

Détection de structures linéiques dans les images radar à synthèse d'ouverture par test de ratio de vraisemblance généralisé

Nicolas Gasnier¹

Loïc Denis²

Florence Tupin¹

¹ LTCI, Télécom Paris, Institut Polytechnique de Paris, 91120 Palaiseau

² Univ Lyon, UJM-Saint-Etienne, CNRS, Laboratoire Hubert Curien UMR 5516, Saint-Etienne

nicolas.gasnier@telecom-paris.fr

Résumé

La détection de structures linéiques constitue souvent une première étape pour des traitements tels que la détection de réseaux routiers ou hydrographiques. Dans cet article, nous proposons une nouvelle méthode basée sur le test de vraisemblance généralisé (Generalized Likelihood Ratio Test : GLRT) pour évaluer en chaque pixel la vraisemblance d'une structure linéique. Des résultats seront présentés pour des images Sentinel 1 et comparés avec une méthode état de l'art, également dérivée du GLRT mais avec une modélisation plus simple des lignes. Nos expériences montrent que notre méthode produit beaucoup moins de faux positifs que la méthode de référence.

Mots Clef

Détection de structures linéiques, RSO, GLRT, Test d'hypothèses,

Abstract

The detection of linear structures in Synthetic Aperture Radar images is often used as a first step for further processing such as the extraction of road and river networks. In this paper, we propose a new method based on the Generalized Likelihood Ratio Test (GLRT) framework to evaluate at each pixel the likelihood of the presence of a linear structure. Results are presented on Sentinel-1 images and compared with a state-of-the-art method, also derived from the GLRT framework but with a simpler model of the lines. In our experiments, our method produces far fewer false positives than the reference method.

Keywords

Linear structures detector, SAR, GLRT, Hypothesis testing

1 Introduction

Avec la disponibilité croissante d'images radar à synthèse d'ouverture (RSO), de nombreuses applications ont été développées pour extraire des informations utiles de ces données pour de nombreux domaines : surveillance des zones urbaines, suivi des écosystèmes, hydrologie,...) Pour certaines de ces applications, comme l'extraction de

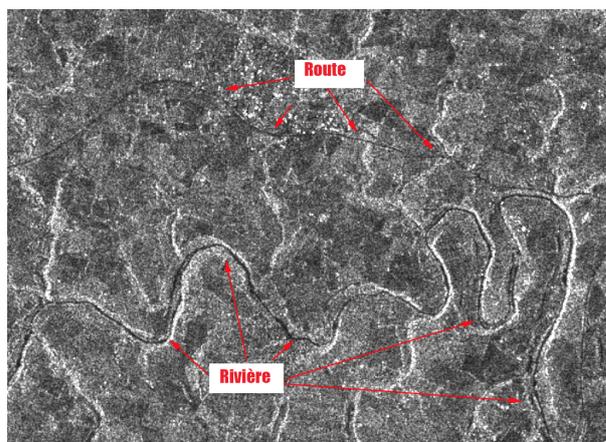


FIGURE 1 – Illustration de structures linéiques qui peuvent être observées en télédétection SAR

rivières ou de réseaux routiers, la détection des structures linéiques est une étape essentielle.

Ces structures linéiques peuvent être définies comme étant un ensemble contigu de pixels avec une disposition longue et étroite (épaisseur de quelques pixels seulement) dont la réflectivité est significativement différente de la réflectivité du fond. Les structures linéiques, qui ne sont pas nécessairement rectilignes, peuvent être sombres (routes et rivières pour la majorité des capteurs SAR tel que Sentinel 1, TerraSAR-X,...) ou claires (rivières ou autres structures linéiques horizontales comme des routes pour les capteurs near-nadir comme interféromètre KaRIn de la future mission SWOT [3]).

