Télédétection, 2005, vol. 4, n°4, p. 329-338
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2005 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*

ANALYSE CLIMATO-STATISTIQUE DES ANAPROPS DANS LE SUD-OUEST DE LA FRANCE

BOUALEM HADDAD[1], HENRI SAUVAGEOT[2], ABD EL HAMID ADANE[1] ET LEILA SADOUKI[1]

[1] *Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène (U.S.T.H.B.), Faculté d'électronique et d'informatique, B.P. n° 32, El Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie. Téléphone : 00 213 21 24 79 52, poste 830 ; courriel : h_boualem@hotmail.com*

[2] *Université Paul Sabatier, Observatoire Midi Pyrénées, Laboratoire d'aérologie, 14, avenue Édouard Belin, 31400 Toulouse, France. Téléphone : 00 33 5 62 40 61 02 ; courriel : sauh@aero.obs-mip.fr*

(soumis : 9 mars 2004 ; révisé : 20 août 2004 ; accepté 12 octobre 2004)

Les anaprops, considérés par les météorologues comme des échos parasites, sont dus aux anomalies de propagation et réduisent considérablement les performances des radars météorologiques. Les données utilisées sont des images de la région de Bordeaux, obtenues en 1996 grâce à un radar météorologique travaillant dans la bande S (avec $\lambda = 10$ cm). Le traitement de ces images montre que les anaprops apparaissent pendant 21 % du temps au cours de l'année et qu'ils sont plus fréquents sur la côte et le continent que sur la mer. L'analyse des données de température, de pression et d'humidité relative, obtenues par radiosondage, a montré que les anaprops sont surtout causés par le phénomène de refroidissement nocturne. Compte tenu de la persistance des phénomènes mis en jeu, nous avons pu modéliser les anaprops et les échos des précipitations par des processus autorégresssifs. En effet, nous montrons que les surfaces occupées par les anaprops dans les images radar évoluent au cours du temps comme un processus autorégressif du quatrième ordre (AR-4) alors que les variations des surfaces occupées par les échos des précipitations sont régies par un processus autorégressif du premier ordre (AR-1). Les différences existant entre les coefficients caractérisant les modèles AR-1 et AR-4 peuvent être mises à profit pour identifier les images contaminées par les anaprops dans des bases de données radar.

Mots-clefs : météorologique ; échos du sol ; anaprops ; modèle autorégressif ; précipitations.

CLIMATO-STATISTIC ANALYSIS OF ANAPROPS FOR THE SOUTHWEST OF FRANCE

The anaprops, considered by the meteorologists as spurious echoes, are issued from anomalous propagation and therefore reduce considerably the radar performance. The data used are images recorded in the region of Bordeaux during 1996 by means of S-band meteorological radar (with $\lambda = 10$ cm). After processing, it is shown that anaprops are present for 21 % of time during the year and their surface is much greater over the continent and the coast rather than the sea. The data analysis of temperature, pressure and relative humidity obtained by radiosonding showed that anaprops are caused by nocturnal radiative cooling. Considering the persistence of involved phenomena, we were able to model anaprops and precipitation echoes by autoregressive processes. In fact, we determined that surfaces occupied by anaprops in images radar evolve during time as a fourth order autoregressive process (AR-4) while the variations of surfaces occupied by the precipitation echoes are represented by a first order autoregressive process (AR-1). Hence, the coefficients characterizing the AR-1 and AR-4 models can be used to identify images contaminated by anaprops in data bases radar.

Keywords : meteorology radar; ground echo; anaprop; autoregessive model; precipitations.

1. INTRODUCTION

De nos jours, le radar météorologique est le moyen d'observation et d'estimation des précipitations le plus utilisé. En effet, il a l'aptitude unique de fournir une couverture continue dans l'espace et dans le temps des champs de précipitations. Cependant, les images radar sont difficiles à exploiter lorsqu'elles sont contaminées par les échos en provenance de la surface terrestre. Ces derniers gênent considérablement la détection des échos météorologiques et provoquent des erreurs dans l'estimation des précipitations et des ambiguïtés dans l'identification des nuages (Sauvageot, 1992).

Les échos du sol existant autour du radar sont permanents et leur position est bien connue. Les reliefs, les bâtiments ou les pylônes sont des exemples de cibles qui peuvent causer ce type d'échos parasites. Lorsque les variations de l'indice de réfraction avec l'altitude sont très fortes et le gradient d'indice inférieur à $-157 \times 10^{-6}\,\mathrm{km}^{-1}$, les ondes radioélectriques se propagent en fonction d'une trajectoire courbe et subissent une réflexion graduelle dans l'atmosphère (Boithias, 1984). Puis, elles sont rétrodiffusées par la surface terrestre et, en partie, reviennent à l'antenne (Bean and Dutton, 1968). Ce type d'échos, appelés échos A.P. (*Anomalous propagation*) ou anaprops, sont observés à des distances relativement lointaines du radar. La position des anaprops dépend des structures horizontale et verticale de l'atmosphère (Ott, 1997). Ils apparaissent sous forme de cibles

lentement mobiles. Il est alors plus difficile de les supprimer. Pour une bonne estimation des précipitations, il est donc indispensable de procéder à l'élimination de ces échos parasites en provenance de la surface terrestre.

