

Caractérisation de bâtiments par interférométrie SAR polarimétrique multi-images utilisant une méthode d'analyse spectrale adaptative

Yue HUANG, Laurent FERRO-FAMIL

Université de Rennes 1, IETR UMR CNRS 6164
263 Avenue General Leclerc, 35042 Rennes Cedex, France

yue.huang@univ-rennes1.fr, laurent.ferro-famil@univ-rennes1.fr

Résumé – Ce travail présente une méthode d'analyse spectrale basée sur des sous-espaces polarimétriques (FP-WSF) pour la localisation et la caractérisation polarimétrique de sources en milieu urbain dense, à l'aide d'un réseau irrégulier SAR en configuration interférométrique et à faible dimension. Contrairement aux méthodes à Haute Résolution (HR) généralement utilisées, cette méthode s'adapte au type de mécanisme de rétrodiffusion polarimétrique observé, en considérant deux modèles de signaux rétrodiffusés, i.e. issus de diffuseurs cohérents ou distribués. Une solution analytique de l'optimisation du critère FP-WSF est développée qui permet de réduire très fortement la complexité du problème. L'efficacité de la méthode est démontrée sur des données SAR polarimétriques interférométriques multi-bases (MB-POLinSAR) en bande L.

Abstract – This paper proposes a polarimetric weighted subspace fitting spectral analysis method (FP-WSF) to localize and characterize backscattered signals in dense urban environments, by means of a small dimension irregular SAR array in interferometric configuration. Unlike other High Resolution (HR) methods, this technique adapts to the nature of the observed scattering mechanism by considering two signal models, i.e. scattered by coherent and distributed media. An analytical solution to the polarimetric optimization FP-WSF criterion is proposed that permits to maintain a low level of computational complexity. The effectiveness of the proposed method is demonstrated using polarimetric and interferometric multibaseline L-band SAR (MB-POLinSAR) data.

1 Introduction

L'objectif de ce travail est d'analyser et caractériser des zones urbaines, en termes de localisation et de caractérisation de structures, à partir de données SAR acquises avec une résolution intermédiaire, en configuration polarimétrique et interférométrique (PolInSAR). L'utilisation conjointe de l'interférométrie et de la polarimétrie permet de déterminer la hauteur de diffuseurs, de discriminer les différentes contributions localisées au sein d'un même pixel et d'extraire certaines de leurs propriétés géophysiques.

Une étude récente, proposée par Sauer et al. [1], a montré que l'application de méthodes d'estimation spectrale polarimétrique (Capon, MUSIC, Maximum de Vraisemblance (ML)) sur des données MB-PolInSAR à faible dimension, permet d'améliorer la discrimination, la localisation et la caractérisation des réponses des diffuseurs, dont la réponse est affectée par la géométrie SAR ou par la présence de végétation.

Bien qu'elles présentent des caractéristiques intéressantes, les méthodes utilisées dans [1] rencontrent certaines limitations, liées aux aspects suivants :

- Comme cela a été montré dans [2], les réponses de diffuseurs constituant une zone urbaine peuvent avoir des propriétés statistiques très variables, qui ne sont pas toutes traitées de manière optimale par les méthodes utilisées dans [1], ce qui entraîne des erreurs d'estimation et des instabilités.

- Le traitement des données MB-inSAR acquises avec un échantillonnage irrégulier, inhérent à l'utilisation de données réelles, fait apparaître des réponses ambiguës et des lobes secondaires élevés qui induisent des interprétations erronées.

Dans ce papier, nous proposons de remédier à ces limitations en utilisant une méthode HR s'adaptant au type de réponse traitée et limitant les effets des ambiguïtés. Nous montrons tout d'abord que les signaux mesurés sur une zone urbaine peuvent être considérés comme fluctuants, lorsque la réponse SAR est dominée par l'effet de speckle, caractéristique d'environnements distribués de type surface ou végétation, ou bien cohérents dans le cas d'un diffuseur ponctuel ou de phénomènes de double réflexion suivant un trajet spéculaire. Ensuite, nous proposons d'utiliser une méthode d'analyse spectrale HR basée sur la poursuite d'une fonction linéaire du sous-espace signal, appelée Weighted Subspace Fitting (WSF) et introduite dans [3], qui permet une adaptation à la nature du signal source et assure l'efficacité statistique de l'estimation. Une extension à une configuration totalement polarimétrique, FP-WSF, est développée, qui permet de restaurer le mécanisme optimal de diffusion, la réflectivité polarimétrique et d'atténuer fortement les lobes secondaires produits par l'échantillonnage irrégulier.

