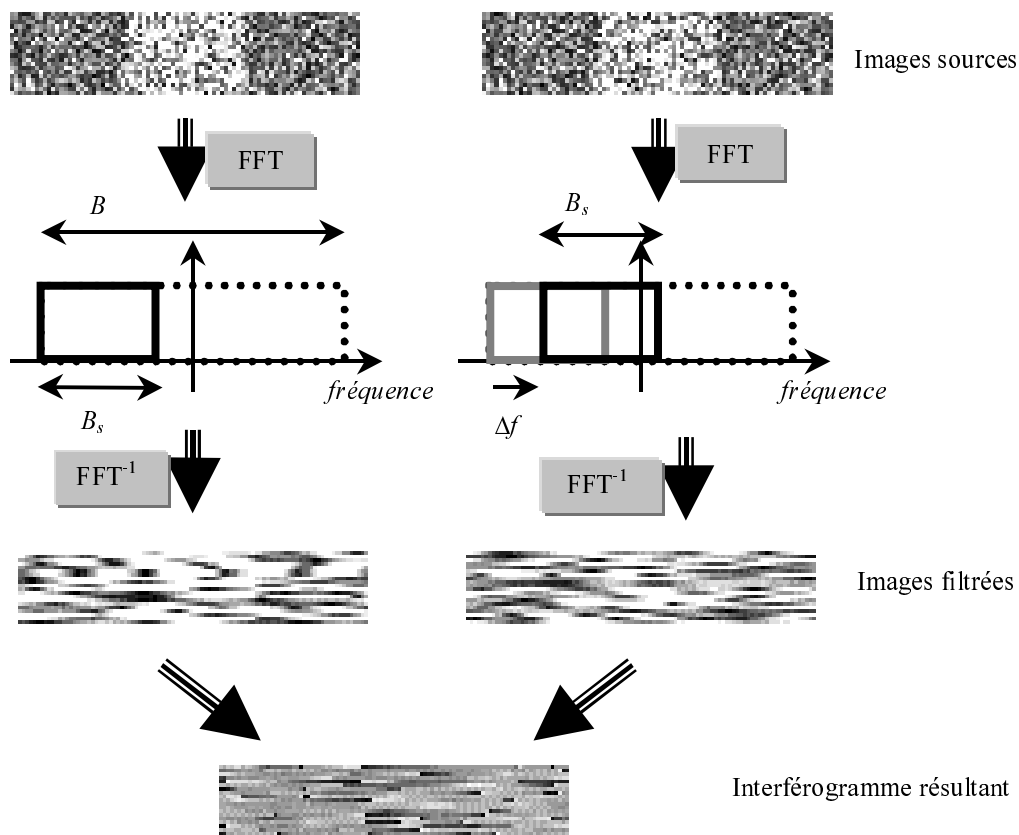


Fig. 3 : filtrage d'un signal dont les réponses spectrales sont décalées.

Nous savons qu'il est possible d'obtenir un interférogramme de qualité améliorée si une estimation suffisamment précise de la pente est disponible². La technique consiste à sélectionner les bandes spectrales communes aux deux images sources et à produire deux nouvelles images filtrées. L'interférogramme généré à partir de celles-ci contiendra un bruit de phase lié à une erreur éventuelle sur l'estimation initiale de la pente, mais réduit par rapport au bruit initial.

La figure 3 présente ce principe de façon plus générale. Les signaux ont une bande passante de largeur B , et nous sélectionnons des bandes spectrales de largeur B_s , décalées de Δf . Dans le cas de la « sélection de pente simple », nous avons la relation (12) :

$$B_{s, simple} = B - \Delta f \quad (12)$$

La figure 3 présente un traitement où B_s est beaucoup plus petite que $B_{s, simple}$. Nous pouvons, en effet, envisager de sélectionner des portions de spectre plus petites que $B_{s, simple}$, dans le but de produire plusieurs paires de sous-vues. C'est le principe de « l'interférométrie de pente ».

b) Interférométrie de pente

Pour réaliser un interférogramme de pente, on génère l'ensemble des paires de sous-vues correspondant à une largeur de bande spectrale B_s donnée et à un décalage spectral Δf donné. Ce procédé réduit d'autant plus la résolution que B_s est plus faible. En revanche, en sommant les sous-interférogrammes résultants, il est possible d'accroître la cohérence interférométrique, pour un signal associé à une pente donnée. Le procédé a déjà été présenté² dans le cas où $B_s = \Delta f$. Nous l'étendons ici au cas où B_s est quelconque.