Diverses techniques d'élimination des échos en provenance de la surface terrestre sont proposées dans la littérature. Par exemple, pour les radars Doppler, l'analyse des propriétés statistiques permet de distinguer les anaprops des échos de précipitations (Doviak and Zrnic, 1993 ; Sachidananda and Zrnic, 2003). La suppression des anaprops par les radars polarimétriques a été étudiée par Giuli *et al.* (1991) et aussi par Ryzhkov et Zrnic (1998). Pamment et Convay (1998) suggèrent une identification des régions de précipitations en comparant les images radar aux images satellitaires infrarouges.

Pour les radars météorologiques conventionnels, c'est-à-dire ceux qui ne sont ni Doppler ni polarimétrique, les échos en provenance de la surface terrestre peuvent être éliminés en analysant les propriétés statistiques des anaprops et des échos de précipitations. Par exemple, Moszkowicz *et al.* (1994) ont utilisé l'approche bayesienne pour classer les échos radar. Grecu et Krajewski (2000) proposent une méthode basée sur les réseaux de neurones pour éliminer les échos A.P. Steiner et Smith (2002) suggèrent une étude tridimensionnelle de la structure de la réflectivité radar pour filtrer les échos de précipitations. La texture des images radar est également utilisée pour supprimer les anaprops (Haddad *et al.,* 2004). Il est aussi intéressant de connaître les propriétés climatologiques et stochastiques des échos du sol et des anaprops de façon à mieux les prendre en compte. Nous avons récemment montré que les processus Markoviens peuvent être utilisés pour identifier les échos en provenance de la surface terrestre (Haddad *et al.*, 2000). Cette représentation s'inscrit dans le cadre d'une approche globale où nous avons supposé que l'état observé à l'instant présent ne dépend que de l'état précédent immédiat. Afin d'améliorer ce résultat, nous nous proposons dans cet article d'évaluer une modélisation en prenant en compte plus d'états antérieurs, ceci au travers d'une représentation autoregrésssive des deux phénomènes. En outre, nous allons étudier tant la distribution des anaprops sur la mer, la côte et le continent en utilisant un radar côtier que leur durée ainsi que leur moment d'apparition pour l'année 1996.

2. BANQUE DE DONNÉES

Le radar utilisé a été installé sur une tour, à 70 m d'altitude à l'aéroport de Bordeaux-Merignac. Il est l'un des éléments du réseau français opérationnel géré par Météo-France. Ses coordonnées géographiques sont 44° 51' N et 0°39' O. C'est un radar pulsé travaillant à 2,8 GHz et délivrant une puissance de crête de 700 kW. La durée de l'impulsion radar est de 2 μs. L'antenne est un paraboloïde de 4 m de diamètre et de gain de 40 dB. L'ouverture à 3 dB du lobe principal vaut 1,9°. Les images sont enregistrées suivant le mode P.P.I. (*Plan Position Indicator*). Elles sont recueillies quotidiennement toutes les cinq minutes au cours de l'année 1996 et représentées dans un format de 512 x 512 pixels avec une résolution de 1 km par pixel. L'échantillon de données utilisé comprend 105 408 images. Le nombre de niveaux de gris codant chaque pixel est de 52. La région de Bordeaux est située dans le sud-ouest de la France. Le relief est plutôt plat. À l'intérieur d'un rayon de 150 km autour du radar, l'altitude est inférieure à 200 m, à l'exception de la zone nord-est, où l'on rencontre le premier contrefort du Massif Central situé à une distance du radar légèrement supérieure à 130 km et culminant à 400 m d'altitude. Plus loin, au sud, à une distance de 200 km du radar, les Pyrénées qui s'élèvent à 3 000 m d'altitude. Les images radar sont en grande partie contaminées par les échos fixes causés par la zone industrielle de Bordeaux. En outre, les échos A.P. dus aux collines et aux montagnes voisines apparaissent de manière fréquente dans les images.

Le climat de Bordeaux est océanique. La plupart des phénomènes pluvieux observés dans cette région sont des perturbations cycloniques frontales régionales. L'intensité moyenne annuelle des précipitations est de 800 mm (Nzeukou and Sauvageot, 2002). Compte tenu des caractéristiques géographiques de la région de Bordeaux, le site étudié a été découpé en trois parties, dont la largeur est comptée d'est en ouest et la longueur du nord au sud. Les trois zones ont toutes une longueur de 180 km et une largeur de 60 km. Ce sont la mer à l'ouest du radar, la côte proprement dite, incluant le radar, et le continent, situé à l'est du radar.

Nous avons considéré deux classes d'images dans cette étude, à savoir les précipitations et les échos en provenance de la surface terrestre. Ainsi, nous avons sélectionné 22 467 images prises en temps clair et 37 056 images représentant les précipitations. Pour distinguer les échos fixes du sol, les anaprops et les précipitations, nous avons procédé à l'animation des images. Les précipitations se déplacent d'une image à une autre. Par contre, les échos du sol et les anaprops sont, soient immobiles, soient animés d'un mouvement lent. Si, pour les premiers, ils sont observés en majorité à faible distance (≤ 30 km), les seconds se manifestent à des distances plus éloignées et leur durée de vie dépend des conditions météorologiques. Ainsi, dans cette

étude, pour ne considérer que les échos A.P. et les échos des précipitations, lors du traitement des images, nous avons ignoré tous les pixels qui se trouvent à un rayon inférieur ou égal à 30 km du radar (Nzeukou and Sauvageot, 2002).

3. CLIMATOLOGIE DES ANAPROPS

Les paramètres caractéristiques des anaprops sont leur durée de vie, leur moment d'apparition, leur surface et leur position géographique (Skolnik, 1990).

