

MODELE HYBRIDE NEURO-MULTIRESOLUTION POUR LA PREVISION DES DEBITS (Applications aux bassins sahariens)

Mohamed CHETTIH*, **Mohamed MESBAH****

* Laboratoire de recherche en Génie Civil, Université de Laghouat, B.P 37. G 03000, Laghouat, Algérie.

** Département de géologie, F.S.T. G.A.T, U.S.T.H.B., B.P. 32 El Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie.

Tél : 00 213 73 44 72 74

Fax : 00 213 29 90 20 16

Mode de présentation : **Oral**

1. Disponibilité, Usage et Gestion de l'Eau (**Sessions régionales**)

Résumé :

Cette étude consiste en une analyse du fonctionnement des bassins hydrologiques sahariens et à la maîtrise des phénomènes hydrologiques extrêmes dans un milieu saharien.

Dans une première partie, la non-stationnarité des signaux pluies et débits est mise en évidence par l'introduction de l'analyse en ondelettes. Les spectres à petites échelles, des précipitations et des débits, en ondelettes de Morlet, ont permis de mettre en évidence des processus à hautes fréquences présentant une forte variabilité temporelle moins visible pour les débits. Cependant, l'influence des crues s'étend profondément sur la gamme des échelles.

A grande échelle, les spectres révèlent la présence de certains processus bien localisés en temps, correspondant à des processus multi-annuels. Par conséquent, il apparaît clairement que les processus débits sont des processus non-stationnaires dont la distribution varie temporellement à toutes les échelles.

Les analyses multirésolution en ondelettes de Daubechies ont montré une répartition non uniforme dans le temps est à travers les échelles à court et à moyen terme. Certains niveaux ont permis de mettre également en évidence des processus multi-annuels. Les systèmes aquifères sahariens sont donc très peu sensible aux fluctuations des précipitations pour les courtes périodes, mais, les phénomènes pluri-annuels les influencent fortement.

Dans une deuxième partie, ce travail a consisté à élaborer une nouvelle méthodologie pour la simulation des événements extrêmes en s'appuyant sur les résultats de cette première analyse.

La complexité des régimes hydrodynamiques des bassins sahariens requiert à recourir à des outils spécifiques des systèmes dynamiques non-linéaires. Ainsi, un modèle neuro-multirésolution pour la prévision des débits est proposé et utilisé en identification et simulation.

Les séries temporelles de pluie et débit sont décomposées en ondelettes de Daubechies en deux sous-séries décrivant les processus pluie-débit à courte et à longue période.

Les résultats obtenus sont encourageants et révèlent que pour les courtes périodes les simulations permettent de mieux restituer les crues, alors que pour les longues périodes une meilleure simulation des étiages a été constatée par comparaison à d'autres modèles.

I) - INTRODUCTION :

Les formations gréseuses mésozoïques représentant les aquifères les plus importants de l'Atlas Saharien constituent des systèmes aquifères hétérogènes complexes à porosité multiple, induisant souvent une spécificité de structure et de fonctionnement.

Les analyses préliminaires (débits classés, courbes de récession) ont montré que les systèmes atlasiques possèdent des réseaux de drainage très développés, avec cependant une zone noyée à faible volume dynamique. Les paramètres d'ajustement déterminés sur les récessions traduisent, en général le caractère bien drainé pour les différents systèmes ainsi que l'importante organisation structurale des aquifères. La classification des systèmes étudiés dans le diagramme de Mangin les caractérise comme des systèmes évolués, donc de faibles réserves.

Les analyses corrélatoire et spectrale ont montré que les systèmes atlasiques ont une très faible mémoire. Leur réponse impulsionnelle très rapide étant principalement attribuée à la structure très développée de l'aquifère et à son degré d'organisation. Le comportement hydrodynamique du système, 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.

L'analyse du bruit a permis de montrer que le signal de sortie est non-gaussien, sa variance est également caractérisée par une forte variabilité des moments dès l'ordre 2. La fonction cohérence du système indique des non-linéarités fortes. Le système atlasique est donc non-stationnaire et non-linéaire.

La complexité des régimes hydrodynamiques de ces aquifères fortement hétérogènes intrinsèquement non-linéaires, requiert à recourir à des outils spécifiques des systèmes dynamiques non-linéaires.

Compte tenu de la nature non-linéaire, non-stationnaire et multi-échelles des signaux hydrologiques, l'analyse conjointe "temps-échelle" apparaît comme l'outil privilégié pour remplir les fonctions d'extraction, de quantification et de mise en relation d'informations obtenues à différentes échelles (Rodriguez-Iturbe 1991, Labat et al. 2000).