L'intérêt du procédé est de permettre la séparation des différents signaux, correspondant à des pentes différentes, qui sont superposés dans une zone de repliement. Considérons le signal produit par un sol de pente donnée, superposé à deux autres signaux correspondant à des pentes très différentes. La composante du signal interférométrique dont la pente est spécifique au décalage spectral sélectionné a un comportement cohérent dans chaque sous-interférogramme, tandis que les composantes issues des autres signaux de pente auront des comportements proches du bruit. En effet, les réponses spectrales du sol mises en jeu par les bandes sélectionnées sont totalement différentes pour ces signaux. Les signaux interférométriques résultants sont donc imprévisibles et ils peuvent être considérés, en première approximation, comme des bruits blancs.

La figure 4 résume ce processus. Chaque sous-interférogramme est la résultante de trois signaux, dont l'un a un comportement cohérent et les deux autres peuvent être considérés comme un bruit dont l'espace des phases est équiprobable. Si le nombre de sous-vues est suffisant, l'interférogramme final ne doit plus contenir que le signal associé à la pente sélectionné, plus un bruit résiduel. Nous pouvons donc séparer des signaux de pentes spécifiques, et produire des interférogrammes dits « interférogrammes de pente ».

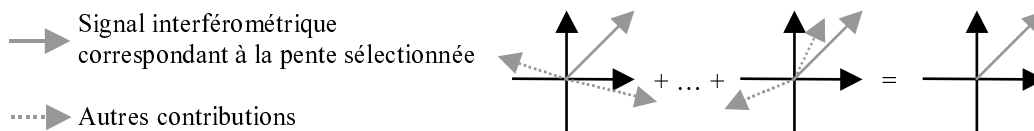


Fig 4 : sommation de tous les sous-interférogrammes (représentation de Fresnel).

c) Cohérence de pente

De la même manière que nous avons produit des interférogrammes de pente, nous pouvons calculer des images de cohérence pour un décalage spectral donné. Ces « cohérences de pente » sont des indicateurs de la qualité interférométrique. Cela signifie que la cohérence sera d'autant plus importante

que les paires de bandes spectrales sélectionnées pour générer les paires de sous-vues correspondent mieux à la même réponse spectrale du sol. Nous en déduisons trois propriétés :

- Propriété 1 : La cohérence est maximale lorsque le décalage spectral Δf sélectionné correspond à celui associé à la pente locale du sol.
- Propriété 2 : Si plusieurs signaux associés à plusieurs pentes sont superposés, la courbe de la cohérence en fonction du décalage spectral Δf doit présenter plusieurs maxima. Ces maxima sont d'autant plus marqués que les signaux ont pu être mieux séparés par le filtrage. En effet, plus la bande spectrale B_s est étroite, plus le bruit résiduel introduit par les signaux liés aux autres pentes est négligeable. Il faut toutefois garder à l'esprit que la résolution est dégradée d'autant.
- Propriété 3 : Si le modèle de franges Φ de l'équation (10) est remplacé par une fonction nulle, les pics de la courbe de cohérence observés sont beaucoup plus étroits. En effet, lors du filtrage de pente, le décalage fréquentiel est corrigé, ce qui signifie que si le décalage spectral choisi est en correspondance avec la pente, l'interférogramme résultant n'a plus de franges. En revanche, si cette correspondance n'est pas exacte, il subsiste des franges résiduelles qui font chuter la cohérence.

Ces propriétés vont être vérifiées sur des exemples dans le paragraphe suivant.