Sur la figure 1, on représente les fréquences du moment d'apparition des anaprops au cours du jour et de la nuit. On constate que les anaprops sont beaucoup plus fréquents la nuit que pendant le jour. L'absence d'anaprops en milieu de journée est causée par le développement d'une couche de convection thermique (Bean and Dutton, 1968). Pour identifier le phénomène météorologique responsable de l'apparition des échos A.P. dans cette région, nous avons analysé les données de température, de pression et d'humidité relative recueillies par Météo-France par radiosondage dans la région bordelaise. Le traitement de ces paramètres a montré qu'on a surtout affaire à des guides au sol causés par le phénomène de refroidissement nocturne. En effet, pendant la nuit, la température de la surface terrestre devient inférieure à celle de l'air par suite du rayonnement thermique. Un flux de chaleur se dirige alors vers le bas en produisant une inversion du gradient de température. De même, nous avons estimé la durée de vie des échos A.P. dans la région de Bordeaux. On trouve que les anaprops y sont présents 21 % du temps au cours de l'année 1996.

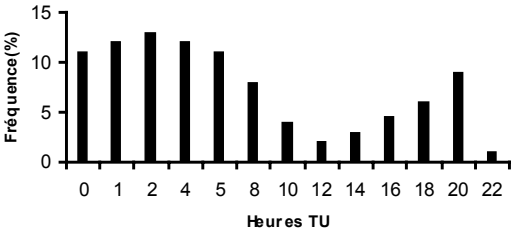


FIGURE 1 Fréquences des instants d'apparition des anaprops pour une durée de 24 h. *Frequencies of the anaprops appearance moments for a duration of 24 hours.*

Les surfaces respectivement occupées par les anaprops et les précipitations ont été comparées. Pour ce faire, ces surfaces ont été cumulées jour par jour, pour chacun des douze mois de l'année. Leur évolution au cours de l'année est indiquée sur la figure 2a. Les résultats montrent que les surfaces représentatives des deux phénomènes varient en sens inverse et que la surface occupée par les anaprops est maximale au cours des mois de juin et d'octobre, alors que celle occupée par les précipitations est plus importante pendant les mois de janvier et de novembre. Ces résultats permettent aussi de lier l'apparition des anaprops à la stratification de l'atmosphère au cours des périodes considérées. L'existence des anaprops est due à des phénomènes de refroidissement nocturne. La disparition des anaprops est liée à l'apparition de la pluie et de la convection dans l'atmosphère (Stull, 1988). Cette instabilité est illustrée par la période juillet/août où il se produit souvent des orages dans la région de Bordeaux. Alors, on trouve que les échos A.P. sont moins fréquents et qu'ils occupent une surface plus petite.

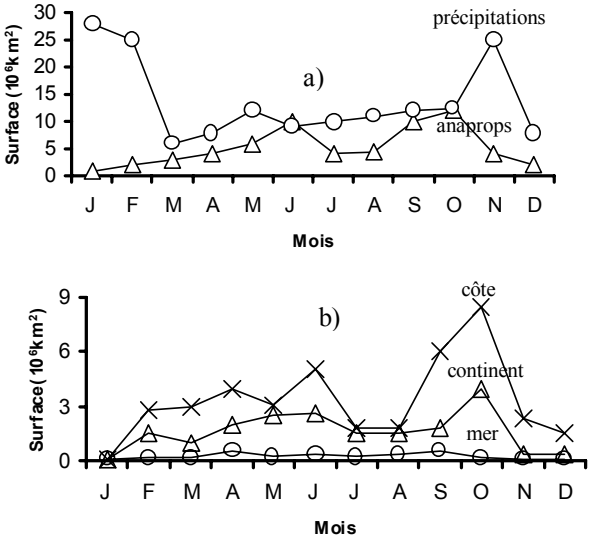


FIGURE 2 *a)* Distribution de la surface mensuelle occupée par les anaprops (Δ) et les précipitations (O), et *b)* distribution de la surface mensuelle des anaprops sur la mer (O), sur la côte (X) et sur le continent (Δ). a) *Distribution of the monthly surface occupied by anaprops (Δ) and precipitation (O), and b) distribution of the monthly surface of anaprops on the sea (O), on the coast (X) and on the continent (Δ).*

Les anaprops ont également été étudiés en fonction de leur localisation dans les trois zones, à savoir la mer, la côte et le continent. Comme on le montre sur la figure 2b, les surfaces d'anaprops cumulées mensuellement sont beaucoup plus importantes sur la côte et sur le continent que sur la mer. Les anomalies de propagation, ainsi observées dans les régions côtières, peuvent s'expliquer par l'existence de brises de terre et de mer (Bean and Dutton, 1968). Par ailleurs, la température atmosphérique varie beaucoup moins au-dessus de la mer qu'au-dessus du continent, causant peu d'inversions thermiques au-dessus de l'océan Atlantique. L'absence d'échos d'anaprop sur la mer

peut s'expliquer aussi par le fait que cette dernière se comporte comme un miroir plan (réflexion spéculaire) et donc ne renvoie pas le signal incident vers le récepteur radar. Étant donné l'emplacement du radar sur la côte, les échos A.P. sont inévitablement accompagnés d'échos fixes du sol. Ceci peut aussi justifier les valeurs élevées des fréquences d'apparition des anaprops au-dessus de la côte.

