ANALYSE MULTI FRACTALE DES ÉCHOS RADAR PAR LA MÉTHODE DES MAXIMUMS DES MODULES DE LA TRANSFORMÉE EN ONDELETTE (MMTO) 2D POUR LES SITES DE BORDEAUX (FRANCE), SÉTIF (ALGÉRIE) : APPLICATION À L'ÉLIMINATION DES ÉCHOS PARASITES.

Mohamed KHIDER[1], Boualem HADDAD[1], Abdelmalik TALEB-AHMED[2]

[1]Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (U.S.T.H.B.),
Faculté d'Électronique et d'Informatique,
B.P. 32, El Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie.
Téléphone : 00 213 21 24 79 52, poste 830 ; courriel : h_boualem@hotmail.com
[2]LAMIH UMR CNRS UVHC 8530,
Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis
Le mont Houy 59313 Valenciennes Cedex 9 France.
Téléphone : + 33 (0)3 27 51 13 34 ; courriel : Abdelmalik.taleb-ahmed@univ-valenciennes.fr

Soumis le 31 juillet 2008 , accepté le 4 mai 2009- © *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 4, p. 271-283

Résumé

Dans le présent travail, l'approche MMTO-2d est appliquée pour l'analyse multi fractale des échos radar et l'identification des échos parasites en provenance de la surface terrestre. Pour ce faire, nous avons considéré des images radar prises dans deux régions où prévalent des climats et des reliefs différents. Il s'agit des sites de Sétif (Algérie) et Bordeaux (France). Nous avons montré que la plupart des Anaprops sont caractérisés par un spectre monofractal contrairement aux échos de précipitations qui présentent un caractère multi fractal. En outre, nous avons montré que le coefficient d'Holder ou la combinaison mode du spectre et densité de squelette par pixel se présentent comme des facteurs robustes de discrimination entre les deux types d'échos. En effet, les échos parasites sont pratiquement éliminés à 98% alors que les échos de précipitation sont quasiment conservés à 98,2%. Aussi, nous avons montré que l'erreur entre l'intensité mesurée au sol et estimée après traitement des échos parasites ne dépasse pas 5% pour le site de Sétif. Etant donné que le temps de traitement est égal à trois minutes, les images radar peuvent être traitées en temps réel.

Mots clés : analyse multi fractale, Anaprops, échos du sol, méthode MMTO-2d, exposant de Hölder, squelette de la transformée en ondelette.

WAVELET BASED MULTIFRACTAL ANALYSIS FOR BORDEAUX (FRANCE) AND SETIF (ALGERIA) REGIONS: APPLICATION TO THE SUPPRESSION OF THE SPURIOUS ECHOES

Abstract

In this work, the 2D-WTMM multifractal approach was applied to analysis the radar echoes, and to identify the unwanted echoes coming from terrestrial surface. With this intention, we considered radar images taken from two areas where different climates and relief prevail. We showed that almost Anaprops are characterized by a monofractal

spectrum contrary to the echoes of precipitations which present a multifractal character. Moreover, we showed that the Holder coefficient and the combination of the spectrum mode and density of skeleton per pixel present robust factors to discriminate between the two types of echoes. Indeed, the unwanted echoes are practically eliminated at 98 per cent whereas the echoes of precipitation are almost preserved at 98,2 per cent. Also, we showed that the error between the measured intensity on the ground and the estimated intensity after treatment of the unwanted echoes does not exceed 5% for the Sétif site. Because the computation time is three minutes, the radar images can be processed in real-time.

Keywords : multifractal analysis, Anaprops, ground echoes, 2D-WTMM, Hölder exponent, skeleton of the wavelet transform.

1. INTRODUCTION

Parmi les moyens d'estimation des précipitations, le radar est actuellement l'instrument le plus utilisé de par le monde. Cependant, la qualité de mesures par radar est tributaire d'un éventuel réseau d'étalonnage mais aussi de facteurs météorologiques et instrumentaux. L'autre problème majeur de mesure par radar est lié aux échos parasites en provenance de la surface terrestre. Ces derniers réduisent considérablement les performances de l'instrument en induisant des erreurs non négligeables dans l'estimation des précipitations. Les échos en provenance de la surface terrestre peuvent être subdivisés en deux catégories, à savoir, les échos fixes dus aux obstacles de la surface terrestre observés autour du radar et les anaprops ou échos A.P. (Anoumalous Propagation) causés par une propagation anormales du signal radar et détectés à des distances lointaines du radar (Boithias, 1984 ; Olson, 1996 ; Sauvageot, 1992).

Une bonne connaissance de la structure des précipitations est nécessaire pour la modélisation de la circulation atmosphérique, en hydrologie, mais aussi dans l'identification et le filtrage des échos de précipitations pour les radars au sol et embarqués (Cheng et Arakawa, 1997 ; Mesnard et Sauvageot, 2003 ; Prabhara *et al.*, 2008; Galenda *et al*., 2005) ont montré que la para métrisation des champs de précipitations nécessite une connaissance préalable de leur structure à différentes échelles. Très récemment, nous avons montré que la dimension fractale des échos de précipitations est invariante dans l'espace et dans le temps et qu'elle dépend du seuil traduisant le caractère multi fractal de ce type d'échos. En outre, nous avons montré que la dimension fractale ne peut pas être utilisé comme un paramètre discriminant entre les échos de précipitations et les échos parasites en provenance du sol. (Haddad *et al.,* 2006). L'utilisation de l'analyse multi fractale pour l'interprétation des données radar n'est pas nouvelle. Des approches analysant le comportement multi fractal des précipitations aussi bien dans le domaine temporel que spatial ont été proposées dans la littérature (Macor *et al,* 2007 ; De Michèle et Bernardara, 2005). Diverses techniques numériques ont été conçues pour les surfaces isotropes et auto-similaires et fournissent de bonnes évaluations de la dimension fractale D_f (Mandelbrot, 1983 ; Feder, 1988). Cependant, en présence d'une invariance d'échelle anisotrope, ces différentes méthodes de calcul donnent des dimensions fractales différentes (Dubuc *et al.*, 1989). A cause de la complexité et la richesse de la nature, la plupart des phénomènes ne présentent pas une autosimilarité exacte ou statistique. Ce qui rend l'analyse fractale insuffisante pour les décrire. D'où la nécessité d'une analyse plus fine. Cette mesure peut s'effectuer grâce à la théorie de Mallat et Hwang (1992) selon laquelle l'évolution des maxima des modules de la transformée en ondelette (MMTO) à travers les échelles d'analyse renferme toute l'information concernant l'irrégularité locale du signal.

Le travail que nous présentons a trois objectifs :

L'implémentation de l'analyse multifractale par la méthode MMTO 2d (Maxima des Modules de la Transformée en Ondelette). Cette méthode a été déjà utilisée dans l'analyse d'images satellitaire de stratocumulus, d'images médicales de mammographie (Arnéodo *et al.*, 2000 ; Kestener, 2003), et en astronomie. Cependant, à notre connaissance, elle n'est jamais appliquée dans le cas des images radar.

L'utilisation des exposants de Holder pour la segmentation de la texture des échos radars, à savoir les échos de précipitation et les échos du sol observés dans deux sites différents où prévalent deux climats différents.

Recherche d'un ou de plusieurs paramètres discriminants issus de la MMTO 2d entre les échos parasites en provenance de la surface terrestre et les échos de précipitations en vue de supprimer les échos indésirables.

Dans ce papier, le formalisme multifractal par la méthode MMTO 2d sera introduit dans la section 2. Les données utilisées seront présentées dans la section 3. Les résultats de l'analyse de la structure des échos radar pour les deux sites étudiés seront discutés dans la section 4. Les conclusions et perspectives de ce travail feront l'objet de la section 5.

2. ANALYSE MULTI FRACTALE PAR LA MÉTHODE DES MAXIMA DES MODULES DE LA TRANSFORMÉE EN ONDELETTE (M.M.T.O.)

2.1. Analyse multi fractale

L'analyse multi fractale consiste à décrire les fluctuations de la régularité locale d'une fonction f(x) représentées par l'exposant de Hurst h(x) local, dit aussi exposant de Holder exprimé comme suit (Frisch and Parisi, 1985) :

$$\left|f(x+l)-f(x)\right| \sim l^{h(x)} \quad (1)$$

Une description plus rigoureuse de l'exposant d'Holder $h(x_0)$ consiste à le définir de façon qu'il existe un polynôme P_n de degré $n < h(x_0)$ et une constante C tels que pour tout point x appartenant au voisinage de x_0, on ait (Bacry *et al.*, 1993):

$$\left| f(x) - P_n(x-x_0) \right| \le C \left| x - x_0 \right|^{h(x_0)} \quad (2)$$

Le polynôme $P_n(x)$ correspond au développement en série de Taylor de la fonction f(x) au point x_0. Plus la valeur de $h(x_0)$ est grande, plus la fonction f est régulière et inversement.

