



Développement et expérimentation de filtres adaptés au lissage d'images de phase InSAR appliqué aux bâtiments

■ Clémence DUBOIS

Le besoin d'une cartographie rapide et précise du milieu urbain gagne en importance, qu'il s'agisse de modéliser les bâtiments en 3D de manière à pouvoir calculer leur impact énergétique, ou bien d'évaluer les dégâts après une catastrophe naturelle. La technologie InSAR montre son intérêt dans cette tâche du fait de son utilisation indépendamment de la période d'acquisition et des conditions météorologiques. Cependant, à cause de différents effets liés au capteur ou à la configuration d'acquisition, l'image de phase interférométrique est très bruitée. Avant de pouvoir reconstruire les bâtiments, il est donc nécessaire d'effectuer un lissage de cette image. Outre les méthodes habituellement utilisées pour le lissage, une nouvelle méthode, basée sur la connaissance d'une information SIG et s'adaptant davantage à la signature particulière d'un bâtiment dans l'image de phase, est présentée dans cet article. Cette nouvelle méthode est testée sur des images réelles aéroportées single-pass du capteur AeS-1 et comparée aux méthodes habituelles.

■ MOTS-CLÉS

InSAR, lissage de phase dynamique, bâtiments, SIG, cohérence

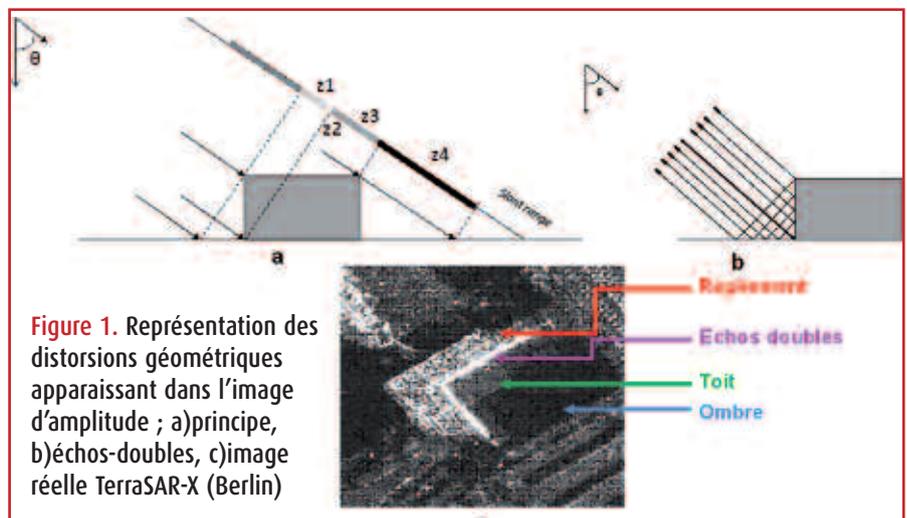
Rappel: L'interférométrie SAR (InSAR) est une méthode de télédétection active, utilisant le produit complexe de deux images d'un radar à synthèse d'ouverture (RSO) prises à deux dates ou sous deux angles de vue légèrement différents. Ce produit est appelé interférogramme. Chacune des images comporte deux informations: amplitude et phase du signal retourné. La différence de phase entre les deux images, correspondant à l'image de phase considérée, donne une information sur un mouvement ou la topographie du terrain étudié.

Introduction

La rapide expansion des zones urbaines ainsi que les nombreuses catastrophes naturelles accroissent le besoin d'une détection rapide et précise des bâtiments, que ce soit dans le but de déterminer le volume d'un bâtiment pour en déduire son impact énergétique en vue de son intégration dans un plan d'approvisionnement en énergie, ou bien pour détecter les dégâts après un tremblement de terre, une tempête ou un tsunami, par comparaison avant/après. L'intérêt de la technologie InSAR (Interferometric synthetic aperture radar) pour cette tâche réside dans le fait qu'elle peut être utilisée par mauvais temps et de nuit, contrairement aux capteurs optiques utilisés habituellement. Par déroulement de la phase interférométrique, la hauteur du bâtiment, élément essentiel à sa reconstruction 3D, peut être déter-

minée. Cependant, l'image de phase interférométrique est très bruitée et nécessite un prétraitement avant de pouvoir y détecter les bâtiments. L'article s'inscrit dans ce cadre. Il y est d'abord présenté la signature caracté-

ristique d'un bâtiment dans les images d'amplitude et de phase interférométriques. Il y est aussi abordé l'image de cohérence, utilisée plus tard lors du lissage. Différentes méthodes de lissage de la phase interférométrique



► sont ensuite proposées. Il est plus particulièrement porté attention à deux d'entre elles, basées sur l'utilisation de l'empreinte 2D du bâtiment. En dernière partie sont exposés les résultats des différents filtres.

Signature d'un bâtiment dans l'image interférométrique

■ Image d'amplitude

Les images d'amplitude radar, du fait de la configuration d'acquisition en vue oblique, sont marquées par des distorsions géométriques telles que "raccourci", "repliement" et "ombres". Ces caractéristiques, fortement présentes dans des zones de relief accidenté, se retrouvent en partie dans les zones de bâtiments, et d'autres apparaissent. Ces différents effets sont représentés *figure 1* pour un bâtiment à toit plat, schématiquement et sur image réelle du satellite TerraSAR-X.

Un repliement (z1) apparaît au niveau des surfaces orientées en direction du radar: les trois signaux du sol, de la façade et du toit se superposent, conduisant à une forte intensité de l'image d'amplitude dans cette région. Juste après la zone de repliement apparaît une ligne très claire (z2), de très forte intensité. Cette ligne correspond à des échos doubles (*voir figure 1b*): les signaux arrivant sur la façade subissent une première réflexion miroir en direction du sol et une seconde du sol en direction du radar, et vice versa. Tous ces signaux parcourent le même chemin, correspondant à la distance séparant le radar du pied du

bâtiment. Ils sont ainsi tous représentés dans la même cellule de résolution, d'où la très forte intensité de cette zone. Après la ligne d'échos doubles, on peut observer l'intensité du signal retourné par le toit du bâtiment (z3). Cette intensité varie en fonction du matériau et de la rugosité du toit. Enfin, le toit est suivi d'une zone d'ombre (z4), caractérisée par une très faible intensité, le sol à l'arrière du bâtiment, caché du radar, et ne recevant pas de signal.