4. MODÉLISATION PAR DES PROCESSUS AUTORÉGRESSIFS

4.1. Données

Les données radar utilisées pour la modélisation des échos en provenance de la surface terrestre et les échos de précipitations sont les images prises à Bordeaux, en 1996. Les surfaces occupées par chacun des deux types d'échos ont été calculées image par image pour pouvoir être cumulées à l'échelle de la journée. Sur la figure 3, on montre la série temporelle des surfaces occupées respectivement par les anaprops et les échos de pluie. Pour ces deux types de série temporelle, les surfaces moyennes journalières ont été considérées**.** Les variations saisonnières des phénomènes mis en jeu sont faibles au cours de l'année. En effet, la composante continue à laquelle se superposent les fluctuations des surfaces d'échos est constante à l'échelle du mois. Afin de pouvoir représenter de telles fluctuations par des variables aléatoires qui soient stationnaires, nous avons choisi de travailler à l'échelle du mois et d'utiliser une variable aléatoire qui est centrée et réduite, soit :

$$a(d,m) = \frac{[A(d,m) - A(m)]}{\sigma(m)} \qquad (1)$$

Dans cette expression, A(d,m) est la surface de l'écho étudié quand on observe celui-ci au cours du jour (d) du mois (m), A(m) est la distribution moyenne des surfaces au cours d'un mois et σ(m), son écart type.

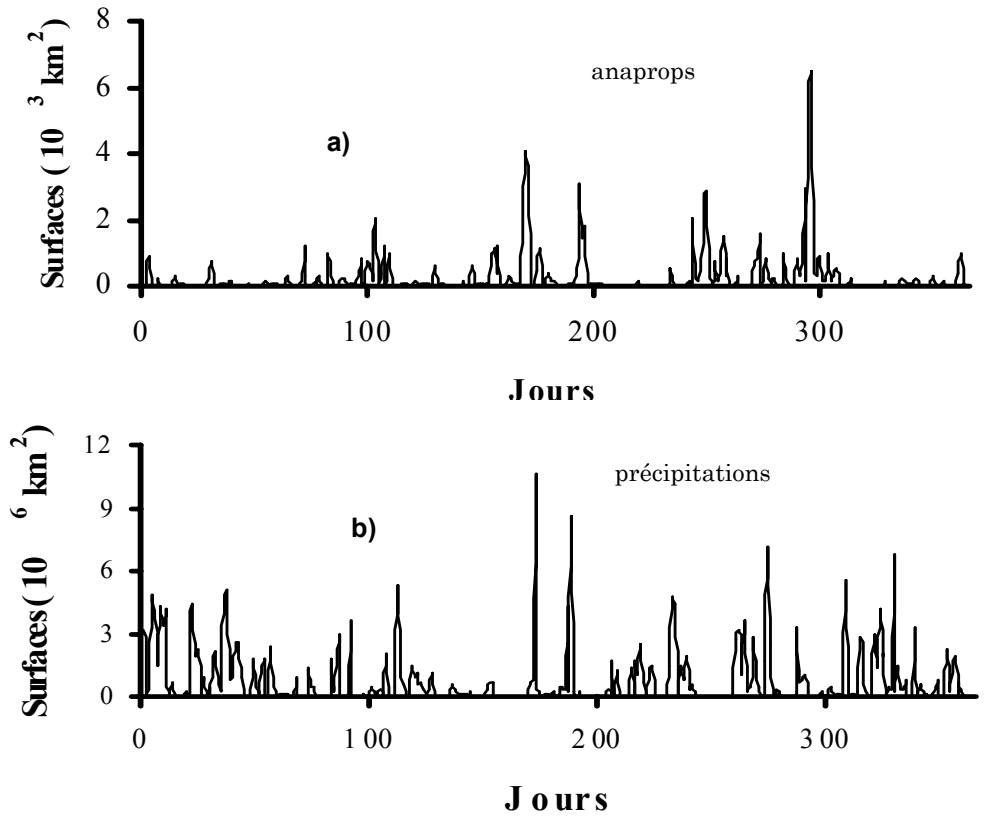


FIGURE 3 *a)* Séries temporelles des surfaces moyennes journalières occupées par les échos A.P. et les précipitations, *b). a) Temporal series of the daily average surfaces occupied by the A.P. echoes and precipitation, b).*

4.2. Processus autorégressif d'ordre p

Considérons une série chronologique formée de variables aléatoires $X_{1,..}$, X_n. Un processus autorégressif, ou processus AR-p, est un processus pour lequel l'observation à l'instant t dépend linéairement des p observations du passé. Son expression mathématique est (Brockwell and Davis, 1996) :

$$X(t) = \sum_{i=1}^{p} a_i X(t-i) + \varepsilon(t) \qquad (2)$$

où a_i sont les coefficients du modèle et $\varepsilon(t)$ est l'erreur d'ajustement. Cette dernière est assimilable à un bruit gaussien.

L'expression (2) peut se mettre sous la forme :

$$\varphi(B)\, X(t) = \varepsilon(t) \qquad (3)$$

où $\varphi(B) = 1 - a_1B - a_2B^2 - a_3B^3 - \ldots - a_pB^p$

Pour que le processus soit stationnaire, les racines $\varphi(\underline{B}) = 0$ doivent être situées hors du disque unité. Pour un processus autorégressif d'ordre p, les conditions de stationnarité sont données par :

$$a_1 + a_2 + .. + a_p < 1$$
$$-a_1 + a_2 + .. + (-1)^p a_p < 1$$
$$-1 < a_p < 1$$

La fonction d'autocorrélation est une fonction très importante dans la caractérisation d'un processus linéaire; elle s'écrit :

$$\rho_k = \frac{C_{XX}(k)}{C_{XX}(0)} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} (X(j) - \bar{X})(X(j+k) - \bar{X})}{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} (X(j) - \bar{X})^2} \qquad (4)$$

où $C_{XX}(k)$ est la fonction d'autocovariance, k est la durée exprimée en nombre de jours observés et $\bar{X}$ est la moyenne.