II) - ANALYSE EN ONDELETTES :

II.1) - Non-stationnarité de la variance :

Dans un premier temps, nous avons essayé de mettre en évidence un phénomène de non-stationnarité de la variance des pluies et des débits. Il a été procédé au calcul de la variance des données journalières mesurées sur des intervalles de plus en plus grands avec un pas d'incrément de 25 jours. La variance des précipitations journalières (Fig. 01) est caractérisée par l'existence de sauts dus à la présence de fortes précipitations, mais tend progressivement vers une limite. La non-stationnarité de la variance des pluies à cette échelle est

donc peu évidente. La variance des débits journaliers de Seklafa, Kerakda et Rhouiba est caractérisée par des sauts importants dûs à des crues qui concentrent une part d'énergie importante (un exemple est donné en figure 02). Par conséquent, les débits sont caractérisés par une forte variabilité des moments dès l'ordre 2.

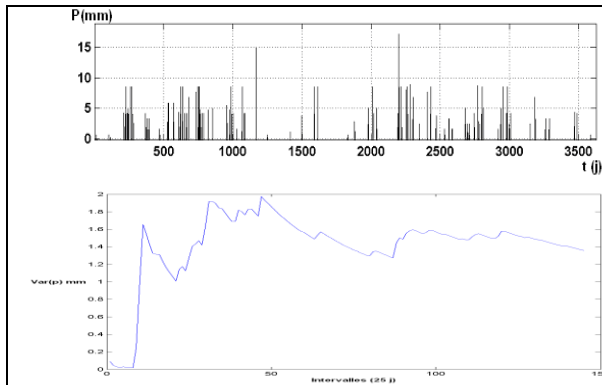


Fig. 01 : - Mise en évidence d'un phénomène de non-stationnarité de second ordre
Précipitations à la station de Laghouat

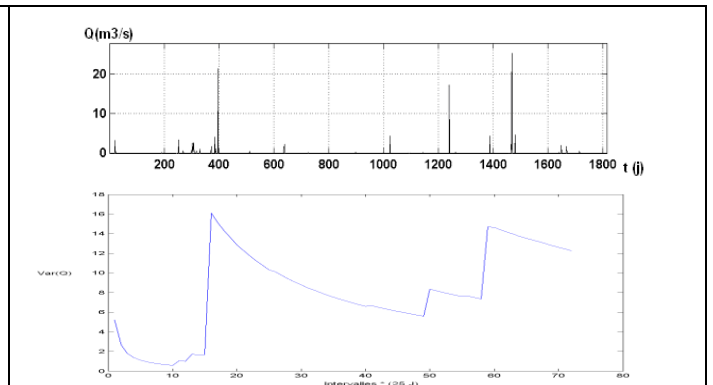


Fig. 02 : - Mise en évidence d'un phénomène de non-stationnarité de second ordre
Débit à la station de Seklafa

II.2) - Analyse en ondelettes continue :

Méthode d'analyse pouvant se prêter à des applications de plus en plus variées (Grossman & Morlet 1984, Strang 1989, Brunet et Collineau 1995, Kumar 1996), la transformée en ondelettes permet de faire le passage d'une représentation d'un signal à un autre à l'exemple de celle de Fourier avec, néanmoins, une résolution temps-fréquence différente. Les coefficients $C_x(a, \tau)$ de la transformée en ondelettes d'un signal $x(t)$ sont donnés par le produit scalaire :

$$C_x(a, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{a, \tau}^*(t) dt \quad (01)$$

avec
$$\psi_{a, \tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t - \tau}{a}\right) \quad (02)$$

où $\psi(t)$ qui joue le rôle d'un noyau de convolution est nommée : fonction ondelette, qui peut être réelle ou complexe ; (*) correspond au complexe conjugué ; le paramètre 'a' (facteur d'échelle), contrôle la dilatation ou la contraction de la fonction $\psi(t)$; le paramètre ' τ ' s'interprète comme un facteur de translation temporelle ou de décalage fréquentiel de la fonction $\psi(t)$.