2 Modèle de signal MB-InSAR

Le signal MB-InSAR reçu par m capteurs, issu de d diffuseurs situés à des hauteurs différentes et dont les réponses appartiennent à la même cellule de résolution, peut être formulé comme :

$$\mathbf{y}(l) = \mathbf{A}(\mathbf{z})\mathbf{x}(l) + \mathbf{n}(l) \quad (1)$$

où $l = 1, \dots, L$ représente une acquisition et L est le nombre total de vues indépendantes. Le vecteur mesuré est noté $\mathbf{y}(l) \in \mathbb{C}^{m \times 1}$ et $\mathbf{x}(l) \in \mathbb{C}^{d \times 1}$ représente l'amplitude complexe de d signaux de source. La contribution du bruit additif de mesure est représentée par $\mathbf{n}(l) \in \mathbb{C}^{m \times 1}$ qui suit une distribution Gaussienne centrée de variance σ^2 , i.e. $\mathbf{n}(l) \sim \mathcal{N}^m(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I})$. La matrice $\mathbf{A}(\mathbf{z}) = [\mathbf{a}(z_1), \dots, \mathbf{a}(z_d)] \in \mathbb{C}^{m \times d}$ est formée à partir du vecteur directionnel $\mathbf{a}(z)$ de chacune des d sources, lui-même fonction de la configuration géométrique de mesure et de la position verticale inconnue du diffuseur, notée z_i .

$$\mathbf{a}(z_i) = [1, \exp(jk_{z_z} z_i), \dots, \exp(jk_{z_m} z_i)]^T \quad (2)$$

Les variations de $\mathbf{x}(l)$ d'une réalisation à l'autre peuvent être prises en compte en reformulant (1) sous la forme d'une somme de contributions comme :

$$\mathbf{y}(l) = \sum_{i=1}^d \mathbf{x}_i(l) \odot \mathbf{a}(z_i) + \mathbf{n}(l) \quad (3)$$

avec \odot , le produit Schur-Hadamard.

Les différents modèles de signaux reçus sont basés sur la variété de statistiques de signaux sources.

2.1 Modèle de signal pour des diffuseurs distribués

En considérant les d sources comme des diffuseurs distribués, dont la réponse est affectée par l'effet de speckle, comme cela est le cas pour des environnements naturels, le signal source peut s'écrire $\mathbf{x}_i(l) = \sqrt{\tau_i} \mathbf{x}_{ui}(l) \in \mathbb{C}^{m \times 1}$ où le terme de speckle multiplicatif $\mathbf{x}_{ui}(l)$ est un vecteur Gaussien centré, dont la matrice de covariance décrit la cohérence interférométrique du signal entre les différentes acquisitions, i.e. $\mathbf{x}_{ui}(l) \sim \mathcal{N}^m(\mathbf{0}, \mathbf{C}_i)$ et τ_i représente la réflectivité de la source considérée. Le vecteur mesuré noté $\mathbf{y}_u(l)$ suit une distribution Gaussienne centrée de covariance \mathbf{R} , i.e. $\mathbf{y}_u(l) \sim \mathcal{N}^m(\mathbf{0}, \mathbf{R})$.

2.2 Modèle de signal pour des diffuseurs cohérents

Dans le cas de diffuseurs cohérents, le signal source rétrodiffusé $\mathbf{x}(l)$ est déterministe et le signal source $\mathbf{x}_i(l) = \sqrt{\tau_i} \mathbf{x}_{ci}(l) \in \mathbb{C}^{m \times 1}$ est figé sur les L réalisations, i.e. $E\{\mathbf{x}_{ci}(l)\} = \mathbf{x}_{ci}(l)$. Le vecteur observé noté $\mathbf{y}_c(l)$ suit alors une distribution Gaussienne de moyenne $\mathbf{A}(\mathbf{z})\mathbf{x}(l)$ et de covariance égale à celle du bruit additif, i.e. $\mathbf{y}_c(l) \sim \mathcal{N}^m(\mathbf{A}(\mathbf{z})\mathbf{x}(l), \sigma^2 \mathbf{I})$.