Leurs détection est particulièrement difficile pour les images SAR en raison du haut niveau de bruit de chatoiement : l'intensité mesurée peut être très différente de la réflectivité sous-jacente. En raison de ces fluctuations, les méthodes qui ont été développées pour les images optiques ([4, 2, 1, 9, 7]) ne peuvent pas être appliquées directement aux images SAR. Pour faire face au bruit de chatoiement, il est possible d'appliquer une première

étape de débruitage pour réduire le niveau de bruit, mais cette approche a l'inconvénient d'augmenter le temps de calcul nécessaire mais surtout de détruire certains détails comme des structures fines, voire de créer des artefacts. Ces effets du débruitage peuvent conduire à des mauvaises détections de structures linéiques : faux négatifs et faux positifs respectivement.

Au cours des 30 dernières années, plusieurs méthodes ont été proposées pour résoudre le problème de détection des structures linéiques dans les images SAR bruitées : Hellwich *et al.* [5] combine les informations de cohérence et d'intensité, Tupin *et al.* [8] combine les résultats d'un détecteur de lignes basé sur le ratio et d'un détecteur de lignes basé sur la corrélation croisée, et peut toujours être considéré comme une méthode de référence aujourd'hui.

Dans cet article, nous proposons une nouvelle approche en se basant sur la propriété d'invariance locale de l'intensité en translation le long de la structure linéique pour en dériver un test d'hypothèse et déterminer laquelle de la présence et de l'absence d'une structure linéique est la plus probable. Cette étape mène à une carte de scores, de même taille que l'image d'origine, qui peut ensuite être utilisée pour la suite du traitement, par exemple pour retrouver la position précise d'un réseau à travers des méthodes de programmation linéaire [6] ou de recherche du chemin de moindre coût entre deux points.

2 Généralités sur la méthode utilisée

Dans cette section, nous présentons le modèle qui fonde notre méthode et décrivons comment notre critère est défini. Le plus souvent, un seul type de structure linéique est recherché : soit des lignes claires sur un fond plus sombre, soit des lignes sombres sur un fond plus clair (par exemple, les routes ou les rivières pour le capteur Sentinel 1). Une caractéristique de notre approche est de distinguer clairement ces deux cas. Dans ce qui suit, nous présenterons la détection des structures linéiques sombres. L'adaptation de la méthode à la détection des structures claires est directe.

2.1 Critère du ratio de vraisemblance généralisé pour la détection de structures linéiques

Notre critère de détection évalue la vraisemblance de présence d'une structure linéique centrée sur un pixel k donné en comparant deux hypothèses :

- H_0 : absence de structure linéique
- H_1 : présence d'une structure linéique

La comparaison entre ces deux hypothèses se fait en déterminant quelle hypothèse explique le mieux le patch observé $I_k \in R^{(2N+1) \times (2N+1)}$ (ie, le vecteur formé par concaténation de toutes les intensités à l'intérieur d'une petite fenêtre carrée centrée sur le k -ième pixel). Dans cet article, nous supposons que l'hypothèse nulle H_0 ("pas de

structure linéique") correspond à un patch avec une réflectivité constante¹ R .

$$GLRT_k = \frac{p(I_k|H_1, \hat{P}, \hat{\theta})}{p(I_k|H_0, \hat{R})}. \quad (1)$$

Le ratio de vraisemblance généralisé (GLRT) doit être calculé à chaque pixel k de l'image. Le calcul des estimateurs du maximum de vraisemblance est simplifié lorsque l'on considère une transformation logarithmique des intensités. Selon le modèle de speckle complètement développé proposé par Goodman, les intensités transformées logarithmiquement suivent une distribution de Fisher-Tippett :

$$p(y|x) = \frac{L^L}{\Gamma(L)} e^{L(y-x)} \exp(-Le^{y-x}), \quad (2)$$

où y est le log de l'intensité à un pixel donné, x est le log de la réflectivité à ce pixel et L est le nombre de vues de l'image, qui correspond au niveau de bruit. Afin d'obtenir des expressions analytiques pour les estimateurs de vraisemblance et calculer simplement le ratio de vraisemblance généralisé, nous utiliserons une approximation gaussienne pour cette distribution :

