

Variabilité spatio-temporelle des ressources en eau en région semi-aride: application au bassin du Chelif, Algérie

FARID ACHOUR, MAHMOUD BOUZELBOUDJEN

Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, 11 Rue Emile Argand, CH-2007 Neuchâtel, Suisse
e-mail: mahmoud.bouzelboudjen@chyn.unine.ch

SERGE A. PIEYNS

Organisation Météorologique Mondiale, 41 Avenue Giuseppe Motta, CH-1211 Genève 2, Suisse

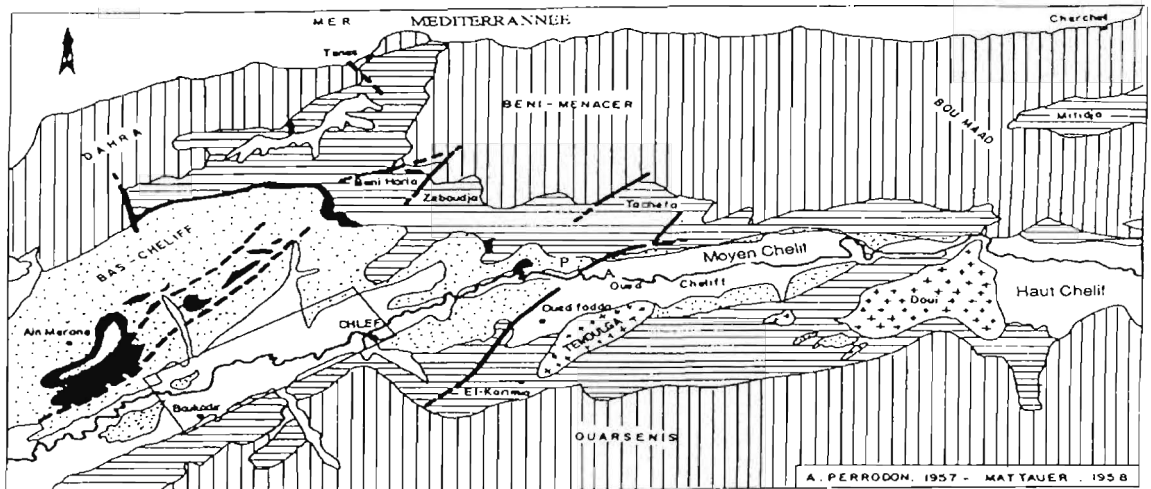
Résumé Une étude pluviométrique a été réalisée sur une période de 66 ans sur l'ensemble du bassin du Chelif (45 000 km²). Le traitement des données pluviométriques annuelles par l'analyse en composantes principales a permis de mettre en évidence les différentes périodes sèches et humides. Les résultats ont montré aussi la diminution de la pluviométrie d'est en ouest. Par ailleurs la classification automatique par nuées dynamiques des postes pluviométriques a permis de régionaliser la pluviométrie sur l'ensemble du bassin du Chelif. Les résultats des analyses multidimensionnelles de 8 campagnes d'échantillonnage des eaux souterraines sur 4 ans montrent que l'alimentation de l'aquifère alluvionnaire du bassin du Chelif Oriental (300 km²) dépend de facteurs hydroclimatiques et lithologiques de la plaine. La simulation numérique des écoulements souterrains par la méthode des éléments finis a été réalisé en régime permanent afin d'établir le bilan de l'aquifère plio-quatenaire du Bas-Chelif Oriental. Les principaux résultats montrent le rôle prépondérant de l'Oued Chelif dans la gestion de la ressource en eau du bassin du Chelif.

INTRODUCTION

La ressource en eau souterraine et superficielle dans les pays semi-arides constitue le facteur limitant pour tout essor économique, à cet effet, la connaissance de l'adéquation entre les conditions hydrologiques et la disponibilité en eaux superficielles et souterraines est une étape fastidieuse mais indispensable pour tout plan de développement. Au delà d'un modèle prévisionnel orienté vers les besoins immédiats de gestion, il y a lieu d'envisager une approche méthodologique permettant de décrire et de quantifier les mécanismes de recharge et décharge des aquifères en ces milieux semi-arides caractérisés par un régime pluviométrique irrégulier.