Une interprétation fréquentielle de l'équation (01) est aussi possible en utilisant le théorème de Parseval, les coefficients d'ondelettes du signal temporel continu $x(t)$ sont aussi donnés par la relation :

$$C_x(a, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{x}(\omega) \sqrt{a} \hat{\psi}(a\omega) e^{i\omega\tau} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{x}(\omega) \Psi_{a, \tau}(\omega) d\omega \quad (03)$$

Cette formulation indique que les coefficients en ondelettes peuvent aussi s'interpréter par le filtrage de \hat{x} (transformée de Fourier de $x(t)$) par un

banc de filtres $\Psi_{a,\tau}(\omega)$ relié à la transformée de Fourier de la fonction ondelettes $\psi(t)$ par la relation :

$$\Psi_{a,\tau}(\omega) = \sqrt{a}\hat{\psi}(a\omega)e^{i\omega\tau} \quad (04)$$

Dans ce cas, le paramètre "a" peut s'interpréter comme un facteur de dilatation ou de contraction du filtre ψ correspondant à des intervalles fréquentiels adjacents tandis que le paramètre "τ" peut s'interpréter comme un décalage de phase.

Les techniques de transformées en ondelettes ont été appliquées aux trois systèmes atlasiques : Seklafa, Kerakda et Rhouiba pour les débits journaliers, ainsi qu'aux données des pluies journalières issues des stations de Laghouat et d'Aflou. Les spectres en ondelettes de Morlet de pluies de Laghouat et d'Aflou et de débits journaliers de Seklafa, Kerakda et Rhouiba ont été calculés en utilisant l'algorithme présenté par Torrence et Compo (1998), dont quelques exemples sont représentés sur les figures 03 et 04.

A petites échelles, les spectres en ondelettes de Morlet des précipitations ont permis de mettre en évidence des processus à hautes fréquences présentant une forte variabilité temporelle. A plus grande échelle, les spectres révèlent la présence de certains processus plus ou moins bien localisés en temps correspondant à des processus multi-annuels similaires à l'effet Joseph décrit dans Mandelbrot et Wallis (1968). A petites échelles, les spectres de Morlet des débits n'ont montré aucune structure évidente. Néanmoins, ce phénomène de plus en plus visible d'un système à un autre constitue par lui-même déjà une information sur le degré d'organisation et de développement des systèmes. L'influence des crues s'étend profondément sur la gamme des échelles. Ceci est révélateur à court terme d'un comportement de système évolué et bien drainé. A grande échelle, les spectres révèlent la présence de certains processus bien localisés en temps, correspondant à des processus multi-annuels à long terme et qui ressemblent à l'effet Joseph. Par conséquent, il apparaît clairement que les processus débits sont des processus non-stationnaires dont la distribution varie temporellement à toutes les échelles (Chettih et Mesbah 2005).

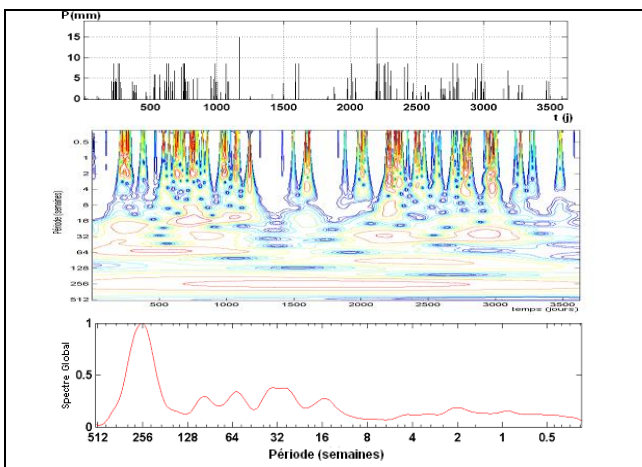


Fig. 03 : Pluies journalières à la station de Laghouat
Application de l'analyse en ondelettes continue de Morlet
(série chronologique ; spectre en ondelettes de Morlet ; spectre global).

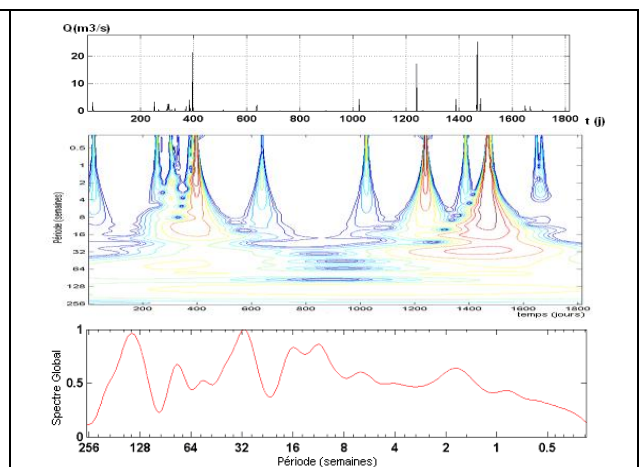


Fig. 04 : Débits journaliers à la station de Seklafa
Application de l'analyse en ondelettes continue de Morlet
(série chronologique ; spectre en ondelettes de Morlet ; spectre global).