L'information sur la variabilité de la régularité de f est ensuite décrite par le spectre multi fractale D(h), défini comme la dimension de Hausdorf de l'ensemble des points x où la fonction f prend le même exposant de Holder h : $D(h) = \dim_H \{x : h(x)=h\}$

2.2. Méthode des Maxima des Modules de la Transformée en Ondelette (M.M.T.O.)

La transformée en ondelette continue est très adaptée pour révéler l'organisation hiérarchique des singularités des mesures fractales (Arnéodo *et al*, 2000, Roux et *al.*, 2000). L'évolution des Maxima des Modules de la Transformée en Ondelette (M.M.T.O) à travers les échelles d'analyse σ permet d'estimer l'exposant de Holder $h(x_0)$.

Selon Mallat et Hwang (1992), pour une ondelette à n_φ moments nuls, les modules $M\sigma(x_0)$ évoluent selon la loi en puissance:

$$\begin{aligned} &M_\sigma(x_0) \sim \sigma^{h(X_0)} \text{ si } n_\varphi > h(x_0) \\ &M_\sigma(x_0) \sim \sigma^{n_\varphi} \text{ si } n_\varphi < h(x_0) \text{ pour } \sigma \to 0^+ \end{aligned} \quad (3)$$

Dans notre cas, nous avons choisi une ondelette dérivée gaussienne de premier ordre. La mise en œuvre numérique de la Transformée en Ondelette Continue en 2d (TOC-2d) avec un noyau gaussien, peut se faire tout simplement avec la FFT2 (Fast Fourrier Transform 2) ou bien en utilisant les filtres de Deriche pour la gaussienne et sa dérivée (Deriche, 1992).

Selon les travaux portant sur l'entropie de Shannon menés par Grazzini (2003) ou la reconstruction de l'image par l'ensemble des exposants de Holder les plus singuliers MSM (Most Singular Manifold) proposé par Turiel *et al.* (2002), l'essentiel de l'information d'une image se concentre dans ses contours, tout comme les maxima des modules de la transformée en ondelette. Ceci explique la nécessité d'une opération de détection de contours, qui peut se faire par une approche semblable à celle de Canny (1986). Pour réduire la redondance d'information introduite par l'utilisation de la TOC, on détecte les maxima des contours MMMTO selon la méthode de Arnéodo *et al.* (2000). Notons que l'un des avantages de l'utilisation de la gaussienne comme ondelette, réside dans le fait que les squelettes ne s'interrompent pas aux échelles d'analyse fines (Mallat, 2009). De même, l'utilisation de quantités multi résolution MMMTO basées sur la TOC-2D est très intéressante, car, l'approche devient plus stable que les anciennes méthodes (box-counting, capacités…etc.). Les quantités multi résolutions permettent aussi d'obtenir la totalité du spectre multifractal, par l'introduction dans le calcul des moments d'ordres négatifs ($q<0$), dans la construction des fonctions de partition, données par (Combes *et al*, 1989) :

$$Z(q,\sigma) = \sum_{q\in R, L\in L(A)} \left(M_\sigma(X)\right)^q \quad (4)$$

Cette sommation doit prendre en considération les modules $M_\sigma(x)$ appartenant aux squelettes de la transformée en ondelette**.**

Pour estimer la fonction d'échelle τ(q), on utilise un ajustement par régression linéaire des fonctions de partition dans un plan bi logarithmique. Toutefois, on doit prendre des échelles réparties uniformément sur l'axe logarithmique, afin d'assurer une plus grande précision dans l'ajustement du nuage de points, dont le comportement est régi par la relation :

$$Z(q, \sigma) \sim \sigma^{\tau(q)} \quad (5)$$

La convexité de la fonction d'échelle τ(q), indique la présence de caractère multi fractal. Par contre, une évolution linéaire reflète une stationnarité dans la mesure et un caractère plutôt mono fractal. Le formalisme multi fractal consiste à appliquer la relation introduite par Frish (1995), dans le cadre de l'étude de la turbulence, et se traduit par l'expression :

$$D(h) = \min_{q\in R} \{qh - \tau(q)\} \quad (6)$$

Donc, ceci revient à effectuer la transformée de Legendre de la fonction d'échelle, qui donne une estimation des dimensions de Hausdorff des différents ensembles fractals de l'image (Bacry *et al*, 1993 ; Jaffard, 1997).

3. BANQUE DE DONNEES

Les données sont collectées dans deux régions différentes : une est située en Afrique du nord à une centaine de kilomètre de la mer méditerranée et l'autre sur la côte atlantique. Toutes les images sont enregistrées selon le mode PPI (Plan Position Indicator) et sont représentées selon le format 512x512 pixels avec une résolution de 1 km par pixel,

Bordeaux est une ville située dans le sud-ouest de la France à 36 km de la côte atlantique. Le climat est du type océanique. Les conditions sont plutôt homogènes bien que durant la saison d'été, les systèmes frontaux sont souvent réduits à des lignes convectives associées à un front froid en surface (la structure stratiforme est pratiquement absente) L'intensité moyenne annuelle avoisine 900 mm. Le radar est localisé à l'aéroport Bordeaux Mérignac (44°52'N, 0°30'O). Il travaille dans la bande S avec une puissance crête de 500 kW. La largeur de l'impulsion est de 5 µs et la fréquence de répétition est de 300 Hz. L'ouverture du faisceau est à 3 dB est de 1°8. Un système numérique analysant les réflectivités sur 8 bits appelé SANAGA (Système Analogique Numérique d'Acquisition des Grains Africains) (Sauvageot et Despaux, 1990) permet le traitement et le stockage des données, Le radar de Bordeaux fait partie du réseau français opérationnel géré par Météo France. La région est pratiquement plate. Les images sont en grande partie contaminées par les échos du sol causés par la zone industrielle de Bordeaux sur un rayon de 40 km. Pour certaines conditions météorologiques, des anaprops sont observés à une distance de 200 km, au niveau de la chaîne de montagne des Pyrénées qui s'élèvent à 3000 m d'altitude.

La ville de Sétif se trouve à 200 km de la mer Méditerranée. Elle est située dans les hauts plateaux algériens. Le climat est du type continental. Le radar est installé à 36°11'N,5°25'E et 1700 m d'altitude. Plusieurs obstacles terrestres entourent le radar. On trouve au sud-ouest, à 60 km, les montagnes du Djurdjura, au sud-est, à 40 km, les monts des Bibans et au nord-est les monts des Babors. La zone industrielle de Sétif se trouve dans un rayon de 25 km du radar. Le radar travaille avec une longueur d'onde de 5,5 cm, une puissance crête de 250 kW, une fréquence de répétition de 250 Hz et une durée d'impulsion de 4 µs. Il est équipé du même système d'acquisition SANAGA.

Les images sont codées sur 52 niveaux pour Bordeaux, 16 pour Sétif. Notre banque de données est constituée de 10052 images prises à Bordeaux en 1996 et de 5799 prises à Sétif en 2001. Pour caractériser les différents échos radar, nous avons réparti nos données en trois types d'échos, à savoir les échos du sol, les anaprops et les échos de précipitations. Pour ce faire, nous avons appliqué l'approche texturale (Haddad *et al.*, 2004). Le paramètre énergie permet de distinguer sans ambiguïté les trois types d'échos. Pour la région de Bordeaux, la classification donne 22467 images d'anaprops, 37056 images de précipitations et 49471 images échos fixes du sol. De même, pour le site de Setif, on enregistre 3809 images d'échos fixes et 1990 images de précipitations. Notons que pour la région algérienne, on n'observe pas d'échos A.P.

4. APPLICATIONS

4.1. Élimination des échos du Sol

A l'échelle d'analyse la plus fine, le squelette de la TO converge vers la position de l'irrégularité (sommet du cône d'influence), et l'estimation de l'exposant de Holder peut se faire par ajustement par régression linéaire des modules du squelette de la transformée en ondelette dans un plan bi logarithmiques. Alors, on peut considérer une région particulière de l'image pour étudier le comportement de ses exposants de singularités (fig. 1).