GEOLOGIE

Les bassins sublittoraux de l'Algérie centro-occidentale s'alignent parallèlement à la côte méditerranéenne formant des zones peu élevées par rapport aux chaînes



P : Station hydrométrique de Pontéba
 A : Station hydrométrique d'El Abadia









| Légende | | | | | | | |
|---|--------------|---|----------------------------|---|-------------------------|--|---------------------|
|  | Quaternaire |  | Messinien gypseux |  | Substratum Anté-Neogène |  | Fautes |
|  | Miocène sup. |  | Miocène moyen et Supérieur |  | Socle Epimétamorphique |  | Bas Chélif Oriental |

Fig. 1 Cadre géographique et géologique de la plaine du Chelif.

secondaires plissées qui les encadrent (Perrodon, 1957; Lepvrier *et al.*, 1970). Ce sont des bassins néogènes dont l'histoire est étroitement liée aux phases ultimes et paroxysmales de l'orogénèse alpine. Du point de vue structural ces bassins forment des sillons complexes plus ou moins continus s'allongeant suivant une direction générale WSW-ENE, entre les massifs secondaires plissés qui peuvent être assimilés en première approximation à des aires anticlinales majeures. Le bassin du Chelif qui évolue dans ce milieu est un bassin subsident de type intramontagneux fonctionnant en graben le long de grandes flexures bordières. Les ensembles lithologiques rencontrés dans la plaine sont les terrains néogènes et quaternaires (Fig. 1); le substratum, essentiellement secondaire sur les bordures du par: les monts de l'Ouarsenis au sud, du Dahra au nord et par les massifs épimétamorphiques à schistosités du Doui et du Temoulga à l'est (Fig. 1).

PLUVIOMETRIE

La plaine du Chelif située entre les montagnes du Dahra au nord et l'Ouarsenis au sud est une région principalement à vocation agricole, traversée par l'Oued le plus important d'Algérie. L'Oued Chelif coule sur 700 kilomètres avec un débit de $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à la station du Ghib dans le Haut-Chelif jusqu'à atteindre $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à l'embouchure de Mostaganem. La plaine du Bas-Chelif Oriental est caractérisée par une faible pluviométrie malgré la proximité de la mer (50 km). Une étude pluviométrique a été réalisée sur une période de 66 ans (1922-1960 et 1967-1995) sur le bassin du Chelif d'une superficie de $45\,000 \text{ km}^2$ (Fig. 2), la critique et l'homogénéisation des données avec des techniques modernes ont permis de détecter

les différentes erreurs systématiques et accidentelles au niveau de la gestion du réseau pluviométrique, la constitution d'un vecteur régional a permis de reconstituer les années manquantes pour les stations ne présentant pas énormément de lacunes d'observation. La plaine du Bas-Chelif Oriental (Fig. 1) est caractérisée par une pluviométrie moyenne de 370 mm et une évapotranspiration réelle de 320 mm lui conférant un climat semi-aride. Le traitement des données pluviométriques annuelles par l'analyse en composantes principales (ACP) a permis de mettre en évidence grâce à la première composante les différentes périodes sèches et humides ayant affecté le bassin du Chelif depuis le début du siècle (Fig. 3). Cette représentation montre entre autres que le bassin subit une période de sécheresse depuis 1975 jusqu'à l'heure actuelle (1995). La seconde composante représentant la projection des coefficients de corrélation montre quant à elle une opposition des stations de l'est à celles de l'ouest matérialisée sur le terrain par une diminution de la pluviométrie d'est en ouest (Fig. 2) ce qui est en accord avec le schéma global de la pluviométrie en Algérie du nord.

La classification automatique par nuées dynamiques (Laborde, 1992) des postes pluviométriques a permis de régionaliser la pluviométrie sur le bassin du Chelif, en vérifiant le regroupement des postes pluviométriques appartenant à une même unité géomorphologique.

Une régression multiple a permis de retrouver l'équation de la pluie sur le bassin et de définir ainsi les différents termes l'influençant. Par ailleurs, des investigations ont été menées pour définir la relation entre la morphométrie et la pluviométrie, aboutissant à l'élaboration d'une équation où la pluviométrie n'est plus calculée sur le pluviomètre mais sur une fenêtre centrée sur le pluviomètre.