Le spectre en ondelettes de Morlet croisé de données journalières du système de Seklafa (fig. 05) a été calculé afin de mettre en évidence la variabilité temporelle de la relation pluie-débit. A petites échelles, des structures éparses visibles sont dûes aux passages consécutifs des crues. A long terme, les composantes correspondant à l'effet Joseph ne sont pas mises clairement en évidence, ceci peut être lié aux faibles réserves internes qui dépendent de la composante à grande échelle des précipitations.

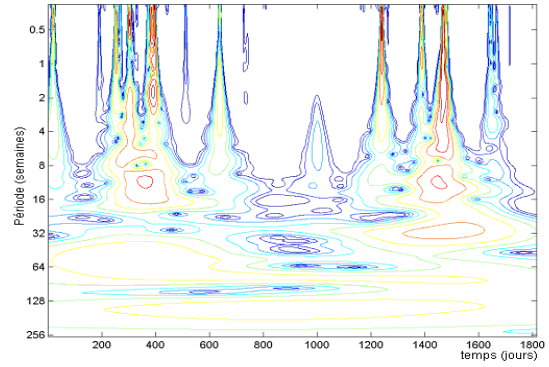


Fig. 05 : - Spectre en ondelettes continue croisé de Morlet Pluie-Débit : (données journalières mesurés sur le bassin de Seklafa, période 1975/1980)

II.3) – Analyse multirésolution :

Le domaine temps-échelle sera remplacé par un domaine discret de la forme $\{(a_0^{-j}, k\tau_0 a_0^{-j}), (k, j) \in \mathbb{Z}^2\}$ où a_0 et τ_0 sont des constantes. On aboutit ainsi à une version discrète définissant les coefficients de la transformée en ondelettes discrète du signal $x(i)$:

$$C_x(j, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{j,k}^*(t) dt \quad (05)$$

avec

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{j/2} \psi(a_0^j t - k\tau_0) \quad (06)$$

L'exposant j est alors appelé facteur d'échelle, tandis que le paramètre $k\tau_0$ est appelé facteur de translation.

Une fois que le domaine temps-échelle est discrétisé, des valeurs particulières pour a_0 et τ_0 correspondant à une représentation dyadique des échelles sont choisies : $a_0 = 2$ et $\tau_0 = 1$. La grille continue est alors remplacée par une grille discrète dyadique de la forme $\{(2^{-j}, k 2^{-j}), (k, j) \in \mathbb{Z}^2\}$. Les coefficients de la transformée en ondelettes discrète orthogonale $C_{j,k}^X$ sont alors donnés par le produit de convolution :

$$C_{j,k}^X = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{j,k}^*(t) dt \quad (07)$$

avec

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (08)$$

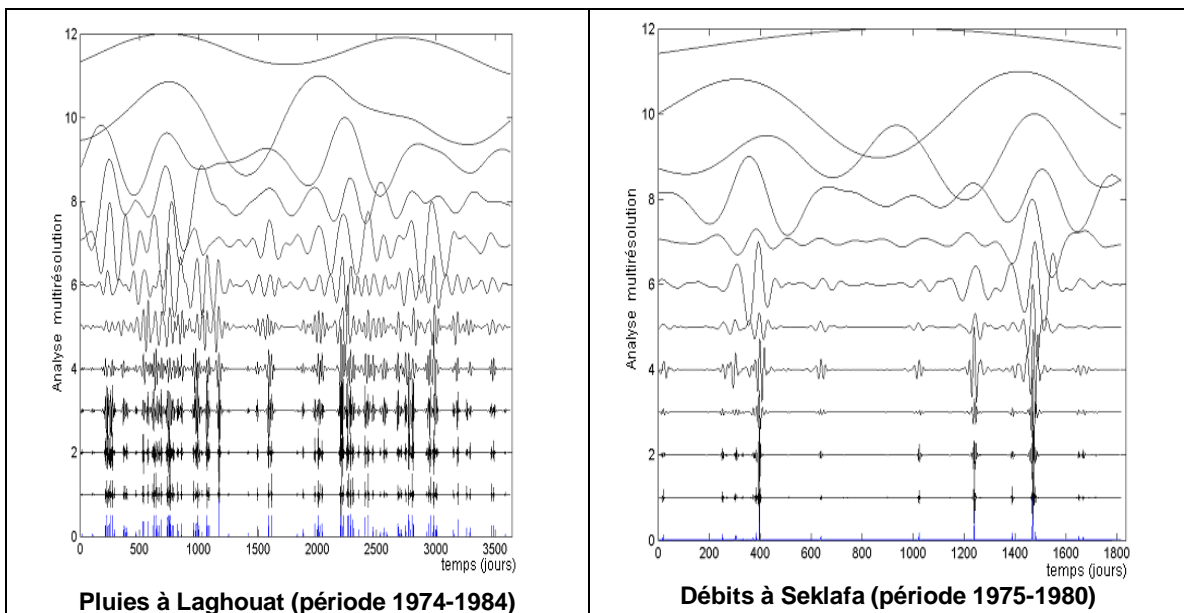
L'analyse en ondelettes multirésolution (Mallat 1989, Cohen et al. 1991, Daubechies 1992) permet la décomposition d'un signal dyadique en une succession d'*approximations* et de *détails* correspondant à des échelles croissantes j .

