

UTILISATION DES ANALYSES CORRÉLATOIRE ET SPECTRALE POUR INFÉRER SUR LA STRUCTURE ET LE COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE DES AQUIFÈRES DE L'ATLAS SAHARIEN

Mohamed CHETTIH* et Mohamed MESBAH**

RESUME

Les principaux aquifères de l'Atlas saharien central correspondent généralement à des formations gréseuses fissurées et faillées. L'intérêt que nous portons à ces systèmes est de chercher à déterminer leurs fonctionnements et leurs réserves. La méthodologie employée sur l'Atlas saharien qui nous a servi d'exemple et de support, s'articule essentiellement sur celle appliquée aux systèmes karstiques. Les analyses corrélatoire et spectrale ont permis d'analyser la structure des séries chronologiques de pluie et de débit du système de Seklafa à partir du corrélogramme et du spectre de densité de variance. L'analyse croisée exprimée par le corrélogramme croisé et la fonction amplitude indique que l'exemple traité présente une réponse impulsionnelle caractéristique d'un comportement de système évolué et bien drainé. En définitive, ces aquifères ont un faible pouvoir régulateur et une faible capacité à emmagasiner les réserves.

Mots clés - Analyses corrélatoire et spectrale - Atlas saharien - Seklafa - Aquifère hétérogène - Fonctionnement - Réserves.

USE OF THE CORRELATION AND SPECTRAL ANALYSIS TO INFER THE STRUCTURE AND THE HYDRODYNAMIC BEHAVIOUR OF THE SAHARIAN ATLAS AQUIFERS

ABSTRACT

The principal aquifers of the Central Saharian Atlas generally correspond to fissured and faulted formations. Our interest for these systems is to determine their functioning and their reserves. The methodology employed on the Saharian Atlas which was used to us as example and support, is articulated primarily on that applied to the karstic systems. The correlation and spectral analysis made it possible to analyze the structure of the chronological series of rainfall and discharge of Seklafa system starting from the correlogram and the spectrum of density of variance. The cross analysis expressed by the cross correlogram and the amplitude function indicates that the treated example presents an impulse response which characterizes a behaviour of advanced system and well drained. As a conclusion, these aquifers have a weak regulating ability and a low capacity to store reserves.

Key words - Correlation and spectral analysis - Saharian Atlas - Seklafa - Heterogeneous aquifer - Functioning - Reserves.

*Laboratoire de Génie Civil, Université Amar Telidji B.P. 37 G 03000-Laghouat, Algérie. E-mail : m.chettih@mail.lagh-univ.dz

**FSTGAT, Université des Sciences et Technologie Houari Boumédiène, B.P. 32, Bab Ezzouar, Alger, Algérie.
- Manuscrit déposé le 01 Juin 2005, accepté après révision le 12 Février 2006.

I - INTRODUCTION

Jusqu'à une date récente, les aquifères de l'Atlas saharien ont été négligés, et l'intérêt porté à ces aquifères se limite à de simples mesures de débit et quelques analyses physico-chimiques, sans chercher à déterminer leur fonctionnement et leurs réserves. Cette chaîne de montagne plus arrosée que le piémont sud saharien, est supposée être la principale zone d'alimentation des nappes profondes du Sahara. Les puissantes séries gréseuses du Jurassique moyen et supérieur et du Crétacé inférieur constituent les principaux aquifères de la chaîne atlasique. Ces formations présentent des systèmes aquifères hétérogènes complexes à multiple porosité, et où l'organisation fissurale induit souvent une spécificité de structure et de fonctionnement qui impose de remettre en cause l'utilisation des paramètres hydrodynamiques pour caractériser le milieu. Cependant, les séries chronologiques vont présenter avant tout des données fondamentales permettant de caractériser la structure et le fonctionnement de ce type d'aquifère et mettre en évidence les principales difficultés de la modélisation.

Cette étude vise à décrire la série chronologique, d'en identifier les composantes et de chercher à mettre celles-ci en relation avec les mécanismes de fonctionnement des systèmes hydrologiques. En général, l'étude d'un système hydrologique se traduit souvent par l'obtention de chroniques de données relatives à la pluie et aux débits. Dans le cas des analyses corrélatoire et spectrale, le système étudié est considéré comme une boîte noire regroupant l'aquifère et son environnement. On traite les chroniques séparément ou l'une par rapport à l'autre, d'abord dans le domaine temporel puis dans le domaine fréquentiel (Mangin 1981 et 1984).

Les résultats de ces analyses autorisent une classification des aquifères entre deux pôles évolutifs : un état initial correspondant à un aquifère mal drainé ayant des réserves impor-

tantes et un état final où la présence d'un réseau développé de fissures entraîne un drainage maximal des volumes capacitifs de l'aquifère, et donc de faibles réserves.

II - PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

II.1 - Caractéristiques hydrogéologiques du système de Seklafa

Les puissantes formations deltaïques et continentales: grès à dolomies de Kerakda, grès massifs de Seklafa, grès à chenaux de Taouiala et grès à dragées du Crétacé inférieur (Abed 1982, Herkat 1982) qui ont du combler progressivement le bassin atlasique au cours du Mésozoïque, en raison de l'arrivée d'apports détritiques du delta des Ksour (Aït-Ouali 1991), constituent les aquifères les plus importants de la chaîne à porosités multiples d'interstices, de fissures et de chenaux (fig. 1). Ces formations sont dotées d'une propriété-réservoir, car elles remplissent principalement vis-à-vis de l'eau une fonction capacitive d'une part, et une fonction conductrice d'autre part. La propriété-réservoir de ces formations est de nature initialement intrinsèque représentée par sa porosité d'interstice. Ces aquifères fortement fissurés possèdent également un potentiel hydraulique de fissuration amplifié par les différentes phases tectoniques post-éocènes. Cette porosité de fissure est mise en évidence par les pertes totales ou partielles de boue dans la zone noyée, que nous avons fréquemment constatées au cours de la réalisation de nombreux forages hydrauliques. La porosité de chenaux est également mise en évidence dans la zone noyée par la descente en chute libre de la garniture (1 à 2.5 m) au cours de la réalisation de forages dans les régions : d'El Haouita, d'Aïn Madhi, d'Aflou, de l'oued Mourra et de Sidi Makhlof. Les débits des forages captant les grès à dragées inférieurs du Barrémien-Valanginien dans ces régions, présentent une large fourchette, et varient de 15 à 45 l/s. Les transmissivités de

UTILISATION DES ANALYSES CORRÉLATOIRE ET SPECTRALE POUR INFÉRER SUR LA STRUCTURE
ET LE COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE DES AQUIFÈRES DE L'ATLAS SAHARIEN