■ Image de Phase

Un profil de bâtiment dans l'image de phase est représenté *figure 2a*, pour lequel on retrouve les différents effets énoncés précédemment. Considérant uniquement la composante topographique de la phase et considérant horizontaux le toit et le sol autour du bâtiment (c'est-à-dire que chacun d'eux a une altitude constante), les valeurs de phase du toit et du sol sont constantes. En zone de repliement, seule la hauteur de la façade n'est pas constante; elle diminue à proportion de son éloignement du capteur. Le repliement est donc caractérisé par une rampe linéaire descendante dans le profil de la phase (z1). Au point le plus haut de cette rampe (A), là où le repliement commence, la hauteur du toit est égale à celle de la façade. Au point le plus bas (B), la hauteur de la façade correspond à celle du sol. C'est aussi en ce point que se retrouvent les échos doubles évoqués au paragraphe précédent. La zone du toit est marquée par des valeurs de phase constantes, puisque l'altitude du toit est constante (z2). La zone d'ombre, quant à elle, est

caractérisée par des valeurs de phase non homogènes (z3). Aucun signal n'arrivant dans cette zone, seul le bruit dû au capteur est présent. Comme le montrent les *figures 2b et 2c*, la rampe linéaire du repliement est facilement reconnaissable dans l'image de phase. Par contre, dans ce cas, le toit ainsi que la zone d'ombre ne se distinguent pas des objets environnants.

■ Image de cohérence

La cohérence est un indicateur de la qualité de l'interférogramme. Elle prend des valeurs de 0 à 1, 0 correspondant à une très mauvaise cohérence, et 1 à une très haute. Comme pour l'image de phase et l'image d'amplitude, les valeurs de cohérence de chaque objet représenté dans la même cellule de résolution se superposent. Ainsi, une forte cohérence est obtenue dans la zone de repliement. Dans la zone d'ombre, fortement marquée par le bruit, la cohérence est très faible. Ainsi, les régions bruitées sont caractérisées par une mauvaise cohérence, propriété utilisée pour une méthode de lissage présentée plus loin dans l'article.

Origine du bruit de phase interférométrique

Le bruit présent dans l'image de phase interférométrique est causé par divers effets dus au capteur ou encore à la configuration d'acquisition du système, qui se multiplient entre eux [3]:

- **décorrélation géométrique:** les deux images nécessaires à la création de l'interférogramme sont prises de deux angles de vue différents, ce qui

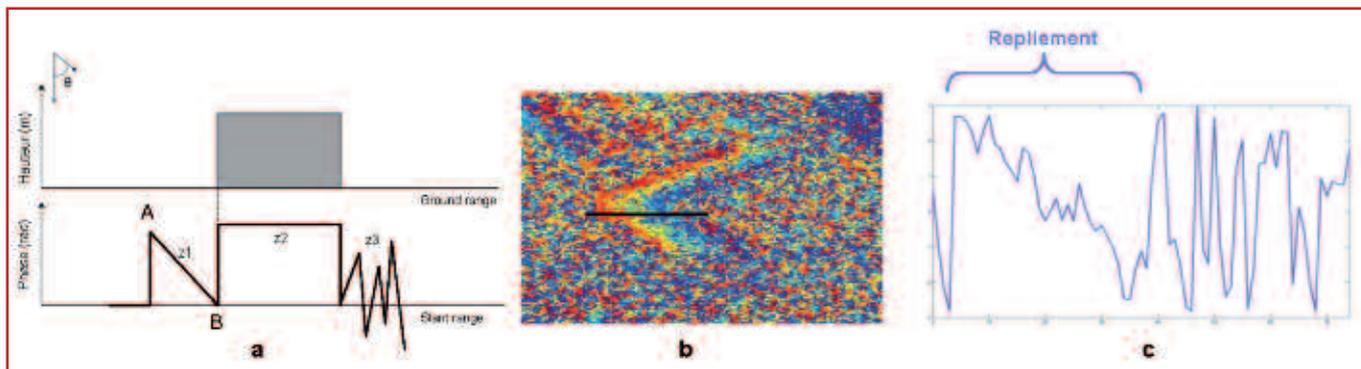


Figure 2. Effets apparaissant dans l'image de phase interférométrique ; a) principe ; b) image réelle TerraSAR-X et c) profil correspondant



entraîne un décalage des spectres fréquentiels des deux images ;

- **décorrélacion des centroïdes Doppler:** différence entre les "Zero Doppler" des deux images ; plus cette différence est grande, moins les deux images sont corrélées ;
- **décorrélacion volumétrique:** lorsque le signal radar pénètre dans un volume (par exemple un arbre), il subit de multiples réflexions avant de revenir à l'antenne. Le signal reçu diffère d'une antenne à l'autre ;
- **décorrélacion thermique:** ce bruit est dû au capteur et dépend du rapport signal bruit (SNR) ;
- **décorrélacion lors du traitement:** du bruit peut être engendré lors du traitement lorsque, par exemple, les deux images ne sont pas parfaitement coregistrées, c'est-à-dire correctement superposées ;
- **décorrélacion temporelle:** cette décorrélacion n'apparaît que lorsque les deux images sont prises à deux dates différentes (*repeat-pass*) ; des changements dans la scène considérée ou bien dans les conditions atmosphériques entre ces deux moments engendrent un bruit supplémentaire lors de la superposition des images pour créer l'interférogramme.