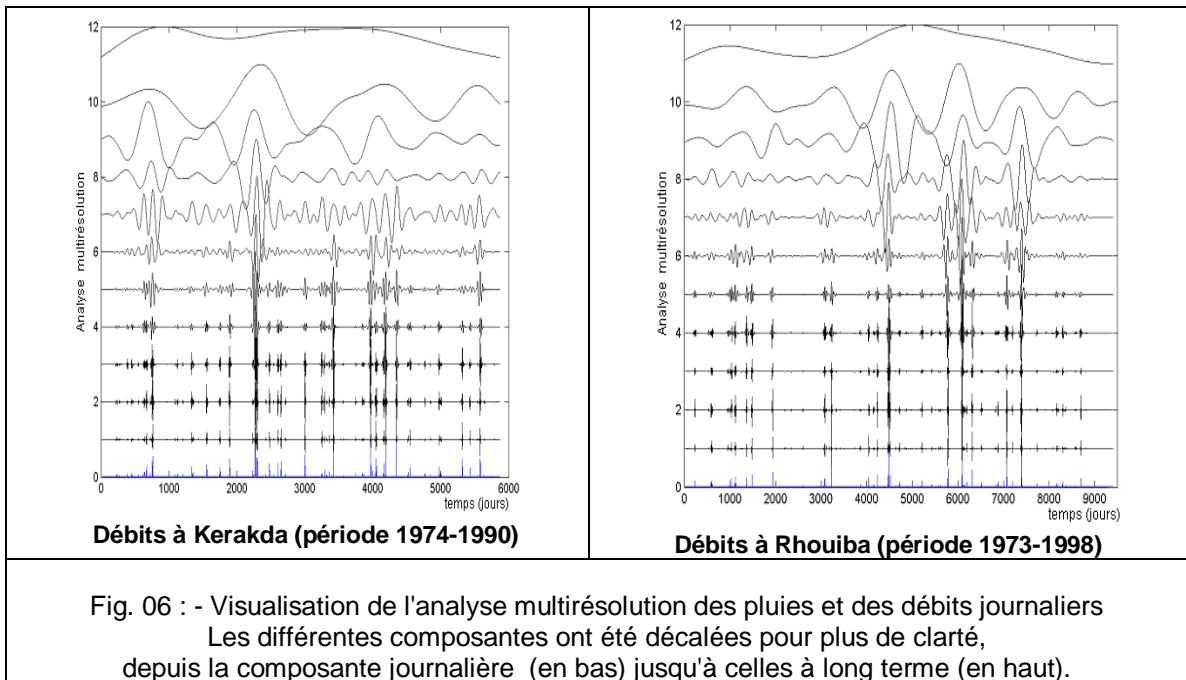
II.3.1) - Analyse multirésolution univariée :

Des analyses multirésolution en ondelettes de Daubechies (daub 20) sont appliquées sur les données journalières des pluies et débits des systèmes atlasiques. L'évolution temporelle des coefficients en ondelttes de Daubéchies est représentée en figure 06.

Cette répartition apparaît comme non uniformément répartie dans le temps et à travers les échelles. L'analyse permet de capturer, en particulier, les variations du signal aux différentes échelles. Ainsi, de grandes variations impliquent de fortes valeurs pour les coefficients aux petites échelles. Ceci est particulièrement visible pour les pluies qui présentent de fortes discontinuités et notamment pour les débits lors des crues.