Le dénominateur de l'expression (4) représente la variance de X. Dans notre cas, la variable représentative des échos AP ou des échos de pluie est centrée réduite. Il en résulte que la moyenne $\bar{X}$ est nulle et que la variance vaut 1. L'expression (4) devient alors :

$$\underline{\rho_k = C_{XX}(k)} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} X(j)\, X(j+k) \qquad (5)$$

Cette fonction nous renseigne sur la mémoire du processus, c'est-à-dire le degré de dépendance entre les observations effectuées à la date t et celles faites à la date (t – k).

Pour estimer les paramètres du modèle, nous avons utilisé l'algorithme de Levinson-Durbin (Box and Jenkins, 1976 ; Fuller, 1995). L'ordre du modèle est obtenu lorsque la variance σ^2 de l'erreur devient constante. La structure de cet algorithme est la suivante

– pour p = 1, on a $a_{11} = C_{XX}(1)$ et $\sigma^2 = (1 - a_{11})^2$;

– pour les ordres supérieurs à 2, les coefficients du processus AR sont calculés en utilisant les relations de récurrence suivantes :

$$a_{kk} = \frac{[C_{XX}(k) - \sum_{n=1}^{k-1} a_{k-1,n}(k,n)]}{\sigma_{k-1}^2}$$

$$a_{k,n} = a_{k-1,n} - a_{kk}\, a_{k-1,k-n}$$

Si le processus est d'ordre p, on a :

$$\sigma_{p+1}^2 = \sigma_p^2$$
$$a_{p+1,i} = a_{p,i}$$
$$a_{p+1,p+1} = 0$$

Les processus autorégressifs sont aussi caractérisés par une fonction d'autocorrélation partielle qui mesure la dépendance des variables X_t et X_{t-k} en ignorant l'influence des variables intermédiaires X_{t-1}, ... , X_{t-k+1}. Les coefficients d'autocorrélation partielle ϕ_{kk} peuvent se déduire des coefficients d'autocorrélation en écrivant que (Bosq et Lecoutre, 1992) :

$$\phi_{kk} = A / B$$

où A et B sont les déterminants respectifs des matrices A_k et B_k représentatives des coefficients d'autocorrélation :

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \cdot & \rho_{k-2} & \rho_1 \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ \rho_{k-1} & \rho_{k-2} & \cdot & \rho_1 & \rho_k \end{bmatrix}$$

$$B_k = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \cdot\ \cdot & \rho_{k-1} \\ . & . & . \ . & . \\ . & . & . \ . & . \\ . & . & . \ . & . \\ \rho_{k-1} & \rho_{k-2} & \cdot\ \cdot & 1 \end{bmatrix}$$

La fonction d'autocorrélation s'écrit :

$$\rho_k = \rho^k \ (6) \qquad (6)$$

On voit que les variables X(t) et X(t-k) dépendent l'une de l'autre avec une corrélation qui décroît en exponentielle.

L'ordre d'un processus autorégressif correspond à la valeur pour laquelle la fonction d'autocorrélation partielle est nulle. Pratiquement, on calcule les écarts types $\sigma(\phi_{kk})$ des coefficients d'autocorrélation partielle. Les estimations des coefficients d'autocorrélation partielle ϕ_{kk} sont alors considérées nulles si elles se situent à l'intérieur de l'intervalle de confiance construit à partir des écarts types $\sigma(\phi_{kk})$. Grâce aux valeurs des écarts types $\sigma(\phi_{kk})$, on déduit donc les ordres des modèles autoré-gressifs décrivant les anaprops et les échos de précipitations.

4.3. Résultats et discussion

Les courbes de variations des coefficients d'autocorrélation en fonction de la durée k pour les anaprops et les précipitations sont données à la figure 4 alors que celles des coefficients d'autocorrélation partielle pour les deux types d'échos sont décrites à la figure 5. Sur la figure 5, l'intervalle de confiance est matérialisé par l'espace compris entre les deux barres horizontales.

D'après les figures 4b et 5b, nous remarquons que les coefficients d'autocorrélation décroissent de façon exponentielle et que les coefficients d'autocorrelation partielle $\phi_{22},\ldots,\phi_{77}$ se trouvent à l'intérieur de la bande de confiance délimitée par $\sigma(\phi_{kk}) = \underline{0{,}09}$. Par conséquent, nous pouvons admettre que les échos de précipitations forment bien un modèle autorégressif du premier ordre. L'analyse des figures 4a et 5a correspondant aux anaprops montre que la décroissance des coefficients d'autocorrelation est aussi exponentielle. Cependant, le coefficient d'autocorrélation partielle ϕ_{33} ne se situe pas à l'intérieur de l'intervalle de confiance obtenu à partir de $\sigma(\phi_{kk}) = 0{,}19$. Cela signifie que les termes d'ordre supérieurs à trois doivent aussi jouer un rôle important dans le processus représentatif des anaprops.