Méthodes de lissage proposées

Les filtres proposés sont regroupés en quatre groupes, représentés *figure 3* :

- Filtres quadratiques
- Filtres orientés
- Filtres orientés avec intégration d'information SIG
- Filtres combinés

Les filtres quadratiques peuvent être séparés en deux sous-groupes, dépendants des données nécessaires à leur utilisation. Pour le premier groupe, l'ensemble de l'image complexe est nécessaire à l'implémentation des filtres, tandis que pour le deuxième, seule l'image de phase est requise. Pour les autres approches de lissage, l'image de phase est aussi directement utilisée. Les filtres quadratiques présentent l'intérêt d'être rapides à implémenter et à appliquer sur l'image. Cependant, en zone urbaine, les bâtiments présentent des orientations

	Filtres quadratiques		Filtres orientés		Filtres orientés SIG		Filtres combinés			
							Repliement	Toit		
Phase & Réel & Imaginaire	Multilook	1	Standard Lee	8	fixe	Median	10	Moyen (Cohérence)	14	Moyen (Cohérence)
	Standard Goldstein	2	Lee (Gradient)	9		Moyen (Cohérence)	11	Moyen (Cohérence)	15	Goldstein (Gauß)
	Goldstein (Gauß)	3			dynamique	Median	12			
	Standard Baran	4				Moyen (Cohérence)	13			
	Baran (Gauß)	5								
Phase	Median	6								
	Moyen (Cohérence)	7								

Implémenté d'après la littérature
 Modifié
 Nouvellement Développé

Figure 3. Les différentes approches proposées

différentes, qui ne sont pas toutes parallèles à la direction d'acquisition. Ces filtres atteignent donc assez rapidement leur limite lorsqu'il s'agit de lisser les arêtes de bâtiments, livrant des arêtes peu nettes. De ce fait, il a été jugé pertinent d'utiliser des filtres orientés, dont la direction est déterminée à partir d'étude de statistiques locales. La connaissance supplémentaire d'une donnée SIG, comme par exemple le plan du bâtiment, permet de développer de nouveaux filtres, prenant en compte l'orientation et la longueur exactes du bâtiment concerné. Pour des gros bâtiments (par exemple bâtiments industriels, hangars...), une méthode combinant les filtres quadratiques dans le toit du bâtiment et des filtres orientés à l'extérieur peut sembler adaptée.

Parmi les filtres proposés *figure 3*, certains ont été implémentés à l'aide de la littérature correspondante, puis modifiés. Les filtres basés sur l'utilisation d'une information SIG ont été développés dans le cadre de ce travail.

■ Filtres existants et modifications apportées

- **Filtre multi-vues:** ce filtre est, de par sa simplicité d'implémentation, souvent utilisé pour réduire le bruit de l'image de phase interférométrique. En effet, il ne s'agit ici que d'effectuer une moyenne complexe des pixels dans une fenêtre de taille pouvant varier de 3x3 à 9x9 pixels autour du pixel à filtrer.

- **Filtre de Goldstein [2]:** Ce filtre travaille dans le domaine fréquentiel. Cela a pour avantage de pouvoir traiter séparément les hautes et basses fréquences, les premières correspondant au bruit. Après avoir découpé l'interférogramme en fenêtres de même taille (32x32 pixels) se superposant à 75 %, le spectre fréquentiel de chacune d'elle est évalué par une transformation de Fourier. Ce spectre est alors multiplié par sa valeur absolue, lissée par un filtre moyen et soumise à une puissance α , comprise entre 0 et 1. Si α est égal à 0, il n'y a pas de lissage, le spectre fréquentiel étant multiplié par 1. Pour α égal à 1, le lissage est fort.

Modification apportée: Au lieu d'utiliser un filtre moyen de taille 3x3 pixels pour le lissage du spectre fréquentiel, qui livre un lissage uniforme des hautes et basses fréquences, un filtre de Gauss de la même taille que la fenêtre à traiter a été utilisé. Pratiquement, le filtre de Gauss, de par sa forme en cloche, minimise les fréquences se situant aux extrémités de la courbe (hautes fréquences), agissant comme un filtre passe-bas. Les fréquences élevées, caractéristiques du bruit, sont alors davantage lissées que les autres. De plus, des fenêtres de taille 25x25 pixels ainsi qu'un recouvrement de 80 % ont été utilisés, de manière à pouvoir centrer le lissage.

- **Filtre de Baran [1]:** Ce filtre repose sur le principe du filtre de Goldstein, mais



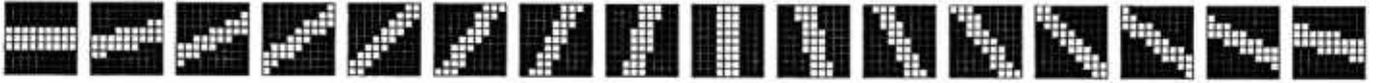


Figure 4. Filtres orientés de Lee.



propose de modifier le paramètre α qui, pour Goldstein, est arbitraire et fixe pour toute l'image, en le faisant dépendre de la cohérence dans la fenêtre considérée: $\alpha = 1 - \gamma$, où γ représente la cohérence moyenne de la fenêtre traitée.

Modification apportée: les mêmes que pour le filtre de Goldstein

• **Filtre de Lee [4]:** Le filtre de Lee est un filtre adaptatif comportant seize fenêtres de lissage d'orientations différentes (figure 4) de taille 9x9 pixels. Pour chaque pixel de l'image, la variance de la phase est évaluée dans chacune de ces fenêtres. La fenêtre directionnelle présentant la variance minimale est utilisée et une moyenne pondérée par la variance est calculée.

Modification apportée: L'idée a été de calculer le gradient de la phase dans chaque fenêtre directionnelle au lieu de calculer sa variance. Cette idée est justifiée par le fait qu'en zone de repliement, le gradient théorique est perpendiculaire à l'arête du bâtiment, et ce pour tous les pixels de la zone.

■ Filtres développés

Les nouveaux filtres développés reposent sur l'utilisation des coordonnées des angles du bâtiment. Dans ce travail, il n'a été considéré qu'un bâtiment rectangulaire à toit plat, et les coordonnées du bâtiment ont été directement définies dans l'image de phase. Pour une future application, il faudra songer à projeter le système de coordonnées SIG utilisé dans le plan de l'image, à l'aide des paramètres du capteur.