Les coefficients en ondelettes de Daubechies correspondant aux processus à moyen terme, exhibent également une distribution non uniforme dans le temps. De plus, le niveau 5 et le niveau 6 permettent de mettre en évidence eux-aussi un processus multi-annuel avec des coefficients élevés alternant avec d'autres coefficients négligeables. Ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus par l'analyse en ondelettes de Morlet.





II.3.2) – Analyse multirésolution croisée :

Les spectres croisés en ondelettes de Daubechies des pluies et débits journaliers ont été appliqués pour le système de Seklafa. Afin de rendre compte de façon plus physique de la décomposition en échelle de la relation pluie-débit, les fonctions de covariance entre approximations des pluies et approximations des débits et entre détails des pluies et détails des débits ont été calculées et sont présentées en figure 07.

La décomposition de la fonction de covariance totale entre covariance des détails et des approximations permet l'identification de deux composantes aux comportements caractéristiques. La covariance entre détails des pluies et des débits amène l'isolation d'une composante rapide correspondant au pic visible sur la fonction de covariance des données (corrélation globale). La covariance entre approximations des pluies et des débits met en évidence la présence d'une deuxième composante peu significative mais plus lente.

Cette analyse a permis de décomposer la réponse globale de l'aquifère en une réponse rapide correspondant à un écoulement rapide dans un réseau très développé, et une réponse retardée correspondant probablement à un écoulement dans un réseau moins développé que le premier.

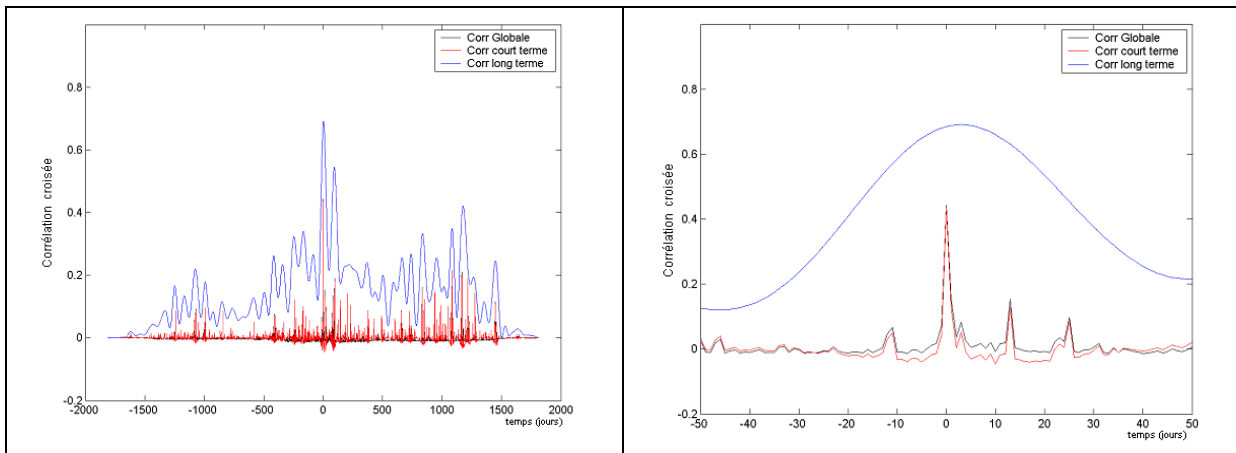


Fig. 07 : - Identification de deux composantes dans la réponse du système de Seklafa par analyse de la covariance entre détails pluie-débit et approximations pluie-débit.

III) – MODELE HYBRIDE NEURO-MULTIRESOLUTION :

Dans une deuxième partie, ce travail a consisté à élaborer une nouvelle méthodologie pour la simulation des événements extrêmes en s'appuyant sur les résultats apportés par l'analyse en ondelettes.

La complexité des régimes hydrodynamiques des bassins sahariens requiert donc à recourir à des outils spécifiques des systèmes dynamiques non-linéaires. Le problème de la transformation de la pluie en débit d'écoulement est l'un des problèmes majeurs qui se posent aux hydrologues plus particulièrement quand les systèmes hydrologiques sont difficiles à modéliser à l'aide des méthodes classiques. Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) constituent une nouvelle approche de modélisation des systèmes complexes (Maier & Dandy 1996, Dawson & Wilby 2001, Riad 2003, Anctil & Tape 2004).