IV) Application : détection des repliements

Pour vérifier les propriétés énoncées dans le paragraphe précédent, nous avons utilisé des simulations produites par 2SIR^{1,2}. Les paramètres de génération correspondent aux conditions spatiales d'un système aux performances métriques. La ligne de base b utilisée est grande, ce qui est nécessaire pour obtenir un décalage spectral suffisant, compte tenu de la finesse de la résolution utilisée. Avec des systèmes d'acquisition ayant un pouvoir de résolution moindre, comme ERS ou RADARSAT1, des lignes de base de quelques centaines de mètres sont suffisantes.

Nom du paramètre	Notation	Valeur	Unité
Distance	d	800 000	mètres
Ligne de base	b	2000 ou 3500	mètres
Angle d'inclinaison	α	0	degrés
Angle d'incidence	θ	35	degrés
Pente locale	β	8,53 ou 75,0	degrés
Résolution en distance	R_d	2	mètres
Bande spectrale	B	$74,95.10^6$	Hertz
Longueur d'onde (bande X)	λ	0,031714	mètres

Table 2 : paramètres de la simulation.

a) Détection de pente

La propriété 1 peut être utilisée directement pour mesurer la pente grossièrement. La figure 5 représente les variations de la cohérence en fonction du décalage spectral Δf , pour deux pentes différentes (la ligne de base choisie vaut 3500 m). Les traitements ont été effectués sur les deux couples interférométriques associés à chacune des pentes, de manière totalement indépendante. Le décalage

spectral est représenté en pourcentage de la bande passante B . La largeur de bande sélectionnée pour le filtrage est $B_{s, simple}$. Celle-ci varie donc avec le décalage fréquentiel Δf .

Nous observons bien des pics de cohérence pour les décalages spectraux attendus. Ces pics sont étroits, car nous avons choisi, pour le modèle de franges Φ , la fonction nulle (cf. la propriété 3). Cela est satisfaisant, dans notre cas, car nous souhaitons mettre en valeur les maxima de cohérence, et la largeur de fenêtre de calcul (20 pixels en azimuth et 40 pixels en distance) se prête à ce traitement. Cependant, avec une fenêtre de taille réduite, le pas fréquentiel serait réduit d'autant, et donc la probabilité de passer par un décalage spectral proche de celui recherché serait faible. Le maximum de cohérence ne pourrait être aisément détecté. Il est donc préférable d'utiliser le modèle de franges (11), pour corriger la perte de cohérence due aux franges résiduelles. La figure 6 donne le résultat obtenu pour la pente de 75 degrés.

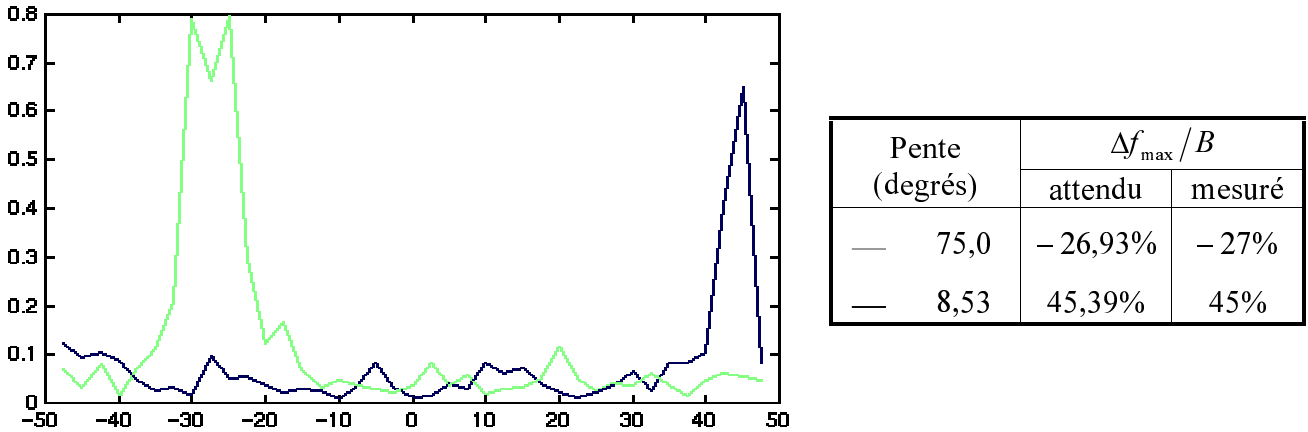


Fig. 5 : cohérence en fonction du décalage spectral Δf donné en % de la bande passante B .