Nous avons analysé l'évolution des maxima le long des lignes des maxima. La figure 2a décrit des précipitations. Le comportement des squelettes pour ce type d'échos peut être décrit par une droite de pente h=0 lorsque l'échelle tend vers zéro. Il ressemble approximativement à celui d'une rampe. La région en noir de la figure 2b représente des échos du sol. L'analyse de cette partie par la méthode MMTO-2D montre un comportement des squelettes qui ressemble à celui des formes de Dirac avec une pente h proche de -1.

A titre d'illustration, on a représenté par un losange la position d'un squelette dans l'image radar, et son évolution dans le plan bi-logarithmique.

Les fonctions de densité de probabilité des exposants de Hölder des échos radar de l'image sont données par la figure 3. On constate que plus de 90% des échos parasites présentent des exposants inférieurs à -1. On remarque aussi qu'un certain nombre de squelettes ont des exposants d'Holder qui n'appartiennent pas à l'intervalle [-2,1]. Ceci est du au fait que lors de l'étape de la poursuite des squelettes à travers les échelles, on a considéré deux critère qui sont le minimum dans le déphasage dans l'angle de direction du gradient et la distance Euclidienne minimale entre MMMTO d'échelles successives du même squelette. Pour ces cas isolés, on doit les éliminer avant de procéder à l'analyse multi fractale. La différence observée entre les fonctions des densités de probabilité entre les deux types d'échos peut s'expliquer par le fait que la texture des échos du sol présente des singularités plus fortes à cause de la discontinuité et de la faible

corrélation entre pixels adjacents, et que l'homogénéité relative qui caractérise les échos de précipitations favorise l'apparition d'exposants de singularité moins élevés (Haddad *et al.*, 2004). Aussi, l'hétérogénéité qui caractérise les échos du sol par rapport aux échos de précipitations, augmente le nombre de contours, et par conséquence des squelettes dans les régions infectées. L'importante fluctuation du signal dans cette région engendre de fortes singularités (h<-1). On peut donc considérer la densité des exposants de singularités comme un paramètre discriminant entre ces deux types d'échos radar (Charalampidis *et al.,* 2002). Pour ce faire, on s'est inspiré de la méthode des K-n plus proches voisins (Duda, 2001). La figure 4 illustre la détection des régions d'intérêt par l'approche des K-n plus proches voisins.

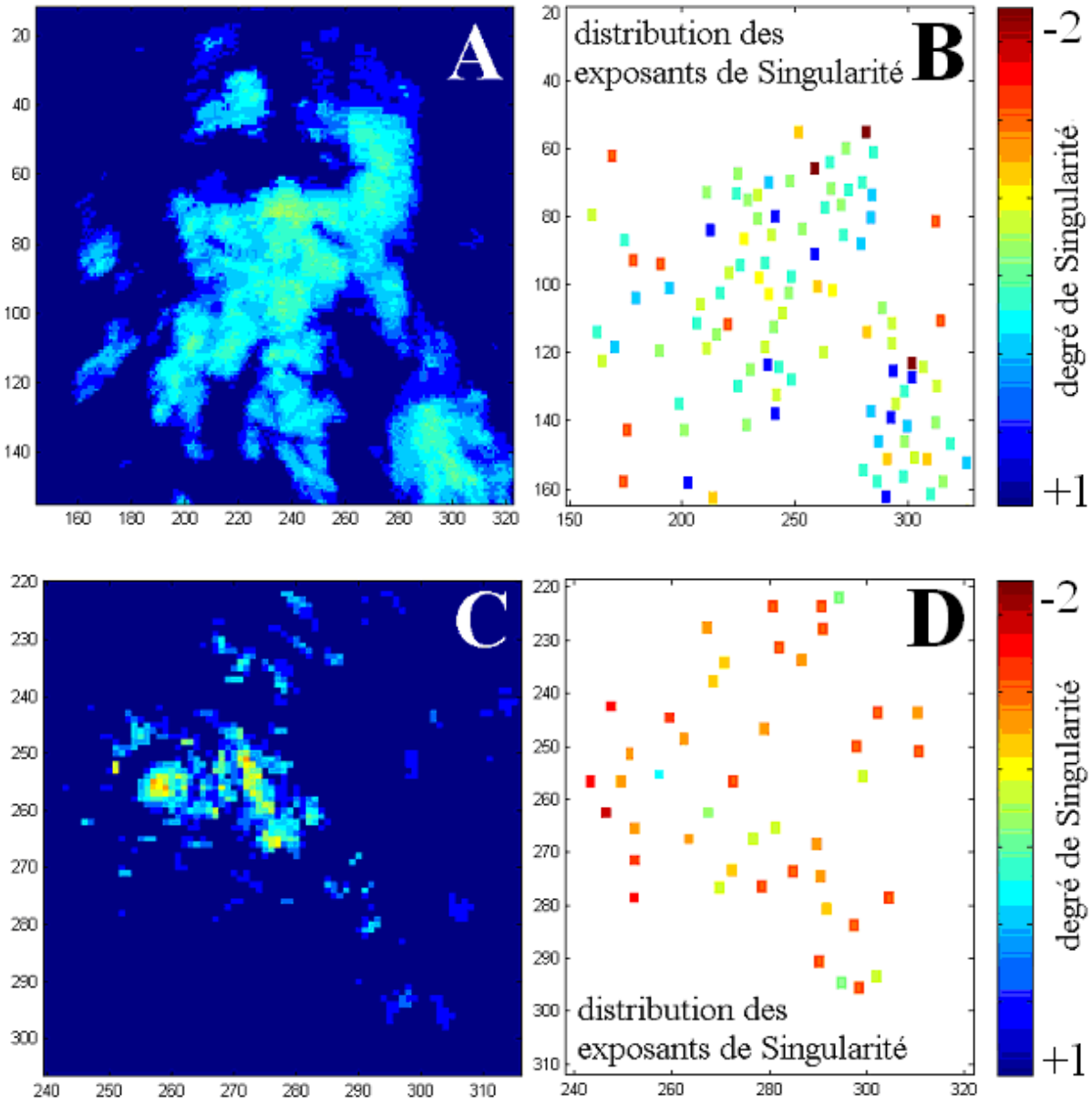


Figure 1 : (A) Echos de précipitations, et **(C)** échos du sol de la région de Bordeaux. **(B)** et **(D)** Représentation en code couleurs des exposants de Hölder calculés avec la méthode MMTO-2D.

Figure 1 : *(A) Illustration of precipitations echoes, and in (C): ground echoes obtained in the Region of Bordeaux. (B) and (D) Representation of holder exponents in color code obtained by the WTMM-2d method.*

Pour cela, on fixe un certain nombre d'exposants n, puis on calcule le rayon r qui représente la distance moyenne entre les n exposants de Holder et l'exposant de Holder central. Les différentes étapes d'élimination des échos du sol se résument comme suit **:**

1° Analyse par MMTO-2D de l'image radar, détection des squelettes, estimation des exposants de Holder par ajustement par régression linéaire, et sauvegarde des positions et des exposants de singularités.