Ainsi, un modèle neuro-multirésolution pour la prévision des débits est proposé et utilisé. Les séries temporelles de pluie et débit sont décomposées en ondelettes de Daubechies en deux sous-séries décrivant les processus pluie-débit à courte et à longue période. Le schéma simplifié du modèle hybride neuro-multirésolution est présenté par la figure suivante :

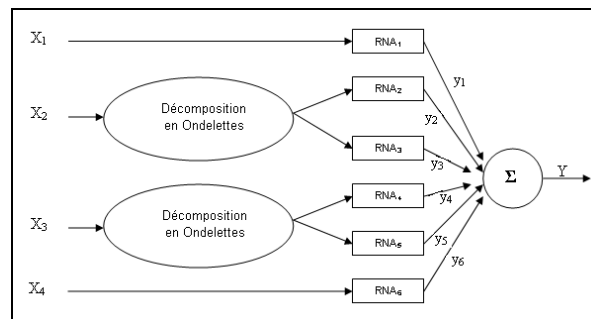


Fig. 08 : - Schéma du modèle hybride neuro-multirésolution pour la prévision des débits.

III.1) – Application du modèle :

L'application du modèle hybride neuro-multirésolution a été effectuée sur les données journalières de pluie (P) et de débit (Q) du système de Seklafa. Le vecteur d'entrée du modèle est représenté par les pluies (P) et les valeurs des débits (Q) pour les trois jours précédents ainsi que les valeurs issues de leurs décompositions en ondelettes. Le vecteur de sortie représente la valeur prévue de débit pour le jour suivant.

La structure du modèle peut être représentée par la forme suivante :

$$\{Q_{t+1}\} = RNA[P, Q, CP, CQ]$$

où CP et CQ sont respectivement les coefficients de la transformée en ondelettes discrète orthogonale de la pluie et du débit.

Pour les critères de performance, trois méthodes ont été utilisées :

- Le coefficient de détermination R^2 ;
- L'erreur moyenne des carrés **ASE** (Average Squared Error) ;
- L'erreur moyenne absolue et relative **MARE** (Mean Absolute Relative Error).

L'algorithme de Levenberg-Marquardt a permis une bonne performance pour les critères cités plus haut. L'apprentissage du réseau a été effectué de façon que l'erreur moyenne des carrés (ASE) soit minimale essentiellement pour la phase de test.

III.2) – Résultats et discussions :

Le modèle a montré une meilleure convergence pour un nombre de neurones égal à 18 et 1500 itérations, soit une valeur minimale de l'ASE pour la phase de test. Les paramètres statistiques pour la phase d'apprentissage et la phase de test sont résumés dans le tableau suivant :

	ASE	R^2	MARE
Phase d'apprentissage	0.000065	0.936	1.852%
Phase de Test	0.000022	0.847	0.831%

Tableau n° : 01 – Paramètres statistiques du modèle hybride neuro-multirésolution du système de Seklafa.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau n° 02 montrant une comparaison entre les débits observés et les débits simulés pour les phases d'apprentissage et de test.

	Débits Observés (m ³ /s)	Débits simulés (m ³ /s)
--	-------------------------------------	------------------------------------

Paramètres statistiques	Apprentissage	Test	Apprentissage	Test
Moyenne	0.487	0.415	0.488	0.425
Ecart-type	12.16	13.27	12.32	13.86
Minimum	0.11	0.11	0.18	0.19
Maximum	88.74	56.64	81.18	60.11

Tableau n°: 02 – Comparaison entre les débits observés et les débits simulés par le modèle hybride neuro-multirésolution pour les phases d'apprentissage et de test.

Pour la deuxième partie de la simulation, l'ensemble des données (1975-1980) a été subdivisé en trois ensembles, calage (apprentissage), test et validation.

Le modèle le plus performant est obtenu pour un nombre de neurones de 17 dans la couche cachée et un nombre d'itération égal à 1200. Le tableau n° 03 résume les paramètres statistiques du modèle pour les différentes phases.

	ASE	R ²	MARE
Phase d'apprentissage	0.000045	0.925	1.770%
Phase de Test	0.000056	0.870	0.854%
Phase de Validation	0.000033	0.861	1.982%

Tableau n° : 03 – Paramètres statistiques du modèle hybride neuro-multirésolution du système de Seklafa (1975-1980).