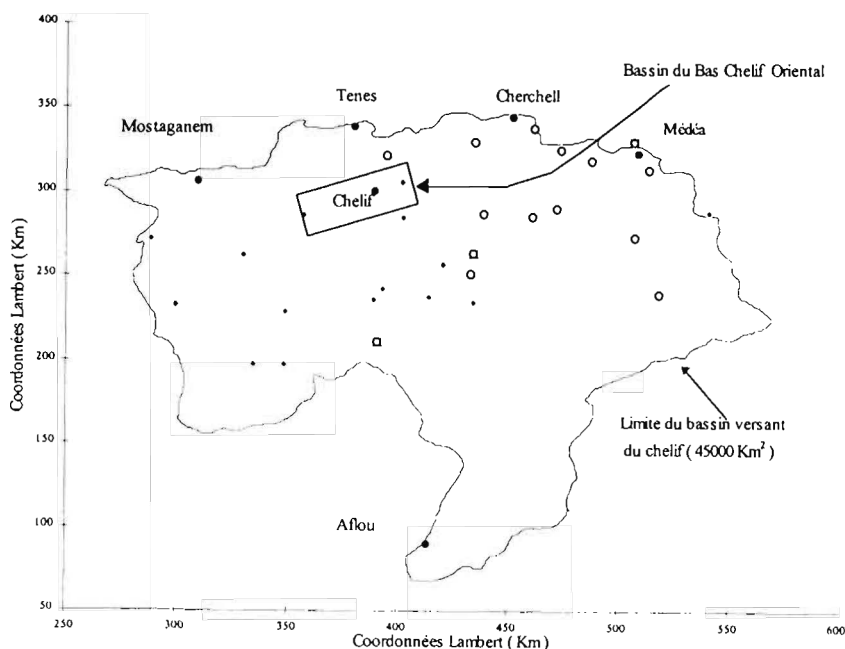


Fig. 2 Projection des coefficients de corrélation (précipitations 1922–1995) sur la deuxième composante.

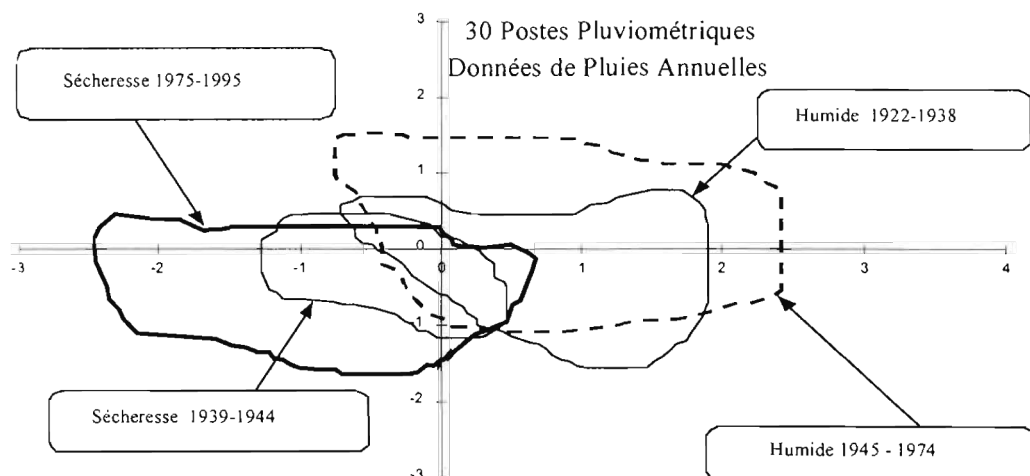


Fig. 3 Répartition des périodes humides et sèches (1922–1995) sur le bassin versant du Chelif.

IMPACT DE LA FAILLE SISMIQUE SUR LES ECOULEMENTS

Ce bassin est caractérisé par une néotectonique intense (Meghraoui & Cisternas, 1986) matérialisée en surface par la faille sismique de Oued Fodda (séisme du 10 octobre 1980) entraînant des changements notables sur les écoulements superficiels et souterrains avec une remontée de près de 2 m du niveau des eaux souterraines. Cet impact certes ponctuel est très important sur le plan socio-économique. L'approche de l'impact de la faille de Oued Fodda sur l'écoulement superficiel par l'analyse corrélatrice et spectrale a permis de mettre en évidence un retard dans la propagation de l'onde de crue pour la période après séisme, le traitement croisé a montré une nette détérioration de la fonction de cohérence (Fig. 4) indiquant une perte du transfert de l'information pour la période après séisme. L'interprétation d'un pompage d'essai de longue durée a permis de mettre en évidence l'effet barrière de la faille corroborée par la géologie ainsi que par le

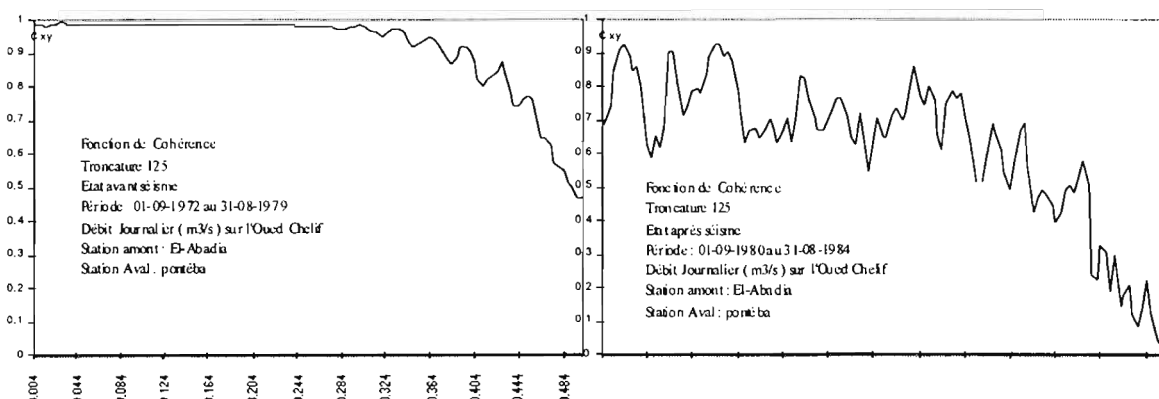


Fig. 4 Configuration de la fonction de cohérence des débits de l'Oued Chelif de part et d'autre de la faille.

modèle numérique de terrain qui met en évidence certaines zones à forte potentialité en eaux souterraines (Achour, 1997).