Filtres orientés avec intégration d'information SIG

Pour les filtres orientés utilisant l'information SIG, deux méthodes ont été implémentées. L'une, utilisant les seize fenêtres fixes directionnelles de Lee [4], et l'autre, définissant des filtres de longueur et d'orientation variables. La première méthode ne diffère du filtre de Lee que par la détermination du masque à utiliser à l'aide des coordonnées des angles du bâtiment au lieu de l'étude des statistiques locales.

Un schéma de principe de la deuxième méthode est représenté figure 5. A l'aide des coordonnées des angles du

bâtiment, six régions différentes sont définies dans l'image (différents tons de vert). Dans les régions 1 et 6, qui ne comprennent pas le bâtiment, sont appliqués des filtres quadratiques de taille 5x5 pixels.

Dans les autres régions (2 à 5), des filtres dynamiques sont définis, dont la longueur et l'orientation dépendent de la position de chaque pixel de la zone considérée par rapport à l'arête du bâtiment la plus proche et aux lignes de visée passant par les angles du bâtiment (caractérisées par les lignes pointillées horizontales).

Prenons l'exemple du point 4. La fenêtre de lissage est orientée selon l'orientation de l'arête B1B4 (pixels blancs à l'intérieur du masque). Sa longueur est définie à l'aide d'un point auxiliaire H4, intersection de l'arête B1B4 avec le déplacement du point 4 dans la direction de prise de vue. La distance séparant H4 de l'angle du bâtiment le plus proche (ici B4) est multipliée par deux et correspond à la taille de la diagonale du filtre. Ainsi, pour des pixels se situant exactement

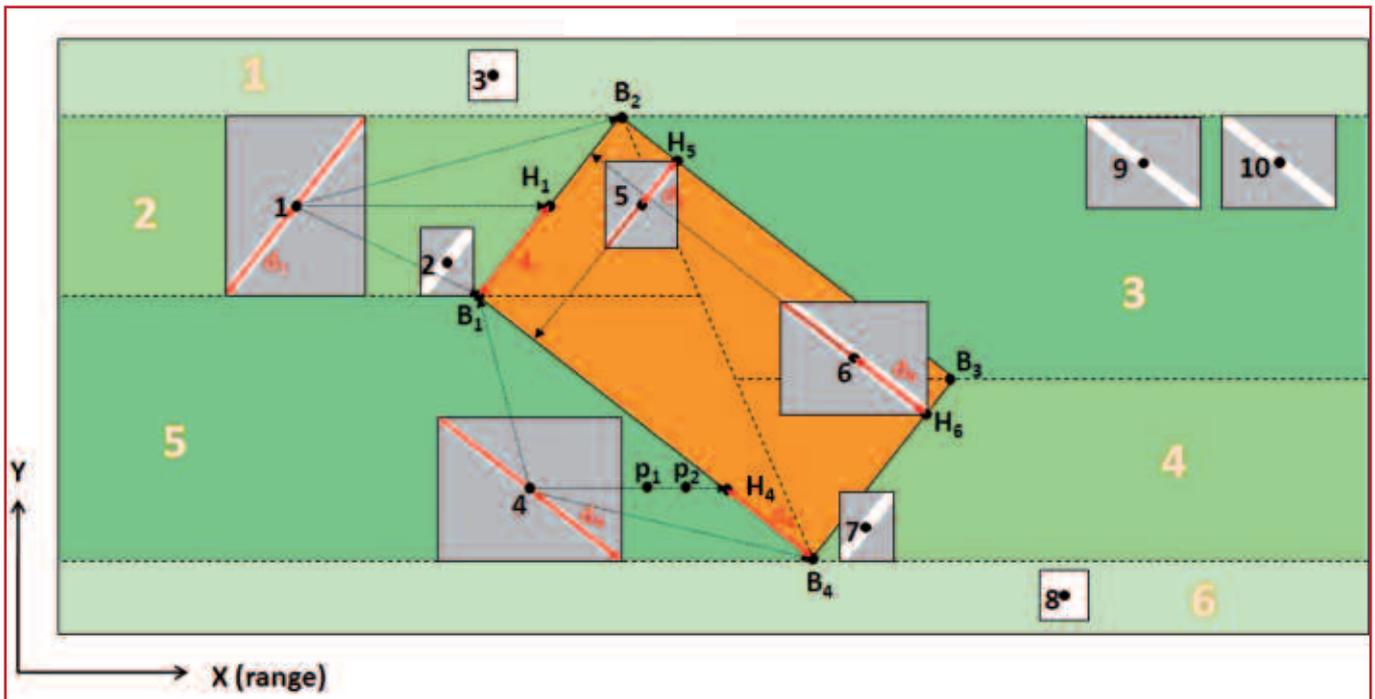


Figure 5. Schéma de principe du filtre dynamique orienté avec intégration d'une donnée SIG



au milieu de deux lignes de visée, la longueur totale de l'arête du bâtiment est utilisée (par exemple point 1), tandis que des pixels se situant plus près des lignes de visée recevront de plus petits masques (par exemple points 2 ou 7).

Pour les pixels se situant dans le toit du bâtiment, ce n'est plus la distance du point auxiliaire à l'angle du bâtiment le plus proche qui est considérée, mais la distance du pixel à liser à l'arête perpendiculaire la plus proche. Par exemple le point 6, situé dans la zone 3, est plus proche de l'arête B3B4 que de l'arête B1B2 (distance orthogonale). Sa distance à l'arête B3B4 est alors doublée et correspond à la longueur de la diagonale du filtre pour le point 6. Cela a pour avantage qu'aucun pixel en dehors du toit n'influence le lissage du toit.

Les filtres orientés avec intégration d'une information SIG ont donc pour avantage qu'ils prennent en compte l'orientation exacte et la longueur totale de chaque arête du bâtiment. De ce fait, les arêtes et la zone de repliement devant le bâtiment sont très bien préservées. Par contre, au niveau du toit, des filtres orientés sont aussi utilisés, alors que le toit est une zone homogène qui ne présente pas de

direction de lissage privilégiée. C'est pour cette raison que les filtres présentés ci-après ont été implémentés.