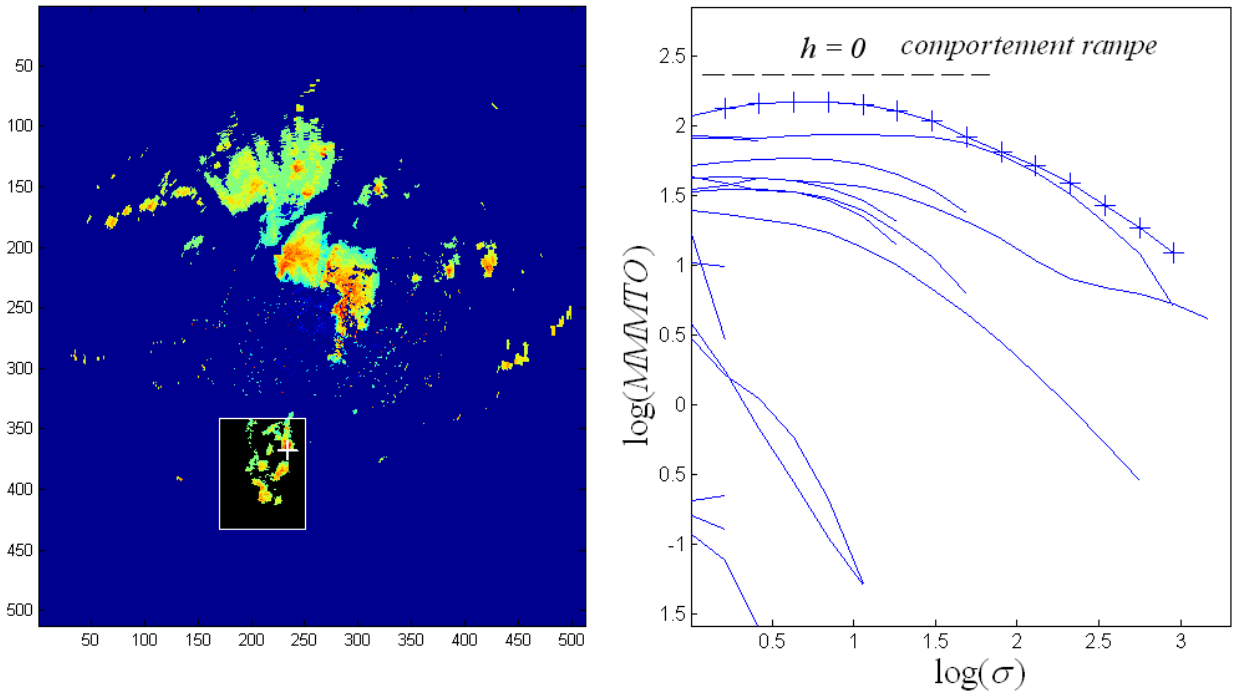
2° On applique la méthode des K-n plus proches voisins avec n=5. Ce chiffre est choisi après plusieurs tests portant sur l'élimination des échos parasites. La figure 5 donne les résultats obtenus avec différentes valeurs de n (si le rayon dépasse la valeur r_{max}=50 pixels sans atteindre le nombre n voulu d'exposant, on se contente du nombre d'exposants détectés). On sauvegarde la position de l'exposant de Holder central (centre du cercle), la moyenne des exposants de Holder de chaque cercle, et son rayon.

3° On affecte à chaque pixel d'échos radar, la valeur moyenne des exposants de Holder, calculée comme suit : somme des valeurs moyennes des exposants de Holder des cercles qui contiennent le pixel considéré/ le nombre de cercles qui entourent le pixel considéré.

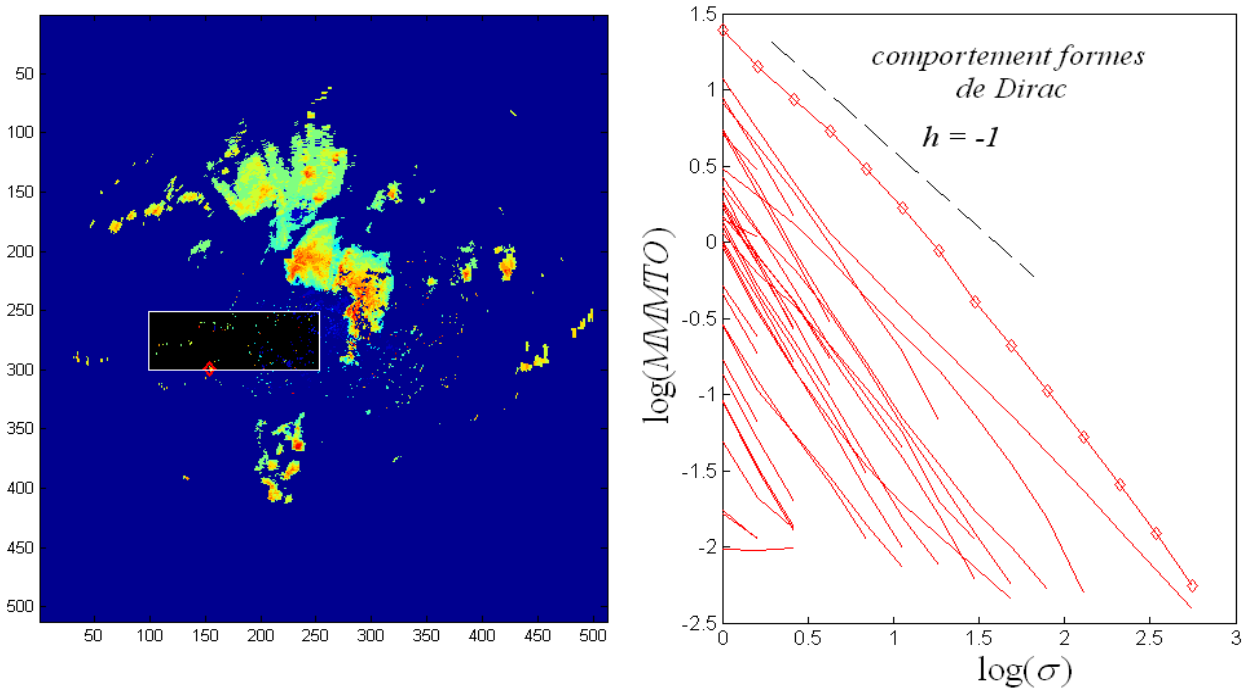
4° On élimine les pixels de valeur inférieures à -1.
Dans notre cas, on trouve n=5 et r_{max}=50 pixels pour les deux sites considérés. Pour d'autres régions, une étude statistique complète est nécessaire pour déterminer les meilleurs paramètres.

Cette approche élimine les échos fixes à 98% et préserve les échos de précipitations à 98,2% (voir figure 5). Elle est aussi efficace dans le traitement des échos fixes de la région de Bordeaux (France). Le taux d'élimination des échos parasites pour notre banque de données est de l'ordre de 98,1% pour le site de Bordeaux et de 97, 8% pour le site de Sétif. Notons que les précipitations sont conservées à 98,1% pour Bordeaux et 98% pour Sétif.

Cette étude concerne deux sites radars où prévalent des climats différents. En outre, la région de Sétif s'illustre par un nombre d'échos parasites plus important compte tenu des reliefs et des obstacles qui entourent le radar. Ces premiers résultats montrent que notre algorithme s'adapte bien aux deux régions malgré leurs différences climatique et topographique.



a) cas des précipitations :



b) cas des échos du sol :

Figure 2 : Comportement des maxima le long des lignes de maxima.
Figure 2 : *Evolution of maxima along the maxima lines.*