HYDROGEOCHIMIE

La nature salée des sols (Boulaine, 1957) confère un caractère minéralisé (1 à 5 g l⁻¹) aux eaux souterraines ainsi qu'aux eaux des Oueds. Les analyses hydrochimiques de huit campagnes d'échantillonnage (465 échantillons) sur une période de 4 ans ont permis de comprendre que l'alimentation de l'aquifère dépend des facteurs hydro-climatiques et lithologiques de la plaine, les différentes sources d'alimentation ont pu être vérifiées et différenciées comme l'alimentation verticale (pluie), locale (calcaires) et lointaine (Monts de l'Ouarsenis) à l'aide des analyses multidimensionnelles.

Afin de mieux comprendre l'évolution du chimisme des eaux de la nappe d'une saison à l'autre nous avons réalisé une ACP entre les campagnes hautes et basses eaux entre 1990 et 1993 sur un certain nombre de puits répartis dans la plaine. Le cumul des coordonnées des individus sur les composantes 1 et 2 montre une non différenciation pour l'année 1990 (Fig. 5(a)) et que seules les années 1991 (Fig. 5(b)) et 1992 (Fig. 5(c)) et à une moindre mesure l'année 1993 (Fig. 5(d)) présentent une différenciation du chimisme entre les deux périodes hautes et basses eaux. En effet, la projection des individus sur le plan I-II montre une différenciation suivant l'axe II. Par ailleurs, l'analyse des données de pluie de la région d'étude montre que l'écart pluviométrique entre les périodes ayant précédé chaque campagne est variable pour chacune des années, allant jusqu'à observer (Fig. 6) des anomalies climatiques (plus de pluie en été qu'en hiver) pour les années 1992 et 1993 ayant entraîné des modifications du régime des écoulements souterrains.

Une analyse géostatistique (krigeage) des données hydrochimiques a permis de corroborer les résultats obtenus grâce aux analyses multidimensionnelles à savoir l'importante quantité d'eau apportée par les calcaires de la bordure sud en période de déficit pluviométrique, et de localiser les zones agricoles où les engrais ammoniacaux sont utilisés en excès.

Afin de vérifier la relation Oued nappe, nous avons réalisé une ACP sur les eaux de la nappe hautes et basses eaux 1990 (124 échantillons) et les eaux de l'Oued Chelif (37 échantillons) prélevés en différents points de l'Oued sur le tronçon traversant la zone d'étude (pendant l'année 1990). L'analyse des éléments majeurs a montré une prédominance du faciès chloruré-sodique 78% suivi du faciès sulfaté-sodique 13.5% (Tableau 1). En général, les eaux de l'Oued Chelif présentent des teneurs en éléments toujours élevées, toutefois, il faut noter que le résidu sec (1600 mg l⁻¹) est inférieur à celui des eaux de la nappe (2700 mg l⁻¹). Les valeurs de la pCO₂ sont presque toujours (95%) supérieures à 0.03% (Bakalowicz, 1994), ceci est la preuve de la participation permanente des eaux souterraines aux écoulements superficiels. Nous avons réalisé une ACP sur les eaux de l'Oued Chelif pour l'année 1990:

- l'axe I avec 46% de variance représente toujours le pôle évaporitique;
- l'axe II avec 18% de variance représente quant à lui le dégazage du CO₂.

Nous notons cependant sur l'axe I une séparation de CaHCO₃ par rapport aux autres variables, ceci est probablement dû à la présence dans les eaux de l'Oued Chelif d'eaux provenant des massifs calcaires du Temoulga, ainsi que les eaux de