Filtres combinés

Il s'agit ici d'une combinaison entre les filtres orientés à l'aide d'information SIG et des filtres quadratiques (voir figure 6).

Le principe est le même que pour les filtres précédents, à l'exception que des filtres quadratiques sont utilisés dans le toit au lieu de filtres orientés. Du fait qu'à l'extérieur du toit, les filtres orientés sont utilisés, ce procédé de lissage permet toujours de bien conserver les arêtes et la rampe de phase en zone de repliement. À l'inverse du filtre précédent, il permet en complément de préserver l'homogénéité du toit en utilisant la même fenêtre de lissage quadratique pour tous les pixels du toit. Le seul inconvénient de ce filtre est dû aux effets de bordure aux arêtes du bâtiment. En effet, afin que le lissage effectué soit aussi important avec les filtres quadratiques qu'avec les filtres orientés précédents, de grandes fenêtres de lissage doivent être utilisées. Des grandes fenêtres de lissage impliquent cependant d'effectuer un bon traitement des bordures au droit des arêtes,

afin qu'aucun pixel en dehors du toit n'influence le lissage à l'intérieur du toit. Pour l'instant, seules de petites fenêtres de lissage ont été utilisées avec ce procédé (5x5 ou 9x9 pixels). De ce fait, les pixels extérieurs au toit n'ont que peu d'influence sur le résultat du lissage du toit.

■ Méthode de lissage utilisée

Pour les deux types de filtres présentés, différentes méthodes de lissage ont été testées. La méthode présentée ici est commune aux deux. Il s'agit d'un filtre moyen usuel, dont chaque pixel (valeur de phase) est pondéré par sa valeur de cohérence correspondante. L'intérêt de cette méthode est que la pondération apportée à chaque pixel dépend de son niveau de bruit. Ainsi, les pixels présentant une faible cohérence, c'est-à-dire bruités, reçoivent de plus faibles poids que les pixels présentant une meilleure cohérence. Ils ont donc moins d'impact sur le résultat final.

Comme la phase est donnée modulo 2π , il s'est avéré qu'un déroulement de phase (*Phase Unwrapping*) était nécessaire. En plus de la méthode proposée par Lee [4], s'agissant de prendre comme offset la moyenne complexe dans une fenêtre de taille