2.3 Modèle de signal hybride

Un modèle hybride du signal MB-InSAR, introduit par Sauer et al [1] et mieux adapté à la description de réponse de zones urbaines, rassemble les contributions de diffuseurs cohérents et distribués.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(l) &= \mathbf{y}_c(l) + \mathbf{y}_u(l) \\ &= \sum_{i=1}^{d_1} \sqrt{\tau_i} \mathbf{x}_{ci}(l) \odot \mathbf{a}(z_i) \\ &\quad + \sum_{i=1}^{d_2} \sqrt{\tau_i} \mathbf{x}_{ui}(l) \odot \mathbf{a}(z_i) + \mathbf{n}(l) \end{aligned} \quad (4)$$

Les méthodes HR comme MUSIC, ML déterministe et stochastique n'ont des caractéristiques optimales que pour une partie des contributions dans (4) et conduisent à des performances limitées pour les diffuseurs appartenant à l'autre classe. La méthode MUSIC est adaptée aux diffuseurs distribués, mais ses performances se dégradent de façon significative en présence de diffuseurs cohérents, en raison d'une singularité de la matrice de covariance de signaux sources. La méthode ML déterministe convient aux diffuseurs cohérents et ne peut localiser précisément les diffuseurs distribués. Quant à la méthode ML stochastique, elle est asymptotiquement efficace pour estimer les diffuseurs distribués ou non-cohérents. Par conséquent, nous proposons d'utiliser une méthode s'adaptant au type de signal observé, c'est à dire conservant un caractère optimal pour toutes les contributions de (4).

3 Méthode HR FP-WSF

Afin de prendre en compte une diversité de polarisation à l'émission et à la réception des signaux (configuration FP), le vecteur directionnel polarimétrique est défini comme une combinaison linéaire de trois vecteurs directionnels, un par canal de polarisation, chacun pondéré par un coefficient complexe ϕ_i , $\mathbf{a}(z, \boldsymbol{\phi}) = \mathbf{a}_1(z)\phi_1 + \mathbf{a}_2(z)\phi_2 + \mathbf{a}_3(z)\phi_3$, avec $\sum_i |\phi_i|^2 = 1$. A partir de [3] et [4], nous définissons la méthode de poursuite du sous-espace signal polarimétrique, FP-WSF, comme :

$$(\hat{\mathbf{z}}, \hat{\boldsymbol{\Phi}}) = \arg \min \text{tr}\{\mathbf{A}^H(\mathbf{z}, \boldsymbol{\Phi}) \hat{\mathbf{E}}_n \hat{\mathbf{E}}_n^H \mathbf{A}(\mathbf{z}, \boldsymbol{\Phi}) \mathbf{W}\} \quad (5)$$

avec

$$\mathbf{A}(\mathbf{z}, \boldsymbol{\Phi}) = \mathbf{A}_1(\mathbf{z})\boldsymbol{\Phi}_1 + \mathbf{A}_2(\mathbf{z})\boldsymbol{\Phi}_2 + \mathbf{A}_3(\mathbf{z})\boldsymbol{\Phi}_3 \quad (6)$$

où $\boldsymbol{\Phi}_i$ ($i = 1, 2, 3$) est la matrice diagonale ($d \times d$) des coefficients du canal de polarisation i pour les d diffuseurs et \mathbf{E}_n est le sous-espace bruit. La matrice de pondération \mathbf{W} est choisie de façon à minimiser la variance de l'erreur d'estimation [3]

$$\mathbf{W}_{opt} = (\mathbf{A}^H(\mathbf{z}, \boldsymbol{\Phi}) \hat{\mathbf{E}}_s (\boldsymbol{\Lambda}_s - \sigma^2 \mathbf{I})^{-2} \boldsymbol{\Lambda}_s \hat{\mathbf{E}}_s^H \mathbf{A}(\mathbf{z}, \boldsymbol{\Phi}))^{-1} \quad (7)$$

