

## Identification des Facteurs de Variation du Chimisme de l'Eau dans un Milieu Cristallin

H. Majour, H. Hani, K. Khanchoul & L. Djabri

Département de Géologie, Université Badji Mokhtar - Annaba, BP 12, 23000 Annaba, Algérie.

Adresse e-mail de l'auteur : yah\_majour@yahoo.fr

### ملخص :

تتكون جبال إيدوغ من مجموعة صخور متحولة في شمال شرق الجزائر. تشكل قبة نايس محاطة بشبست ميكاني بمستوى الرخام البسيط. تحتوي أيضًا على بعض الصخور النارية النادرة. تأثير الجو على صخرة النايس سمح باستقرار تربة سميكة شكلت طبقات مائية استغلت لتزويد الماء الصالح للشرب. يجري التصرف الطبيعي لنظام جيولوجيا الماء في مجموعة ينابيع موزعة طبقاً للإتجاهين رئيسيين NW-SE و NE-SW، يعود تزويد الطبقات المائية إلى نفاذية المطر بمعدل سنوي يقدر ب 1040 مم (1978 إلى 2006 مم)، تستند دراسة الخصائص الفيزيائية الكيميائية للطبقات المائية على النتائج التحليلية لسلسلة العينات الدورية في 15 يوم، أنجزت بين 2005-2006. على أساس المعالجة الإحصائية، تمت مطابقة العمليات الرئيسية المسؤولة عن التطور الكيميائي الملاحظ على مستوى الطبقات المائية. يعود تخفيف العناصر الكيميائية وزيادة محتويات البوتاسيوم إلى نفاذية مياه المطر. تساهم المياه القذرة في زيادة المعدنة، تخضع مصفوفة الصخرة إلى الإنحلال طبقاً لمساهمة ثاني أكسيد الكربون المفسر لمعدنة المياه الجوفية. في هذه الدراسة. تم استعمال شبكات الخلايا العصبية الإصطناعية (ANN) لنقل التدفق و معدنة الينابيع. ولذلك يسمون بتحديد تأثير العوامل الفيزيائية الكيميائية و المناخية و خصوصاً الخصائص البنيوية الخاصة بالينابيع.

**Résumé :** Située au nord-est de l'Algérie, la partie centrale du massif de l'Edough est constituée essentiellement de gneiss et de migmatites à intercalations de marbres et d'amphibolites. L'altération superficielle de la roche mère (gneiss) a permis le développement d'un sol épais de près de 10 mètres, qui constitue un aquifère exploité pour l'alimentation en eau potable. La décharge naturelle de ce système hydrogéologique se réalise par un ensemble de sources qui se répartissent selon deux directions préférentielles d'orientation NE-SW et NW-SE. Ces dernières correspondent aux directions de deux familles de failles conjuguées. L'alimentation de l'aquifère est essentiellement due à l'infiltration des eaux de précipitation d'une valeur moyenne de 1040 mm/an (1978 à 2006). L'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux de l'aquifère du massif cristallophyllien de l'Edough est basée sur les résultats analytiques obtenus pour une série d'échantillons, de périodicité de 15 jours, réalisés entre Juin 2005 et Février 2006. Partant d'un traitement statistique, les principaux processus responsables de l'évolution chimique observée au niveau de l'aquifère ont été identifiés.

L'infiltration des eaux météoriques est responsable de la dilution des éléments chimiques et de l'augmentation des teneurs en potassium. L'apport des eaux usées est responsable de l'augmentation de la minéralisation, en particulier à proximité du village de Seraidi. La matrice rocheuse de l'aquifère est soumise selon l'apport du gaz carbonique à une dissolution qui explique une partie de la minéralisation des eaux souterraines. Dans cette étude, les réseaux de neurones artificiels ont été utilisés pour simuler les débits et la minéralisation des sources et d'appréhender par conséquent l'influence des facteurs physico-chimiques, climatiques et notamment des caractéristiques structurales sur le comportement des sources.

**Mots Clés :** milieu cristallin, réseau neurone artificiel, débits, minéralisation.

**Abstract :** The Edough massif is a metamorphic body in the northeast Algeria. It forms a gneissic dome surrounded by micaschistes with minor marble levels. It also contains some rare ultramafic rocks.

The gneiss weathering allows the settlement of thick soil that constitutes an aquifer exploited for the drinking water supply. The natural discharge of this hydrogeologic system is realized by a set of springs, which are distributed according to two main directions NE – SW and NW – SE. The supply of the aquifer is due to the rainfall infiltrations with an annual average of 1040 mm ( 1978 to 2006 mm). The study of the physico-chemical characteristics of the aquifer is based on the analytical results carried out on a series of samples for a periodicity of 15 days, realized between 2005 and 2006. On the basis of a statistical treatment, the main processes ruling the observed chemical evolution within the aquifer are defined. The infiltration of meteoric waters governs the dilution of the chemical elements and the increase of potassium contents. The waste water contributes to the increase of the mineralization. The rock matrix is submitted to dissolution according to the carbon dioxide contribution which explains the mineralization. In this survey artificial neurons networks (ANN) have been used to simulate the flows and the mineralization of the springs. Consequently they allow to define the effect of the physico-chemical and climatic factors and more particularly the structural one the behaviour of the springs.

**Key words :** crystalline medium, artificial neurons networks, flows, mineralization.

## 1. Introduction

Afin d'aider des planificateurs de l'eau pour acquérir la connaissance adéquate et comprendre les relations qui peuvent exister entre qualité et la quantité de l'eau, il y a un besoin d'utiliser une méthodologie adéquate pour définir les déterminants de la qualité des eaux souterraines influençant par là l'attraction des différents utilisateurs municipaux et ceux du domaine agricole.

Pendant la dernière décennie, le modèle des réseaux de neurones artificiels (ANN) a été appliqué avec succès à plusieurs processus hydrologiques, tels que le modèle pluie-débit (Minns et Hall, 1996), prévision de la pluie, modélisation de la demande en eau (Liu et al., 2003), modélisation de la qualité de l'eau (Rajurkar et al., 2004; Riad et al., 2004; Hani et al., 2006), modélisation des débits liquides (Coulibaly et al., 2000), problèmes des eaux souterraines (Lallahem et al., 2004) et problèmes dans le fonctionnement du réservoir (Coulibaly et al., 2000). Hornik et al. (1989) a montré que l'ANN pourrait être appliqué aux différents problèmes appliqués en génie civil. Maier et Dandy (2000) ont examiné dans leurs travaux des modèles du réseau neuronal pour la prévision des ressources en eau.

Une rétro-propagation de type « perceptron » multicouches (MLP) avec les fonctions de transfert en forme de S est la plus connue du réseau neuronal due à sa haute performance comparée aux autres réseaux (Lippmann, 1987; Riad et al., 2004).

Cet article introduit la rétro-propagation MLP et autres types de modèles ANN pour pouvoir établir des comparaisons. Ces types incluent la Fonction de la Base Radiale (RBF), régression générale des réseaux neuronaux (GRNN) et Linéaires.