	Age	Épaisseur (m)	Log. Lithologique	Formations	Comportement hydrogéologique		
T. C.	Quaternaire			Sables argilo-limoneux			
	Tertiaire	Variable		Croute calcaire	Perméables à peu perméables	Circulation d'interstices	
	Continental			Grès et argiles rouges			
CRETACE	Sénonien	200		Calcaires dolomitiques	Perméables "Karstifiés"	Circulation par fissures	
	Turonien	130		Haute muaille calcaire			
	Cénomanién	140		Marnes gypseuses	Imperméables	Substratum	
	Albien Sup.	100		Marno-calcaires			
	Albien Inf.	250		Grès à dragées supérieurs	Perméables	Circulation par interstices, fissures et chenaux	
	APTIEN			Basse intra-gypseuse			
	Barrémien - Valanginien	800		Grès à dragées inférieurs			
	JURASSIQUE	Portlandien	200		Calcaires oolithiques du Zerga	Imperméables	Substratum
				Marnes gypseuses			
Kimméridgien			200		Grès à chenaux de Taouiala	Perméables	Circulation par interstices, fissures et chenaux
					Calcaires en plaquettes		
			600		Calcaires massifs	Peu perméables	Circulation par fissures
					Marnes à gypses	Imperméables	
					Calcaires lumachelliques	Peu perméables	Circ. par fissures
			150		Grès et argiles rouges de Kourdane	Peu perméables	Circ. par interstices
		300		Grès massifs de Seldafa	Perméables	Circulation par interstices, fissures et chenaux	
		150		Zone intermédiaire	Peu à imperméables		
Oxfordien	800		Calcaires à polypiers d'El Azreg	Perméables	Circulation par interstices, fissures et chenaux		
			Grès de Kerakda				
Dogger		150		Zone de passage	Peu à imperméables	Substratum	
		400 à 500		Argiles silteuses d'El Aoudja			

Fig. 1 - Comportement hydrogéologique des formations mésozoïques de l'Atlas saharien central.

The hydrogeologic behavior of the mesozoic formations of the Central Saharian Atlas

ces aquifères varient en moyenne de 10^{-2} à 5.10^{-4} m²/s et la porosité est de l'ordre de 20 %.

Les aquifères dans le bassin de l'Oued M'zi sont drainés par un nombre important de sources qui jaillissent le plus souvent le long des accidents tectoniques et au niveau de certains contacts

stratigraphiques et alimentent régulièrement les cours d'eau montagnards (fig. 2).

Le bassin versant de l'Oued M'zi d'une superficie totale de 8895 Km² (fig. 3), fait partie des bassins endoréiques sahariens. Son réseau hydrographique bien organisé en amont est

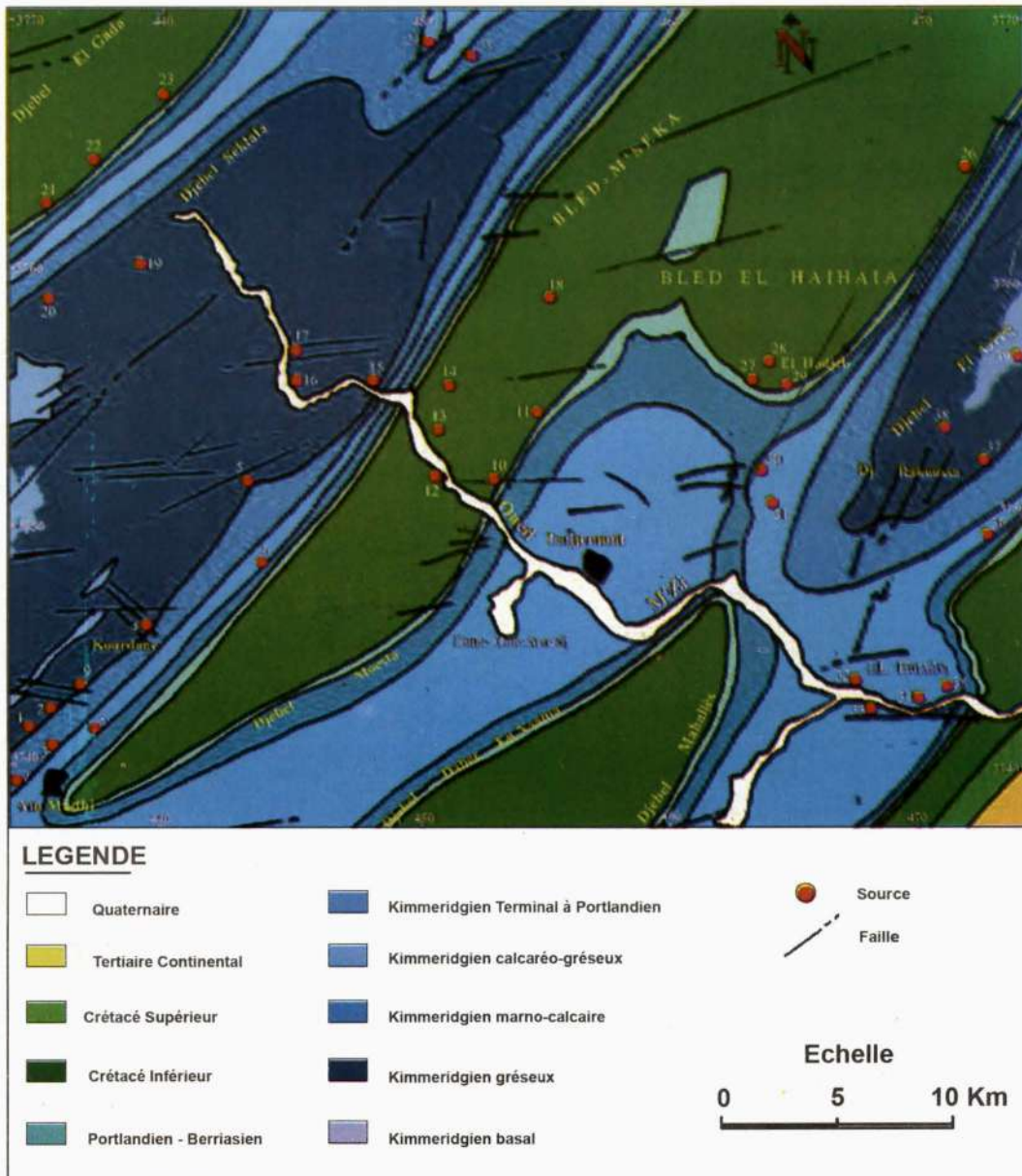


Fig. 2 - Carte de situation des principales sources dans le bassin du M'zi et leurs conditions d'émergence.
Chart of situation of the principal sources in the basin of M'zi and their conditions of emergence.