$$p(y|\mu) \simeq f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (3)$$

où $\sigma = \sqrt{psi(1, L)}$, et $\mu = x - \log(L) + \psi(L)$ avec ψ étant respectivement la fonction polygamma et la fonction digamma pour correspondre à l'écart type et à l'espérance de la distribution précédente. Cette approximation est suffisamment précise pour les images SAR multilookées. **La figure 2** compare la distribution du speckle log-transformé pour $L = 4.4$ comme pour les images Sentinel-1 GRD haute définition acquises en mode interférométrique (IW). Les deux distributions sont proches. Bien que les différences puissent avoir un impact limité sur la précision des estimateurs de la réflectivité, l'impact est négligeable pour $L = 4, 4$ dans le cadre du test d'hypothèse.

Sous ces hypothèses, la log-réflectivité biaisée $r = \log(R) - \log(L) + \psi(L)$ du fond homogène sous l'hypothèse H_0 peut être estimée à partir de la moyenne de la transformation logarithmique de l'intensités y du patch en soustrayant un terme de biais $\log(L) - psi(L)$.

L'estimation du profil de réflectivité et de l'orientation de la ligne est décrite plus en détail dans la section suivante.

Lorsque les estimations des log-réflectivités (biaisées) du patch \hat{r}_1 , sous H_0 et $\hat{r}_k(\hat{\theta})$, sous l'hypothèse H_1 , sont utilisées dans la définition de $GLRT_k$ dans l'équation (1), on

¹. Cette hypothèse peut paraître trop restrictive. Des distributions de réflectivité inhomogènes à l'intérieur du patch qui ne peuvent être modélisées ni par une constante ni par un profil invariant de translation conduisent à des valeurs de vraisemblance similaires sous H_0 et H_1 , elles ne conduisent donc pas à de fausses détections. L'hypothèse simplificatrice d'une réflectivité constante sous H_0 ne limite donc pas l'applicabilité de la méthode à des structures homogènes ou linéiques.

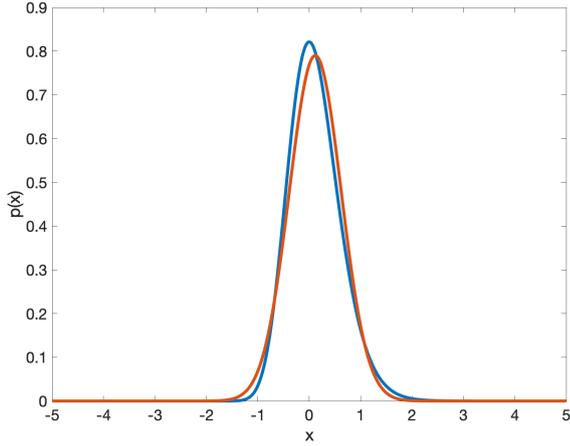


FIGURE 2 – Distribution de Fisher-Tippett (orange) et approximation gaussienne (bleue) pour $L=4.4$.

obtient, sous l'approximation gaussienne présentée précédemment :

$$\log(GLRT_k) = \frac{1}{2} \|y_k - \hat{r}_k(\hat{\theta})\|^2 - \frac{1}{2} \|y_k - \hat{r}1\|^2, \quad (4)$$

Où 1 est un vecteur de 1 de même dimension que y_k (le nombre de pixels dans un patch).

2.2 Modélisation d'une structure linéique

Avant de paramétriser la structure linéique étudiée, nous définissons d'abord comment une structure linéique peut être caractérisée à l'échelle d'un patch. Considérant un patch de taille $(2N + 1) \times (2N + 1)$, centré sur le k -ième pixel, avec une ligne sombre qui traverse le patch comme illustré dans la figure 3, deux principes définissent notre modèle :

1. la réflectivité est plus faible dans au centre de la structure linéique que sur ses bords
2. La distribution de la réflectivité est invariante dans la direction de la ligne.