Le massif de l'Edough renferme dans son sous sol un potentiel hydrique assez précieux surtout d'un point de vue qualitatif. Il est constitué par un réseau de sources utilisées essentiellement pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation. Cependant le développement de ce village et l'accroissement des besoins en eau peuvent provoquer la dégradation de la qualité de ses eaux qui constituent par ailleurs un des apports à la nappe des graviers.

Dans cette étude, nous essayerons d'identifier les facteurs responsables de la variation des débits des sources et d'analyser l'évolution des caractéristiques physico-chimiques des eaux et d'identifier les facteurs qui régissent ces variations.

## 2. Zone étudiée

L'Edough constitue un véritable îlot montagneux, entouré par la mer Méditerranée au Nord, la vallée de l'oued Kébir à l'Ouest, au Sud par la dépression du lac Fetzara et par la plaine de Annaba à l'Est. La masse principale de ce massif est allongée vers le nord-est avec une ligne de crête longue de 25 kilomètres qui débute du lac Fetzara, s'élève très rapidement à Koudiat El Roha avec 616 m, pour atteindre 1008 m au Kef Seba le point culminant de la région. Cette ligne redescend vers le village de Seraïdi (867 m) puis s'abaisse régulièrement jusqu'au Cap de Garde au Nord. Les deux versants du massif, ainsi identifiés, sont assez distincts :

- le versant Nord-Ouest est moins abrupt mais profondément entaillé par de nombreux ravins.
- le versant Sud-Est, est beaucoup plus raide avec une pente globale de 25%.

La région étudiée est caractérisée par un climat méditerranéen. La température moyenne annuelle est de 15°C. La région reçoit des précipitations abondantes dont le total moyen annuel est de 1040 mm mesuré à la station de Seraïdi (1978-2005). Les chutes de neige sont également fréquentes. D'une manière générale, la période d'alimentation (1<sup>ère</sup> phase d'échantillonnage) débute par une infiltration très courte correspondant aux dernières averses du mois de Juin, passe ensuite à une décrue, puis à un tarissement mobilisant les eaux de réserves.

Enfin, la période de recharge finale (2<sup>ème</sup> phase d'échantillonnage) se termine par un relèvement des courbes correspondant à la crue d'hiver (Majour, 1996). Le réseau hydrographique est très dense, bien hiérarchisé et encaissé. Il est de type dendritique. Les principaux oueds à écoulement pérenne sont: El Aneb, Boudjenane, El Ourida, Erbibba et Maïser. Le djebel Edough est un vaste anticlinal métamorphique constitué essentiellement par des gneiss ceinturés par des micaschistes (Hilly, 1962; Caby et Hammor, 1992; Ahmed-Said, 1993). Les gneiss occupent la partie centrale du massif et sont ocellés, feuilletés ou rubanés (Fig. 1 a-b).

La plupart sont à deux micas mais parfois seule la muscovite est représentée. Ils renferment outre la biotite, la muscovite, du quartz, des feldspaths alcalins (orthose, microcline) et des plagioclases (albite, oligoclase), de la tourmaline et du grenat près des zones de passage aux micaschistes. Les micaschistes sont plus abondants et occupent les zones périphériques du massif de l'Edough. Ils sont essentiellement formés de quartz, de biotite et de muscovite. Ils renferment également des minéraux de métamorphisme: grenat, staurotide, tourmaline, andalousite, disthène.

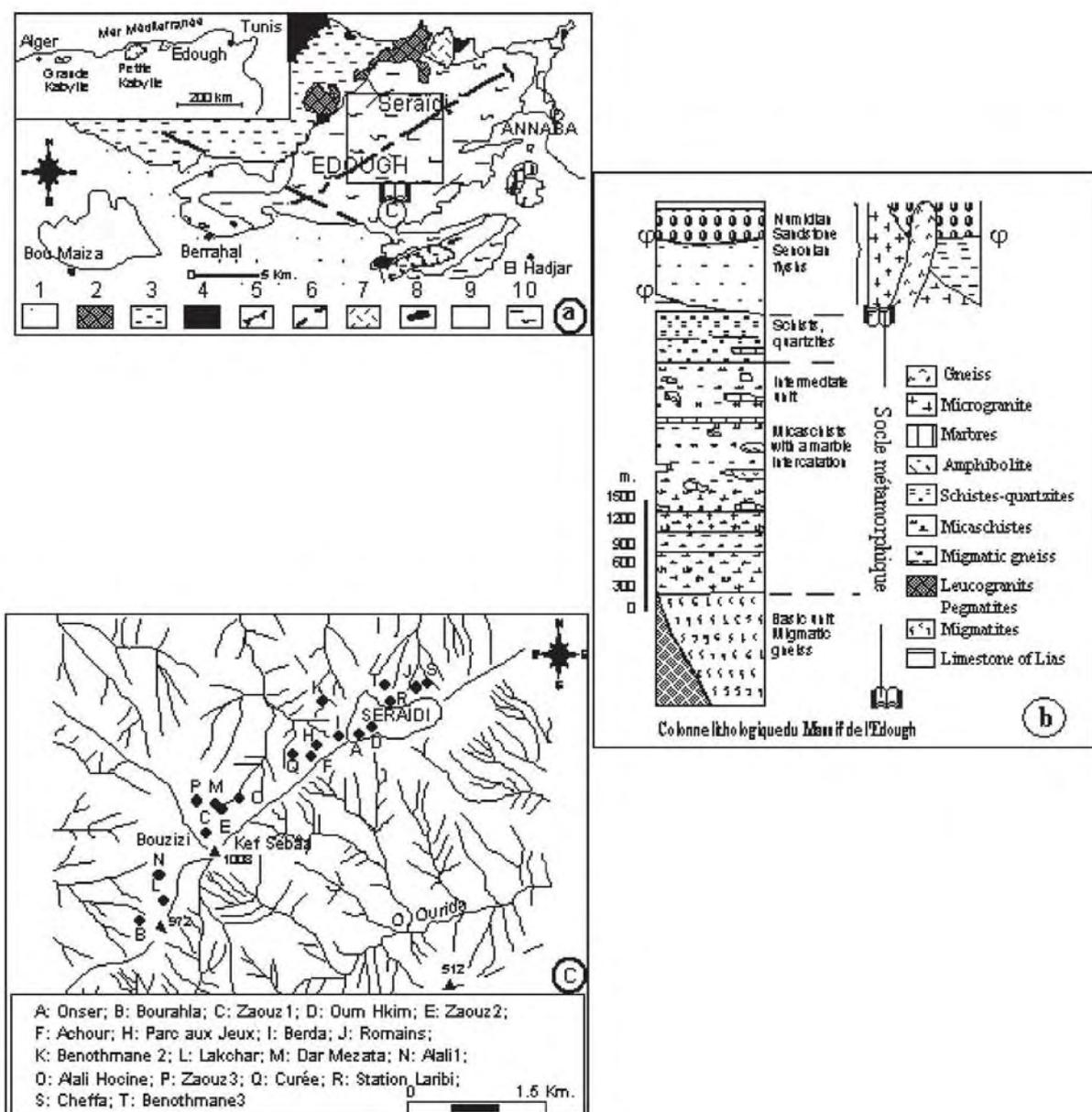


Fig. 1 Situation et description de la zone d'étude. (a) Cadre géologique (d'après Hilly, 1962; Hammor, 1992; modifiée). En cartouche, croquis de situation: 1: Quaternaire indifférencié; 2: roches éruptives miocènes; 3: flyschs allochtones; 4: couverture de type prékabyle; 5: contact anormal; 6: axe antiforme; 7: amphibolites; 8: calcaires métamorphiques; 9: micaschistes; 10: gneiss. (b) Colonne lithologique du massif dunaire (Hammor, 1992). (c) localisation des sources échantillonnées.