UTILISATION DES ANALYSES CORRÉLATOIRE ET SPECTRALE POUR INFÉRER SUR LA STRUCTURE ET LE COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE DES AQUIFÈRES DE L'ATLAS SAHARIEN

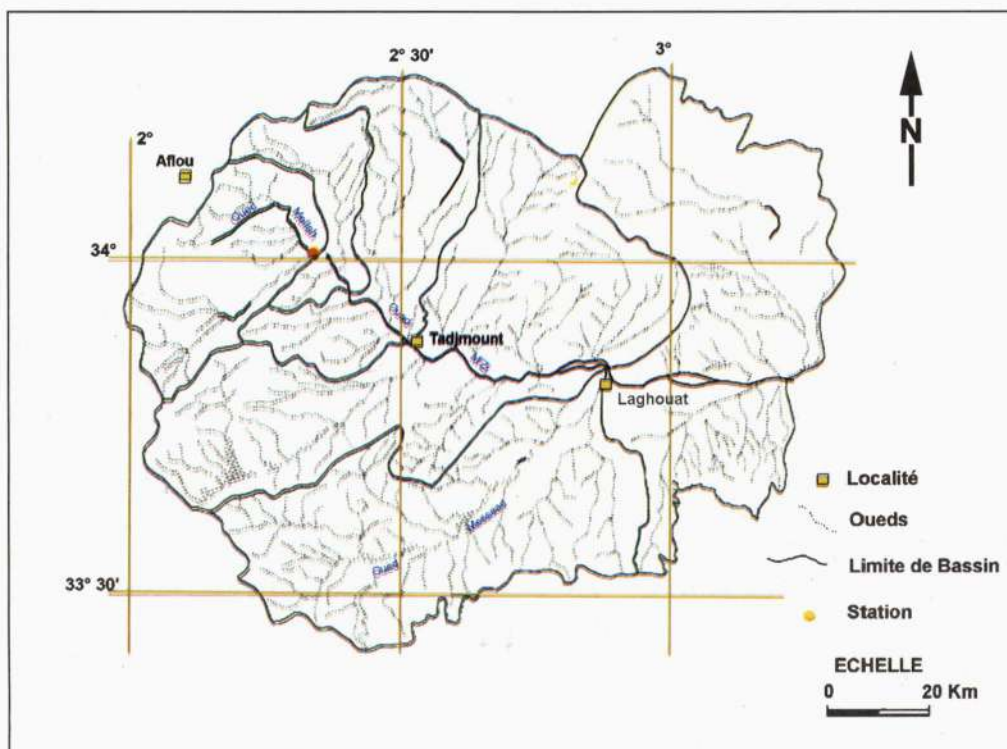


Fig. 3 - Bassin Versant du M'zi
The drainage basin of M'zi

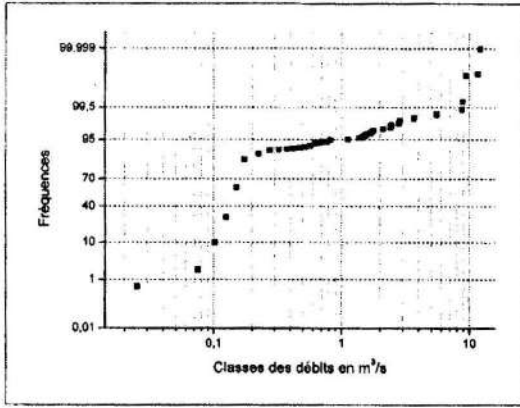
constitué principalement par l'Oued M'zi et l'Oued M'saad qui prennent leurs sources au cœur du Djebel Amour et qui confluent juste à l'exutoire d'El Fetha, et rejoignent à l'aval l'Oued Djedi qui se déverse dans Chott El Melhrir. En amont, les sources de l'Oued Seklafa drainent les grès à dragées du Barrémien du synclinal d'El Gada-Madna et Eddor et les grès massifs de Seklafa du Kimméridgien inférieur sur une superficie de 783 Km². Pour ce sous-bassin nous disposons des données de débits journaliers fournis par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Pour l'étude des débits, la station hydrométrique utilisée est celle de Seklafa, située à l'exutoire du sous-bassin, elle jauge l'ensemble des sources du système aquifère. En raison des importantes lacunes de mesure en 1981 et après 1985, la période d'étude est limitée à cinq cycles hydrologiques, du 01/09/1975 au 31/08/1980,

cette durée étant suffisamment longue pour les traitements employés.

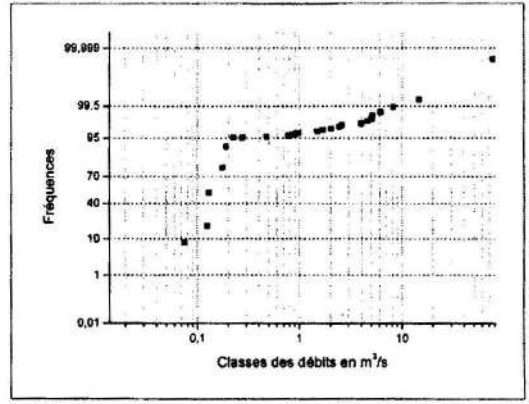
II.2 – Analyses préliminaires

Bien que d'utilisation délicate, les analyses préliminaires (débits classés et courbes de récession) ont apporté des renseignements non négligeables sur le fonctionnement des aquifères de l'Atlas saharien (Chettih et Mesbah, 2004).

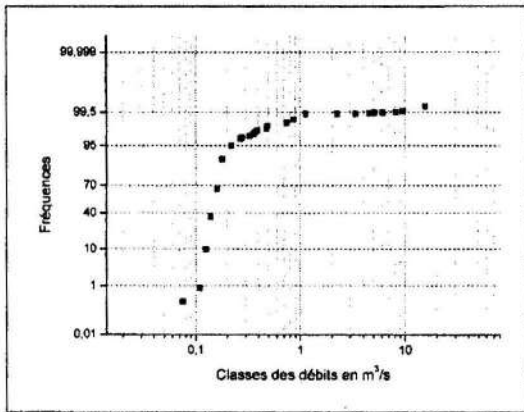
L'analyse des débits classés appliquée aux cinq cycles hydrologiques a été réalisée avec un intervalle de classe de 0.050 m³/s. L'analyse cycle par cycle pour le système de Seklafa a permis d'étudier certains mécanismes de détail. En utilisant une relation logarithmique, les courbes obtenues (fig. 4) montrent dans le domaine des forts pourcentages une courbe complexe



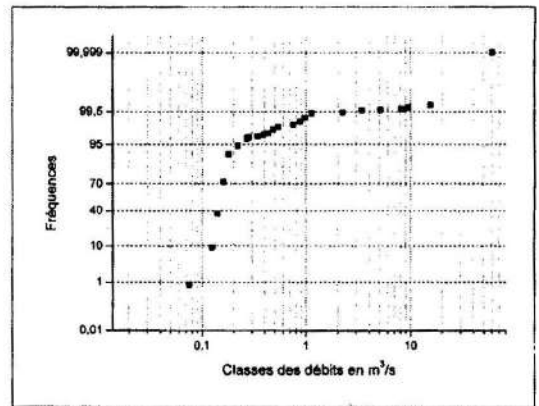
Cycle 75/76



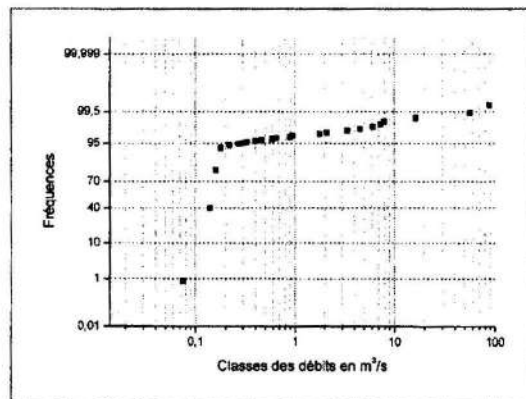
Cycle 76/77



Cycle 77/78



Cycle 78/79



Cycle 79/80

Fig. 4 - Seklafa, analyse des débits classés.