La méthode de [4] est étendue au cas FP pour minimiser (5). En posant $\boldsymbol{\Psi} \in \mathbb{C}^{3d \times 1}$ le vecteur formé par les éléments diagonaux de $\boldsymbol{\Phi}_1, \boldsymbol{\Phi}_2, \boldsymbol{\Phi}_3$, i.e. $\boldsymbol{\Psi} = [\boldsymbol{\Psi}_1^T, \boldsymbol{\Psi}_2^T, \boldsymbol{\Psi}_3^T]^T \in \mathbb{C}^{3d \times 1}$, la fonction à minimiser devient :

$$V(\mathbf{z}, \boldsymbol{\Psi}) = \boldsymbol{\Psi}^H \mathbf{M}(\mathbf{z}) \boldsymbol{\Psi} \quad (8)$$

où $\mathbf{M}(\mathbf{z}) \in \mathbb{C}^{3d \times 3d}$, formée de 3×3 matrices définies par $\{\mathbf{M}_{ij}\} \in \mathbb{C}^{d \times d}$ avec $i, j = 1, 2, 3$, est représentée par

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^H \mathbf{\Pi} \mathbf{A}_1 \odot \mathbf{W} & \mathbf{A}_1^H \mathbf{\Pi} \mathbf{A}_2 \odot \mathbf{W} & \mathbf{A}_1^H \mathbf{\Pi} \mathbf{A}_3 \odot \mathbf{W} \\ \mathbf{A}_2^H \mathbf{\Pi} \mathbf{A}_1 \odot \mathbf{W} & \mathbf{A}_2^H \mathbf{\Pi} \mathbf{A}_2 \odot \mathbf{W} & \mathbf{A}_2^H \mathbf{\Pi} \mathbf{A}_3 \odot \mathbf{W} \\ \mathbf{A}_3^H \mathbf{\Pi} \mathbf{A}_1 \odot \mathbf{W} & \mathbf{A}_3^H \mathbf{\Pi} \mathbf{A}_2 \odot \mathbf{W} & \mathbf{A}_3^H \mathbf{\Pi} \mathbf{A}_3 \odot \mathbf{W} \end{bmatrix} \quad (9)$$

où $\mathbf{\Pi} = \hat{\mathbf{E}}_n \hat{\mathbf{E}}_n^H$. En normalisant $\mathbf{\Psi}$, le vecteur de paramètres polarimétriques se simplifie en $\mathbf{\Psi}' = [\mathbf{e}^T, \mathbf{\Psi}'_2, \mathbf{\Psi}'_3]^T$ avec $\mathbf{e} = [1, \dots, 1]^T$. L'Estimateur des signaux sources est donné par

$$(\hat{\mathbf{z}}, \hat{\mathbf{\Psi}}'_2, \hat{\mathbf{\Psi}}'_3) = \arg \min [\mathbf{e}^T, \mathbf{\Psi}'_2, \mathbf{\Psi}'_3] \mathbf{M}(\mathbf{z}) \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{\Psi}'_2 \\ \mathbf{\Psi}'_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Les solutions de $\partial V / \partial \mathbf{\Psi}'_2 = 0$ et $\partial V / \partial \mathbf{\Psi}'_3 = 0$ aboutissent à :

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{\Psi}}'_2(\mathbf{z}) &= -\mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{M}_{21} + \mathbf{M}_{23} \mathbf{G}) \mathbf{e} \\ \hat{\mathbf{\Psi}}'_3(\mathbf{z}) &= \mathbf{G} \mathbf{e} \end{aligned} \quad (11)$$

avec $\mathbf{G} = (\mathbf{M}_{23}^H \mathbf{M}_{22}^{-1} \mathbf{M}_{23} - \mathbf{M}_{33})^{-1} (\mathbf{M}_{31} - \mathbf{M}_{32} \mathbf{M}_{22}^{-1} \mathbf{M}_{21})$.

Une fois que la configuration optimale de polarisation est trouvée, la configuration de WSF ne dépend que de \mathbf{z} et peut être formulée comme

$$V(\mathbf{z}) = [\mathbf{e}^T, \hat{\mathbf{\Psi}}'_2, \hat{\mathbf{\Psi}}'_3] \mathbf{M}(\mathbf{z}) \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \hat{\mathbf{\Psi}}'_2 \\ \hat{\mathbf{\Psi}}'_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{z}} &= \arg \min V(\mathbf{z}) \\ \hat{\mathbf{\Psi}}'_2 &= \hat{\mathbf{\Psi}}'_2(\hat{\mathbf{z}}) \\ \hat{\mathbf{\Psi}}'_3 &= \hat{\mathbf{\Psi}}'_3(\hat{\mathbf{z}}) \end{aligned}$$