Dans le massif de l'Edough, la naissance des sources semble être liée à la tectonique cassante et l'altération superficielle du socle. Les accidents tectoniques connus jusqu'à ce jour dans le massif de l'Edough permettent de déceler deux familles d'accidents :

- Une première famille, dont l'orientation est Nord Ouest - Sud Est. La direction la plus fréquente de ces accidents varie de N 120° E à N 150° E.
- La seconde famille, qui semble être conjuguée à la première, est dirigée Nord Est- Sud Ouest.

Outre le système de failles conjuguées NW-SE et NE-SW, la phase tectonique est également responsable de la formation des fractures d'extension secondaires. L'altération superficielle de la roche mère (gneiss) permet le développement d'un sol épais pouvant atteindre par endroits huit mètres d'épaisseur (Gleizes et al., 1988). Ainsi, à proximité des fractures, nous constatons que la roche mère perd toute sa cohésion et devient friable, prenant une teinte blanchâtre. D'une manière générale, les sources du massif de l'Edough se répartissent selon deux directions préférentielles d'orientation NW-SE et NE-SW correspondant aux directions des deux de failles conjuguées. Dans le village de Seraïdi, la répartition des sources peut être liée à des zones d'altération du socle (Fig. 1c).

### 3. Matériels et méthode

Les données climatiques journalières ; précipitations (RAIN), évaporation (EVP) et température (TEMP) proviennent de la station de Seraïdi. Les jaugeages des sources du massif de l'Edough (CFLOW) ont été réalisés dans le cadre de la préparation d'un mémoire de Magistère (Majour, 1996). Dans cette étude, les réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été utilisés pour essayer d'obtenir une relation entre le débit de la source et les caractéristiques climatiques. Dans ces conditions le débit à la source peut s'exprimer de la manière suivante (Lallahem and Mania, 2002A) :

$$CFLOW = F[RAIN(t), RAIN(t-1), \dots, RAIN(t-k+1); EVP(t), EVP(t-1), \dots, EVP(t-k+1); RAIN(t), TEMP(t), TEMP(t-1), \dots, TEMP(t-k+1), X1FLOW(t), X1FLOW(t-1), \dots, X1FLOW(t-k+1), X2FLOW(t), X2FLOW(t-1), \dots, X2(t-k+1)] + e(t)$$

Où : t est un index du temps avec une valeur entière positive; TEMP(t), EVP(t), RAIN(t) représentent les vecteurs des paramètres d'entrée à un temps t; X1FLOW, X2FLOW, X3FLOW, X4FLOW, F[] est une fonction non linéaire qui sera estimée par le modèle ANN; e(t) est l'erreur de simulation qui devrait être la plus faible; k, nombre inconnu représentant le pas de temps; si k = 1, le débit calculé (CFLOW) à l'instant t = 0 dépend uniquement des

valeurs des paramètres à l'entrée du modèle à t = 0 autrement dit un lag-1, c'est-à-dire:

$$CFLOW = F[EVP(t), RAIN(t), TEMP(t), X1FLOW(t), X2FLOW(t)] + e(t)$$

où k est évalué par une procédure itérative jusqu'à l'obtention du plus petit écart possible entre les débits mesurés et ceux calculés en utilisant une seule couche cachée du modèle.

Par ailleurs, nous avons choisi d'utiliser 50% des données saisies pour l'apprentissage afin d'assurer une bonne représentativité de l'ensemble du tableau d'entrée, 25% pour la phase de validation et les 25% restants pour tester le modèle (Lallahem et Mania, 2002B). Ensuite pour vérifier la fiabilité des résultats du modèle, nous avons utilisé la notion de racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (Nash et Sutcliffe, 1970). Celle-ci peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{N}}$$

Où Q est le débit mesuré à l'exutoire;  $\hat{Q}$ , le débit calculé par le modèle et N, le nombre total de mesures.

L'évolution des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du massif de l'Edough est basée sur les résultats analytiques obtenus sur une série d'échantillons de périodicité de 15 jours à 1 mois. Chacune des 19 sources répertoriées a été ainsi échantillonnée 23 fois.

Afin d'étudier les mécanismes qui commandent l'évolution spatiale et temporelle de la qualité des eaux du réservoir cristallin de l'Edough, les données ont été traitées par l'analyse en composantes principales (ACP). La démarche adoptée consiste à établir une ACP pour chaque campagne d'échantillonnage (évolution dans l'espace) et une ACP pour chaque source (évolution temporelle).

## 4. Résultats

### 4.1 Simulation des débits des sources

Les résultats obtenus montrent une parfaite superposition des courbes des débits mesurés et calculés lors des phases d'apprentissage, de validation et de test.

Ils montrent également des écarts minimums avec des valeurs de RMSE très faibles. L'introduction des paramètres climatiques (température, précipitations et évaporation) permet donc d'obtenir une bonne reconstitution des débits des deux sources étudiées (Fig. 2). Par conséquent, nous pouvons utiliser cette démarche pour décomposer les hydrogrammes des sources ou pour valider des hypothèses de travail.

D'une manière générale, la période d'étude débute par une infiltration très courte correspondant aux dernières averses du mois de Juin, passe ensuite à une décrue, puis à un tarissement mobilisant les eaux

de réserves. Enfin, la période d'échantillonnage correspond au relèvement des courbes lié à la crue d'hiver.