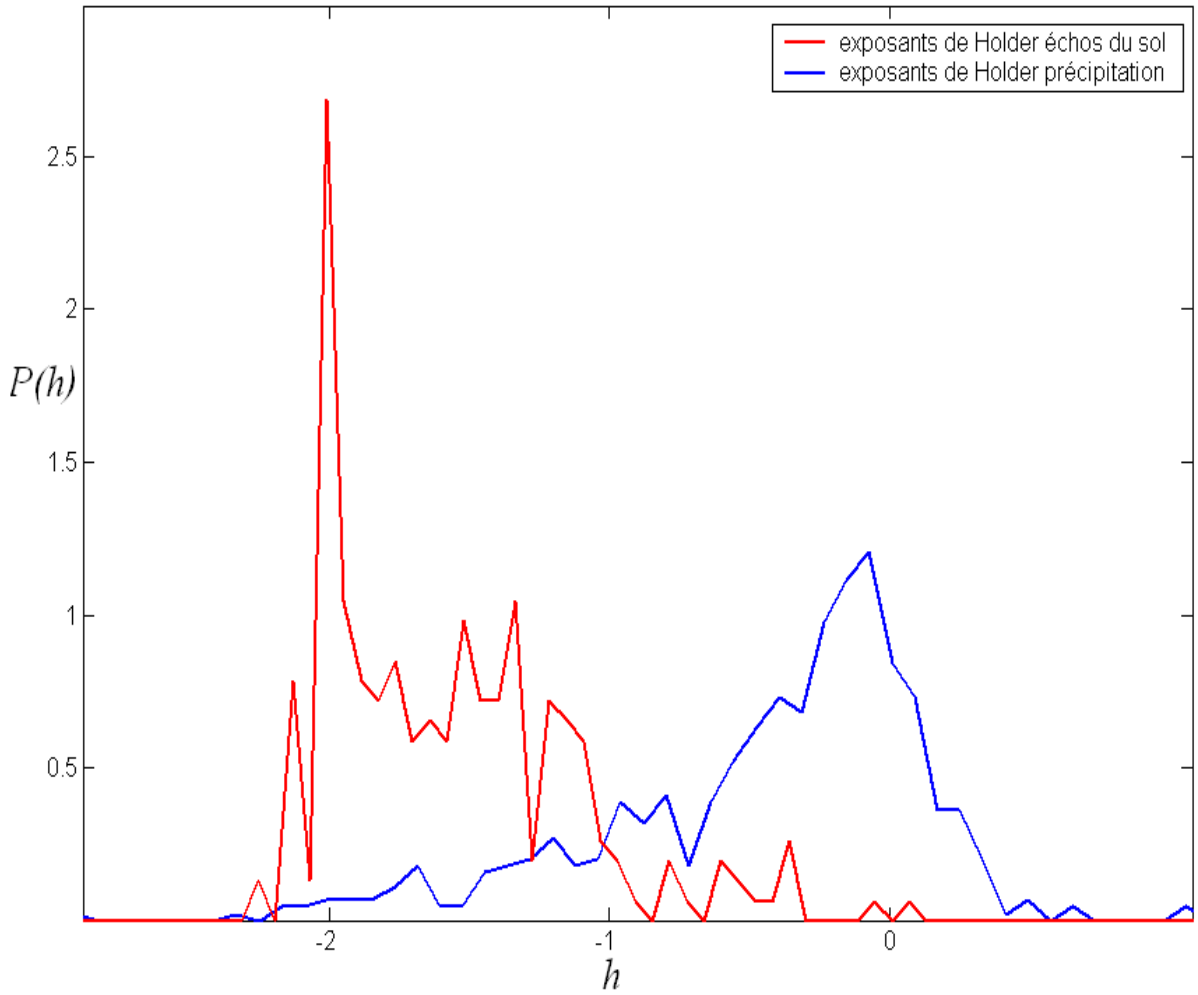


Figure 3 : Fonctions de densité de probabilité de l'image de la figure 4.
Figure 3 : *Probability density functions obtained from image of figure 4*

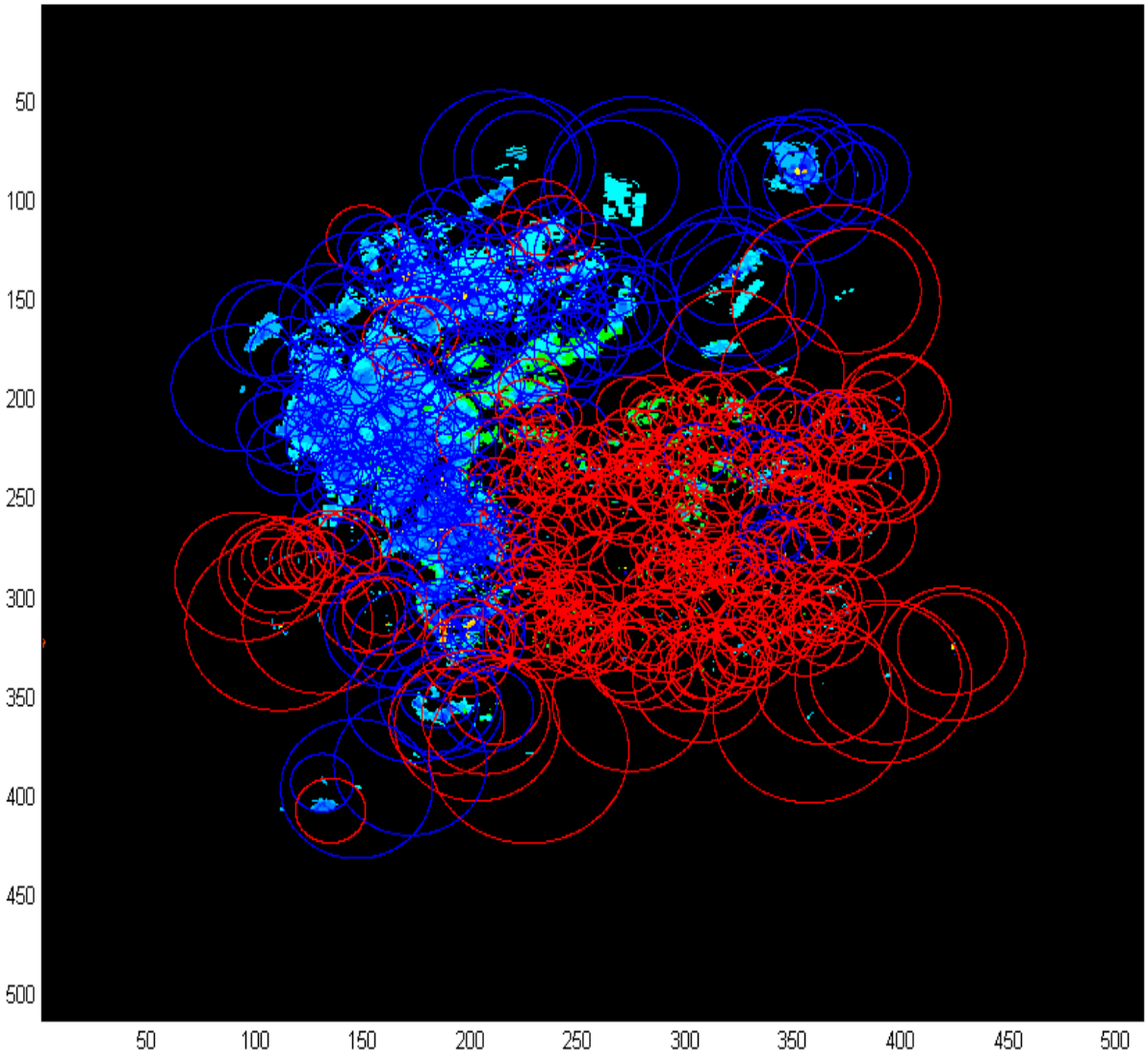


Figure 4 : Détection des régions d'intérêts par les K-n plus proche voisins. En rouge, les régions de moyennes d'exposants de Hölder <-1 et en bleu les régions de moyennes>-1, avec les paramètres n=5 et r_{max}=50 pixels.

Figure 4 : *Detection of interest region by the K-n nearst neighbour. In red, the region with average Holder exponents<-1 and in blue the region with average Holder exponents>-1 with n=5 and* r_{max}*=50 pixels.*