Dans la suite de l'article, la distribution 1D de la réflectivité le long de la direction orthogonale à la ligne est appelée *profil de réflectivité*.

En plus de l'invariance en translation de la réflectivité dans la direction de la ligne, il faut également que le profil soit symétrique par rapport à l'axe médian de la ligne. Cette propriété est nécessaire pour améliorer la localisation de la structure linéique et pour réduire le nombre de faux positifs.

2.3 Estimation de l'orientation locale de la structure linéique

L'estimation au sens du maximum de vraisemblance de $\hat{\theta}$ de l'angle d'orientation de la structure linéique du patch est obtenu par échantillonnage uniforme de l'orientation :

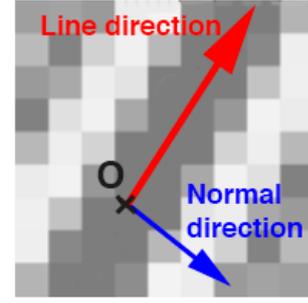


FIGURE 3 – Le profil de la réflectivité de la structure linéique est défini dans la direction normale à la direction de la structure linéique

dans nos expériences, 60 échantillons ont été utilisés pour l'intervalle $[0, \pi]$. En chaque pixel, la plus grande valeur de $GLRT_k$ parmi toutes les valeurs calculées, correspondant chacune à une orientation, est retenue.

2.4 Estimation du profil de réflectivité de la structure linéique

La première étape pour estimer le profil de réflectivité de la structure linéique consiste à modéliser la correspondance entre un profil 1D Vp et un patch 2D (θ) . Afin de traiter un patch de taille $(2N + 1) \times (2N + 1)$ pixels pour toutes les orientations de la ligne, le profil 1D doit couvrir $\sqrt{2}(2N + 1)$ pixels. Puisque nous considérons des profils symétriques par rapport à la ligne centrale, il suffit de définir le profil uniquement pour les $\sqrt{2}(N + 1)$ premiers pixels à partir du centre de patch O. L'opération de correspondance revient à interpoler le profil 1D à chaque pixel du patch 2D en fonction de la distance du pixel à la ligne passant par O et qui forme un angle θ par rapport à la direction horizontale. Cette opération d'interpolation est une transformation linéaire caractérisée par une matrice M_θ de taille $(2N + 1) \cdot (2N + 1) \times \sqrt{2}(N + 1)$:

$$r(\theta) = M_\theta \cdot p \quad (5)$$

La deuxième étape consiste à calculer l'estimation du maximum de vraisemblance \hat{p}_θ du profil de réflectivité d'une structure linéique orientée dans la direction θ . Dans le cadre de notre approximation gaussienne, cela correspond à la solution des moindres carrés :

$$\hat{p}_\theta = (M_\theta^T M_\theta + \epsilon I)^{-1} M_\theta^T y_k, \quad (6)$$

où le terme ϵI , avec ϵ une petite constante et I une matrice identité, est ajouté afin de garantir l'inversibilité de la matrice.

Afin de contraindre la réflectivité au centre de la structure linéique à être le minimum du profil de réflectivité, une opération de seuillage est ajoutée après estimation du profil au sens du maximum de vraisemblance, pour garantir

qu'aucun point de la ligne ne puisse être plus clair que le fond :

$$\hat{p}_\theta^+ = \max [\hat{p}_\theta, \hat{p}_\theta(0)] , \quad (7)$$

où le maximum est appliqué par composant et $\hat{p}_\theta(0)$ est la valeur de la log-réflexivité au centre du profil. Dans le profil seuillé \hat{p}_θ^+ , aucune réflexivité ne peut être inférieure à la réflexivité au centre du profil. Si, au lieu de lignes sombres, on cherchait à détecter des lignes claires, ce maximum devrait être remplacé par un minimum pour définir un profil *widehat* Vp_{theta-} où aucune réflexivité ne peut être plus claire que la réflexivité à le centre de la ligne.