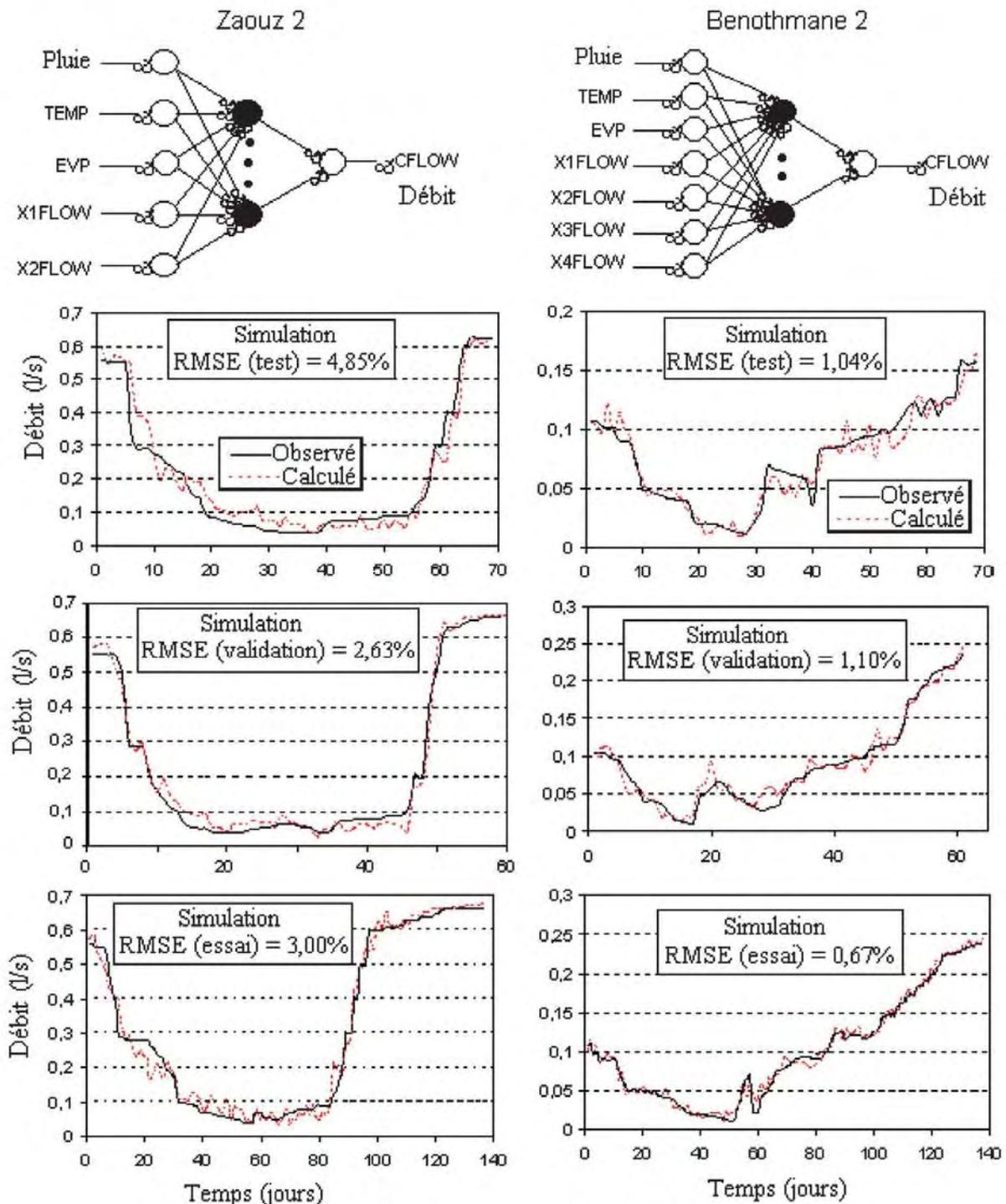


Fig. 2 Comparaison entre les débits mesurés et calculés dans les sources Zaouz 2 et Benothmane 2.

#### 4.2 Evolution physico-chimique des eaux

Les résultats obtenus montrent que la conductivité présente un ensemble de valeurs comprises entre 260 et 2127  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ; les valeurs minimales correspondent à des mesures obtenues sur les eaux de la source de Bourahla en période de crue d'hiver alors que les sources de Curée et des Romains, situées dans le village de Seraïdi, enregistrent les valeurs maximales pendant la période d'été. L'étude des corrélations montre que la conductivité est surtout contrôlée par les bicarbonates, le calcium, les chlorures, le sodium et le magnésium et à une moindre échelle par les sulfates et les nitrates. Les températures sont assez homogènes pour l'ensemble des sources. Le degré de variation d'une source à une autre est assez faible avec cependant un écart global qui distingue la période hivernale, avec un minimum de 9°C, et la période d'été avec un maximum de 19°C. La valeur du pH varie entre 5,5 et 7,8 ce qui indique une eau acide puis équilibrée et enfin légèrement basique.

A partir des données analytiques ont été évalués les coefficients de corrélation entre les débits et les éléments physico-chimiques pour chaque source pour illustrer ainsi l'évolution physico-chimique des eaux dans l'aquifère (Tableau 1). Les meilleures corrélations « r » sont celles qui lient le potassium au débit à la source de Dar-Mezata et Zaouz3 avec respectivement  $r = 0,931$  et  $0,921$ ,  $r = 0,846$  pour le

débit et la température à Ben-Othmane 2 et  $r = 0,828$  pour le couple débit-sulfate à la source Dar-Mezata (Hani et al., 2002).

Lorsque les corrélations sont inverses, cela signifie que les valeurs des éléments mesurés diminuent quand le débit augmente. C'est le cas des chlorures, des bicarbonates, des nitrates (sauf en cas de pollution), du calcium, du magnésium, de la conductivité et des températures. Tous ces éléments évoluent comme s'ils avaient une origine endogène puisque les teneurs les plus fortes sont observées pendant les décrues et le tarissement et le plus faible en périodes pluvieuses. Le cas inverse a été observé pour les sulfates, le potassium et le pH qui évoluent comme le débit. Graphiquement, à une augmentation de débit correspond des valeurs fortes en sulfates, en potassium, et un pH fort et inversement lors d'une diminution de débit.

Afin d'étudier les mécanismes qui commandent l'évolution spatiale et temporelle de la qualité des eaux du réservoir cristallin de l'Edough, les données ont été traitées statistiquement par l'Analyse en Composantes Principales (ACP). La démarche adoptée consiste à établir une ACP pour chaque campagne d'échantillonnage (évolution dans l'espace) et une ACP pour chaque source (évolution temporelle).

Tableau 1. Matrice de corrélation débit - éléments physico-chimiques.

	Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K	CE	T	pH
A	-0,266	-0,102	-0,285	0,510*	0,189	-0,030	-0,426	-0,146	0,093	0,141	0,161
B	0,251	-0,292	-0,091	-0,363	-0,073	-0,224	0,086	0,604*	-0,057	-0,066	0,076
C	0,139	-0,173	0,082	-0,068	0,176	-0,252	0,019	0,759*	-0,321	-0,237	0,322
D	-0,502*	-0,545*	-0,094	-0,042	-0,488*	-0,172	-0,561*	-0,248	-0,323	0,179	-0,086
E	-0,199	-0,625*	-0,398	-0,510*	-0,534*	-0,464*	-0,712*	0,647*	-0,497*	-0,488*	-0,244
F	0,124	-0,191	-0,091	0,323	-0,430	-0,156	-0,427	0,216	-0,595*	-0,059	-0,030
G	-0,753*	-0,409	0,192	0,209	-0,599*	-0,692*	-0,242	0,053	-0,539*	-0,336	-0,006
H	0,166	-0,330	-0,206	-0,019	0,041	-0,020	-0,626*	0,504*	-0,188	-0,136	0,366
I	-0,451*	-0,581*	-0,174	0,173	-0,381	-0,444	-0,032	-0,472*	-0,163	-0,146	-0,041
J	-0,611*	-0,534*	0,241	0,077	-0,722*	0,243	-0,770*	0,663*	0,271	-0,846*	0,438
K	0,035	-0,574*	0,582*	-0,616*	-0,357	-0,040	-0,254	-0,246	-0,341	0,322	-0,153
L	-0,711*	-0,419	0,828*	-0,358	-0,158	-0,397	-0,559*	0,931*	-0,268	-0,324	0,318
M	-0,250	-0,489*	-0,157	-0,525*	-0,558*	-0,236	-0,607*	0,674*	-0,609*	-0,690*	0,480
N	-0,423	-0,758*	-0,234	0,372	-0,318	-0,031	0,054	0,395	-0,416	-0,620*	-0,361
O	-0,258	-0,364	0,425	-0,556*	-0,134	-0,182	-0,509*	0,921*	-0,222	-0,380	0,364
P	-0,319	0,077	0,166	0,121	-0,330	-0,387	-0,411	-0,133	-0,684*	-0,336	0,046
Q	-0,273	-0,026	0,087	-0,182	-0,655*	-0,514*	-0,517*	0,355	-0,210	-0,237	0,049
R	-0,233	-0,183	0,346	0,275	-0,286	-0,038	0,097	0,269	-0,076	-0,450*	0,075
S	-0,206	0,001	0,167	0,250	-0,683*	-0,487*	0,366	0,307	-0,071	0,417	0,027