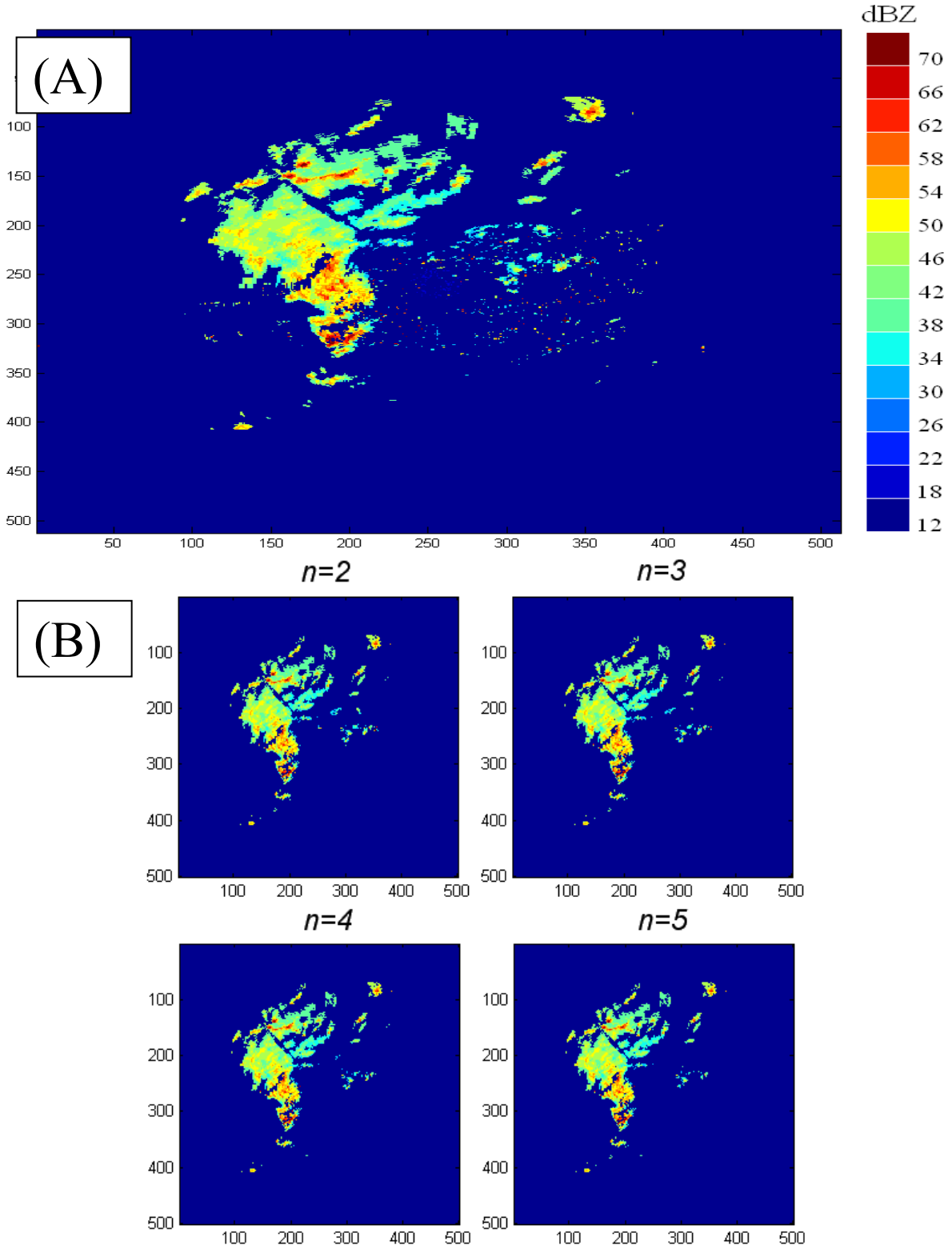


Figure 5 : (A) : Image d'échos radar prise à Sétif. (B) : Image d'échos radar traitée, en utilisant différentes valeurs de n=1,2,3 et 4, et un rayon maximal r_{max}=50 pixels.

Figure 5 : *(A) Radar echoes image of Setif (B) Radar echoes image processed, by using various values of n=1,2,3 and 4 with maximal radius* r_{max}*= 50 pixels.*

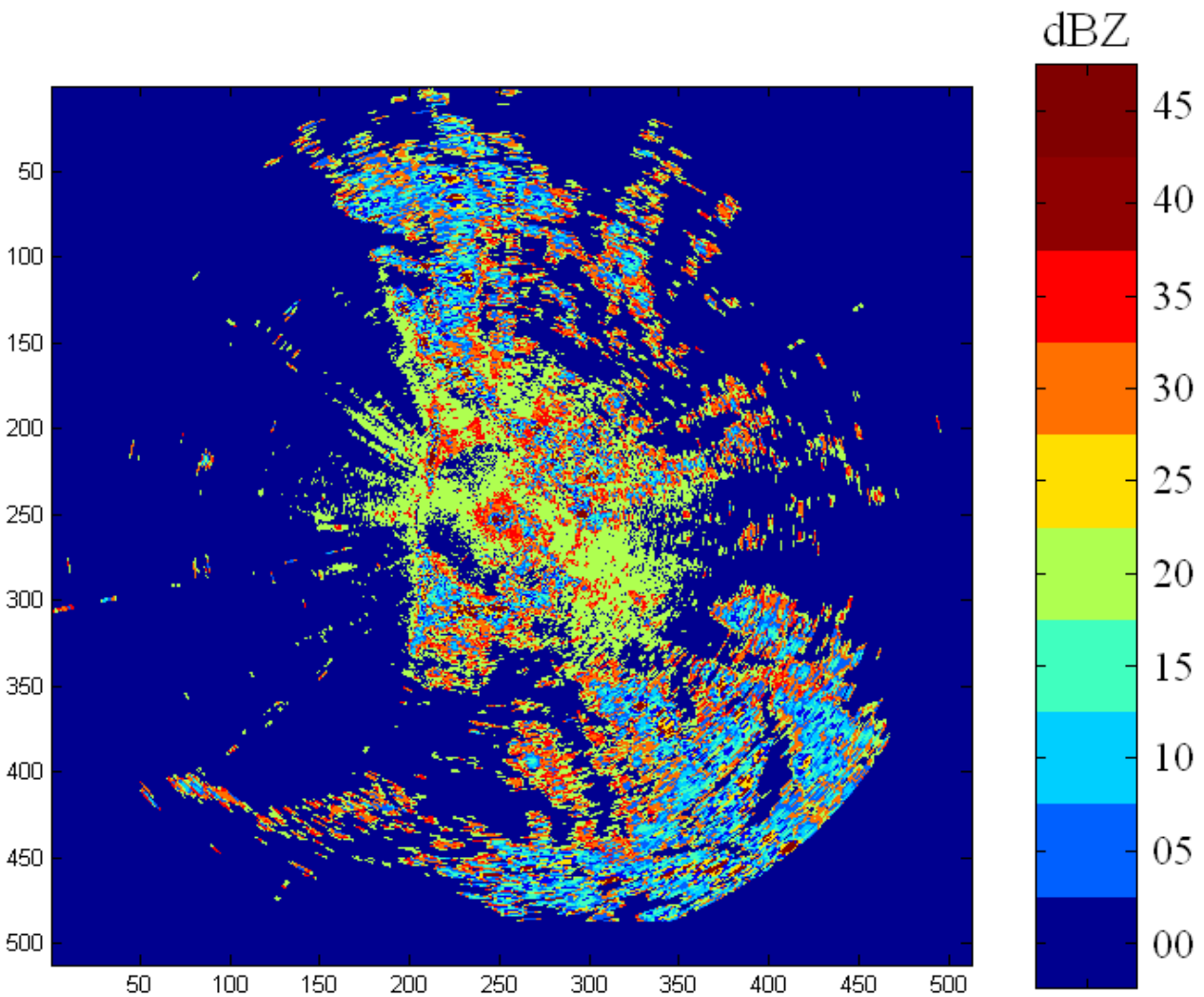


Figure 6 : Image d' anaprops collectée dans la région de Bordeaux le 22 Juillet 1996 à 22h30'.
Figure 6 : *Anaprops image collected in Bordeaux region, on July 22, 1996 at 22h30'.*

4.2. DÉTECTION DES ÉCHOS ANAPROPS

Une autre application de la méthode MMTO 2d pour l'identification des anaprops est de considérer le mode du spectre de Legendre. La figure 6 représente une image d'anaprops prise dans la région de Bordeaux. La figure 7.b décrit les spectres multi fractals des deux types d'échos radar (précipitations et anaprops). Nous avons pris au hasard dans notre banque de données , trois images d'anaprops enregistrées respectivement le 10 août 1996 à 23 H, le 22 août 1996 à 21 H et une dernière le 20 septembre 1996 à 20 H. De même, nous avons considéré des images de précipitations dont deux concernent le site de Bordeaux et une la région de Sétif. La taille des images est de 512x512 pixels. Dans la plus part des images d'anaprops traitées, on observe une dégénérescence dans le spectre des anaprops, et un mode h_{mode} *inférieur à celui des spectre d'échos de précipitation*. Pour les échos de précipitations**,** le spectre est plutôt de caractère multifractal. L'analyse est effectuée avec une ondelette dérivée gaussienne et 16 échelles d'analyses allant de σ_{min}=1 pixel à σ_{max}=9 pixels. La figure 7b montre une convexité de la fonction d'échelle autour de q=0. Ceci est en bon accord avec les résultats publiés dans la littérature (Lovejoy et Schertzer, 1990; Hubert *et al*, 1993). La partie droite de la fonction d'échelle construite à partir des moments d'ordre positifs, est de magnitude plus importante que la partie gauche. En effet, les moments statistiques q>0 privilégient les fluctuations les moins importantes. Ceci indique la présence d'une texture due à une surface lisse, puisqu'une homogénéité plus importante caractérise les échos de précipitations. Par contre, les échos anaprops engendrent un spectre dégénéré de caractère mono fractal (linéarité de la fonction d'échelle autour de q=0), avec une divergence dans les moments d'ordres négatifs. La partie gauche de la fonction d'échelle est de magnitude plus élevée à cause des fortes fluctuations du signal. On utilise alors le mode du spectre comme paramètre discriminant entre les échos de précipitations et les anaprops.

Pour identifier les anaprops, on utilise deux paramètres à savoir : le mode du spectre et la densité des squelettes par pixels donnée par le nombre de squelettes sur le nombre de pixels d'échos radar non nuls. La figure 8 représente les modes de spectres en fonction du rapport squelettes/pixels. On distingue sans ambiguïté les anaprops des échos de précipitations. On suppose que la densité de probabilité est normale. On utilise la théorie de décision Bayesienne pour trouver les frontières de séparation entre les deux régions. On constate que les deux types d'échos se situent au-delà de la frontière de séparation hyperbolique. Ils peuvent donc être identifiés sans aucune ambiguïté. Pour déterminer la frontière de séparation entre les deux régions, on calcule les moyennes et les matrices de covariances (Duda *et al*, 2001) :

$$\mu_t = \varepsilon[X] \quad (7)$$

$$\sum_t = \varepsilon\left[(X-\mu)(X-\mu)^t\right] \quad (8)$$

Les fonctions de discrimination :

$$g_i(x) = X^t\left(-\frac{1}{2}\sum_i^t\right)X + \left(\sum_i^t \mu_i\right)X - \frac{1}{2}\mu_i^t \sum_i^t \mu_i - \frac{1}{2}\ln|\Sigma_i| + \ln P(\omega_i) \quad (9)$$

La technique s'avère efficace dans le traitement de toutes les images de Bordeaux.