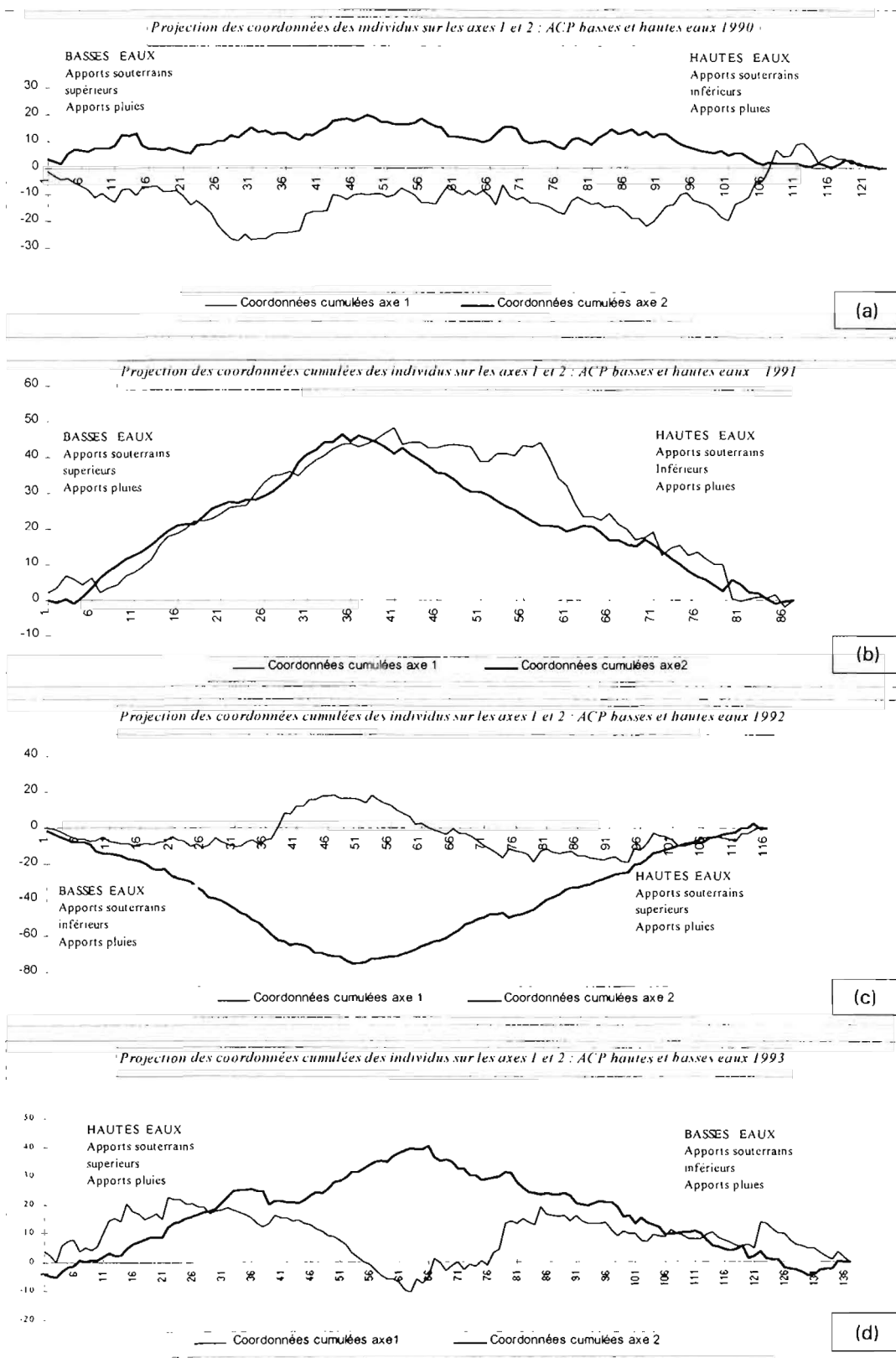


Fig. 5 Projection du cumul des coordonnées sur la deuxième composante pour les données chimiques.

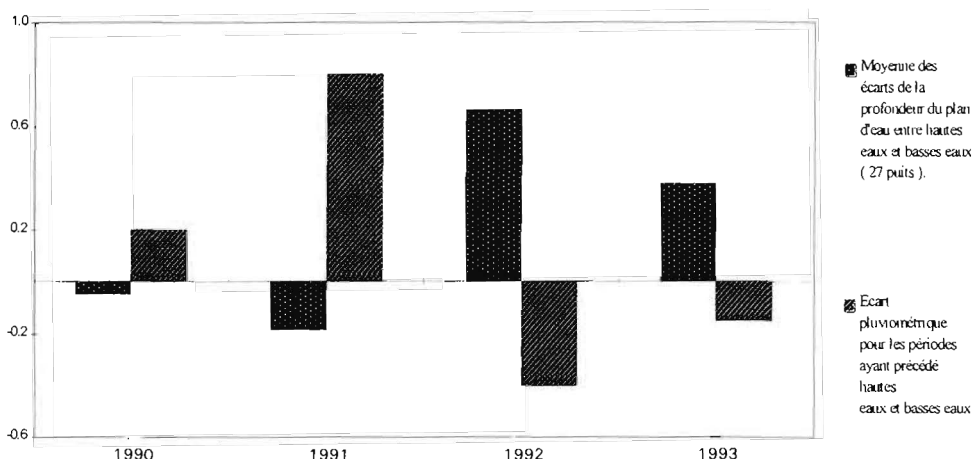


Fig. 6 Relation entre l'écart pluviométrique et le battement de la nappe (1990-1993).