Seklafa, analyze classified discharges

UTILISATION DES ANALYSES CORRÉLATOIRE ET SPECTRALE POUR INFÉRER SUR LA STRUCTURE
ET LE COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE DES AQUIFÈRES DE L'ATLAS SAHARIEN

avec plusieurs ruptures de pente situées aux environs de $10.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $8.0 \text{ m}^3/\text{s}$ et $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, qui peuvent être attribuées au rôle de trop-plein à différents niveaux et entrant en activité à ces différents débits. Il s'agit là de la mise en fonctionnement d'un trop-plein en période des hautes eaux, l'impluvium fluctue et la fuite vers d'autres systèmes est à envisager. Cependant, cette anomalie est moins marquée pour les cycles déficitaires.

Deux anomalies affectent la droite représentative pour pratiquement tous les cycles étudiés, l'une pour les débits supérieurs à $0.180 \text{ m}^3/\text{s}$, et l'autre pour un débit de l'ordre de $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$. Entre ces deux anomalies la droite est la même, et les débits correspondent à des débits de décrue et de tarissement.

Pour le débit de $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ en décrue, une réserve est piégée pour les cycles excédentaires. Elle pourra être libérée en tarissement, mais pour les cycles déficitaires, ce stockage n'est pas tout à fait mis en évidence.

Les courbes obtenues s'ajustent également selon une droite représentative entre les débits $0.0180 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0.0075 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce phénomène peut être attribué à la longue phase du tarissement. Une décroissance moins rapide de la courbe

pour les débits inférieurs à $0.100 \text{ m}^3/\text{s}$ est observée correspondant à un stockage d'une réserve préexistante. Dans le cas présent, et pour les débits inférieurs à $0.0100 \text{ m}^3/\text{s}$, l'apport de réserve emmagasinée antérieurement détermine cette anomalie. Ce comportement doit probablement être attribué à un apport d'une réserve, traduisant ainsi le soutien à l'étiage du cours d'eau par des apports d'eau et probablement par la participation différée d'autres sous-systèmes annexes de l'aquifère. On peut envisager que l'impluvium réel est probablement plus étendu en basses eaux.

L'analyse des courbes de récession a été faite pour les crues de Mai 76, Octobre 76, Juin 78, Janvier 79, Novembre 80 et Octobre 84. Ces différentes crues ont été choisies de telle façon qu'elles représentent l'amplitude maximum de chaque cycle et suivies d'une période d'étiage. Parmi les courbes de récession retenues, quatre considérées comme de courte durée, ont une durée inférieure à 30 jours (*). Les deux autres s'étendent jusqu'à 110 jours. Le tableau I résume les principaux résultats.

Sur les récessions de courte durée, il est possible d'ajuster un tarissement pour des durées de décrue faible. Les paramètres d'ajustement déterminés sont assez homogènes (tableau II),

Tableau I - Paramètres obtenus à partir des courbes de récession.
(* Récession de courte durée.

Parameters obtained starting from the curves of recession.
(* *Recession of short duration.*

Récession	Coefficient de tarissement $\alpha \text{ (j}^{-1}\text{)}$	Coefficient d'infiltration $\eta \text{ (j}^{-1}\text{)}$	Coefficient d'hétérogénéité d'écoulement $e \text{ (j}^{-1}\text{)}$	Volume dynamique $V_d \text{ (10}^6 \text{ m}^3\text{)}$
* Crue du 10/05/76	0.01347	0.222	2.519	0.513 064
* Crue du 01/10/76	0.02497	0.200	2.691	0.553 412
Crue du 02/06/78	0.00471	0.250	1.131	3.298 619
Crue du 22/01/79	0.00435	0.100	3.106	3.567 136
* Crue du 16/11/80	0.03118	0.285	1.350	0.498 637
* Crue du 16/10/84	0.01150	0.222	2.185	0.685 527

Tableau II - Paramètres moyens et extrêmes obtenus à partir des courbes de récession de courte durée.

Average and extremes parameters obtained starting from the curves of recession of short duration.

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyen
Coefficient de tarissement α (j^{-1})	0.01150	0.03118	0.02028
Coefficient d'infiltration η (j^{-1})	0.200	0.285	0.232
Coefficient d'hétérogénéité d'écoulement ε (j^{-1})	1.350	2.691	2.186
Volume dynamique V_d (10^6 m ³)	0.498 637	0.685 527	0.562 660

les valeurs de volume dynamique varient de 0.49 à 0.68 mm³, ces faibles valeurs traduisent l'absence de réserves.

Un coefficient de tarissement moyen très élevé ($2.0 \cdot 10^{-2} j^{-1}$) et assez peu variable reproductible d'un cycle à un autre, un coefficient d'infiltration fort (0.232) et un coefficient d'hétérogénéité élevé (2.18) traduisent le caractère bien drainé de ce système.

Pour les récessions de longue durée, on s'aperçoit que le coefficient de tarissement est relativement faible ($4.5 \cdot 10^{-3} j^{-1}$) correspondant à une vidange lente du réservoir en régime non-influencé. Les coefficients d'hétérogénéité globalement élevés et les temps d'infiltration courts traduisent une importante organisation structurelle du sous-système d'infiltration.

A partir des valeurs moyennes des paramètres η , ε et V_d et pour un volume de transit annuel moyen de 13.908 331 mm³, le calcul des valeurs k et i de la classification de Mangin sont respectivement pour le premier et le deuxième cas :

- $k = 0.040$ et $i = 0.099$;
- $k = 0.246$ et $i = 0.124$.

Le report des valeurs « k » et « i » sur le diagramme de Mangin (fig. 5) permet de comparer le système de Seklafa aux systèmes de référence. Ces valeurs sont caractéristiques d'un système

bien développé, possédant un réseau de drainage organisé (classes 3 et 4) et dont la zone noyée présentant un comportement fonction de l'état du système. Ce comportement est typique des systèmes sahariens où la répartition des précipitations dans le temps est très hétérogène et discontinue, ce qui entraîne de grandes variations de l'état du système et de sa réponse aux précipitations. Les analyses corrélatoire et spectrale vont nous permettre d'apprécier le pouvoir régulateur du système atlasique saharien ainsi que la durée de sa réponse impulsionnelle.