Pour vérifier que le filtrage des échos du sol n'influe pas sur la réflectivité des échos de précipitations, nous avons comparé l'intensité de pluie collectée au sol et celle estimée par radar pour le site de Sétif. Pour ce faire, nous avons utilisé la relation radar $Z=300R^{1,5}$ proposée par Sauvageot (1992) pour les climats tempérés. Nous avons trouvé que l'intensité estimée par radar vaut 110,2 mm alors que celle enregistrée par la station au sol est égale à 105 mm. L'erreur d'estimation vaut alors 5%. En outre le temps de traitement est estimé à trois minutes. On peut donc traiter les échos radar en temps réel aussi bien pour le site de Sétif que Bordeaux.

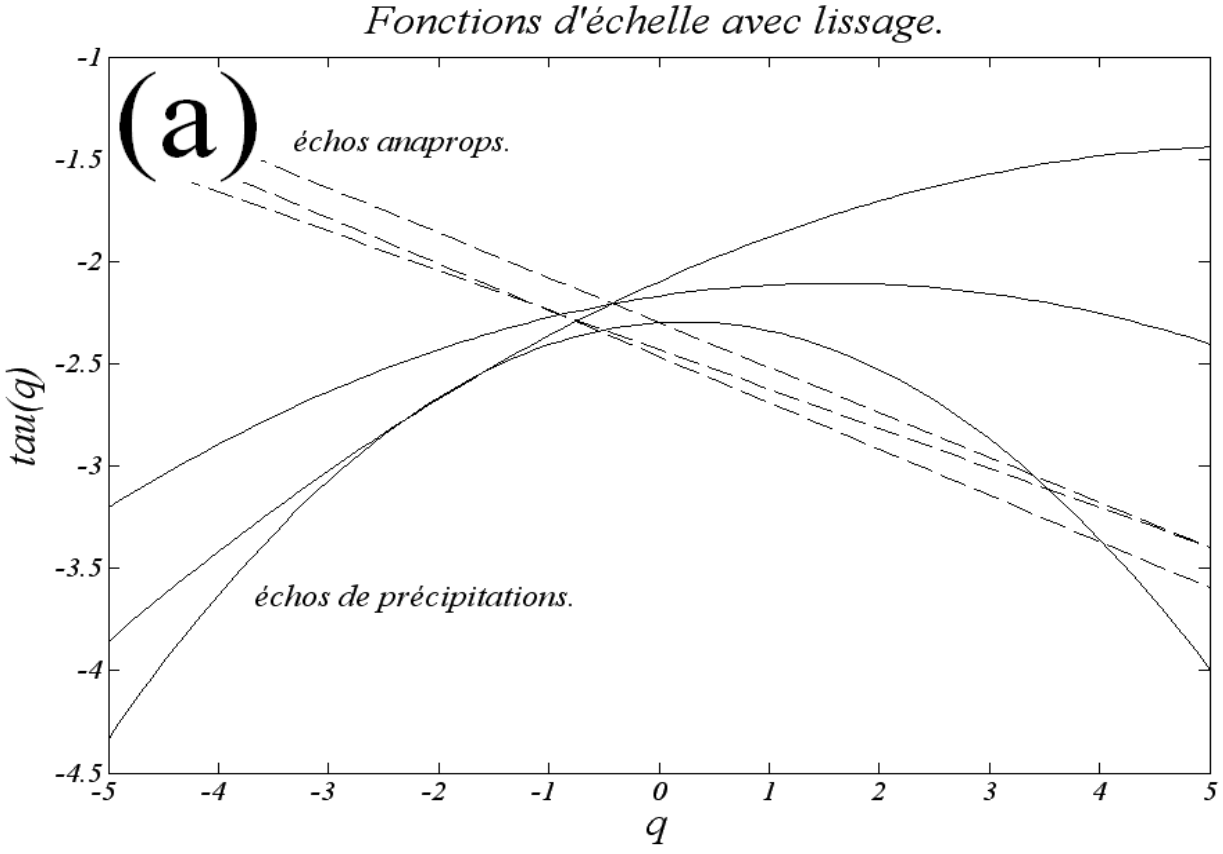


Figure 7 : (a) : Fonctions d'échelles d'anaprops et des échos de précipitations avec interpolation et des valeurs de -5<q<+5 pour les moments statistiques. **(b) :** Spectres de Legendre obtenus avec l'analyse multifractale par la méthode MMTO-2D de 3 images d'anaprops et 3 images d'échos de précipitation.

Figure 7 : (a) : *Scaling functions of anaprops and precipitation echoes with interpolation and using values of -5<q<+5 for the statisticals moments (b): Legendre spectrums obtained by WTMM-2d for 3 anaprop images and 3 precipitation images.*

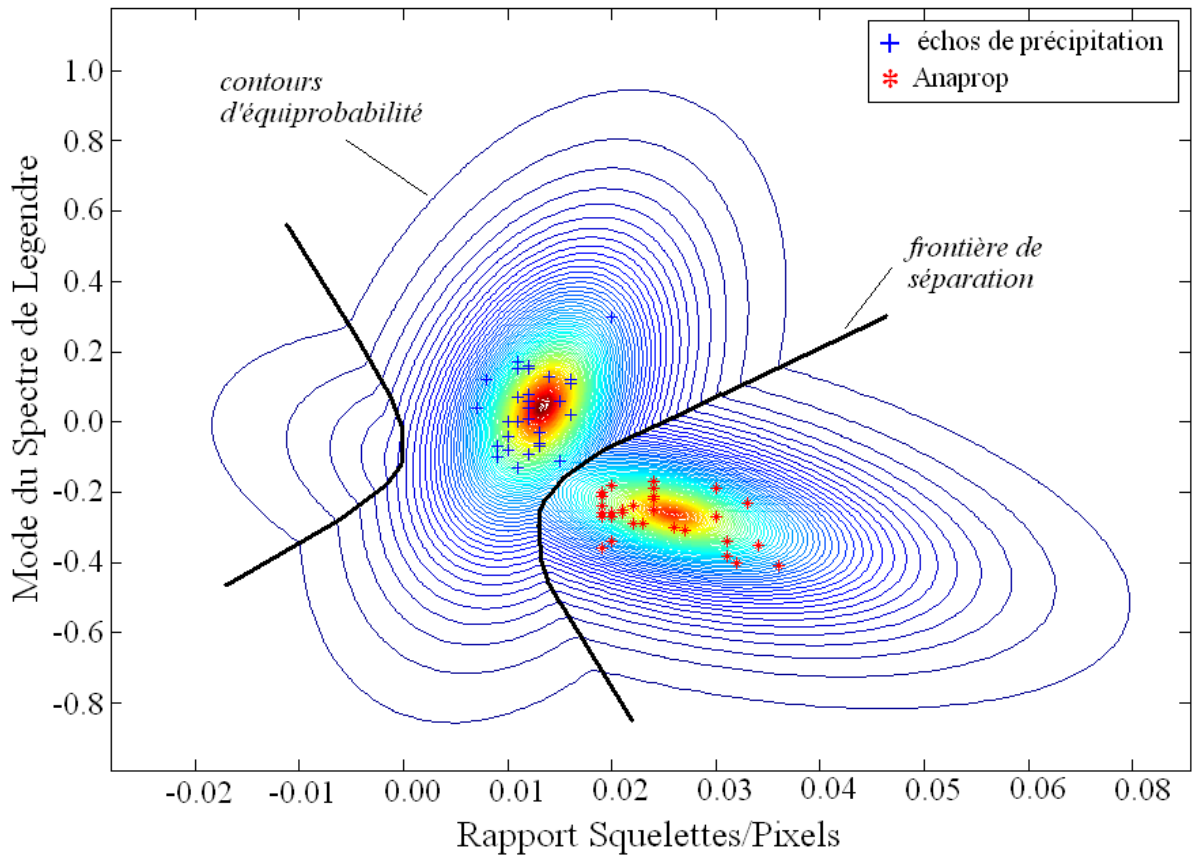


Figure 8 : Classification des échos de précipitations et d'anaprops (30 images d'anaprops et 30 images d'échos de précipitations) avec deux paramètres : l'exposant de Hölder du mode du spectre de Legendre, et le nombre de squelettes par pixels d'échos radar Contours d'équiprobabilité en code couleurs, et en noir l'hyperbole qui représente la frontière de séparation entre les deux classes.