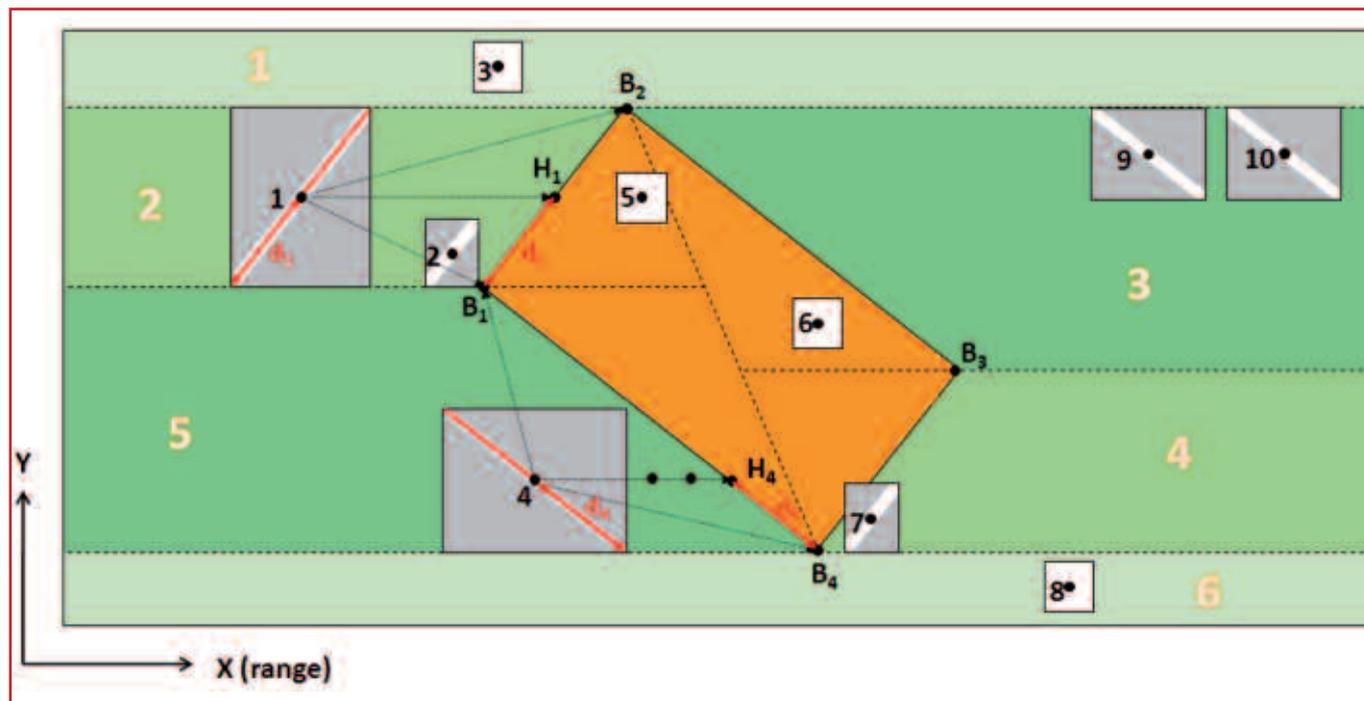


Figure 6. Schéma de principe des filtres combinés

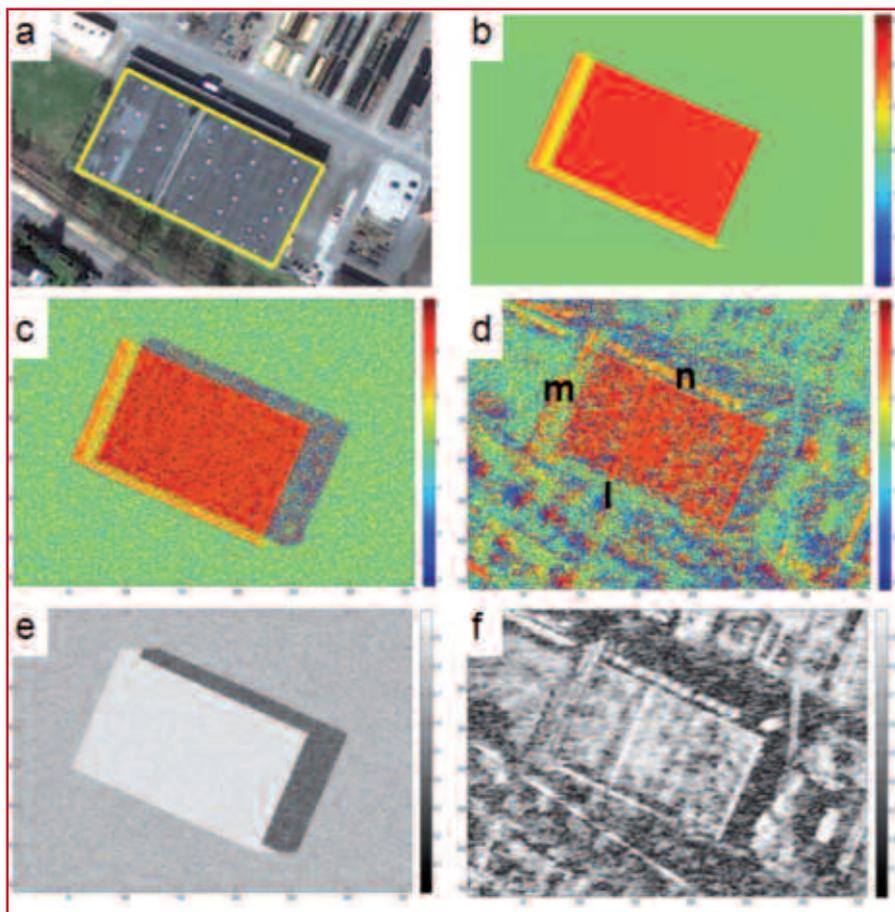


Figure 7. données utilisées ; a) vue aérienne (source : Google Maps) avec empreinte 2D (jaune) ; b) image de phase simulée (non bruitée) ; c) image de phase simulée (bruitée) ; d) image de phase réelle ; e) image de cohérence simulée (bruitée) ; f) image de cohérence réelle



3x3 pixels, deux autres méthodes ont été proposées :

- **Analyse d'histogramme :** pour cette méthode, un histogramme des valeurs de phase est généré pour chaque fenêtre de lissage. Le principe est que le bruit est aléatoirement réparti sur les différents intervalles de l'histogramme. Ainsi, l'intervalle contenant le maximum de valeurs correspond aux valeurs de phase non bruitées. En calculant la moyenne des valeurs de phase de cet intervalle, un offset est déterminé, à partir duquel le déroulement de phase est effectué pour toutes les valeurs contenues dans le masque de lissage.
- **Utilisation de valeurs de phase simulées :** pour cette méthode, il est nécessaire d'avoir la hauteur du bâtiment, afin que la signature du bâtiment puisse être simulée. Pour chaque pixel, sa valeur de phase simulée est l'offset utilisé pour tous les pixels de sa fenêtre de lissage.

Présentation et Analyse des Résultats

■ Données utilisées

Deux jeux de données ont été utilisés pour valider les filtres : un jeu de données simulées [6] et un jeu de données réelles du capteur aéroporté AeS-1 [5]. Les principaux paramètres de ce capteur sont résumés dans le **tableau 1**.

Les différentes données sont représentées **figure 7**. On peut déjà remarquer des différences entre les deux jeux de données. Tout d'abord, la zone de repliement (l) est absente sur les données réelles ; cela est lié aux arbres se situant devant le bâtiment et empêchant le signal radar d'arriver jusqu'au mur. Le repliement (m) est aussi différent sur les données réelles ; cela est de nouveau dû à des arbres se situant uniquement devant une partie du mur. C'est pour cela que la zone de repliement réelle ne paraît pas droite. Enfin,

Domaine fréquentiel	9.35...9.75GHz (Bande X)
Longueur de ligne de base	2.4 m
Altitude	3 000 m
Angle d'incidence	28° à 52°
Résolution (Range)	38 cm
Résolution (Azimut)	17 cm
Date d'acquisition	13/03/2003

Tableau 1. principaux paramètres du capteur AeS-1

en (n), une zone homogène de signal réfléchi apparaît sur l'image réelle, alors qu'il n'y a que de l'ombre sur les données simulées. Cela est dû à un avant-toit, non pris en compte lors de la simulation. Ces effets sont aussi visibles sur l'image de cohérence.

La plus grosse différence entre données simulées et données réelles est due aux objets se situant autour du bâtiment, qui n'ont pas été simulés. Lors de l'évaluation des résultats, cet effet a été pris en compte.

■ Résultats

Les résultats des différents filtres sont présentés **figure 8** pour les données réelles et actualisent les résultats précédemment présentés par Thiele [7].

En général, on peut remarquer que les modifications apportées aux filtres déjà existant (Goldstein, Baran et Lee) livrent de meilleurs résultats que les filtres standards, en particulier pour les filtres de Goldstein et Baran (2 et 4), pour lesquels le lissage est plus important avec les nouveaux filtres (3 et 5). Le filtre de Goldstein montre des résultats légèrement meilleurs que celui de Baran ; cela est dû au paramètre α , qui pour Goldstein a été fixé à 0.6 tandis qu'il varie pour Baran. Dans le toit en particulier, la cohérence γ est forte (de l'ordre de 0.8). Le paramètre α pour Baran est alors de l'ordre de 0.2 ($\alpha = 1 \gamma$) et le lissage est moins important que pour Goldstein.