A : Onser ; B : Bourahla ; C : Zaouz 1 ; D : Oum Hkim ; E : Zaouz 2 ; F : Achour ; H : Parc aux jeux ; I : Berda ; J : Romains ; K : Benothmane2 ; L : Lakchar ; M : Dar Mezata ; N : Alali 1 ; O : Alali Hocine ; P : Zaouz 3 ; Q : Curée ; R : Station Laribi ; S : Cheffa ; T : Benothmane 3 ; \* : coefficients significatifs différents de 0 au seuil de 0,05 reconnus à partir d'un test bilatéral de Student.

### 4.3 Evolution spatiale de la qualité des eaux

Pour les différentes campagnes d'analyse, on obtient des diagrammes factoriels qui montrent que (Fig. 3a-c) :

- Un important nuage de points correspond à la minéralisation naturelle par altération du réservoir

(hydrolyse des silicates essentiellement) (Fritz, 1975; Travi et Mudry, 1997). Cette famille est bien représentée sur l'axe 1 (axe réservoir) de presque toutes les campagnes ;

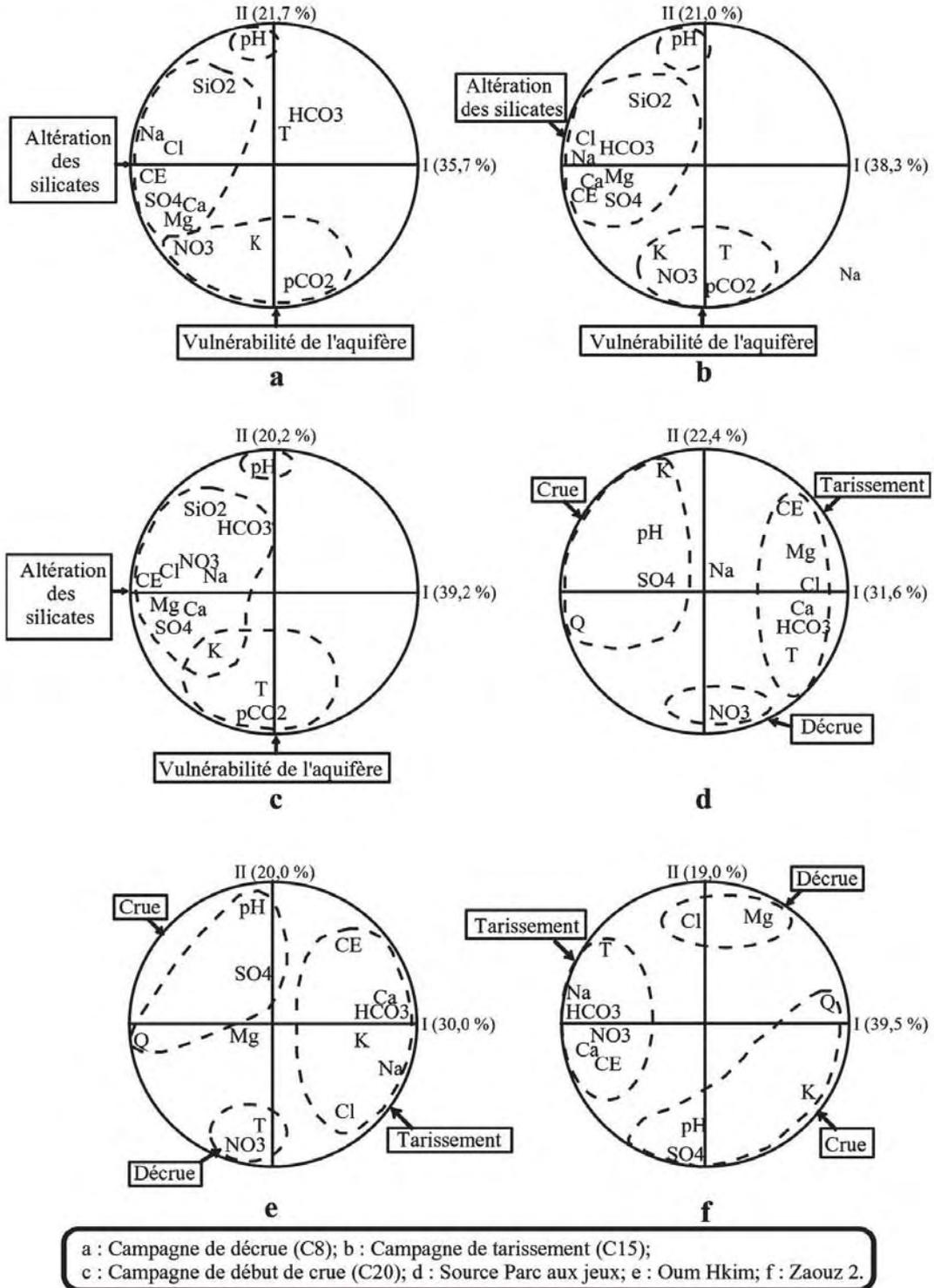


Fig. 3 Analyse en composantes Principales : évolution saisonnière des processus responsables de la qualité des eaux.

• Des points isolés, liés surtout aux équilibres des eaux, se traduisent par l'opposition entre le pH associé souvent aux  $\text{SiO}_2$  et  $\text{HCO}_3$  (abscisse positive sur l'axe 2) et la  $\text{pCO}_2$  avec la température et le potassium (abscisse négative sur l'axe 2). Dans le cas du réservoir cristallophyllien de l'Edough, caractérisé par une faible profondeur de 8 m environ (résultat du forage), la sensibilité de la nappe aux variations thermiques est un bon indicateur du temps de transfert des eaux d'infiltration. On peut donc considérer que l'axe 2 caractérise la vulnérabilité de la nappe sans négliger pourtant l'hétérothermie annuelle du sous-sol quand la nappe est profonde.