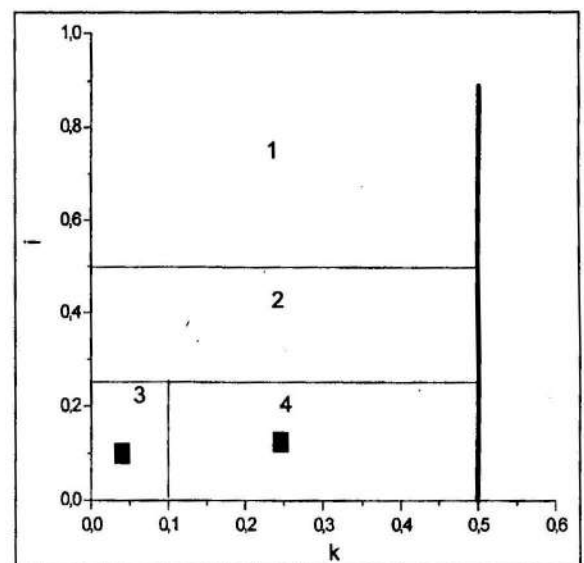


Fig. 5 - Système de Seklafa, position dans la classification de Mangin.

System of Seklafa, position in the classification of Mangin.

III – PRINCIPE DE LA METHODE

En général, l'étude d'un système hydrologique se traduit souvent par l'obtention de chroniques de données relatives à la pluie et aux débits. Dans le cas des analyses corrélatoire et spectrale, le système étudié est considéré comme une boîte noire regroupant l'aquifère et son environnement. On traite les chroniques séparément ou l'une par rapport à l'autre, d'abord dans le domaine temporel puis dans le domaine fréquentiel (Mangin, 1984). L'analyse est fondée sur l'emploi du corrélogramme, déterminé par les différents coefficients d'autocorrélation et sur celui du spectre de densité de variance, correspondant à la transformée de Fourier du corrélogramme (Box et Jenkins, 1976).

Cependant, on sait que préalablement à toute analyse de série chronologique, il faut vérifier si cette série est stationnaire, c'est-à-dire si ses propriétés statistiques sont indépendantes du temps (Froidevaux et Krummenacher, 1976). Il est bien sûr possible de déssaisonnaliser et de stationnariser les chroniques, mais cela se fait au détriment d'une partie de l'information qui, dès lors, est perdue. Par ailleurs, ce comportement saisonnier permet très souvent de caractériser la structure du système hydrologique (Mangin, 1984). Dans cette méthode, puisque l'on n'introduit aucun caractère inférentiel, il n'est pas obligatoire de tenir compte de la condition de stationnarité (Brillinger, 1975). La méthode peut être simple ou croisée mais nécessite dans tous les cas un nombre conséquent de données pour être validée.

III.1 - Analyse simple

L'analyse corrélatoire repose sur la fonction d'autocorrélation. Au départ, on dispose d'une série temporelle de N observations x_i (x_1, x_2, \dots, x_N). On calcule les coefficients d'autocorrélation r_k ($k = 0, \dots, m$). Le choix de la variable m n'est pas fondé sur des concepts

théoriques; il est souvent conseillé (Box et Jenkins, 1976) de prendre $m = N/3$ ou $m = N/2$ ou utiliser d'autres valeurs de m , par exemple $m = 2N/3$.

Le calcul de r_k utilise la formulation: $r_k = \frac{C_x(k)}{C_x(0)}$

avec

$$C_x(0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (1.0)$$

où \bar{x} est la moyenne des observations, et

$$C_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x}) \quad (2.0)$$

On dresse le corrélogramme en établissant le graphe de la fonction r_k .

Le théorème de Wiener-Kinchine montre que la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation d'une fonction aléatoire stationnaire correspond à la densité spectrale énergétique de cette fonction (Max, 1980). Cette densité spectrale n'est autre que la répartition des variances suivant les fréquences (Ventsel, 1973).

Une approche non biaisée de la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation (Padilla et Pulido-Bosch, 1995) est fournie par:

$$\Gamma_x(f) = \frac{1}{2} \left[1 + \sum_{k=1}^m D_k r_k \cos(2\pi f K) \right] \quad (3.0)$$

où f est la fréquence considérée (si le pas choisi est j , $f = j/2.m$); r_k est le coefficient d'autocorrélation; D_k est une fonction de pondération choisie de manière à ce que la valeur estimée du spectre $\Gamma_x(f)$ ne soit pas biaisée; le filtre de Tukey est utilisé, et dans ce cas :

$$D_k = \frac{1 + \cos(\pi k / m)}{2} \quad (4.0)$$

L'analyse spectrale exprime dans le domaine fréquentiel ce dont le corrélogramme rend compte dans le domaine temporel.

III.2 - Analyse croisée

Dans le cas d'une analyse croisée (Padilla et Pulido-Bosch, 1995), lorsqu'on dispose de deux séries temporelles de N observations $x_t (X_1, X_2, \dots, X_N)$ et $y_t (Y_1, Y_2, \dots, Y_N)$, la fonction d'intercorrélation n'est pas symétrique quand $r_{+k} \neq r_{-k}$. Les expressions auront les formes suivantes:

$$r_{+k} = r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sqrt{C_x^2(0)C_y^2(0)}} \quad (6)$$

$$r_{-k} = r_{yx}(k) = \frac{C_{yx}(k)}{\sqrt{C_x^2(0)C_y^2(0)}} \quad (7)$$

où

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad (8)$$

$$C_{yx}(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} (y_t - \bar{y})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad (9)$$

$$C_x(0) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2 \quad (10)$$

$$C_y(0) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \bar{y})^2 \quad (11)$$

où \bar{x} et \bar{y} sont les moyennes respectives des séries d'observations x_t et y_t . La fonction d'intercorrélation représente la réponse impulsionnelle du système. L'asymétrie de la fonction d'intercorrélation rend nécessaire d'exprimer la fonction de densité spectrale

avec un nombre complexe :

$$\Gamma_{xy}(f) = |\alpha_{xy}(f)| \exp[-i\phi_{xy}(f)] \quad (12)$$

dans laquelle i représente $\sqrt{-1}$, $\alpha_{xy}(f)$ et $\phi_{xy}(f)$ sont respectivement les fonctions amplitude et phase à la fréquence f , données par les expressions suivantes :

$$\alpha_{xy}(f) = \sqrt{\Psi_{xy}^2(f) + \Lambda_{xy}^2(f)} \quad (13)$$

$$\phi_{xy}(f) = \arctan \frac{\Lambda_{xy}(f)}{\Psi_{xy}(f)} \quad (14)$$

où $\Psi_{xy}(f)$ est le co-spectre, et $\Lambda_{xy}(f)$ est le spectre quadratique donnés par les expressions suivantes :

$$\Psi_{xy}(f) = 2 \left\{ r_{xy}(0) + \sum_{k=1}^m [r_{xy}(k) + r_{yx}(k)] D_k \cos(2\pi f k) \right\} \quad (15)$$

$$\Lambda_{xy}(f) = 2 \left\{ \sum_{k=1}^m [r_{xy}(k) - r_{yx}(k)] D_k \sin(2\pi f k) \right\} \quad (16)$$

Du point de vue de son application pratique à l'étude des séries hydrologiques, la fonction amplitude croisée $\alpha_{xy}(f)$ peut être associée à la durée de la fonction réponse impulsionnelle et indique le filtrage des composantes périodiques des données de précipitations.