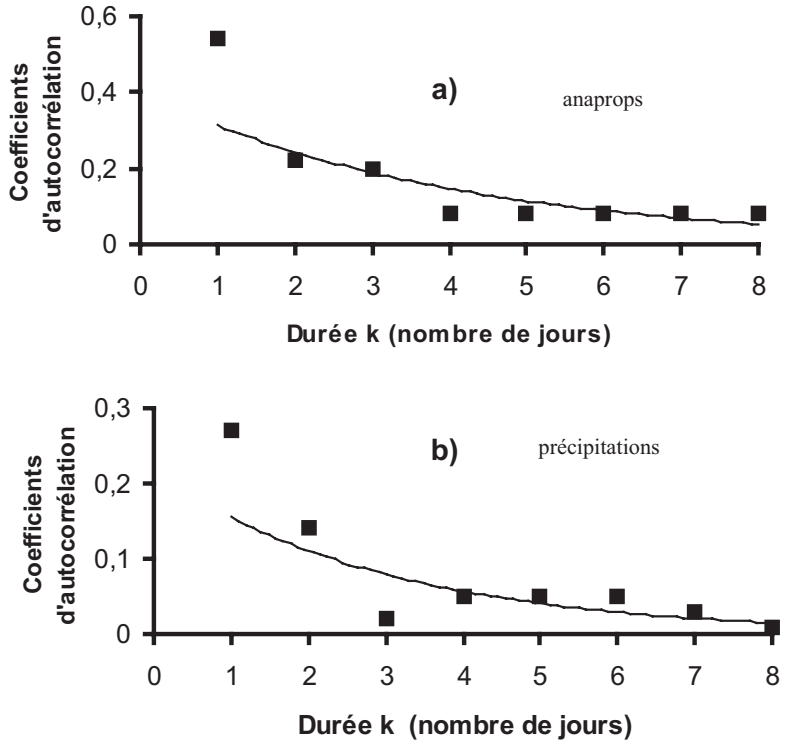


FIGURE 4 *a)* Évolution des coefficients d'autocorrélation en fonction de la durée k pour les anaprops et les précipitations, *b). a) Evolution of the autocorrelation coefficients relatively to the duration k for anaprops and precipitation, b).*

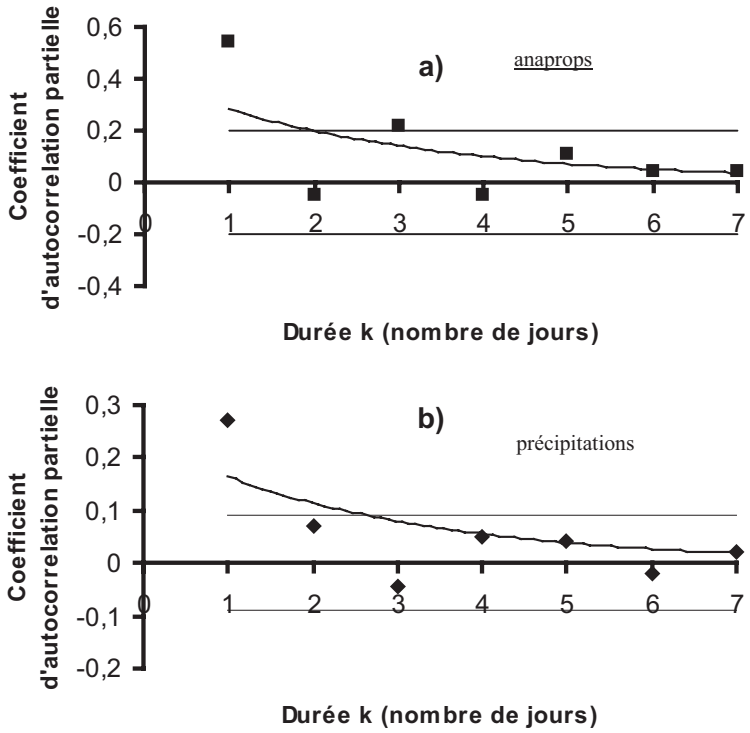


FIGURE 5 *a)* Évolution des coefficients d'autocorrélation partielle en fonction de la durée k pour les échos AP et les précipitations, *b). a) Evolution of the partial autocorrelation coefficients relatively to the duration k for the AP echoes and precipitation, b).*

L'application de l'algorithme de Levinson Durbin aux données d'échos A.P. et de précipitations a permis de déterminer les coefficients des processus A.R. représentatifs des anaprops et des précipitations (tableau 1).

L'analyse des coefficients d'autocorrélation a_{ij} montre que :

– pour les anaprops :

a) le processus est stationnaire à l'ordre 4 car :

$a_{41} + a_{42} + a_{43} + a_{44} = 0{,}76 < 1$

$a_{41} + a_{42} - a_{43} + a_{44} = -0{,}80 < 1$

et $a_{44} < 1$;

b) les paramètres a_{ip} sont constants lorsqu'on passe de l'ordre 4 à l'ordre 5 ;

c) le coefficient a_{55} est négligeable et la variance de l'erreur demeure constante lorsqu'on passe de l'ordre 4 à l'ordre 5 ;

– pour les précipitations :

a) le processus est stationnaire au premier ordre car a_{11} qui est égal à 0,26 est bien compris entre –1 et 1 ;

b) les coefficients a_{ip} restent constants lorsqu'on passe de l'ordre un à l'ordre deux ou trois ;

c) les coefficients a_{22} et a_{33} sont négligeables et la variance de l'erreur demeure constante.

Ceci confirme que le modèle AR-1 est bien adapté pour décrire les variations aléatoires des surfaces des précipitations et que celles des surfaces d'anaprops sont mieux décrites par un modèle AR-4. Le résultat obtenu pour les précipitations est en accord avec celui proposé par Stern et Coe (1984), qui ont modélisé les données journalières de la pluie.