A partir de ce profil estimé, les réflexivités estimées à l'intérieur du patch centré sur le pixel k sont obtenues en appliquant l'opérateur d'interpolation M_θ :

$$\hat{r}(\theta) = M_\theta \hat{p}_\theta^+ . \quad (8)$$

L'orientation est obtenue par maximisation de la vraisemblance :

$$\hat{\theta} = \underset{\theta}{\operatorname{argmax}} \|y_k - M_\theta \hat{p}_\theta^+\|^2 . \quad (9)$$

Le calcul de $GLRT_k$ est alors obtenu par application de l'équation (4). Étant donné que ce calcul doit être effectué pour tous les patches de l'image, une implémentation efficace est nécessaire. Nous utilisons un algorithme basé sur des convolutions discrètes utilisant des transformées de Fourier rapides pour calculer le produit matrice-vecteur en équation (6) et sur une décomposition SVD pour évaluer efficacement $GLRT_k$.

3 Adaptations potentielles de la méthode

Certaines des adaptations possibles de la méthode sont exposées dans cette section.

3.1 Traitement multi-échelle

Comme la largeur maximale des structures pouvant être détectées est limitée par la taille du patch, la détection de structures linéiques larges peut être difficile à calculer. Pour traiter ces cas, une approche de traitement multi-échelle peut être utilisée en appliquant le détecteur sur des images redimensionnées par interpolation. Des combinaisons de plusieurs échelles peuvent être effectuées en combinant les réponses redimensionnées du détecteur.

3.2 Adaptation à la détection des rivières dans des capteurs proches du nadir

Sur des capteurs proches du nadir comme KaRIn dans la future mission SWOT, les surfaces horizontales comme les rivières sont détectées comme des structures linéiques claires sur un fond sombre. Le détecteur proposé peut facilement être adapté à cette configuration en modifiant la contrainte présentée en section 2.4 : au lieu d'empêcher le profil d'être plus sombre que son centre comme pour les détections de lignes sombres, la contrainte empêche le profil d'être plus clair.

4 Résultats

Cette section présente les résultats du détecteur de ligne proposé appliqué à diverses images SAR Sentinel 1. Les résultats sont comparés à la réponse du détecteur de structures linéiques présenté dans [8]. Les résultats présentés ici ont été obtenus à l'aide de notre détecteur de ligne en utilisant trois échelles de détection (avec des facteurs de redimensionnement de 3,2 et 1) et en sommant les résultats.

Les deux images sont des images GRD Sentinel 1 pleine résolution acquises en mode IW avec des structures linéiques sombres correspondant à des rivières. **La figure 4** montre une comparaison des deux détecteurs sur des structures linéiques correspondant à la rivière Esk près de Carwinley (Royaume-Uni). Sur **la figure 5** les structures linéiques sombres correspondent aux rivières Vilaine et Oust près de Redon (France). **La figure 6** présente les résultats pour les méandres du fleuve Aulne, sinueux, près de Chateaulin (France)

La réponse de l'algorithme proposée a significativement moins de faux positifs tout en maintenant une bonne détection des structures linéiques comparé à l'algorithme état de l'art.

5 Conclusion

Cet article propose une nouvelle approche pour détecter les structures linéiques dans une image SAR qui peuvent avoir de multiples applications telles que le réseau routier ou l'extraction de rivière. Dans nos comparaisons sur l'image Sentinel 1, la méthode proposée montre une performance de détection améliorée par rapport à une méthode de détection de ligne de référence.

Ce détecteur constitue une première étape à une chaîne de détection des rivières fines qui fera l'objet de futures publications.