l'Oued Harchoun lequel continue d'alimenter l'Oued Fodda en aval du barrage pour enfin se déverser dans l'Oued Chelif au niveau de la cluse de Pontéba (2 km en aval de l'Oued Fodda). L'analyse en composantes principales des eaux de l'Oued Chelif et les eaux de la nappe indique la persistance du pôle évaporitique sur l'axe I, et le dégazage sur l'axe II. La projection des individus sur le plan I-II (Fig. 7) montre une superposition des nuages formés par les deux familles ce qui confère une origine souterraine aux eaux superficielles.

MODELISATION HYDRODYNAMIQUE

L'analyse hydrologique du remplissage plio-quaternaire de la plaine alluviale du Bas-Chelif entre Chlef (ex. El Asnam) et Boukadir a permis de définir les limites du réservoir ainsi que la compréhension des écoulements dans le bassin, le modèle hydrogéologique bidimensionnel contient de façon implicite tous les paramètres nécessaires pour l'obtention d'une solution. Le réservoir aquifère plio-quaternaire est constitué par une épaisseur de sables et graviers allant de 10 m en rive gauche jusqu'à 350 m en rive droite avec de nombreuses intercalations argileuses. La modélisation mathématique (2-D plan) des écoulements souterrains dans la nappe du Bas-Chelif Oriental s'est effectuée par la méthode des éléments finis en régime

Tableau 1 Teneurs en éléments des eaux de l'Oued Chelif pour l'année 1990.

| | Ca | Mg | Na | K | Cl | SO ₄ | CO ₃ H | NO ₃ | Residus | PCO ₂ | dpH | ISDd | Mg/Ca |
|-------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|-----------------|-------------------|-----------------|---------|------------------|-------|-------|-------|
| Oued Chelif 1990 | | | | | | | | | | | | | |
| Maximum | 321 | 152 | 633 | 29 | 920 | 1080 | 809 | 34 | 3300 | 3.68 | 1.75 | 3.44 | 243 |
| Minimum | 42 | 21 | 76 | 2 | 82 | 125 | 92 | 2 | 640 | 0.02 | -0.41 | -0.57 | 0.13 |
| Moyenne | 141.36 | 64.56 | 275.83 | 9.47 | 421.81 | 393.83 | 258.06 | 10.94 | 1592.0 | 0.37 | 0.78 | 1.38 | 0.57 |
| Nappe année 1990 | | | | | | | | | | | | | |
| Maximum | 785 | 511 | 1900 | 305 | 3000 | 3000 | 843 | 520 | 8883 | 0.99 | 1.1 | 2.35 | 0.79 |
| Minimum | 50 | 10 | 35 | 0 | 55 | 30 | 153 | 1 | 393 | 0.11 | 0.59 | 1.31 | 0.48 |
| Moyenne | 194.85 | 131.31 | 457.84 | 13.86 | 769.95 | 563.71 | 333.73 | 86.77 | 27363 | 0.39 | 0.83 | 1.72 | 0.67 |

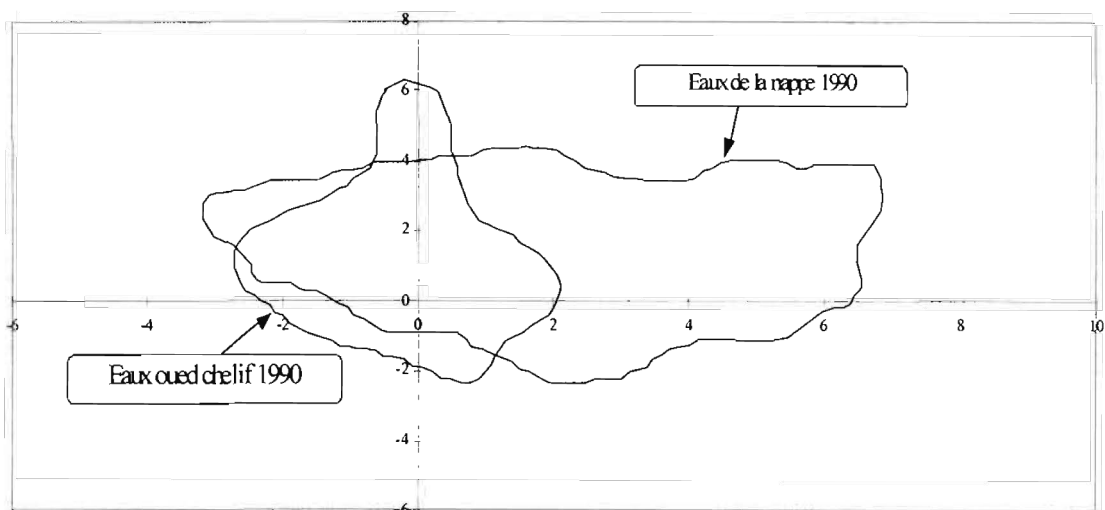


Fig. 7 Projection des individus sur le plan factoriel I-II des données chimiques (Oued-Nappe 1990).