Ayant identifié le modèle pour chaque type d'échos, puis estimé les paramètres, il est nécessaire de vérifier l'adéquation du modèle retenu avec les observations. L'hypothèse fondamentale à tester est l'indépendance des erreurs ε(t). Comme ces erreurs ne sont pas observables, on les remplace par des erreurs $\hat{\varepsilon}(t)$, estimées à partir des paramètres du modèle AR-p retenu, soit :

$$\hat{\varepsilon} = (t) = x(t) - a_1\, x(t-1) - a_2\, x(t-2) \text{ -.- } a_p\, x(t-p) \quad (7)$$

TABLEAU 1 Coefficients du processus autorégressif (AR) représentatif des anaprops et des précipitations. *Autoregressive process coefficients representative of anaprops and precipitation.*

Ordres du modèle	Valeurs des coefficients du modèle	
	Précipitations	Anaprops
1	$a_{11} = 26$ $\sigma_1^2 = 0,92$	$a_{11} = 0,50$ $\sigma_1^2 = 0,74$
2	$a_{21} = 0,24$ $a_{22} = -0,06$ $\sigma_2^2 = 0,92$	$a_{21} = 0,53$ $a_{22} = 0,05$ $\sigma_2^2 = 0,73$
3	$a_{31} = 0,24$ $a_{32} = -0,07$ $a_{33} = -0,04$ $\sigma_3^2 = 0,92$	$a_{31} = 0,54$ $a_{32} = 0,03$ $a_{33} = 0,22$ $\sigma_3^2 = 0,72$
4		$a_{41} = 0,55$ $a_{42} = 0,03$ $a_{43} = 0,23$ $a_{44} = -0,05$ $\sigma_4^2 = 0,70$
5		$a_{51} = 0,53$ $a_{52} = 0,04$ $a_{53} = 0,23$ $a_{54} = -0,08$ $a_{55} = 0,08$ $\sigma_5^2 = 0,70$

Le test d'adéquation est basé sur le calcul de la fonction d'autocorrélation des erreurs $\hat{\varepsilon}(t)$ et sur le test de $\aleph^2$; cette fonction s'écrit :

$$R_k(\hat{\varepsilon}) = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} \hat{\varepsilon}(t)\,\hat{\varepsilon}(t+k)}{\sum_{i=1}^{n} \hat{\varepsilon}^2(t)} \qquad (8)$$

Pour que le modèle soit acceptable, il faut que les estimations de $R_k(\hat{\varepsilon})$ soit proche de zéro afin d'assurer l'indépendance des erreurs. On calcule alors les K premières valeurs $R_k(\hat{\varepsilon})$, où K est choisi assez grand devant p mais généralement inférieur à 20. Puis, on utilise la distribution statistique de Box et Pierce qui s'écrit (Bosq et Lecoutre, 1992) :

$$Q_n = n \sum_{k=1}^{K} R_k^2(\hat{\varepsilon}) \qquad (9)$$

Sur le tableau 2, on donne respectivement les valeurs des coefficients $R_k(\hat{\varepsilon})$en fonction des durées k pour les anaprops et les précipitations. Le modèle que nous avons considéré sera rejeté si $Q_n > C$ et où C a pour valeur approchée le fractile d'ordre $1 - \alpha$ d'une loi $\aleph^2$ à K–p degrés de liberté. Le terme α est le risque de première espèce associé à ce test.

Sur le tableau 3, on donne les degrés de liberté $\nu = K–p$ de la loi Khi-II obtenus pour un nombre d'estimations K = 13 et les valeurs de Q_n, obtenues à partir de l'expression 6. Rappelons que l'ordre du modèle p vaut 1 pour les précipitations et 4 pour les anaprops. La valeur C est lue sur la table statistique de la loi de Khi-II pour un risque d'erreur inférieur ou égal à 0,05.

Les résultats du tableau 3 montrent que Q_n est toujours inférieur à C aussi bien pour les anaprops que pour les précipitations. Les erreurs sont donc indépendantes entre elles.

Les valeurs des coefficients d'autocorrélation a_{ij} obtenues pour les échos AP sont notablement différentes de celles correspondant aux échos de précipitations. Elles montrent que les échos d'anaprops sont influencés par ceux des quatre derniers jours alors que ceux des précipitations sont dépendants uniquement de ceux de la veille. Aussi, ces valeurs sont plus fortes pour les anaprops que pour les précipitations. Par conséquent, les coefficients d'autocorrélation par-tielle et notamment le coefficient d'ordre trois ϕ_{33} peuvent servir pour identifier les images radar contaminées par les échos A.P. En effet, ce coefficient est nul pour les précipitations alors qu'il est différent de zéro pour les anaprops.