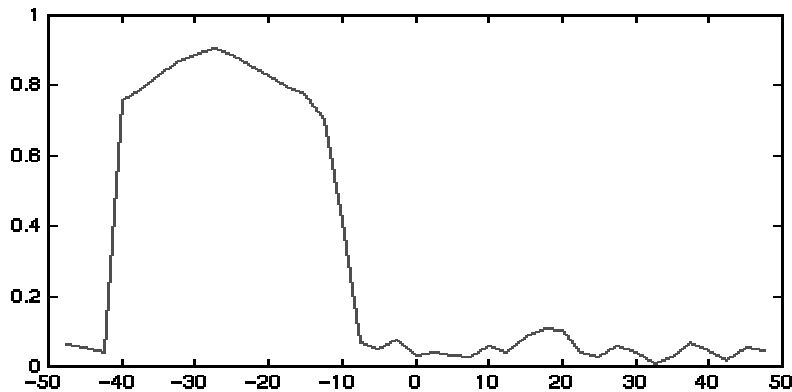


Fig. 6 : cohérence en fonction du décalage spectral Δf donné en % de la bande passante B , avec soustraction des franges résiduelles, dans le cas de la pente de 75 degrés.

Les pentes brutales sur les bords du pic de la figure 6, correspondent à un décrochage du procédé d'estimation de Φ : les franges résiduelles sont trop serrées et trop bruitées. Avec un pas fréquentiel plus faible, le maximum de cohérence reste détectable. Du reste, l'objectif n'est pas réellement de déterminer avec précision le décalage spectral pour mesurer la pente, mais d'estimer au mieux ce décalage afin de produire un interférogramme filtré comportant un minimum de franges résiduelles.

b) Détection des pentes dans une zone de repliements

Nous allons maintenant appliquer le même type de traitement dans le cas où les deux signaux associés aux deux pentes précédentes sont superposés. La largeur de bande spectrale B_s est choisie constante et inférieure à $B_{s, simple}$, quelque soit le décalage spectral Δf . Ainsi, nous pouvons appliquer le calcul interférométrique de pente. Cette fois-ci, la ligne de base choisie vaut 2000 m.

Sur la figure 7, nous avons de nouveau représenté l'évolution de la cohérence, en fonction du décalage spectral Δf (exprimé en pourcentage de la bande passante B). Nous observons bien deux maxima correspondant aux décalages spectraux liés aux deux pentes ($-15,39\%$ et $25,94\%$). L'une des valeurs maximales est plus faible que l'autre, car le signal provenant de cette pente est moins énergétique. En effet, les deux signaux ne pouvant être parfaitement séparés par la technique du filtrage, chaque signal apporte un bruit parasite à l'autre interférogramme de pente. Ce bruit est d'autant plus important que l'énergie du signal est grande. L'interférogramme de pente du signal le moins énergétique est ainsi plus bruité et sa cohérence est donc plus faible.

Ce problème peut être partiellement résolu en réduisant la largeur de bande spectrale B_s , car cela accroît la séparabilité des signaux. Ainsi, nous pouvons observer que la cohérence augmente lorsque la largeur de bande B_s diminue (cf. figure 8a). Cependant, en réduisant B_s , nous dégradons la résolution, et par voie de conséquence, le bruit de la cohérence augmente. C'est ce que traduit la figure 8b, qui représente l'évolution du rapport Signal/Bruit des valeurs maximales de la cohérence.