#### 4.4 Evolution saisonnière de la qualité des eaux

Nous présentons quelques exemples de résultats de l'ACP appliquée à l'ensemble des sources (Fig. 3d-f). D'une manière générale, on peut distinguer trois groupes de points : l'un formé par la conductivité électrique, les bicarbonates, le calcium, les chlorures, le sodium et la température correspondant à la période de tarissement le second par le potassium et le pH représentant la crue.

Les sulfates peuvent être présents beaucoup plus dans le premier que dans le second groupe.

L'axe 1 est donc apte à discriminer les points où les facteurs climatiques provoquent d'une part une hausse sensible de la minéralisation par altération des silicates et d'autre part la dilution des éléments chimiques et l'augmentation des teneurs en potassium. Le troisième groupe est représenté essentiellement par les nitrates dont les teneurs sont relativement plus élevées en période de décrue.

### 5. Discussion

#### 5.1 Altération des silicates plus importante en tarissement qu'en période de crue

L'ensemble des éléments de la minéralisation, Ca,  $\text{HCO}_3$ , Cl,  $\text{NO}_3$ , Mg, Na,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  et conductivité électrique, révèle un comportement identique au cours du temps. Leurs courbes de variation ont des allures comparables. La baisse des débits est suivie par une augmentation des éléments de la minéralisation suite à l'altération des silicates plus importante en période d'étiage qu'en période de crue (Fig. 4).

On doit admettre que l'écoulement d'étiage, incluant essentiellement le drainage de la matrice s'est effectué avec une infiltration plus riche en  $\text{CO}_2$  suite à une augmentation de la température (Appelo et Postma, 1993) que celles des eaux d'hiver, par exemple lors des petites crues du fin de printemps et de début d'été. L'étude des indices de saturation (S.I.) des eaux par rapport aux principaux minéraux, calculés avec le programme WATEQF (Plummer et al. 1976), montre que les concentrations des principaux éléments sont essentiellement sous le contrôle de l'équilibre avec le quartz (SIQuartz), la calcédoine (SICalc), la silice amorphe (SIGel), la silice vitreuse (SIGlas) et à un degré moindre de la calcite, de l'anhydrite, de l'aragonite et de la dolomite.

L'évolution chimique des eaux étudiées sur la base des calculs thermodynamiques, met en évidence une augmentation très significative de la minéralisation en période de tarissement traduisant en cela la tendance des eaux à s'équilibrer par rapport à ces minéraux en présence de gaz carbonique (Figs. 4 et 5).

Les valeurs de la  $\text{pCO}_2$  sont en moyenne plus élevées en été qu'en hiver. Cette dernière période est caractérisée par une diminution des teneurs qui chutent énormément après une dilution favorisée par l'arrivée des eaux météoriques et qui participent à l'augmentation des débits et une augmentation des teneurs en potassium issues de l'hydrolyse des feldspaths, des feldspathoïdes (leucite) et des micas (muscovite).

#### 5.2 Caractérisation du facteur «vulnérabilité»

L'opposition entre débit, pH, potassium et température semble rendre compte des conditions du milieu et de leur influence sur les variations thermiques des eaux des émergences, sachant que la sensibilité des eaux souterraines aux variations thermiques est un bon indicateur du temps de transfert des eaux d'infiltration. Le tableau 2 mentionne les sources dont les analyses participent au mieux à cette opposition. La source Alali 1 caractérise cette opposition avec des coefficients de corrélation assez significatifs entre la température et le débit d'une part ( $r = -0.69$ ) et entre la température et le pH d'autre part ( $r = -0.783$ ).

Tableau 2. Coefficients de corrélation entre température-pH et température-débit.

Point d'eau	Alali 1	Benothmane 2	Alali Hocine	Romains	P/ jeux	S/ Laribi	Onser
T-pH	-0.783	-0.337	-0.004	-0.690	-0.577	-0.647	-0.636
T-Q	-0.690	-0.846	-0.620	-0.146	-0.336	-0.237	-0.141

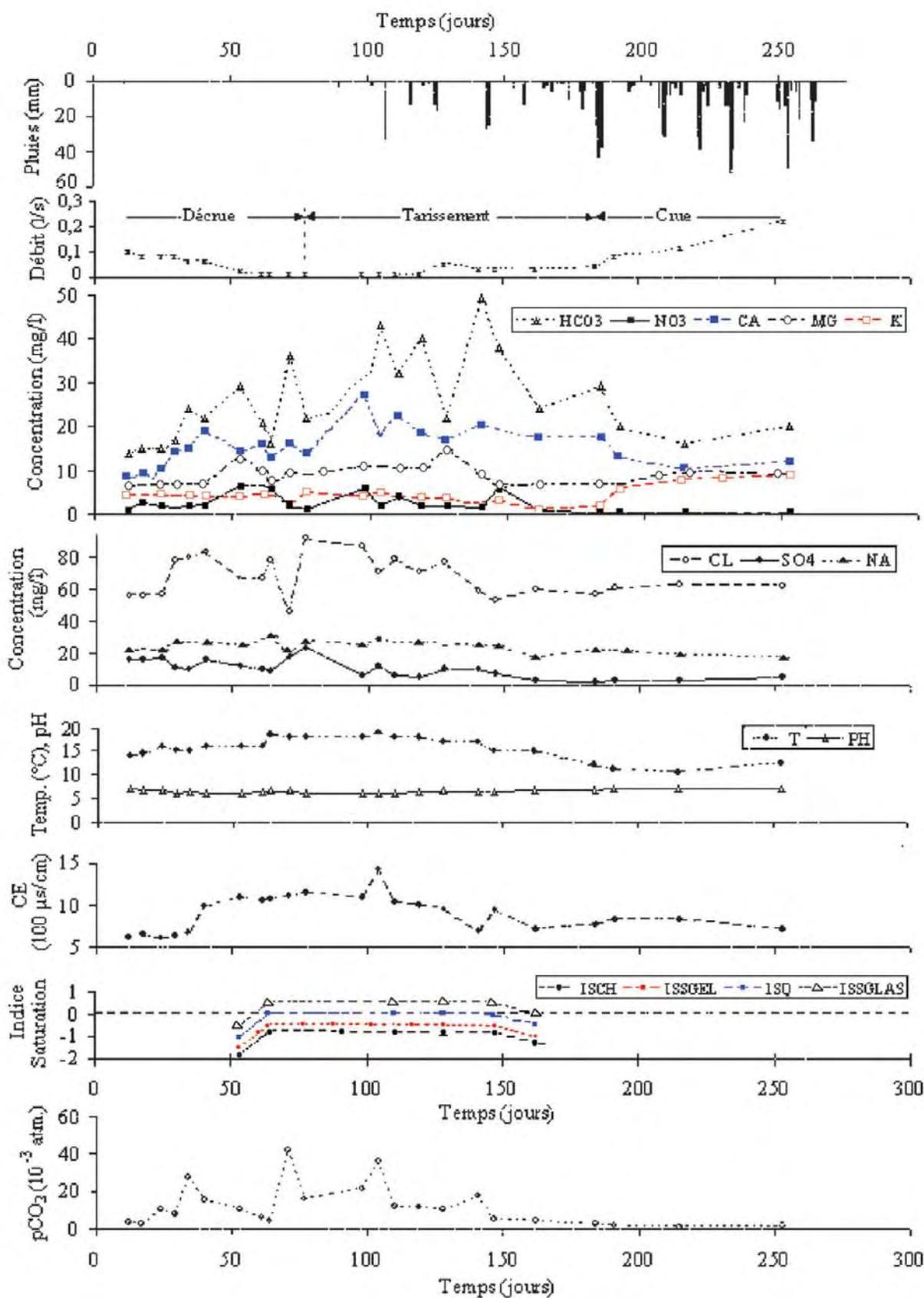


Fig. 4 Courbes d'évolution des différents éléments physico-chimiques « source Alali 1 ».