TABLEAU 2 Variation des coefficients de corrélation des erreurs d'anaprop et de précipitations. *Variation of the error correlation coefficients of anaprops and precipitation.*

Durée k	Valeurs des coefficients de corrélation des erreurs	
	Précipitations	Anaprops
1	-0,012	0,016
2	0,087	-0,018
3	-0,047	0,016
4	0,034	-0,047
5	0,031	0,057
6	0,077	0,038
7	-0,038	0,018
8	-0,010	0,009
9	-0,022	-0,002
10	-0,011	-0,031
11	-0,055	0,037
12	-0,021	0,024
13	0,066	0,012

TABLEAU 3 Valeurs de Q_n et de C pour les anaprops et les précipitations (K désigne le nombre d'estimations, p l'ordre du modèle et ν les degrés de liberté de la loi Khi-II). *Q_n and C values for anaprops and precipitation (K indicate the number of estimations, p the Model order and ν the freedom degrees of Chi squared distribution).*

Type d'écho	K	p	$\nu = K - p$	Q_n	C
Anaprops	13	4	9	4,09	16,92
Précipitations	13	1	12	10,22	21,03

5. CONCLUSION

D'après cette étude, les phénomènes de propagation anormale dans la région bordelaise sont assez importants et persistants. Les résultats montrent que les anaprops apparaissent surtout en l'absence de précipitations. Au cours de l'année 1996, ils ont été observés durant 21 % du temps et ils étaient plus nombreux sur la côte et sur le continent que sur la mer. Ils se manifestent surtout la nuit, à cause du phénomène de refroidissement nocturne, et ils sont presque absents la journée, à cause de la convection thermique.

L'analyse du caractère stochastique des échos de pluie et des anaprops s'est traduite par une description de l'évolution des deux sortes d'échos par des processus autorégressifs. Compte tenu des tests d'adéquation, nous avons alors trouvé que, pour la région de Bordeaux, les anaprops peuvent être représentés par un processus AR-4 et les échos de précipitations par un processus AR-1. Dans cette étude, les coefficients caractérisant les modèles AR-1 et AR-4 pourraient être utilisés pour identifier les images contaminées par les échos parasites dans des banques de données radar. Il convient cependant de mentionner, qu'en réalité, nous avons considéré les échos fixes du sol et les anaprops. Ceci implique donc que le processus AR-4 que nous avons trouvé est représentatif des anaprops auxquels viennent s'ajouter les échos fixes du sol.

Afin de généraliser les résultats, nous procéderons prochainement à l'étude des images radar obtenues sur les sites de Setif (Algérie), d'Annaba (Algérie) et de Dakar (Sénégal). Toutes ces suggestions impliquent naturellement une étude climato-statistique des phénomènes mis en jeu. De même, il serait intéressant d'étudier les deux types d'échos à l'échelle de l'image et de considérer le paramètre facteur de réflexivité radar. En outre, nous envisageons de voir si d'autres approches, tels les modèles autorégressifs à moyenne mobile, donnent une meilleure représentation de ces deux types d'échos.

Références

Bean, B.R. and Dutton, E.J. (1968) Radio meteorology. Dover Publications, Washington, 453 p.

Boithias, L. (1984) Propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement terrestre. Édition Dunod, Paris, 290 p.

Bosq, D. et Lecoutre, J.P. (1992) Analyse et Prévision des Séries Chronologiques. Édition Chiron, Paris, 425 p.

Box, G.E.P. and Jenkins, G.M. (1976) Time series analysis, forecasting and control. Springer-Verlag, San Francisco, 592 p.

Brockwell, P.J. and Davis, R.A. (1996) Introduction to time series and forecasting. Springer-Verlag, New York, 525 p.

Doviak, R.J and Zrnic, D.S. (1993) Doppler Radar and Weather Observations. Academic Press, San Diego, Californie, 562 p.

Fuller, W.A. (1995) Introduction to statistical time series. John Wiley, New York, 700 p.

Giuli, D., Gharardelli, M., Freni, A., Seliga, T.A. and Aydin, K. (1991) Rainfall and clutter discrimination by means of dual-linear polarisation radar measurements. Journal of Atmospheric and Oceanic of Technology, vol. 8, p. 777-789.

Grecu, M. and_ Krajewski, W.F. (2000) An efficient Methodology for Detection of Anomalous Propagation Echoes in Radar Reflectivity Data Using Neural Networks. Journal of Atmospheric Oceanic and Technology, vol. 17, p. 121-129.

Haddad, B., Adane, A., Mesnard, F. and Sauvageot, H. (2000) Modelling anomalous propagation using first-two-states Markov Chains. Atmospheric Research, vol. 52, p. 283-292.

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

Moszkowicz, S., Ciach, G.J. and Krajewski, W.F. (1994) Statistical detection of anomalous Propagation in radar reflectivity patterns. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 11, p. 1026-1034.

Nzeukou, A. and Sauvageot, H. (2002) Distribution of rainfall parameters near the coast of France and Senegal. Journal of Applied Meteorology, vol. 41, p. 69-82.

Ott, R.H. (1997) A line of sight propagation model for calculating atmospheric terrain multipath and clutter at microwave frequencies. Radio Science, vol. 32, p. 369-386.

Pamment, J.A. and Conway, B.J. (1998) Objective identification of echoes due to anomalous propagation in weather radar data. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 15, p. 98-113.

Ryzhkov, A.V. and Zrnic, D.S. (1998) Polarimetric rainfall estimation in the presence of anomalous propagation. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 15, p. 1320-1330.

Sachidananda, M. and Zrnic, D.S. (2003) An improved clutter filtering and spectral moment estimation algorithm for staggered PRT sequences. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 19, p. 2009-2019.

Sauvageot, H. (1992) Radar Meteorology. Artech House, Boston, 366 p.

Skolnik, M.I. (1990) Radar Handbook. Publisher McGraw Hill Professional, New York, 1 200 p.

Steiner, M. and Smith J.A (2002) Use of three dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of non precipitation echoes in radar data. Journal of_Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 19, p. 673-686.

Stern, R.D. and Coe, R. (1984) A model fitting analysis of daily rainfall data. Journal of the Royal Statistical Society, vol. 14, p. 1-34.

Stull, R.B. (1988) An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers, Boston, 666 p.