6 Remerciements

Les auteurs remercient le Centre National d'Études Spatiales (CNES) et C-S GROUP pour leurs financements.

Références

- [1] F. Deschênes and D. Ziou. Detection of line junctions and line terminations using curvilinear features. *Pattern Recognition Letters*, 21(6) :637 – 649, 2000.
- [2] Martin A Fischler, Jay M Tenenbaum, and Hans Christoph Wolf. Detection of roads and linear structures in low-resolution aerial imagery using a multisource knowledge integration technique. In *Readings in Computer Vision*, pages 741–752. Elsevier, 1987.
- [3] R. Fjørtoft, J. Gaudin, N. Pourthié, J. Lalaurie, A. Mallet, J. Nouvel, J. Martinot-Lagarde, H. Oriot, P. Borderies, C. Ruiz, and S. Daniel. Karin on swot : Charac-

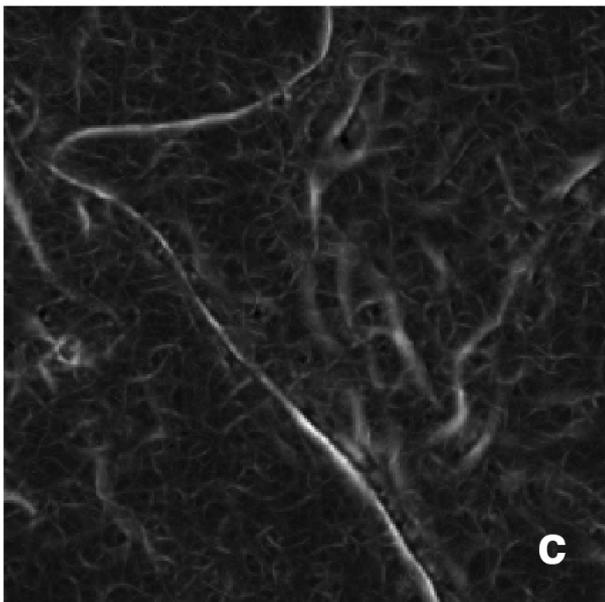
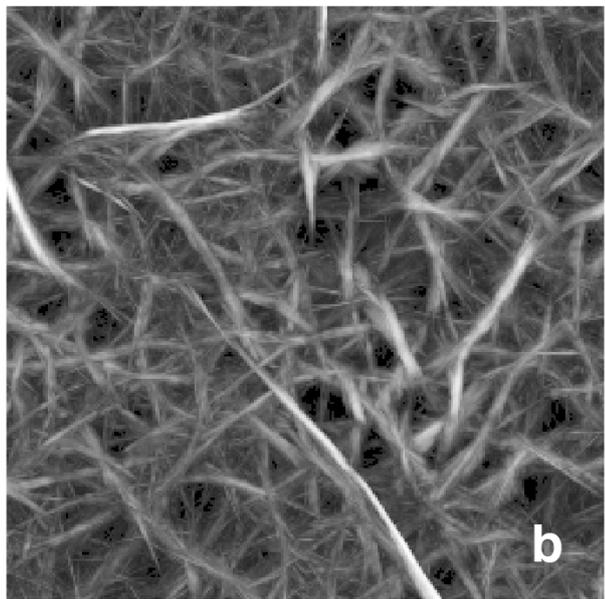
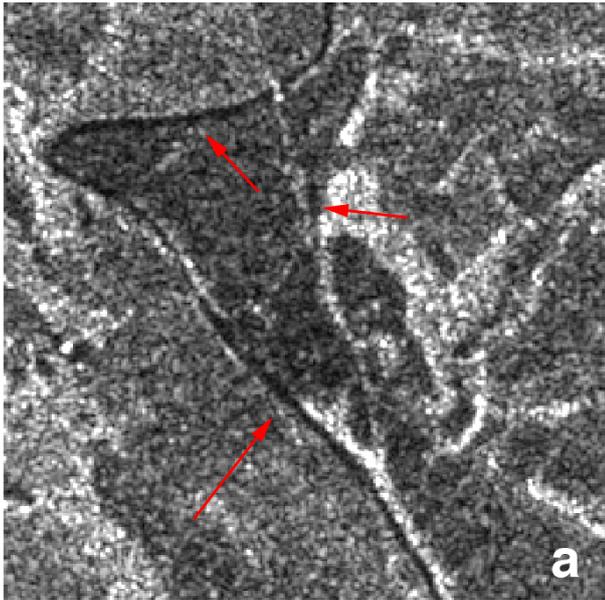