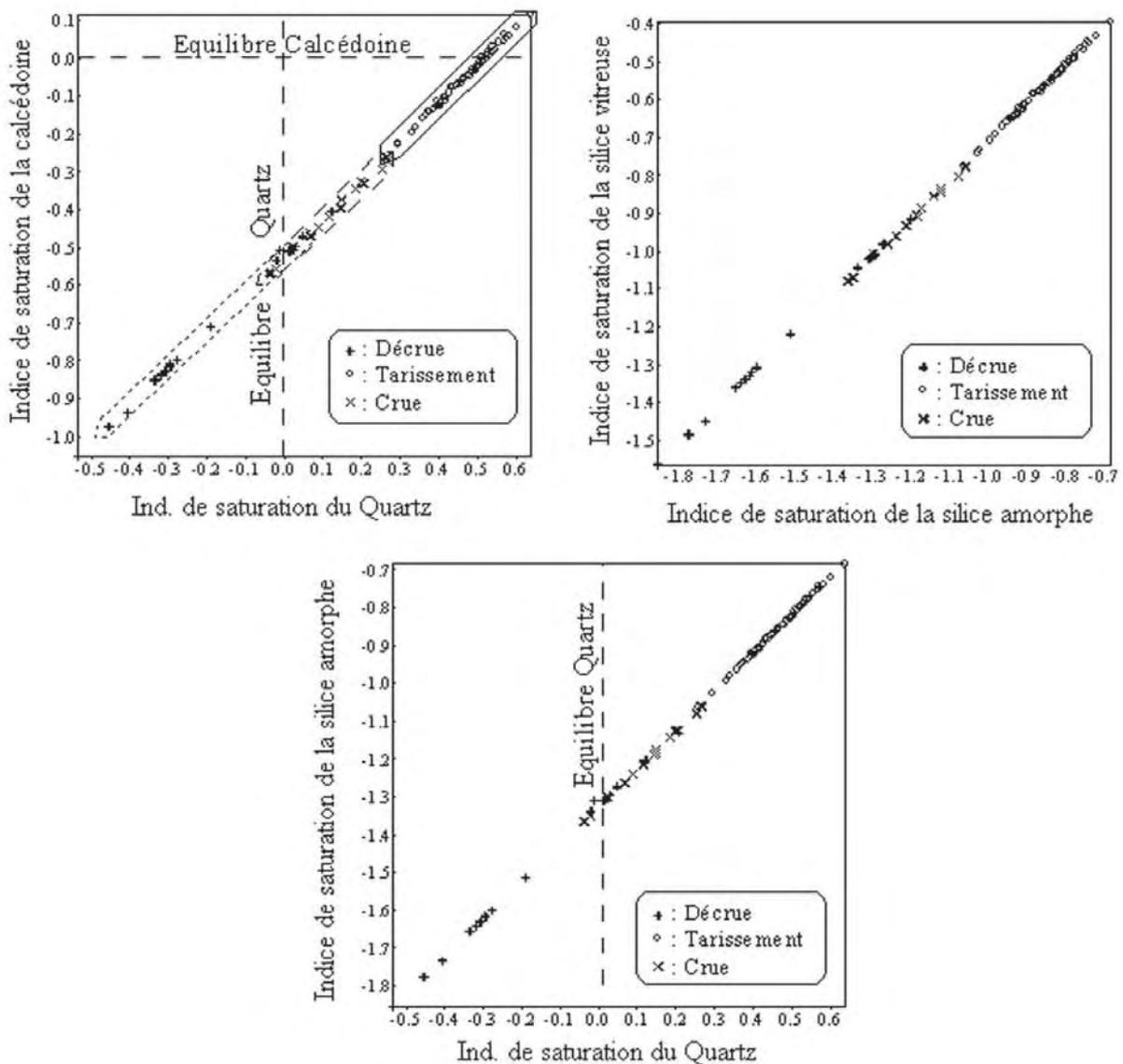


Fig. 5 Relations entre les indices de saturation.

Les profils de la figure 4 traduisent ces constatations; ils montrent une évolution inverse entre le débit et la température au cours de la période d'observation. La décrue et le tariissement sont caractérisés par une quasi-stabilisation avec toutefois, des valeurs plus faibles pendant la décrue qu'en tariissement. Ce dernier est marqué par une mise en équilibre des eaux avec l'encaissant. La température d'équilibre semble atteinte dans l'intervalle 18-19°C. Cet équilibre coïncide avec une augmentation des concentrations des éléments issus de l'altération des silicates et une diminution des éléments liés au réservoir ou d'origine externe (cas du potassium et des sulfates). La période hivernale est marquée par l'arrivée dans le réservoir des eaux d'infiltration qui abaissent la température des eaux de l'aquifère.

## 6. Conclusion

L'altération superficielle de la roche mère permet le développement d'un sol épais qui constitue la principale ressource en eau pour l'alimentation des populations locales et qu'il convient de protéger et de comprendre le fonctionnement. Le traitement par ACP des données chimiques observées pendant une période de huit mois sur une vingtaine de source du massif de l'Edough met en évidence deux principaux processus responsables de la qualité des eaux des sources et de leur évolution dans le temps. Le premier est l'hydrolyse des silicates responsables de l'augmentation de la minéralisation en période de tariissement (Fig. 6).