Ceci caractérise l'effet de modulation de l'aquifère à court, moyen et long terme. La fonction d'amplitude croisée permet également d'affiner le choix de la fréquence de coupure.

La fonction de phase $\phi_{xy}(f)$, montre le déphasage pour les différentes fréquences entre les pluies et les débits, sa gamme de variation est de 2π , généralement entre $-\pi$ et $+\pi$. Le déphasage représentatif de la relation pluie-débit doit être calculé pour le centre de gravité de la réponse impulsionnelle, mais celui-ci est difficile à déterminer. Aussi, le déphasage entrée-sortie est-il calculé pour la fréquence de coupure.

On peut également définir à partir de la fonction amplitude croisée et de la densité spectrale, de nouvelles fonctions, telles que la fonction de cohérence $k_{xy}(f)$ et la fonction de gain $G_{xy}(f)$ par les relations suivantes :

$$k_{xy}(f) = \frac{\alpha_{xy}(f)}{\sqrt{\Gamma_x(f)\Gamma_y(f)}} \quad (17)$$

$$G_{xy}(f) = \frac{\alpha_{xy}(f)}{\sqrt{\Gamma_x(f)}} \quad (18)$$

La fonction de cohérence caractérise la linéarité et la stationnarité des systèmes. La linéarité est à mettre principalement en relation avec le drainage de l'aquifère. La stationnarité s'exprime sur la fonction de cohérence, par des variations en fonction de la fréquence.

La fonction de gain permet de quantifier, fréquence par fréquence, le filtrage introduit par le système, en règle générale, on observe une atténuation des hautes fréquences au profit des basses fréquences.

IV - APPLICATIONS DES ANALYSES CORRÉLATOIRE ET SPECTRALE

Les analyses corrélatrice et spectrale ont été réalisées à l'aide du logiciel Stochastos 3.2 développé au laboratoire souterrain de Moulis. Pour la chronique des pluies journalières, l'analyse a été seulement réalisée à court terme avec un pas d'un jour et une troncature de 125 jours. Dans un premier temps, l'analyse des chroniques de débits a été limitée au pas de 125 jours, afin de mettre en évidence l'évolution des débits à court et moyen terme, elle a été étendue ensuite à 900 jours pour examiner le comportement pluriannuel du système.

IV.1 - Analyse simple du signal d'entrée

Une analyse simple a porté sur une chronique issue de la station d'Aflou, elle couvre cinq cycles hydrologiques du 01/09/75 au 31/08/80. Sur cette

période d'étude, l'analyse globale présente un corrélogramme (fig. 6), qui décroît très rapidement, il indique des événements indépendants les uns des autres, après cette décroissance rapide, les valeurs oscillent ensuite autour de $r_k = 0$. La pluie apparaît donc comme aléatoire sans composante saisonnière marquée, comme le confirme le spectre de densité de variance (fig. 7). Toutefois, le spectre montre la présence de quelques pics proches du bruit de fond.

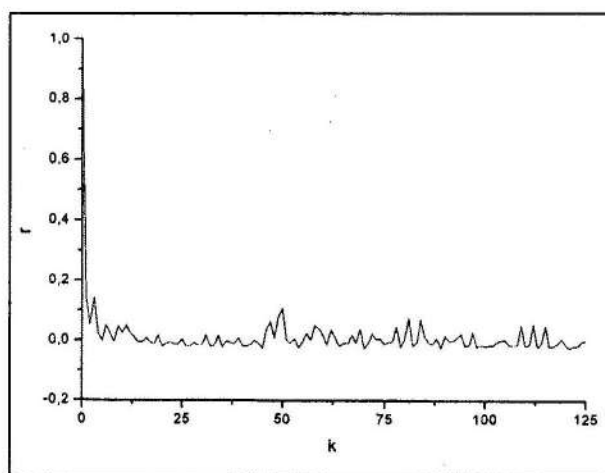


fig. 6 - Corrélogramme simple des pluies.
Simple correlogramme of the rainfalls.

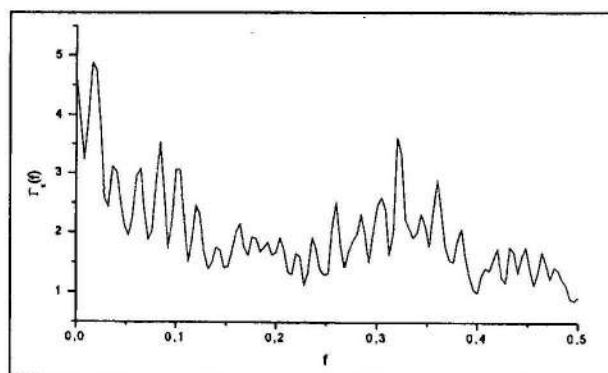


fig. 7 - Spectre simple des pluies
Simple spectrum of the rainfalls.

IV.2 - Analyse simple du signal de sortie

L'analyse globale à court terme a permis d'avoir un corrélogramme (fig. 8) qui présente une décroissance rapide de la valeur de r_k , avec un effet mémoire inférieur à deux jours ($r_k = 0.2$). Cet effet mémoire très faible, traduit l'indépendance dans le temps des événements affectant la chronique des débits. Cette forte vitesse de décroissance est directement liée à l'inertie du système. L'effet mémoire montre également le faible filtrage introduit par le système et traduit l'existence de réserves limitées. Le corrélogramme présente également quelques structures périodiques à court terme.

Ces résultats sont également mis en évidence par le spectre de densité de variance (fig. 9) qui montre un faible effet filtre du système. La fréquence de coupure pour le système de Seklafa est de l'ordre de 0.4, soit l'équivalent de 2.5 jours. Le spectre permet, en outre, de déterminer le temps de régulation qui définit la durée d'influence du signal d'entrée. Ce temps est de 1.5 jour pour le système étudié. L'ensemble de ces paramètres est représentatif d'un comportement très actif du système et d'une forte sensibilité aux conditions externes.

Le corrélogramme à long terme (fig. 10) décroît très rapidement et oscille autour de la valeur $r_k = 0$. Le spectre met en évidence l'absence de structure à long terme (fig. 11). La faible valeur du spectre à l'origine montre qu'il n'y a pas de régulation pluri-annuelle, c'est-à-dire que les réserves accumulées au court d'un cycle hydrologique ne bénéficient pas au cycle suivant.

Ces analyses simples à court et à long terme ont permis de mettre en évidence le haut niveau de drainage de ce système et sa classification dans la catégorie des systèmes rapides sans réserves.