FIGURE 4 – Comparaison entre le détecteur proposé (c) et le détecteur état de l'art (b) Pour une image GRD. Les structures linéiques intéressantes sont mises en évidence par des flèches rouges (a)

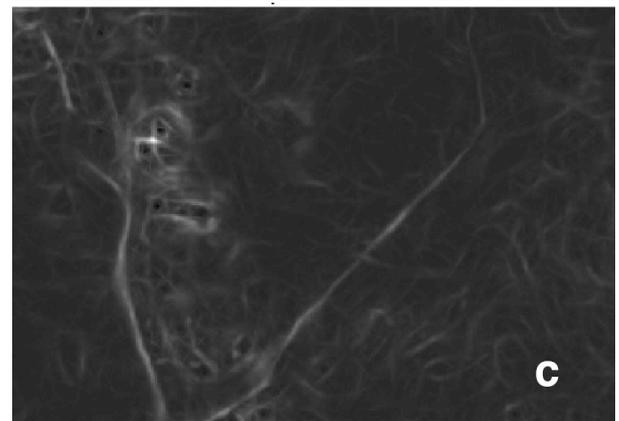
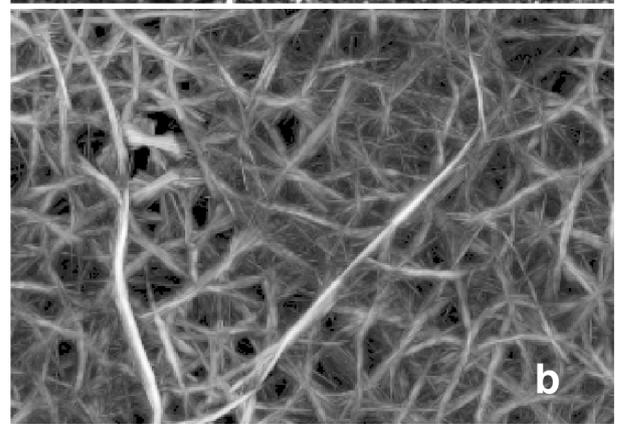
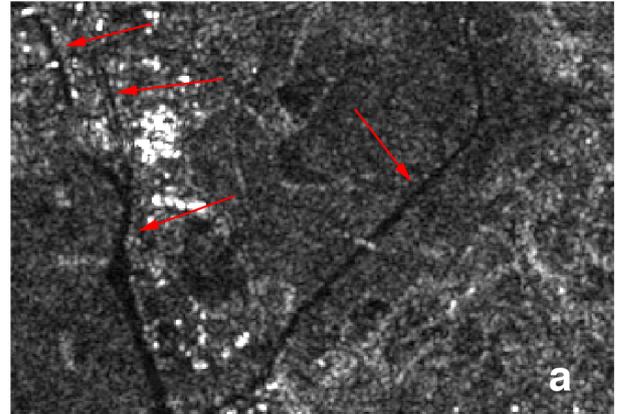


FIGURE 5 – Comparaison entre le détecteur proposé (c) et le détecteur état de l'art (b) Pour une image GRD. Les structures linéiques intéressantes sont mises en évidence par des flèches rouges (a)