permanent (Király, 1985). La première étape a constitué à situer la période climatique dans laquelle s'inscrivait la campagne modélisée, en nous reportant au travail réalisé en pluviométrie. Les résultats montrent que la surface de la nappe libre est plus profonde en hautes eaux 1989 par rapport aux basses eaux 1973 (Fig. 8). La seconde partie du travail a été consacrée à la caractérisation hydraulique du système marquée par la définition des conditions aux limites. Le calage du modèle (Fig. 9) en régime permanent montre que l'Oued Chelif commande la majorité des écoulements souterrains et qu'il constitue de ce fait un véritable drain. Il représente en effet 30% des apports soit $1.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ contre 12.5% ($0.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) pour l'Oued Tsighaout. Les infiltrations efficaces constituent 9% du total des entrées dans le système. Les sorties sont en majorité représentées par l'Oued Chelif avec 84% du total (Tableau 2).

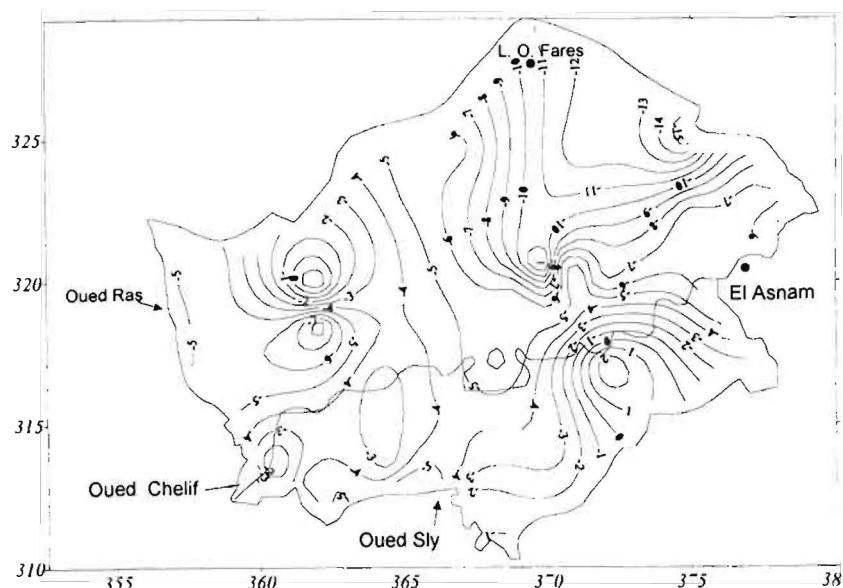


Fig. 8 Carte des écarts piézométriques (mètre) dans le bassin du Bas-Chelif Oriental (1973-1989).

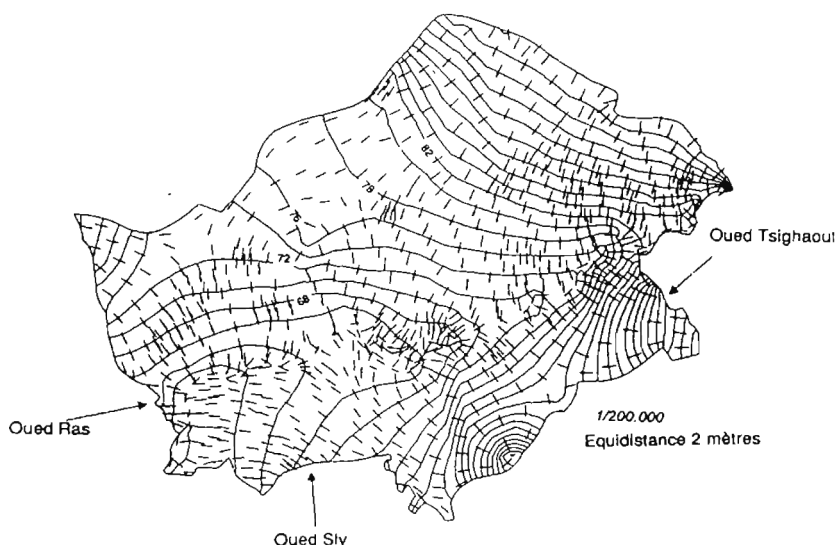


Fig. 9 Carte de distribution des flux et des potentiels simulés (état août 1973).