En outre, les nouveaux filtres dynamiques avec intégration d'une information SIG livrent de bien meilleurs résultats que les autres (13a, 13b, 14b et 15b) : la rampe de phase du repliement est très bien conservée, et le toit

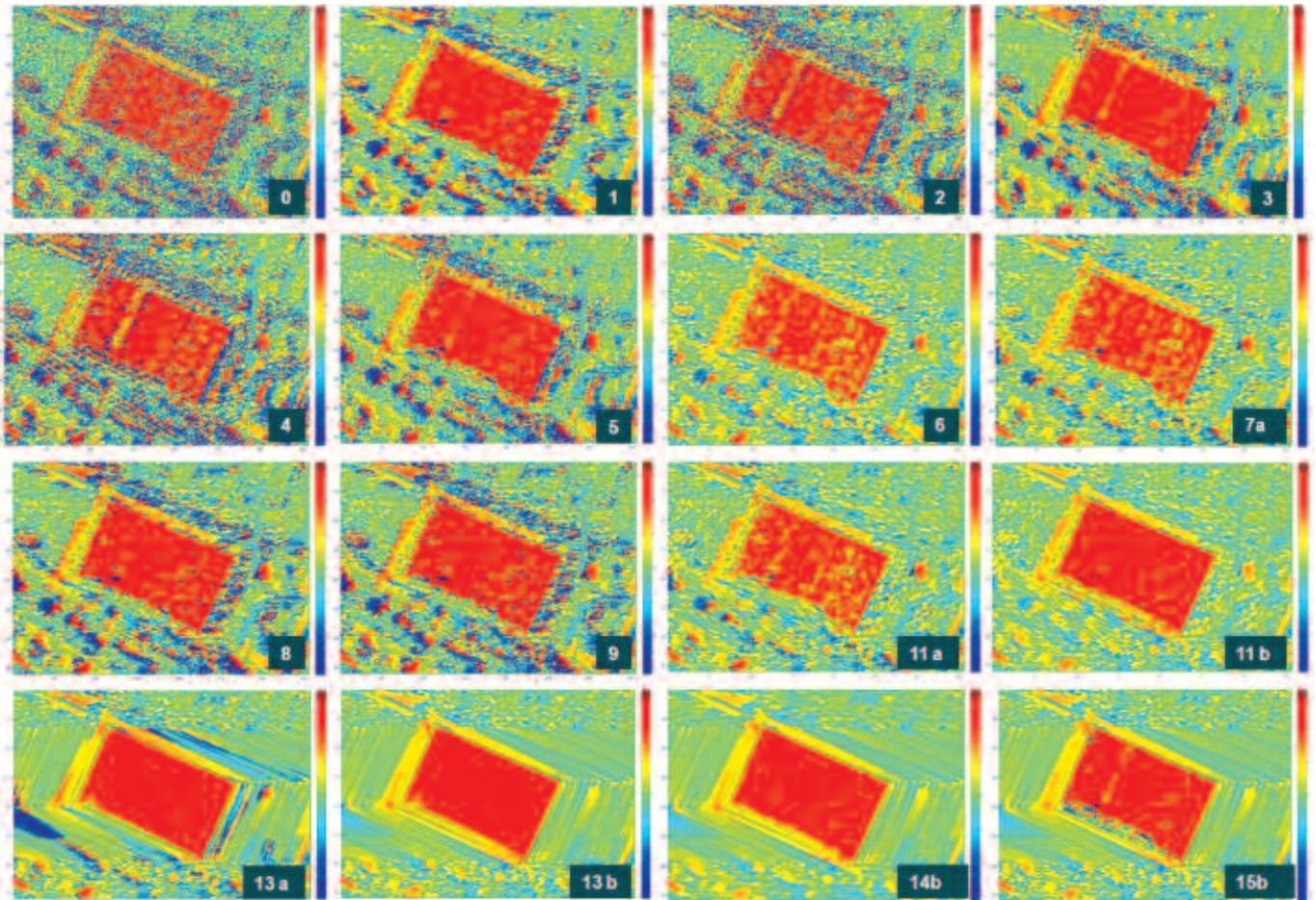


Figure 8. Résultats des différents filtres ; 0) : image réelle bruitée ; les autres numéros correspondent au filtre portant le même numéro figure 3. Pour tous les filtres, une fenêtre de lissage de taille 5x5 pixels a été utilisée, excepté pour 2) 3) 4), et 5) : 25x25 ainsi que pour les filtres combinés à l'intérieur du toit : 9x9. Les lettres a et b correspondent à la méthode de déroulement de phase utilisée : a) analyse d'histogramme et b) valeurs simulées

est plus homogène. En regardant dans le détail, on remarque que le lissage du toit avec le filtre combiné (14b) est légèrement plus faible qu'avec les filtres dynamiques orientés. Cela est dû à la taille de la fenêtre quadratique de lissage utilisée pour le toit : en effet, une fenêtre de taille 9 x 9 pixels a été utilisée, ce qui est nettement inférieur au nombre de pixels utilisés pour le lissage dans un filtre dynamique orienté.

Lorsque l'on compare les méthodes de déroulement de la phase, on remarque qu'avec la méthode par analyse d'histogramme la zone d'ombre n'est pas complètement filtrée (13a), par comparaison à la méthode par utilisation de valeurs de phase simulées (13b). Cela est dû à l'image simulée qui est utilisée comme offset pour le déroulement de la phase : celle-ci ne modélise pas la

zone d'ombre (voir figure 7, b). On remarque par contre que la hauteur du toit, sous-estimée sans déroulement de phase (par exemple 6, filtre médian), est conservée par les deux méthodes.