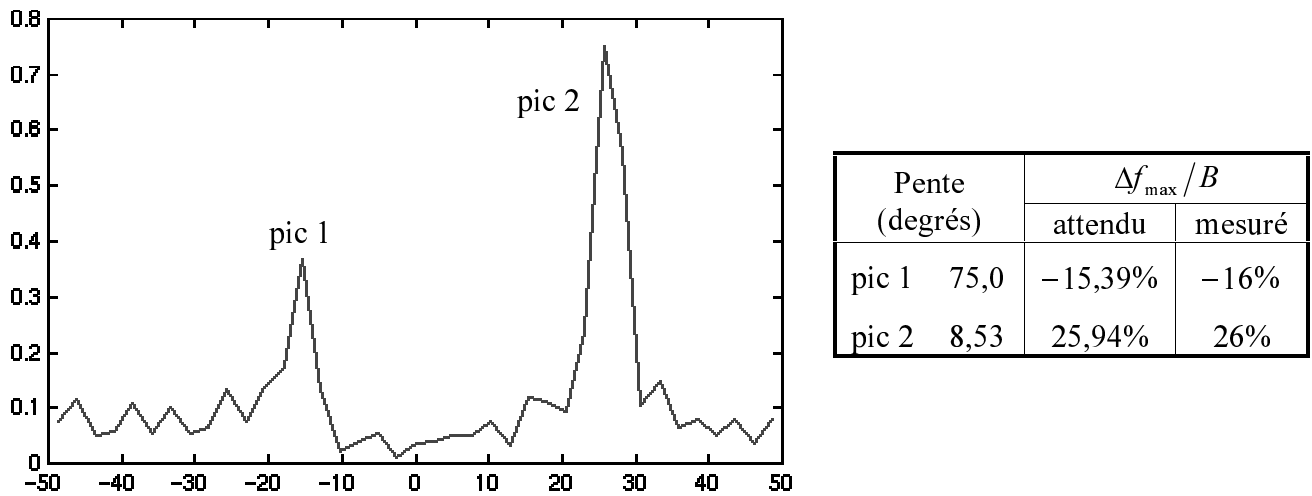


Fig. 7 : cohérence en fonction du décalage spectral Δf donné en % de la bande passante B , dans le cas de deux pentes, dans une zone de repliement.

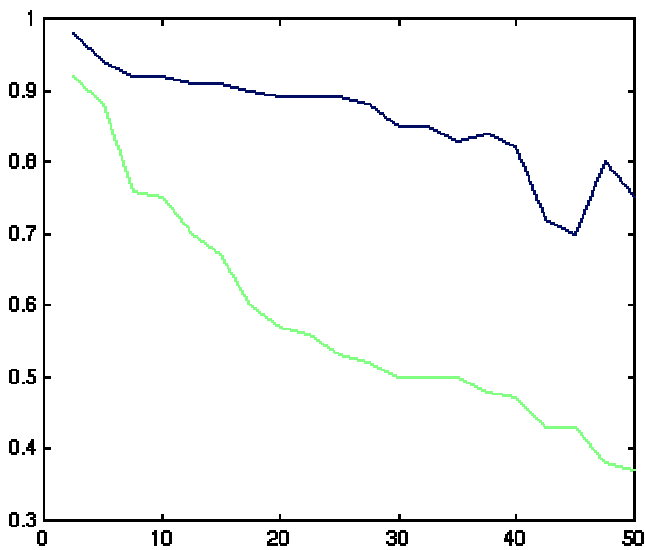


Fig 8a : évolution des valeurs maximales des pics de la cohérence en fonction de la largeur de bande B_s .

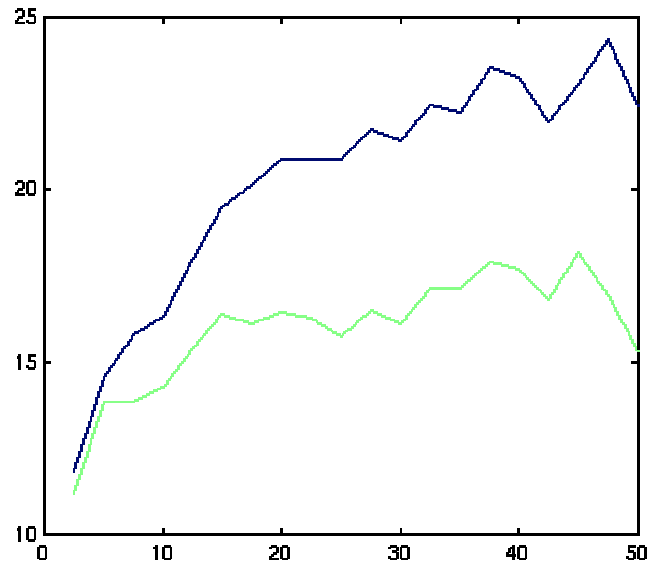


Fig 8b : évolution du rapport Signal/Bruit (en dB) des valeurs maximales des pics de la cohérence, en fonction de la largeur de bande B_s .