L'Oued Chelif constitue une conduite naturelle pour le transfert des eaux en aval (Bouzelboudjen & Mania, 1989; Achour, 1997).

CONCLUSION

L'étude de la disponibilité en eau du Bas-Chelif Oriental est tributaire au premier degré des conditions hydrologiques. Nous avons donc été amenés à adopter la démarche de "l'hydrologue-hydrogéologue". Une politique de gestion intégrée des ressources en eau s'impose d'elle même (Achour, 1997). Les résultats du modèle hydraulique et de l'étude hydrochimique ont permis de localiser les zones favorables à l'implantation de nouveaux forages au niveau du cône de déjection de l'Oued Sly, des grès astiens

Tableau 2 Bilan hydrologique de l'aquifère plio-quatenaire (régime permanent, août 1973).

| Entrées | Débit ($m^3 s^{-1}$) | % Partiel | % Total | Sorties | Débit ($m^3 s^{-1}$) | % Partiel | % Total |
|----------------------------------|------------------------|-----------|---------|-----------------------------------|------------------------|-----------|---------|
| Infiltration les bordures | | | | Exfiltrations par bordures | | | |
| Sud | 0.00 | 0.00 | | Sud | 0.00 | 0.00 | |
| Nord | 0.00 | 0.00 | | Nord | 0.00 | 0.00 | |
| Est | 1.6 | 32 | 32 | Est | 0.00 | 0.00 | |
| Infiltrations les oueds | | | | Exfiltrations par oueds | | | |
| Tsighaout | 0.60 | 13 | | Tsighaout | 0.01 | 0.23 | |
| Ouahrane | 0.38 | 8 | | Ouahrane | 0.31 | 6.57 | |
| Sly | 0.20 | 4 | | Sly | 0.15 | 3.11 | |
| Ras | 0.22 | 5 | | Ras | 0.03 | 0.65 | |
| Chelif | 1.40 | 30 | 59 | Chelif | 4.02 | 84.4 | 95 |
| Infiltration efficace | 0.42 | 9 | 9 | Débites forages | 0.24 | 5 | 5 |
| Total | 4.8 | | 100 | Total | 4.8 | | 100 |

des Monts de Mouafekia (au nord de Chlef) ainsi qu'au niveau des cavités karstiques situées sur la rive gauche de l'Oued Chelif. De plus en relation avec l'activité sismique un champ captant pourrait être mis en place dans la plaine de Oued Fodda. Par ailleurs, il faut en même temps établir des périmètres de protection autour de chaque champ captant et autour des tronçons d'échange importants Oued-nappe mis en évidence par le modèle mathématique d'écoulement souterrain.

REFERENCES

- Achour, F. (1997) Conditions hydrologiques et disponibilité en eaux en région semi aride: Application de méthodologies nouvelles au bassin du Chelif (Algérie). Thèse de Doctorat d'Université, Univ. des Sci. et Tech. de Franche-Comté, Besançon, France.
- Bakalowicz, M. (1994) Water geochemistry: water quality and dynamics. In: *Groundwater Ecology*, 97-127. Academic Press, New York, USA.
- Boulaine, J. (1957) Etude des sols des plaines du Chélif. Thèse Université d'Alger, Algérie.
- Bouzelboudjen, M. & Mania, J. (1989) Hydrogeology of the middle Chelif basin (Algeria): simulation of the groundwater flows. In: *Appropriate Methodologies for Development and Management of Groundwater Resources in Developing Countries* (Proc. Int. Workshop Hyderabad, India, 28 February-4 March 4), vol. II, 505-521.
- Király, L. (1985) FEM301—a three dimensional model for groundwater simulation. *NAGRA Technical Report NTB 84-49, Baden, Switzerland*.
- Laborde, J. P. (1992) Automatic classification of variables by principal dynamic components. *Rev. d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée* 31, 53-66.
- Meghraoui, M., Cisternas, A. & Philip, H. (1986) Seismotectonics of the lower Chelif basin: structural background of the El Asnam (Algeria) earthquake. *Tectonics* 5, 809-836.
- Lepvrier, C., Magne, J. & Sigal, J. (1970) : Données stratigraphiques et structurales sur les formations telliennes d'une partie du Tell septentrional (secteur compris entre Cherchell, Miliana, El Asnam et Ténès, Algérie). *Bull. Soc. Géol. de France* 7, 794-804.
- Perrodon, A. (1957) Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie nord Occidentale. Thèse Paris, *Publ. Serv. Carte géol. Algérie*, nouv. Sér. no. 12.