Le modèle des réseaux de neurones artificiels a permis d'obtenir des résultats encourageants, cependant, en introduisant les coefficients de la transformée en ondelettes discrète orthogonale de la pluie et du débit dans le vecteur d'entrée du modèle on a constaté une meilleure performance des paramètres statistiques. Sans l'introduction des valeurs issues de la décomposition en ondelettes de la sous-série décrivant le processus pluie-débit à longue période, on a remarqué que la moyenne des débits simulés est légèrement supérieure à celles des débits réels, le modèle a tendance à surestimer les étiages, par contre une meilleure estimation des forts débits de pointe a été constaté.

IV) – CONCLUSION :

En définitive, les systèmes aquifères atlasiques sahariens ont un comportement hydrodynamique très complexe. Ces systèmes sont fortement influencés par les phénomènes pluri-annuels. Leurs débits sont également influencés par la non-linéarité intrinsèque du système aquifère qui indique à priori l'existence de nombreux degrés de liberté.

En général, les aquifères sont le plus souvent modélisés dans leur comportement linéaire. Cependant, pour les aquifères hétérogènes intrinsèquement non-linéaires, comme ceux des systèmes atlasiques, ces notions sont inadaptées. L'application d'un modèle hybride neuro-ondelettes a permis de bonnes prévisions hydrologiques. Ce modèle a permis une meilleure performance des paramètres statistiques, et une meilleure simulation des phénomènes extrêmes.

BIBLIOGRAPHIE

ANCTIL F. & TAPE D.G. (2004) – An exploration of artificial neural network rainfall-runoff forecasting combined with wavelet decomposition. Jour. Environ. Eng. Sci, pp S121-S128.

BRUNET Y. & COLLINEAU S. (1995) – Wavelet Analysis of diurnal and nocturnal turbulence above a Maize crop, *Wavelets in Geophysics*, Academic Press, pp 129-150.

CHETTIH M. & MESBAH M. (2005) – Analyse en ondelettes appliquée à l'étude du comportement hydrodynamique des systèmes atlasiques. Séminaire International de l'eau. HYDROTOP, 15-17 Mars 2005, Marseille, France.

CHETTIH M. & MESBAH M. (2006 a) - Apports de l'analyse en ondelettes à la connaissance du fonctionnement d'un système atlasique saharien. International Scientific Conference on "The Future of Drylands". 19 - 21 June 2006, Tunis, Tunisie.

CHETTIH M. et MESBAH M. (2006 b) – Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale pour inférer sur la structure et le comportement hydrodynamique des aquifères de l'Atlas Saharien. Bulletin du Service Géologique National. Vol. 17, n° 2, Juillet 2006.

COHEN A., FROMENT J. & ISTAS J. (1991) – Analyse multirésolution des signaux aléatoires. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris 312, pp 567-570.

DAUBECHIES I. (1992) – Ten lectures on wavelets. CSBM-NSF Series in Applied Mathematics, SIAM Publication.

DAWSON C.W. & WILBY R.L. (2001) – Hydrological modeling using artificial neural networks. *Progress in Physical Geography*, 25, pp 80-108.

GROSSMAN A. & MORLET J. (1984) – Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM Jour. Mathematics*, pp 723-736.

KUMAR P. (1996) – Role of coherent structure in the stochastic dynamic variability of precipitation. *Journal of Geophysical Research* 101 (D6), pp 393-404.

LABAT D., ABABOU R. & MANGIN A. (2000 b) – Rainfall-runoff relation for karstic springs. Part II: continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. *Jour. Hydrol.* 238, pp 149-178.

MAIER H.R.& DANDY G.C. (1996) The use artificial neural networks for the prediction of water quality parameters. *Water Ressources Research*, 32(4),pp1013-1022.

MALLAT S. (1989) – A theory for multiresolution signal decomposition : The wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern analysis and Machine Intelligency* 11, pp 674-693.

MANDELBROT B. & WALLIS J. (1968) – Noah, Joseph and operational hydrology. *Water Resources Research* 4(5), pp 909-918.

RIAD S. (2003) – Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Thèse, Université de Lille. 99, 121p.

RODRIGUEZ-ITURBE I. (1991) – Exploring complexity in the structure of rainfall. *Advances in Water Resources* 14(4), pp 162-167.

STRANG G. (1989) – Wavelets and dilatation equation : A brief introduction. *SIAM Review* 31(4), pp 614-627.

TORRENCE C. & COMPO G. (1998) – A pratical guide to wavelet analysis. *Bull. Of the American Meteorological Society*, 79, pp 61-78.