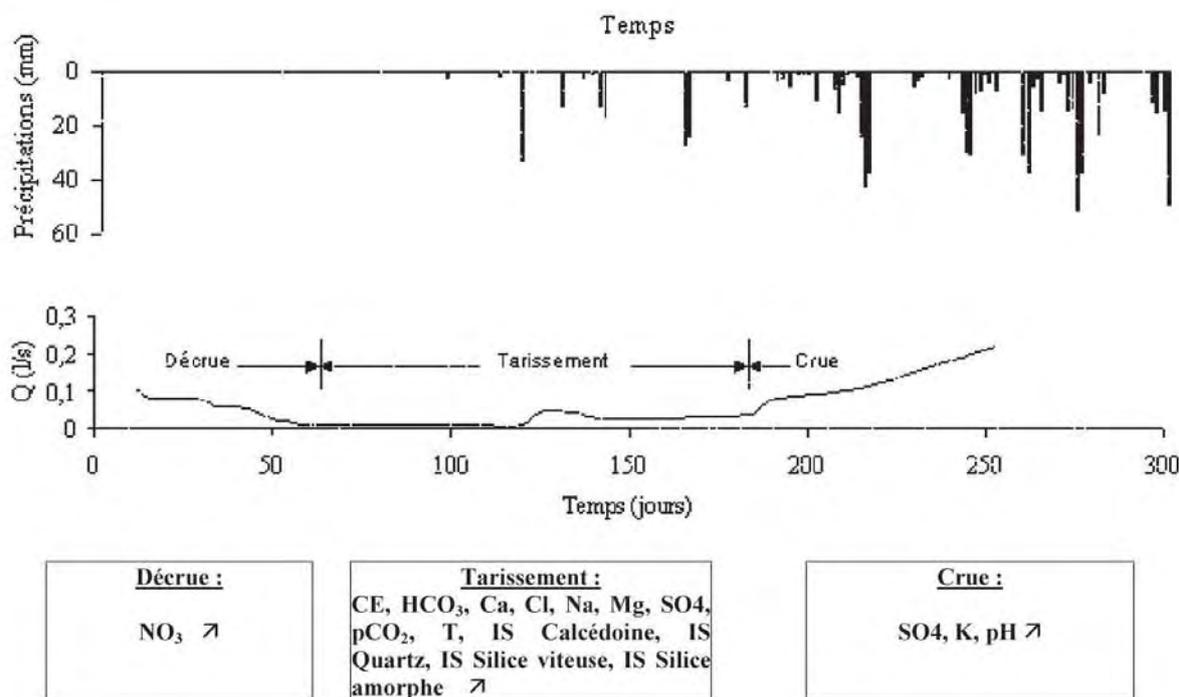


Fig. 6 Evolution saisonnière de la minéralisation dans les sources de l'Edough.

L'étude des indices de saturation des eaux par rapport aux principaux minéraux montre que les concentrations des principaux éléments sont essentiellement sous le contrôle de l'équilibre avec le quartz, la calcédoine, la silice amorphe et la silice vitreuse. Les analyses thermodynamiques montrent une tendance des eaux à s'équilibrer par rapport à ces minéraux en présence de gaz carbonique plus important en tariissement que lors des autres périodes de l'année.

Le second processus, lié surtout à la vulnérabilité de la nappe et sa sensibilité aux variations thermiques, constitue un bon indicateur du temps de transfert des eaux d'infiltration. Les données utilisées dans cette étude montrent que les eaux des sources du massif de l'Edough sont d'excellente qualité chimique mais l'accroissement des terres cultivées et le développement des agglomérations limitrophes pourraient, dans un proche avenir, influencer négativement la qualité des eaux. Il serait donc intéressant d'utiliser ces méthodes très simples pour détecter d'éventuelles pollutions de surface.

Par ailleurs, le passage de la décrue au tariissement est marqué, pour la majorité des sources, par une baisse des teneurs en nitrates et par une augmentation des éléments de la minéralisation suite à l'altération des silicates plus importante en période d'été. L'hiver est caractérisé par une diminution des teneurs qui chutent énormément après une dilution favorisée par l'arrivée des eaux météoriques qui participent à l'augmentation des débits et une augmentation des teneurs en potassium.

## Références Bibliographiques

- Ahmed-Said Y. 1993 : The Edough leptynites, Annaba, NE Algeria, are they good indicators to the origin of the biotite gneisses?. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie, volume 4, n°2 pp. 99-107.*
- Appelo C.A.J., Postma D. 1993 : *Geochemistry, groundwater and pollution.* – Ed. A. A. Balkema, Rotterdam, 536 p.
- Caby R., Hammor D. 1992 : Le massif cristallin de l'Edough (Algérie) : un "Metamorphic Core complex" d'âge miocène dans les Maghrébides. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Mécanique, physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre, 314 (08) 829-835.*
- Coulibaly, P., Anctil, F., Bobée, B. 2000 : Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. *J. Hydrol.* 230: 244-257.
- Fritz B. 1975 : Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géométrie des altérations et des eaux continentales. *Mém. Sci. Géol. N°41, 148 p.*
- Gleizes G., Bouloton J., Bossière G., Collomb P. 1988 : Données lithologiques et pétro-structurales nouvelles sur le massif cristallophyllien de l'Edough (Est-Algérien). *C. R. Acad. Sci. Paris, t. 306, Série II, p. 1001-1008, 1988.*

- Hani A., Djabri L., Mania J., Majour H. 2002 : Evolution des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du massif cristallophylien de l'Edough (Annaba, Algérie). 19<sup>ème</sup> colloque de géologie africaine, El Jadida (Maroc), pp. 100.
- Hani, A., Lallahem, S., Mania, J., Djabri, L. 2006 : On the use of finite-difference and Neural network models to evaluate the impact of underground water overexploitation. *Hydrol. Process.* 20 : 4381-4390.
- Hilly J. 1962 : Etude géologique du massif de l'Edough et du Cap de Fer (Est constantinois). Bull. n°19 carte géologique Algérie, Alger, 339p.
- Hornik, K., Stinchcombe, L., White, H. 1989 : Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Netw.* 2: 359-366.
- Lallahem, S., Mania, J. 2003a : A nonlinear Rainfall-Runoff Model using Neural Network Technique: Example in Fractured Porous Media. *Math. And Comp. Model.* 37: 1047-1061.
- Lallahem, S., Mania, J. 2003b : Evaluation and forecasting of daily groundwater outflow in a small chalky watershed. *Hydrol. Process.* 17: 1561-1577.
- Lallahem, S. Mania, J., Hani, A., Najjar, Y. 2004 : On the use of neural networks to evaluate groundwater levels in fractured media. *J. hydrol.* 28: 738-744.
- Liu, J., Savenije, H.H.G., Xu, J. 2003 : Forecast of water demand in Weinan City in China using WDF-ANN model. *Phys. and Chemist. of the Earth* 28: 219-224.
- Lippmann, RP. 1987 : An introduction to computing with neural nets. *IEEE ASSP Magazine* April: 4-22.
- Maier, H.R., Dandy, G.C. 2000 : Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications. *Environ. Model. & softw.* 15: 101-124.
- Majour H. 1996 : Utilisation de l'analyse statistique pour l'étude du fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique du réservoir cristallin de l'Edough (Nord Est Algérien). Mém. de magistère, Université de Annaba, 112 p.
- Minns, A.W., Hall, M.J. 1996 : Artificial Neural Networks as rainfall-runoff models. *Hydrol. Sci.* 41 (3): 399-417.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970 : River flow forecasting through conceptual models. Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrology*, 10: 282-290.
- Plummer N.L., Jones B.F., Truesdell A.H. 1976 : (revised 1978, 1984) – WATEQF, a FORTRAN IV version of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibria of natural waters. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations paper 76-13.
- Rajurkar, M.P., Kothiyari, U.C., Chaude U.C. 2004 : Modeling of the daily rainfall runoff relationship with artificial neural network. *J. Hydrol.* 285: 96-113.
- Riad, S., Mania, J., Bouchaou, L., Najjar, Y. 2004 : Predicting catchment flow in a semi-arid region via an artificial neural network technique. *Hydrol. Process.* 18: 2387-2393.
- Travi Y., Mudry J. 1997 : Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest. *Hydrogéologie*, n°1, pp. 13-21.
-