■ Evaluation des résultats

Parallèlement à une analyse visuelle des résultats, une interprétation numérique a été effectuée. Pour ce faire, sept valeurs ont été déterminées :

- la moyenne $\sigma_{\Delta\phi}$ des écarts-types locaux, calculés pour chaque pixel dans une fenêtre de 5x5 pixels (selon [2])
- la différence moyenne μ_{bat} entre l'image simulée et l'image filtrée, pour le bâtiment uniquement (toit et repliement)
- l'écart-type moyen σ_{bat} entre l'image simulée et l'image filtrée, pour le bâtiment uniquement

- la corrélation ρ_{bat} entre l'image simulée et l'image filtrée, pour le bâtiment uniquement
- la différence moyenne entre l'image simulée et l'image filtrée, pour toute la scène
- l'écart-type moyen entre l'image simulée et l'image filtrée, pour toute la scène
- la corrélation entre l'image simulée et l'image filtrée, pour toute la scène

Les valeurs se rapportant à toute la scène sont intéressantes pour les résultats sur les données simulées. Pour les données réelles, il est préférable de considérer les données se rapportant uniquement au bâtiment, à cause des objets entourant le bâtiment, qui influencent le résultat global. Les valeurs se rapportant uniquement au bâtiment sont rapportées dans le tableau 2 pour les données réelles. Ces



	0	1	2	3	4	5	6	7a	8	9	11a	11b	13a	13b	14b	15b
$\sigma_{\Delta\phi}$	1.36	0.55	1.18	0.89	1.18	0.86	0.36	0.40	0.70	0.80	0.40	0.29	0.32	0.19	0.14	0.24
μ_{bat}	0.18	0.30	0.18	0.27	0.18	0.28	0.61	0.53	0.27	0.26	0.53	0.20	0.35	0.20	0.21	0.24
σ_{bat}	1.26	0.80	1.09	0.88	1.10	0.88	0.77	0.81	0.84	0.88	0.80	0.48	0.61	0.36	0.40	0.68
ρ_{bat}	0.19	0.50	0.28	0.42	0.27	0.41	0.50	0.48	0.45	0.40	0.49	0.68	0.65	0.78	0.75	0.43

Tableau 2. Résultats numériques des différents filtres

valeurs sont en accord avec l'analyse visuelle des résultats et montrent que les modifications apportées aux différents filtres et surtout les nouveaux filtres avec intégration d'information SIG livrent les meilleurs résultats.

Conclusion

Dans cet article, des méthodes de lissage de l'image de phase interférométrique ont été présentées. Certaines ont été modifiées par rapport au filtre standard proposé, et d'autres ont été nouvellement créées dans le cadre de ce travail, avec pour but commun : améliorer le lissage de l'image de phase au niveau des bâtiments. Les filtres dynamiques orientés reposant sur l'utilisation d'une information SIG livrent les meilleurs résultats. De plus, deux nouvelles méthodes de déroulement de phase ont été proposées, montrant des résultats prometteurs.

Dans le futur, il est d'ailleurs envisagé de combiner ces deux méthodes : par analyse d'histogramme, l'image de phase peut être filtrée une première fois et une hauteur moyenne du bâtiment peut être déduite, qui sera utilisée comme donnée d'entrée pour l'image simulée, utilisée pour un second lissage de l'image. Une méthode de lissage pondérant chaque valeur de phase par sa cohérence a aussi été proposée, présentant également des résultats prometteurs. Par la suite, il est envisagé d'élargir le champ de recherche aux images satellite single-pass de la mission TanDEM-X, et de considérer d'autres formes de bâtiments (toits à pignon par exemple) ainsi que les voisinages entre bâtiments, le but étant d'automatiser le lissage des bâtiments en zone urbaine, où de nombreux cas de figure peuvent apparaître. Et grâce aux architectes, qui inventent chaque jour de nouvelles

formes, le travail n'est pas prêt d'être terminé! ●

Remerciements

Je souhaite remercier le DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) pour leur mise à disposition des images du satellite TerraSAR-X, le Fraunhofer IOSB (*Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung*) pour leur mise à disposition des images du capteur AeS-1, ainsi que le KIT-IPF (Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung) pour la proposition de ce thème.

Contact

Clémence DUBOIS

clm.dubois@googlemail.com

Références

- [1] Baran I., Stewart M., Kampes B., Perski Z., Lilly P. (2003) *A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter*. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, vol.41, no. 9, pp. 2114-2118.
- [2] Goldstein R. M., Werner C. L. (1998) *Radar Interferogram filtering for geophysical applications*. Geophysical Research Letters, vol.25, no.21, pp. 4035-4038.
- [3] Hanssen R.F. (2002) *Radar Interferometry, Data Interpretation and Error Analysis*. chap.4, pp-98-111.
- [4] Lee J.-S., Papathanassiou K.P., Ainsworth T.L., Grunes M.R., Reigber A. (1998) *A new technique for noise filtering of SAR interferometric phase images*. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, no.5, pp. 1456-1465.
- [5] Schwäbisch M., Moreira J. (1999) *The high resolution airborne interferometric SAR AeS-1*. Proceedings of the Fourth International Airborne Remote

Sensing Conference and Exhibition, Canada, pp. 540-547.

- [6] Thiele A., Cadario E., Hinz S. (2009) *Fusion of InSAR and GIS data for 3D building reconstruction and change detection*. Proceedings of "Fringe 2009 Workshop", ESA SP-677, March 2010.
- [7] Thiele, A., Dubois, C., Cadario, E., Hinz, S. (2011) *Smart Filtering of Interferometric Phases for Enhancing Building Reconstruction*. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, PIA11, Vol. XXXVIII, Part 3/W22, pp. 161-166.

ABSTRACT

Key-Words: InSAR, dynamic phase filtering, building, GIS, coherence

Nowadays, the demand of a rash and accurate mapping of urban areas is considerably increasing, be it for calculating the energetic impact of buildings by 3D modelling or for evaluating the damages after a natural disaster. The InSAR technology shows its importance in this task because of its use at any time of day and by any weather. However, due to several effects related to the sensor itself or to the configuration of acquisition, the interferometric phase image is very noisy. Before the buildings can be reconstructed, it is indispensable to smooth this image. In addition to the traditional filtering methods, a new adaptive method, based on GIS-Information, is presented in this article, which automatically adapts the filtering window to the typical shape of the building signature in the interferometric phase image. This new method is tested on real airborne single-pass data of the sensor AeS-1 and compared with the traditional methods.