Cette solution analytique permet de déterminer les d mécanismes de rétrodiffusion polarimétriques et de réduire la dimension du processus de minimisation de $5 \times d$ à $1 \times d$, i.e. de $\boldsymbol{\theta} = \{\mathbf{z}, \mathcal{R}(\Phi'_2), \mathcal{I}(\Phi'_2), \mathcal{R}(\Phi'_3), \mathcal{I}(\Phi'_3)\} \in \mathbb{R}^{5d}$ à $\boldsymbol{\theta} = \{\mathbf{z}\} \in \mathbb{R}^d$, i.e. celle de la méthode WSF pour un seul canal de polarisation.

4 Résultats Expérimentaux

La méthode proposée est appliquée sur des données SAR polarimétriques acquises sur la ville de Dresde par le capteur E-SAR du DLR (Centre Aérospatial Allemand) en bande L et est comparée à des techniques usuelles sur un profil de bâtiment montré sur la figure 1. Les résultats d'estimation monodimensionnelle utilisant les méthodes MUSIC, ML déterministe et stochastique à l'ordre 1 sont montrés sur la figure 4, sous la forme de tomogrammes continus. La méthode MUSIC a une meilleure résolution que les méthodes ML. De plus, le tomogramme continu de la méthode ML déterministe, très atténué sur le toit et le sol mais présentant une valeur élevée pour la double réflexion sur le sol et les murs du bâtiment, indique que cette technique estime bien les diffuseurs cohérents et sous-estime ceux distribués. Comme cela est montré sur la Fig 4(g), la méthode FP-WSF permet de s'affranchir de lobes

secondaires, contrairement aux autres méthodes HR utilisées. Le profil de bâtiment montre que FP-WSF peut bien localiser les diffuseurs cohérents (double réflexion sur le sol et les murs) et ceux distribués (réflexion simple sur le sol, le toit ou le mur). L'image 3-D d'une zone urbaine Fig 2(a), obtenue par la méthode FP-WSF à l'ordre 1 est montrée sur la figure 2. La topographie estimée renseigne sur la hauteur et la forme des bâtiments, tandis que le paramètre polarimétrique α indique la nature du mécanisme de rétrodiffusion polarimétrique, double réflexion sur le sol et les murs du bâtiment ou sur des structures complexes, ou bien réflexion simple sur les toits ou sur le sol. Afin de localiser plus de diffuseurs et de mieux les caractériser sur le profil de bâtiment, nous avons choisi un modèle d'ordre 2 pour appliquer les méthodes d'estimation. Comme l'illustre la figure Fig 3, la méthode FP-WSF (ordre=2) permet d'extraire la forme du bâtiment ainsi que les mécanismes de rétrodiffusion principaux.

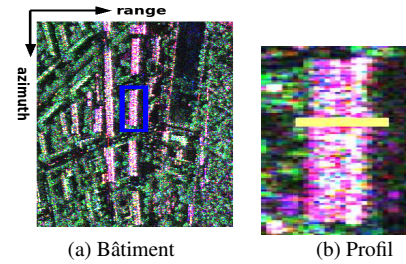


FIG. 1: Profil de bâtiment sélectionné

5 Conclusion

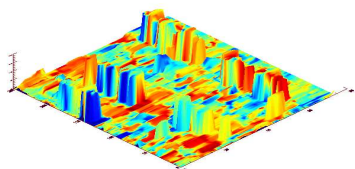
Dans ce travail, nous présentons une nouvelle méthode pour estimer la hauteur de bâtiment et les mécanismes de rétrodiffusion en environnement urbain complexe, en utilisant les données polarimétriques MB-InSAR. Les méthodes souvent utilisées peuvent présenter les limitations liées à des lobes secondaires importants et un caractère optimal pour un seul type de réponse SAR. La méthode proposée, basée sur la technique de poursuite de sous-espaces s'adapte aux différents types de signal et peut être optimalement appliquée sur des diffuseurs cohérents et distribués. L'Estimateur WSF polarimétrique proposé est développé en utilisant une solution analytique d'optimisation polarimétrique qui maintient la complexité de calcul égale à celle d'un seul canal de polarisation. Grâce à cet estimateur WSF complètement polarimétrique, la caractérisation de l'hauteur et de rétrodiffusion de bâtiment est raffinée.