c) Détection des repliements

Nous disposons maintenant d'une méthode permettant de détecter la présence d'un repliement. Si nous détectons un pic de la cohérence pour un décalage fréquentiel Δf vérifiant la relation (13), cela signifie que la pente est en repliement pour cette visée radar. En effet, la différence $\theta - \beta$ étant alors négative, la surface est bien en repliement. Si tel est le cas, il n'est pas nécessaire de détecter un autre maximum de la cohérence, les signaux provenant normalement des autres pentes pouvant être faibles ou masqués. Cette méthode avait été utilisée, dans un cadre plus restreint, pour déterminer les positions de début et de fin d'une zone de repliement, pour un modèle de bâtiment².

$$\arctg\left(\frac{b}{k\lambda} \frac{f_0}{\Delta f} \cos(\theta - \alpha)\right) < 0 \Rightarrow \text{signe}(\Delta f) = -\text{signe}(\cos(\theta - \alpha)) \quad (13)$$

V) Conclusions et perspectives

Nous avons décrit une méthode permettant de détecter une zone de repliement, à partir de l'analyse de la cohérence de pente en fonction du décalage spectral. Celle-ci avait déjà été utilisée au cours de précédents travaux², dans un cadre plus restreint. Elle reste limitée par deux contraintes :

- Les variations de chaque pente doivent être minimales dans la zone étudiée, pour permettre le traitement fréquentiel.
- Le seuil pour la détection du maximum de cohérence doit être judicieusement choisi.

En ce qui concerne la reconstruction 3D, la technique de filtrage ne pourrait pas séparer des signaux correspondant à des pentes trop proches. Néanmoins, dans la mesure où les pentes sont proches, l'erreur sur l'estimation de la pente serait malgré tout réduite, comparée à celle qui serait obtenue sans filtrage. En outre, la perte de résolution sur l'interférogramme de pente, induite par le filtrage de pente, n'est qu'une illusion, car la résolution de l'interférogramme n'est pas celle du système d'acquisition, puisque la bande spectrale réellement commune entre les signaux est plus faible que la bande passante des signaux. En fait, la notion de résolution interférométrique reste à définir...

VI) Bibliographie

- [1] D. Petit, F. Adragna, « A new interferogram simulator : 2SIR. Study of coherence losses for tortured relief. », CEOS SAR Workshop, p. 591-596, Toulouse, France, octobre 1999.
- [2] D. Petit, F. Adragna, J.-D. Durou, « The filtering of layover areas in high-resolution IFSAR for the building extraction. », EUROPTO, Barcelone, septembre 2000.
- [3] C. Prati, F. Rocca, « Improving slant range resolution of stationary objects with multiple SAR surveys. », IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, vol. 29, p. 135-144, janvier 1993.
- [4] F. Gatelli, A. Monti Guarnieri, F. Parizzi, P. Pasquali, C. Prati, « The wavenumber shift in SAR interferometry. », IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, vol 32, n° 4, p. 855-865, juillet 1994.
- [5] J. W. Goodman, « Statistical properties of laser speckle patterns. », in Laser Speckle and Related Phenomena, J. C. Dainty, Springer Verlag, p. 9-74, 1975.
- [6] R. Touzi, A. Lopez, J. Bruniquel, P. W. Vachon, « Coherence estimation for SAR imagery. », IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, n° 1, p. 135-149, janvier 1999.
- [7] F. Adragna, « Interférométrie radar : principes, applications et limitations », Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, vol. 4, n° 148, p. 15-19, 1997.