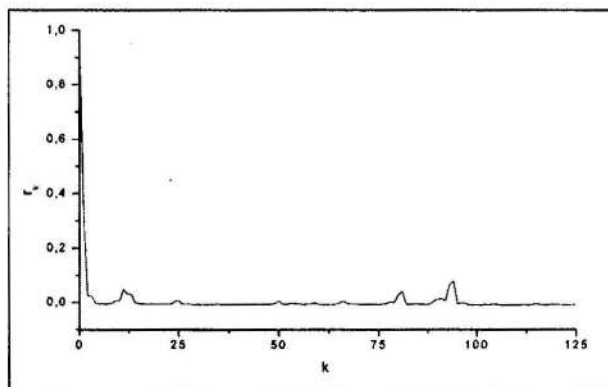


Fig. 8 - Correlogramme simple à court terme des débits.
Simple correlogram in the short run of the discharges.

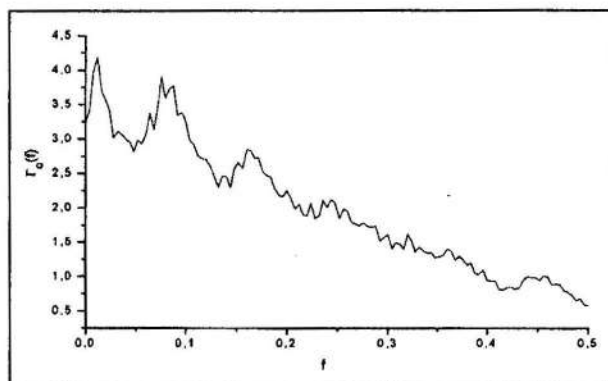


Fig. 9 - Spectre simple à court terme des débits.
Simple spectrum in the short run of the discharges.

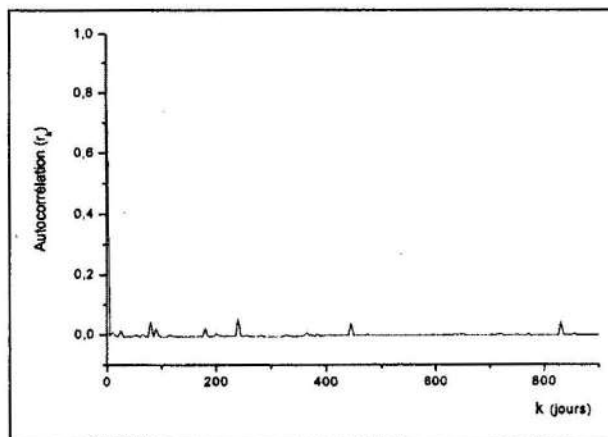


Fig. 10 - Correlogramme à long terme des débits.
Long-term correlogram of the discharges.

UTILISATION DES ANALYSES CORRÉLATOIRE ET SPECTRALE POUR INFÉRER SUR LA STRUCTURE
ET LE COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE DES AQUIFÈRES DE L'ATLAS SAHARIEN

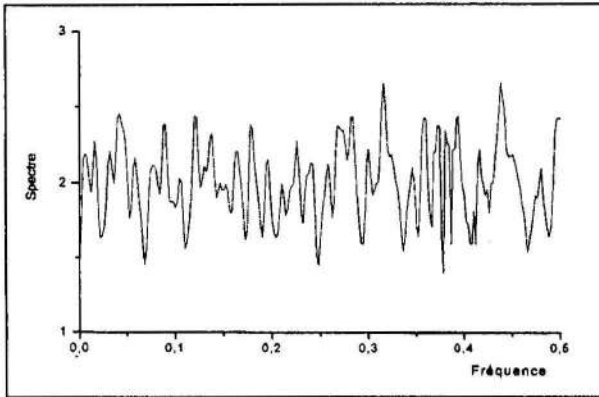


Fig. 11 - Spectre à long terme des débits.
Long-term spectrum of the discharges.

IV.3 - Analyse croisée

L'analyse croisée a été réalisée pour le système de Seklafa dont les débits ont été mesurés à l'exutoire, pour les précipitations nous avons pris celles de la station d'Aflou du fait de sa proximité géographique. Des tests de vraisemblance ont été réalisés sur la concordance des fichiers d'entrée et de sortie (dates et nombre de valeurs), sur la présence de lacunes ainsi que sur la concordance de la troncature.

Le corrélogramme croisé est constitué d'une réponse bien individualisée (fig. 12). Il est très légèrement altéré par un bruit de fond. La montée rapide du corrélogramme est significative d'un comportement en charge et d'une fonction transmissive marquant un drainage bien développé. La décroissance rapide représente l'effet actif du système et le faible effet capacitif de l'aquifère. La réponse impulsionnelle fournie par le corrélogramme possède un pic caractéristique d'un comportement de système évolué et bien drainé.

La fonction amplitude croisée (fig. 13), montre que la relation s'établit très légèrement pour les basses fréquences. Cependant, les phénomènes de moyenne et haute fréquence ne

sont pas totalement filtrés. Il existe probablement une certaine variabilité liée aux phénomènes à plus court terme. Le déphasage calculé pour la fréquence de coupure est inférieur à la journée (fig. 14), ce qui signifie que la montée de crue s'effectue sur des durées très courtes.

Les valeurs de cohérence sont très variables et oscillent entre 0.078 et 0.710 avec une moyenne de 0.430. La fonction cohérence (fig. 15), montre une mauvaise linéarité de la relation pluie-débit.

Le système de Seklafa a un faible pouvoir régulateur. La répartition des précipitations dans le temps est très hétérogène, les phases de stockage et de déstockage entraînent de grandes variations de l'état du système et de sa réponse aux précipitations. La fonction de gain qui traduit la manière suivant laquelle la pluie est mise en réserve, montre une mauvaise atténuation pour les hautes fréquences (fig. 16), cette atténuation de la pluie pourrait correspondre à une mise en réserve lors des crues (effet à court terme). L'amplification des basses fréquences n'est pas mise en évidence, ce qui indique probablement la faible capacité de l'aquifère à emmagasiner les réserves et une indication sur le déstockage à long terme du réservoir.

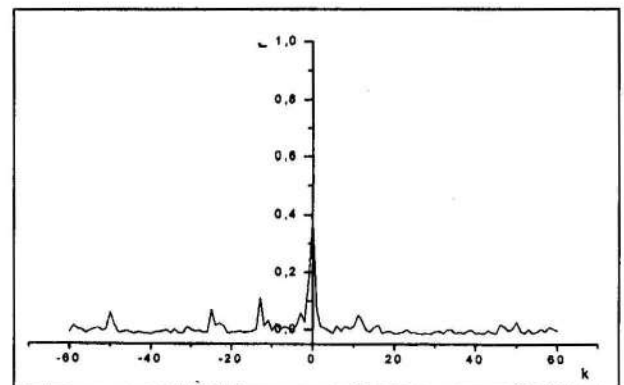


Fig. 12 - Corrélogramme croisé (pluie et débit).
Cross correlogram (rainfall and discharge).