Références

- [1] S. Sauer, L. Ferro-Famil, E. Pottier, and A. Reigber. Physical parameter extraction over urban areas using l-band polar data and interferometric baseline diversity. *Geos-*



(a) Image optique d'une zones urbaine à dresden (b) image SAR polarimétrique



(c) reconstruction 3-D FP-WSF du paramètre α

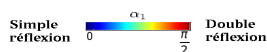
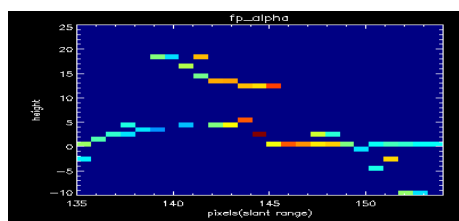
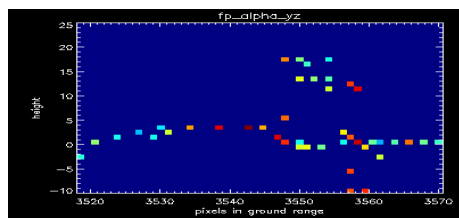


FIG. 2: Catographie 3-D d'un zone urbaine



(a) α (dans le plan d'incidence)

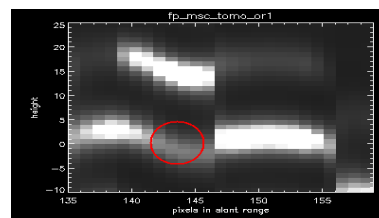


(b) α (après projection au sol)

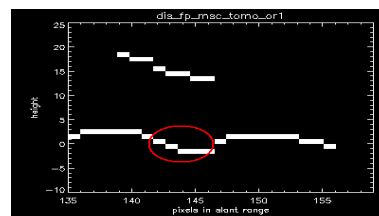
FIG. 3: α tomogram, FP-WSF (order 2)

science and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International, pages 1–5, July 2007.

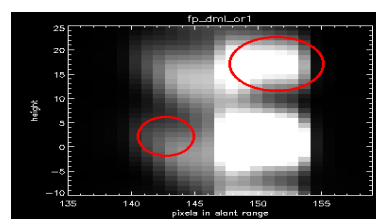
- [2] L. Ferro-Famil and E. Pottier. Urban area remote sensing from l-band polsar data using time-frequency techniques. *IEEE Urban Remote Sensing Joint Event*, pages 5045–5048, April 2007.
- [3] M. Viberg and B. Ottersten. Sensor array processing based on subspace fitting. *IEEE Trans. Signal processing*, 39:1110–1121, May 1991.
- [4] A. Swindlehurst and M. Viberg. Subspace fitting with diversely polarized antenna arrays. *IEEE trans. Antennas and propagation*, 41(12):1687–1694, Dec 1993.



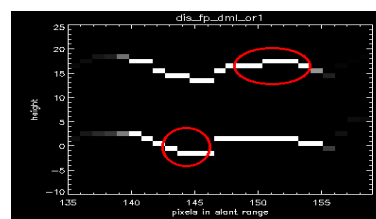
(a) Tomogramme FP-MUSIC



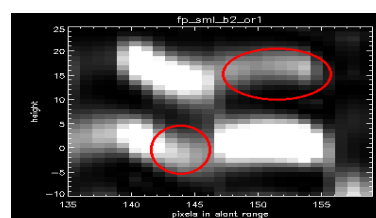
(b) Tomogramme FP-MUSIC discret



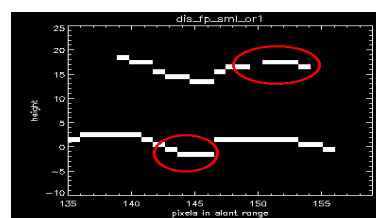
(c) Tomogramme FP-DML



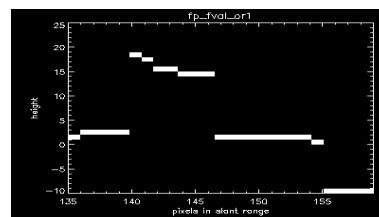
(d) Tomogramme FP-DML discret



(e) Tomogramme FP-SML



(f) Tomogramme FP-SML discret



(g) Tomogramme FP-WSF

FIG. 4: Tomogramme d'un bâtiment (order=1)