Figure 8 : *Classification of anaprops and precipitations echoes (30 anaprops images and 30 precipitation images) by using two features : Holder exponent of Legendre spectrum mode and the rapport skeletons/pixels. Equiprobability contours with color code and in black the boundary of separation between the two classes.*

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Un système automatique de classification et d'élimination des échos radar a été réalisé à partir de l'analyse multi fractale en utilisant la méthode MMTO-2d avec une ondelette dérivée gaussienne du premier ordre. Cette étude montre un comportement proche des formes d'une rampe pour les précipitations et en Dirac pour les échos parasites. Les résultats de traitement montrent que les échos parasites sont quasiment éliminés à 98% alors que les échos de précipitations sont conservés à plus de 98.2% pour les deux sites étudiés . En outre, l'erreur d'estimation des précipitations n'excède pas 5%. De plus, le temps de traitement est estimé à trois minutes, ce qui permet de traiter en temps réel les échos radar. Ces premiers résultats montrent que notre algorithme s'adapte bien aux deux régions malgré leurs différences climatique et topographique.

Nous avons montré aussi que dans la plupart des cas, les spectres de Legendre caractérisant les échos sont de type mono fractal pour les anaprops et multi fractal pour les précipitations. Le mode du spectre de Legendre et le rapport squelettes par pixel peuvent être utilisés comme paramètres d'identification des deux types d'échos. L'application de la théorie de décision Bayesienne a permis d'établir la frontière de séparation entre les deux classes et l'identification sans ambiguïté des deux types d'échos. Pour une automatisation, il faut considérer plusieurs sites radar pour savoir si la frontière de séparation est indépendante du site considéré.

Il serait aussi intéressant de procéder à l'analyse multi fractale des images radar par les coefficients dominants ou considérer la longueur des squelettes et l'anisotropie dans l'identification des échos en provenance de la surface terrestre. Aussi, une étude élargie à d'autres sites permettrait de mieux caractériser les échos parasites du sol.

6. REFERENCES

Arnéodo, A, Decoster, N, Roux, S.G (2000) "A wavelet-based method for multifractal image analysis.I. Methodology and test applications on isotropic random rough surface". *European Physical Journal B*, vol. 15, p. 567-600.

Bacry, E., Muzy, J. F. and Arneodo, A. (1993) "Singularity spectrum of fractal signals from wavelet analysis: Exact results". *Journal of Statistical Physics*, vol. 70, p. 635-674.

Boithias, L. (1984) "Propagation des ondes dans l'environnement terrestre et planétaire". Edition Dunod, Paris, 320 p.

Canny, J. (1986) "A Computational Approach To Edge Detection". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 8, p. 679-714.

Charalampidis, D., Kasparis, T. and Jones, W.L. (2002) "Removal of nonprecipitation echoes in weather radar using multifractals and intensity". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, n° 5. p. 1121–1131.

Cheng, M.D., and Arakawa, A. (1997) "Inclusion of rainwater Bridget connective downdrafts in Arakawa Schubert cumulus parameterization". *Journal of the atmospheric sciences*, vol.54. n°10, p. 1359-1378.

Combes, J.M., Grossmann A., and Tchamitchian P. (1989) "Wavelet". Edition Springer, Berlin, 227 p.

De Michele, C. and Bernardara, P. (2005) "Spectral analysis modelling of space-time rainfall field". *Atmospheric Research*, vol. 77, n°1-4, p.124-136.

Deriche, R. (1992) Proceedings on Image Processing. The Second International Conférence on Image Processing, p. 263-267.

Dubuc, B., Zucker, S.W., Tricot, C., Quiniou J.F. and Wehbi, D. (1989) "Evaluating the Fractal Dimension of Surfaces". *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 425. p. 113-127.

Duda, R.O., Hart, P.E., and Stork, D.G. (2001) "Pattern Classification, Edition Wiley InterScience", New York, 680 p.

Feder, J. (1988) "Fractals". Edition Pergamon, New York, 386 p.

Frisch, U. and Parisi, G. (1985) On the singularity structure of fully developed turbulence; appendice in Fully developed turbulence and intermittency. Proceedings of theInternational Summer school in Physics. Enrico Fermi, North Holland. p. 84-88.

Frisch, U. (1995) "Turbulence. The legacy of A.N. Kolmogorov", Cambridge University Press, 289 p.

Galenda, G., Gorgucci, E., Napolitano, F., Novella, A. and Volpi, E. (2005) "Multifractal Analysis of radar rainfall fields over the area of Rome". *Advances in science* ,vol. 2, p. 293-299.

Grazzini, J. (2003) Analyses multi échelle et multifractale d'images météorologiques : Application à la détection de zones précipitantes. Thèse de Doctorat. Université de Marne La Vallée.

Haddad, B., Adane, A., Sauvageot, H., Sadouki, L. (2004) "Identification and filtering of rainfall and ground radar echoes using textural features". *International Journal of Remote Sensing*, vol.25, n° 21, p. 4641-4656.

Haddad, B., Sadouki, L., Sauvageot, H., and Adane, A. (2006) "Analyse de la dimension fractale des échos radar en Algérie, France et Sénégal". *Télédétection*, vol. 5, n°4, p.299-306.

Hubert, P., Tessier, Y., Lovejoy, S., Schertzer, D., Schmitt, F., Ladoy, P., Carbonnel, J.P., Violette, S., and Desurosne, I. (1993) "Multifractals and extreme rainfall events". *Geophysical Research Letter*, vol. 20, p.931-934.

Jaffard , S. (1997) : "Multifractal formalism for function, Part 1 : Results valid for all functions, S.I.A.M". *Journal of Mathematical Analysis*, vol. 28, n° 4, pp. 944-970.

Kestener, P. (2003) Analyse multifractale 2D et 3D à l'aide de la transformation en ondelettes : application en mammographie et en turbulence développée. Thèse de Doctorat. Université Bordeaux I.

Lovejoy, S. and Schertzer, D. (1990) "Multifractal, universality classes satellite, and radar measurement of clouds, and rain fields". *Journal of Geophysical Research*, vol. 95, p. 2021-2034.

Macor, J., Schertzer, D., Lovejoy, S. (2007) Multifractal methods applied to rain forecast using radar data. Houille Blanche, n° 4, p. 92-98

Mallat, S. and Hwang, W.L. (1992) Singularity Detection and Processing with Wavelets, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 38, n° 2, p. 617-643.

Mallat, S. (2009) "A wavelet tour of signal processing", Edition Academic press. San Diego, 805 p.

Mandelbrot, B.B. (1983) "The fractal geometry of Nature". W.H. Freeman and Company. New York , 423 p.

Mesnard, F, and Sauvageot, H. (2003) "Structural characteristics of rain fields". *Journal of Geophysical Research*, vol.108, n° D13. 4385.

Olson, J.(1996) "Validity and applicability of a scale-independent, multifractal relationship for rainfall". *Atmospheric Research*, vol. 42, p. 53-65.

Prabhakara, R. Iacovazzi, J.-M.Yoo, K.-M. Kim, and T. L. Bell, 2008: "A method to estimate rain rate over tropical oceans with TRMM Microwave Imager radiometer". *Journal of the Meteorological Society of Japan*, vol. 86, n°1, p. 203-212.

Roux, S.G., Arnéodo, A., Decoster, N. (2000) "A wavelet-based method for multifractal image analysis III. Application to high resolution satellite image for cloud structure". *European Physical Journal B*, vol. 15, p. 765-786.

Sauvageot, H., (1992) "Radar meteorology", Artech House. Boston, 361 p.

Sauvageot, H., and Despaux, G. (1990) SANAGA : un système d'acquisition numérique et de visualisation des données radar pour la validité des estimations satellitaires des précipitations. *Veille Climatique Satellitaire*, n°31. p. 51-55.

Turiel, A. and Polzo, A. (2002): "Reconstructing images from their most singular fractal manifold". *IEEE transactions on Image processing*, vol 11, n° 4, p 345-350.