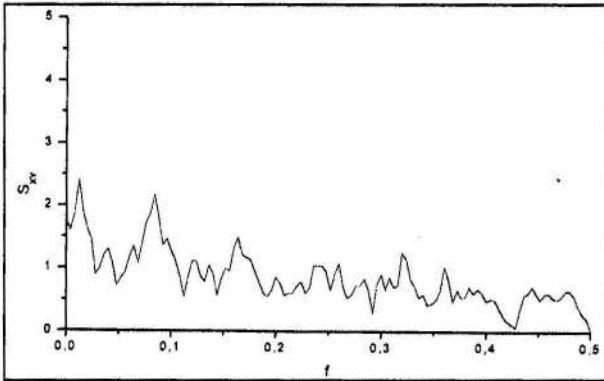


Fig. 13 - Fonction amplitude croisée
Cross amplitude function.

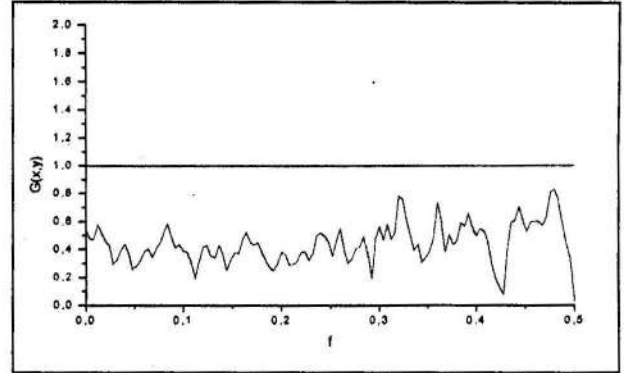


Fig. 16 - Fonction de gain.
Gain function.

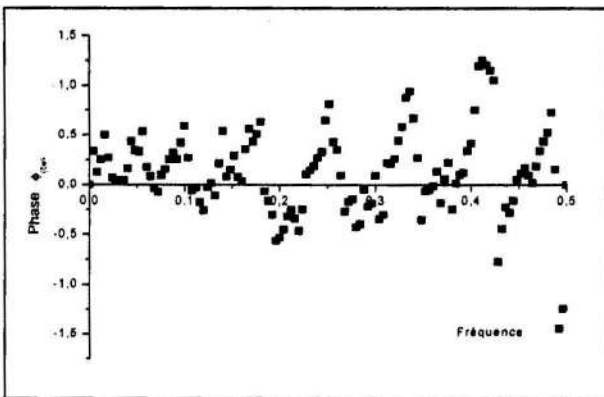


Fig. 14 - Fonction de phase.
Function of phase.

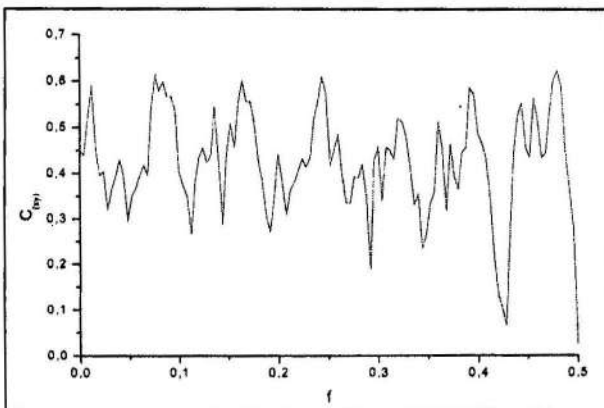


Fig. 15 - Fonction de cohérence.
Function of coherence.

V - CONCLUSION

Les analyses préliminaires ont permis de mettre en évidence des apports en période des hautes eaux et un fonctionnement complexe du système. Les paramètres de structure laissent imaginer une vidange lente à faible débit du réservoir lors de la phase de tarissement et une importante organisation structurale du sous-système d'infiltration matérialisée par une décrue très rapide.

Les analyses corrélatrice et spectrale, montrent un système à très faible mémoire traduisant la présence de très faibles réserves. La réponse impulsionnelle du système relative à la période 1975-1980 est d'une durée inférieure à un jour, cette réponse très rapide peut être attribuée principalement à la structure très développée de l'aquifère et à son degré d'organisation dont la transmissivité est moyennement élevée. Le comportement du système étudié montre une forte dépendance des réserves de l'aquifère vis-à-vis des précipitations dont la répartition dans le temps est très hétérogène et discontinue.

La fonction de cohérence indique une non-linéarité de la relation pluie-débit et limite ainsi l'application des modèles de convolution linéaires dans l'étude de la relation pluie-débit des systèmes atlasiques sahariens. Compte tenu de

UTILISATION DES ANALYSES CORRÉLATOIRE ET SPECTRALE POUR INFÉRER SUR LA STRUCTURE
ET LE COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE DES AQUIFÈRES DE L'ATLAS SAHARIEN

la nature non-linéaire et non-stationnaire de ces signaux hydrologiques, l'analyse en ondelettes pourra probablement palier aux inconvénients des analyses corrélatoire et spectrale.

BIBLIOGRAPHIE

- ABED, S., 1982.** Lithostratigraphie et sédimentologie du Jurassique moyen et supérieur du Djebel Amour (Atlas Saharien Central – Algérie). *Thèse de 3^{ième} cycle, Univ. de Pau, France.* 242 p.
- AIT OUALI, R., 1991.** Le rifting des monts des Ksour au Lias. Organisation du bassin diagenèse des assises carbonatées. Place dans les ouvertures Mésozoïques au Maghreb. *Thèse d'état, IST - U.S.T.H.B. Alger.* 302 p.
- BOX, G. ET JENKINS, G., 1976.** Time Series Analysis: Forecasting and Control, Holden-Day, San Francisco, 575 p.
- BRILLINGER, D.R., 1975.** Time Series Data Analysis and Theory. *International Series in Decision Processes, Holt, Rinehart and Winston, New-York, N-Y.,* 500 p.
- CHETTIH, M. ET MESBAH, M., 2004.** Approche du fonctionnement d'un système aquifère hétérogène de l'Atlas Saharien. *3^{ième} Séminaire National sur les Ressources en Eau, le 4 et 5 Mai 2004, Centre Universitaire de Mascara, Algérie.*
- FROIDEVAUX, R. ET KRUMMENACHER, R., 1976.** Analyse spectrale des précipitations et débits mensuels dans un bassin karstique du Jura français. *Journal of Hydrology, 29,* 293-313.
- HERKAT, M., 1982.** Lithostratigraphie et sédimentologie des formations carbonatées du Jurassique supérieur des Monts des Ouled Nail et de la terminaison orientale du Djebel Amour (Algérie). *Thèse de 3^{ième} cycle, Univ. de Pau, France.* 287 p.
- MANGIN, A., 1981.** Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. *C. R. Acad. Sc. Paris, t.293. Série II,* 401-404.
- MANGIN, A., 1984.** Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology, 67,* 25-45.
- MAX, J., 1980.** Méthodes et Techniques de Traitement du Signal et Applications aux mesures physiques. (2 t), *Masson, Paris,* 457 p.
- PADILLA, A. AND PULIDO-BOSCH, A., 1995.** Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *Journal of Hydrology, 168,* 73-89.
- VENTSEL, H., 1973.** La théorie des probabilités. *Edition Mir, Moscou,* 563 p.