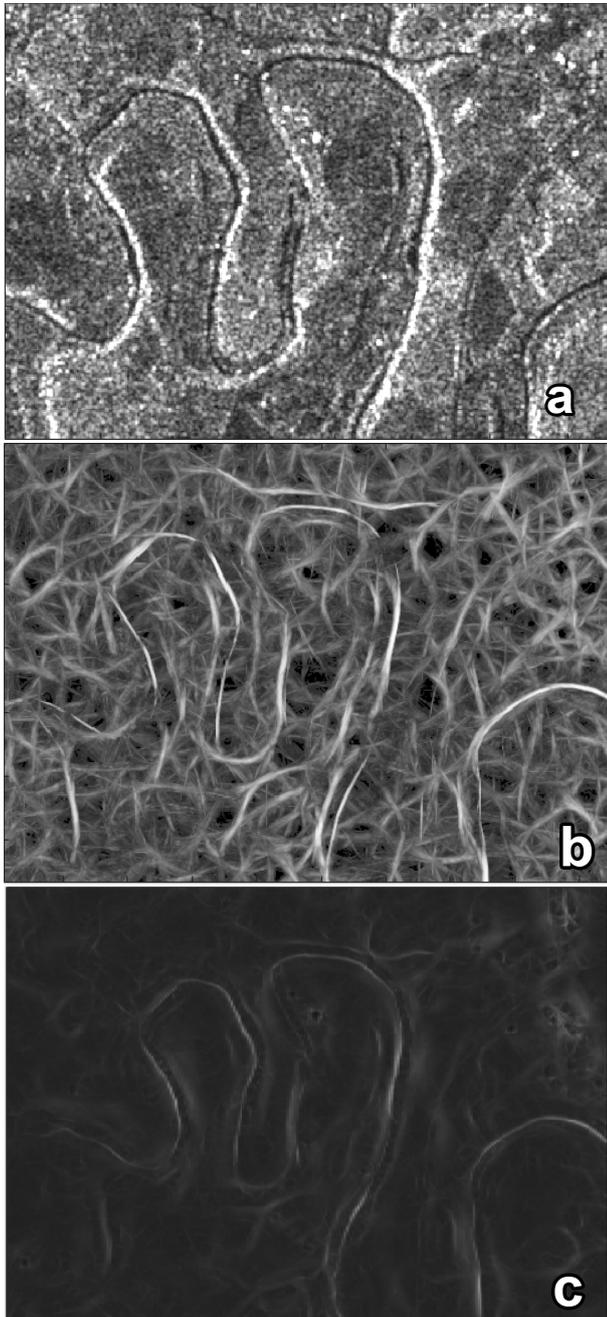


FIGURE 6 – Comparaison entre le détecteur proposé (c) et le détecteur état de l’art (b) Pour une image GRD. Les structures linéiques intéressantes sont mises en évidence par des flèches rouges (a)

teristics of near-nadir ka-band interferometric sar imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(4) :2172–2185, April 2014.

- [4] D. Geman and B. Jedynak. An active testing model for tracking roads in satellite images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18(1) :1–14, Jan 1996.
- [5] Olaf Hellwich, Ivan Laptev, and Helmut Mayer. Extraction of linear objects from interferometric sar data. *International Journal of Remote Sensing*, 23(3) :461–475, 2002.
- [6] N. Merlet and J. Zerubia. New prospects in line detection by dynamic programming. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18(4) :426–431, April 1996.
- [7] S. Movaghati, A. Moghaddamjoo, and A. Tavakoli. Road extraction from satellite images using particle filtering and extended kalman filtering. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(7) :2807–2817, July 2010.
- [8] F. Tupin, H. Maitre, J. . Mangin, J. . Nicolas, and E. Pechersky. Detection of linear features in sar images : application to road network extraction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(2) :434–453, March 1998.
- [9] G. J. Vanderbrug. Line detection in satellite imagery. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 14(1) :37–44, Jan 1976.